

Триньов Олександр Володимирович – канд. техн. наук, доцент, професор кафедри двигунів внутрішнього згоряння Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, <https://orcid.org/0000-0002-0344-8332>, e-mail: trinaleksandr427@gmail.com.

Сівих Дмитро Георгійович – канд. техн. наук, доцент, завідувач 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.

Сергієнко Антон Миколайович – канд. техн. наук, доцент кафедри електричного транспорту та тепловозобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0001-6067-1672>, e-mail: sergienko2707@gmail.com

AUTOMATION OF MEASUREMENTS OF ENGINE HEAT CONSUMPTION IN THE LUBRICATION AND COOLING SYSTEMS

O. V. Trynov, D. G. Sivykh, A. M. Sergienko

The paper presents the results of an intermediate stage of the study of heat transfer processes in high-speed diesel engines of the automotive tractor type at transient load discharge-load-injection modes, which are characteristic of this type of diesel engines. In such modes, as evidenced by the results of calculations of the thermal stress state of combustion chamber parts, in particular pistons, exhaust valves of the gas distribution mechanism, significant tensile and compressive stresses are observed compared to operation at steady-state conditions.

This is the reason for the occurrence of defects in the form of cracks on the heat exchange surfaces of these parts, which limits the service life of automotive tractor engines. For a more detailed study of transient processes, as the main approach, it is proposed to use the well-known method of heat balance tests of a high-speed diesel engine, but with the involvement of automated processing of measurement results in digital form at steady-state and transient modes. It is proposed to focus on heat consumption, which is a component of the heat balance in the lubrication and cooling system. Without the use of automated information processing directly at the time of transient load shedding and load shedding, it is impossible to obtain such information on cooling and lubrication systems. Recording of transient heat transfer processes makes it possible to track the influence of engine operating parameters, the dynamics of the transient process depending on its duration, the initial and final steady-state modes between which the transition is being studied. In general, this way, it is possible to assess the adaptability of cooling and lubrication systems to heat dissipation during sudden changes in load, to avoid, or at least limit, the growth of thermal stresses. The publication presents a possible variant of the schematic solution of such a system for automated processing of the results of heat balance tests with the maximum use of equipment that is mass-produced and has already been used previously in heat balance tests.

Key words: motor-tractor diesel engine; heat balance tests; automation of information processing in steady-state and transient modes

УДК 621.433

DOI: 10.20998/0419-8719.2024.2.08

Д.І. Іванов, С.Ю. Білик

ПЕРЕВАГИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ДЛЯ СТАЦІОНАРНИХ ГАЗОВИХ ДВИГУНІВ

На даний момент у світі відсутня масова альтернатива енергетичним установкам основу яких складають двигуни внутрішнього згоряння. Такі енергетичні установки на цей час повністю освоєні у виробництві, вони – мобільні, не громіздкі, не залежать від погодних умов (наявність вітру і течії, як цього вимагають вітрові та гідроелектростанції). Різноманітність та доступність палива також є дуже великою перевагою використання двигунів внутрішнього згоряння. З іншого боку, двигуни є джерелом тепла, шуму та хімічного забруднення, а працюючи на вичерпних видах палива, вони сприяють негативним кліматичним змінам на планеті, тому питання підвищення паливної, економічної та екологічної ефективності в експлуатації двигунів на транспортних засобах є актуальним. З швидким розвитком інформаційних технологій в наш час є можливість створити досконалу систему керування стаціонарними двигунами, використовуючи технологію цифрових двійників, яка в майбутньому змогла б взяти на себе повністю задачу керування установкою з мінімальним втручанням людини, виключивши ефект людського фактору і тим самим збільшити ресурс та ефективність використання силового агрегату. Завдання полягає в тому, щоб за допомогою системи прогнозування оцінити реальний технічний стан двигуна і на основі одержаних даних встановити оптимальні терміни технічного обслуговування, а також запобігти можливим аваріям, які тягнуть за собою дорогі ремонт, або навіть повну заміну агрегату. Така система була б актуальною для великих, вартісних стаціонарних машин, задіяних в будь-яких технологічних процесах, де простий агрегат тягне за собою фінансові втрати, пов'язані з припиненням того чи іншого виробничого процесу. Представниками цього типу електростанцій є газові двигуни – приводи для дотискувальних або свердловинних газових компресорів, газогенераторів, що працюють на звалищному газі або біогазі.

Ключові слова: газовий двигун; цифровий двійник; терміни обслуговування; ресурс; предиктивна модель, енергетична установка, експлуатація

Вступ

На сьогодні у світі в експлуатації перебуває величезна кількість стаціонарних і транспортних енергетичних установок, в основі яких закладено двигун внутрішнього згоряння.

Відомо, що сумарна потужність ДВЗ, що знаходяться в експлуатації, у п'ять разів перевищує потужність всіх стаціонарних електростанцій світу, порівняно з двигунами інших типів, з енергетичними установками електричних силових установок електромобілів, гібридів, двигунів, що працюють на водні, та інших альтернативних видах палива. Використання ДВЗ залишається майже безальтернативним, як станом на тепер, так і в оглядному майбутньому.

Стирання кордонів між цифровим світом і фізичними продуктами призвело до появи такого поняття як четверта промислова революція, або Індустрія 4.0. В основі цієї революції знаходяться розумні технологічні програми, такі як глобальне підключення, великі дані, машинне навчання та віртуальна реальність. Технологія Digital Twin (Цифровий двійник) поєднує ці додатки та стала ключовим компонентом Індустрії 4.0 [2-8].

Ця технологія відкриває значні можливості для авіаційного, енергетичного, та транспортного сектору, особливо маючи в своєму програмному забезпеченні предиктивну математичну модель, що дає змогу прогнозування технічного стану агрегату. Цифровий світ дуже швидко заповнив нашу буденність і продовжує розвиватись великими темпами, тому зовсім не виключено що технологія цифрових двійників дозволить перекласти задачу керування тими чи іншими машинами та процесами на штучний інтелект [6].

Актуальність проблеми що розглядається

З моменту створення технології цифрових двійників, а саме з 2002 року по сьогоднішній час вже є компанії які активно використовують та розвивають її у своїх продуктах. Rolls-Royce застосовує технологію цифрових двійників для обслуговування своїх газотурбінних двигунів. ABB розробила платформу "Ability Digital Powertrain", яка використовує технологію цифрових двійників для обслуговування теплових та електродвигунів. Siemens також використовує цю технологію для обслуговування теплових двигунів. Їх рішення, відоме як "Sinalytics", надає дані в реальному часі про стан і продуктивність двигуна, а також рекомендації з оптимізації роботи. Очевидно що така технологія в першу чергу затребувана для потужних дорожніх агрегатів до яких в тому числі належать стаціонарні газові двигуни у складі генераторних блоків, станцій дожиму приро-

дного газу, тощо. Для таких установок є дуже актуальним питання їх надійної та безперебійної роботи, зменшення часу та витрат на технічне обслуговування, можливість прогнозування технічного стану [9].

Викладення основного матеріалу

Цифровий двійник (Digital Twin) — програмний аналог фізичного пристрою, що моделює внутрішні процеси, технічні характеристики та поведінку реального об'єкта в умовах впливу навколишнього середовища. Важливою особливістю цифрового двійника є те, що завдання на нього вхідних впливів використовується інформація з датчиків реального пристрою, що працює паралельно [8]. Далі можливе проведення порівняння інформації віртуальних датчиків цифрового двійника з датчиками реального пристрою, виявлення аномалій та причин їх виникнення.

На сьогоднішній день в експлуатації знаходиться велика кількість установок які мають у своєму складі стаціонарний газовий двигун внутрішнього згоряння. Основна маса таких установок припадає на генератори та установки для дожиму та перекачування природного газу, при цьому якщо генераторні установки можуть бути не задіяні у безперервній роботі, а наприклад стояти в аварійному резерві, то ДВЗ які є приводом для газових компресорів задіяні у безперервній роботі і не регламентований простій цих агрегатів негативно впливає на технологію у якій він задіяний.

На рис.1 показано приклад області використання газових двигунів від виробника Waukesha в нафтогазовій промисловості [10]. Тут ми можемо бачити що на одному лише підприємстві з добування та (або) підготовки природного газу ДВЗ може використовуватись як привід для газових компресорів, генераторів у складі енергетичних станцій, привід для іншого механічного обладнання.

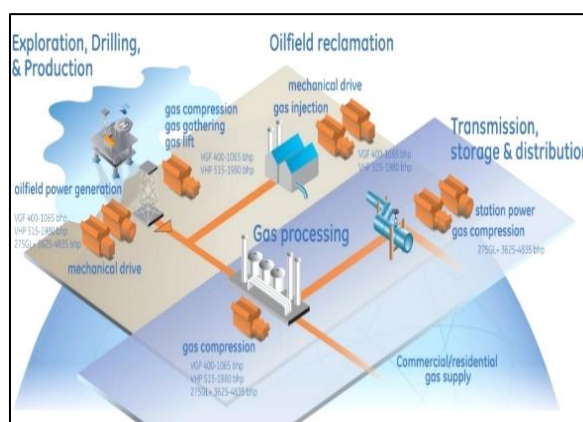


Рис. 1. Використання газових двигунів від виробника Waukesha в нафтогазовій промисловості

Саме тому використання технології цифрових двійників з можливістю прогнозування технічного стану, введення адаптивних інтервалів обслуговування, та віддалений моніторинг з системою керування є доволі актуальним напрямом для проведення досліджень в цій галузі.

Моніторинг реальних умов експлуатації для двигуна покладається на систему, в основі якої закладено технології цифрових двійників з прогностичною моделлю. Така система може бути інтегрована в блок керування двигуном, або застосована як окрема система зі своїми власними датчиками та вимірювальними пристроями [8]. Відстеження та керування такими двигунами можливо за допомогою інтернету речей (Internet of Things, IoT). Інтернет речей — це комплекс пристроїв, які взаємодіють між собою і з зовнішнім середовищем через мережу зв'язку. Завдяки IoT можна автоматично в режимі реального часу відстежувати роботу різних систем і виконання процесів [2,8]. Таким чином, використовуючи інтернет речей, відстежувати роботу двигуна може не тільки компанія що експлуатує його, а також сервісна фірма, що проводить технічне обслуговування. Тим самим остання, використовуючи систему прогнозування (базовану на предиктивній моделі двигуна в інтернеті речей), може спланувати свої роботи по технічному обслуговуванню з мінімальною участю посередніх факторів, беручи до уваги лише реальний технічний стан двигуна [9].

Розглянемо типову схему експлуатації двигуна, задіяного у певному виробничому процесі як показано на рис 2. Зазвичай при введенні в роботу нового двигуна, до нього безпосередньо мають відношення три компанії, це компанія що експлуатує цей двигун, яка є його власником, фірма-виробник двигуна, та сертифікована сервісна компанія, яка за договором має виконувати технічне обслуговування.

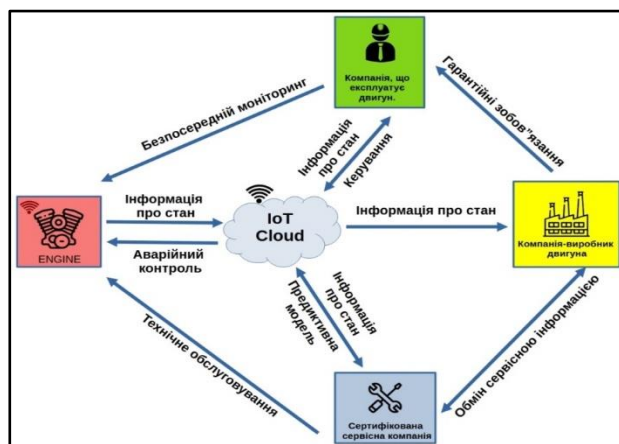


Рис.2. Схема експлуатації двигуна

Використовуючи технологію цифрових двійників та інтернет речей всі користувачі мають доступ до інформації в реальному часі про поточний стан двигуна, покази його датчиків, крім того компанія що експлуатує двигун має можливість керування ним за потреби.

Сертифікована сервісна компанія має доступ до двигуна з метою його технічного обслуговування, проведення планових, аварійних ремонтів, та налагоджувальних робіт, має постійний контакт з виробником двигуна задля обміну технічною інформацією. Технологія цифрових двійників для сервісної компанії в першу чергу несе зацікавленість в можливості інтегрування системи прогнозування технічного стану в двійника у вигляді прогностичної математичної моделі [6]. Це дає змогу адаптувати сервісні інтервали до реальних умов експлуатації, оптимізувати час проведення технічного обслуговування, спланувати складський запас необхідних запасних частин, та за можливості передбачити аварійні та позаштатні ситуації, опираючись на покази цифрового двійника [8].

Під можливістю адаптування сервісних інтервалів під умови експлуатації мається на увазі продовження або скорочення їх в залежності від того в яких експлуатаційних та навантажувальних умовах працює двигун, якої якості використовуються запчастини та розхідні матеріали для його обслуговування [9].

Для компанії виробника використання інформації з інтернету речей про стан двигуна може бути в нагоді при настанні гарантійного або негарантійного випадку, таким чином є можливість оцінити покази та режими роботи при яких стався аварійний зупин двигуна. Також є можливість накопичити інформацію в вигляді статистичного нагляду за своїм продуктом.

Опираючись на вищесказане, технологію цифрових двійників можливо адаптувати до будь-якого двигуна, але для більш надійного та передбачуваного двигуна це буде втілити набагато простіше. Тому для двигуна під використання системи прогнозування технічного стану було б справедливим висунути деякі експлуатаційні та конструктивні вимоги. Надійність будь-якої машини складається з наступних ознак:

1. Висока довговічність,
2. Безвідмовність роботи,
3. Безаварійність,
4. Стабільність роботи (здатність роботи довгий час без зниження вихідних параметрів),
5. Витривалість (здатність витримувати перевантаження)

6. Невеликий об'єм операцій по обслуговуванню та догляду.
7. Невибагливість до якості догляду
8. Живучість (здатність при часткових ушкодженнях продовжувати деякий час роботу, хоча б на знижених режимах)
9. Збереження ремонтпридатності.
10. Продовжені міжремонтні строки.

Умови правильної експлуатації машини мають бути закладені в її конструкції. Необхідно забезпечити надійну роботу навіть в умовах недостатньо кваліфікованого обслуговування. Усуненню підлягають періодичні операції регулювання, підтяжки, змащення і т.д., які при недостатньо уважному обслуговуванні можуть стати причиною прискореного зносу и передчасного виходу агрегату або вузла з ладу.

Постановка задачі

На основі викладеного вище матеріалу, пропонується до оснастити існуючий двигун додатковими датчиками та пристроями, завдяки яким буде можливість моніторити основні параметри двигуна та за допомогою інтернету речей завантажувати інформацію в хмарні ресурси.

В якості дослідного агрегату буде слугувати газовий двигун MAN E2876 E322 потужністю 160 кВт, що є приводом для дотискного газопоршневого компресора. Дана компресорна установка є основним дотискним агрегатом в технології установки комплексної підготовки газу, тому її безперебійна робота дуже важлива. Планово двигун зупиняється один раз на місяць для проведення технічного обслуговування.

Під обов'язковий контроль підпадають наступні робочі показники:

1. Температура охолоджуючої рідини на вході та виході з радіатора охолодження.
2. Температура відпрацьованих газів (загальна та по кожному циліндру окремо)
3. Температура мастила.
4. Температура у впускному тракті та температура зовнішнього середовища.
5. Тиск мастила.
6. Тиск у впускному тракті після дросельної заслінки.
7. Рівні мастила та охолоджуючої рідини.

Також до технічного обслуговування будуть додані роботи по вібро-акустичному аналізу двигуна, загальному аналізу мастила та охолоджуючої рідини, заміри зазорів між електродами свічок запалення. На основі даних по цим замірам буде можливість оцінити реальний стан двигуна при даних умовах роботи, та по можливості застосувати адап-

тивні терміни обслуговування, які будуть направлені на збільшення або скорочення міжсервісних інтервалів, та прогнозування аварійних ситуацій.

Висновки

На основі викладеного в статті матеріалу можна зробити висновок, що використання технології цифрових двійників з предиктивною моделлю для стаціонарних газових двигунів допомагає у вирішенні декількох задач, а саме:

1. Дозволяє контролювати стан двигуна, та керувати ним через інтернет речей.
2. Дає можливість мінімізувати аварійні випадки, та вчасно виявити несправності.
3. Адаптувати інтервали обслуговування під реальні умови експлуатації.
4. Мінімізувати людський фактор при керуванні силовою установкою.

Майбутня основна задача в цьому напрямку це синхронізація Інтернету речей, технології цифрових двійників з системою прогнозування технічного стану та конструкцією двигуна в цілому.

Список літератури:

1. Грудз Я. В. Прогнозування технічного стану газоперекачувальних агрегатів // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2012. – № 4 (45). – С. 149-153.
2. Іванов Д.І. Прогнозування технічного стану двз в інтернеті речей / Іванов Д.І., Білик С.Ю. // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2023, (17–20 травня 2023 р., м. Харків) / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків : НТУ «ХПІ», 2023. – С. 139.
3. Марченко А. П. Моторні властивості низькокалорійних газових палив та їх вплив на показники двигунів внутрішнього згоряння / А. П. Марченко, А. А. Осетров, С. С. Кравченко, О. А. Хамза // Енерготехнології и ресурсозбереження. – 2014. – № 5-6. – С. 3-11.
4. Minchev, D. S. (2020). Simulation of Diesel-Generator Set Transient Operation. MPP&O // Матеріали II Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету [“Marine Power Plants and Operation”], (квітень 2020 р., м. Одеса) / Одеський національний морський університет. Одеса, 2020. – С. 46-52.
5. Орлов П. І. Основи конструювання: довідково-методичний посібник в 3-х книгах. Кн. 1. Вид. 2-ге, перероб. і доп. – М. : «Машинобудування», 1977.
6. Прохоренко А. Цифровий двійник газопоршневої компресорної установки: концепція, архітектура та пілотне впровадження / Прохоренко А., Кравченко С., Солодкий Є. // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2021. – № 2. – С. 68-72. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2021.2.09>.
7. Серікова О. А. Засоби адаптивного прогнозування залишкового ресурсу ДВЗ / Серікова О. А., Бажинов О. В. // Вісник ХНАДУ. – 2012. – Вип. 56. – С. 46-50.
8. Прохоренко А.О. Предиктивна модель двигуна в інтернеті речей / Прохоренко А.О., Кравченко С.С., Таланін Д.С., Самойленко Д.Є. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2018): збірка матеріалів X Міжнародної науково-практичної конференції, (29–31

травня 2018 р., м. Херсон). – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2018. – С. 74. 9. Ivanov D. *Analysis of the problem of integrating an engine technical condition prediction system* / Ivanov D., Bilyk S. // *Conferința tehnico-științifică a studenților, masteranzilor și doctoranzilor Technical Scientific Conference of Undergraduate, Master and PhD Students, 5-7 aprilie 2023, Chișinău / comitetul științific: Bostan Viorel [et al.]*. – Chișinău: Tehnica-UTM, 2023. – Pp. 401-403. 10. *Загальна інформація Waukesha gas engines*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://customer.innio.com/en/resources/brochures-case-studies/powering-the-world-s-energy-infrastructure>.

Bibliography (transliterated):

1. Hrudz, Y. V. (2012). *Prediction of the technical condition of gas compressor units. Exploration and development of oil and gas fields [Prohnozuvannya tekhnichnogo stanu hazoperekachyvalnykh agregativ. Rozvidka ta rozrobka naftovikh i hazovikh rodovyshch]*, 4(45), Pp. 149-153. 2. Ivanov D.I., Bilyk S.Y. (2023). *Predicting the technical condition of engine in the Internet of Things [Prohnozuvannya tekhnichnogo stanu dviguniv v interneti rechey]*. *Information technologies: science, engineering, technology, education, health: Theses of reports of the XXXI International scientific and practical conference MicroCAD-2023 (May 17–20, 2023, Kharkiv)*. Sokol, Y. I. (Ed.). Kharkiv: NTU "KhPI", P. 139. 3. Marchenko, A. P., Osetrov, A. A., Kravchenko, S. S., & Khamza, O. A. (2014). *Motor properties of low-calorie gas fuels and their influence on indicators of internal combustion engines. Energotehnologii i resursosberezhene [Motorni vlastivosti nizkokaloriynykh gazovykh paluv i ikh vpluv na pokazniki dviguniv vnutrishnogo sgoraniya. Energotehnologii i resursosberezheniye]*, 5-6, Pp. 3-11. 4. Minchev, D. S. (2020). *Simulation of Diesel-Generator Set Transient Operation. MPP&O. Odesa National*

Maritime University. (2020). Materials of the II International scientific and practical maritime conference of the Department of SEU and TE of the Odessa National Maritime University [“Marine Power Plants and Operation”] (April 2020, Odesa). Odesa, Pp.46-52. 5. Orlov, P. I. (1977). *Fundamentals of design: Reference and methodological guide in 3 volumes [Osnovy konstruyuvannya: dovidkovo-metodichnyi posibnik v 3-kh knigakh]*. Vol. 1 (2nd ed., revised and enlarged). Moscow: "Mashinobuduvannya". 6. Prokhorenko, A., Kravchenko, S., & Solodkyy, Y. (2021). *Digital twin of a gas piston compressor unit: concept, architecture, and pilot implementation. Dvyhuny vnutrishnogo zghoryannya [Tsyfrovyi dvynik hazoporshnevoyi kompresornoyi ustanovky: kontseptsiya, arkhitektura ta pilotne vprovadzheniya. Dvyhuny vnutrishnoho zghoryannya]*, 2, Pp. 68-72. 7. Serikova, O. A., & Bazhinov, O. V. (2012). *Means of adaptive prediction of residual resource of DVS. Herald of the KhNADU [Zasoby adaptivnoho prohnozuvannya zalishkovoho resursu DVS. Visnyk KhNADU]*, 56, Pp. 46-50. 8. Prokhorenko A.O., Kravchenko S.S., Talanin D.S., Samoilenko D.E. (2018). *Predictive model of the engine in the Internet of Things [Preduktivna model dvuguna v internrti rechey] Kherson State Maritime Academy. (2018). Modern information and innovative technologies in transport (MINTT-2018): Collection of materials of the X International scientific and practical conference (May 29–31, 2018, Kherson)*. Kherson: Kherson State Maritime Academy, P. 74. 9. Ivanov, D., & Bilyk, S. (2023). *Analysis of the problem of integrating an engine technical condition prediction system. In Conferința tehnico-științifică a studenților, masteranzilor și doctoranzilor Technical Scientific Conference of Undergraduate, Master and PhD Students (5-7 April 2023, Chișinău)*. Chișinău: Tehnica-UTM, Pp. 401-403. 10. *Common information Waukesha gas engines available at: <https://customer.innio.com/en/resources/brochures-case-studies/powering-the-world-s-energy-infrastructure>*.

Надійшла до редакції 11.02.2024 р.

Іванов Дмитро Ігорович – аспірант кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок. Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Dmytro.Ivanov@ieec.khpi.edu.ua, <http://orcid.org/0009-0005-7001-4218>.

Білик Сергій Юрійович – канд. техн. наук, доцент кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок. Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Serhii.Bilyk@khpi.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-8813-5652>

ADVANTAGES AND FEATURES OF USING DIGITAL TWIN TECHNOLOGY FOR STATIONARY GAS ENGINES.

D.I. Ivanov, S.Y. Bilyk

At the moment, there is no mass alternative to power plants based on an internal combustion engine. Such power plants are fully mastered in production, they are mobile, not bulky, and do not depend on weather conditions (wind, current, etc.), as required by wind and hydroelectric power plants. The variety and availability of fuels is also a very big advantage in favour of internal combustion engines. On the other hand, engines are a source of heat, noise and chemical pollution, and by running on fossil fuels, they contribute to negative climate change on the planet, so the issue of improving the fuel, economic and environmental efficiency of vehicle engines is relevant. With the rapid development of information technology, it is now possible to create a perfect control system for stationary engines using digital twin technology, which in the future could take over the entire task of controlling the unit with minimal human intervention, eliminating the effect of the human factor and thereby increasing the life and efficiency of the unit. The goal is to use the forecasting system to assess the actual technical condition of the engine and, based on this data, set the optimal maintenance intervals, as well as prevent accidents that entail expensive repairs or even complete replacement of the unit. Such a system would be relevant for large, expensive stationary machines involved in any technological processes where the unit's downtime entails financial losses associated with the cessation of a particular production process. Representatives of this type of power plant are gas engines - drives for booster or downhole gas compressors, gas generators operating on landfill gas or biogas.

Keywords: gas engine; digital twin; service life; resource; predictive model; power plant; operation.