

УДК 681.518.5

Ю.П. КОНДРАТЕНКО<sup>1,2</sup>, О.В. КОРОБКО<sup>2</sup><sup>1</sup> Чорноморський державний університет імені Петра Могили<sup>2</sup> Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова

## КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

*В статті розглянуто сучасні тенденції розвитку суднових систем діагностики, що забезпечують підвищення гарантоздатності суднових енергетичних установок. Представлена структура комп'ютерної системи автоматичного термометрування суднового дизельного двигуна 6NVD26-2. Наведені алгоритми контролю головних температурних показників двигуна. Розглянуто підхід обміну даними між ПЛК та SCADA-системою через структуровану базу даних. Проведено аналіз вибору оптимального закону регулювання для системи керування частотою обертів валу дизельного двигуна. Людино-машинний інтерфейс системи синтезовано в базовій версії SCADA TRACE MODE 6.*

**Ключові слова:** судновий дизельний двигун, автоматична діагностика, ПЛК, SCADA-система, людино-машинний інтерфейс, структурована база даних.

### Вступ

В умовах суднового плавання головний двигун судна має зберігати гарантоздатну працеспроможність, адже витрати в сфері морських вантажоперевезень, що пов'язані із затримкою вантажу або його незадовільним станом, цілком покладаються на судновласника. Тому нагляд за технічним станом двигунів є пріоритетною задачею судновласника.

Для підтримання робочого стану енергетичної установки (ЕУ) на суднах, як старої побудови так і сучасних, встановлені штатні контрольно-вимірвальні пристрої. Частіше за все, такі системи контролюють теплотехнічні параметри [1, 2], що дозволяє оцінювати індикаторні показники роботи двигунів.

Впровадження комп'ютерних систем і нових обчислювальних технологій [3, 4] у сферу діагностики двигунів [5], зокрема для вирішення завдань автоматизації контролю теплонапруженості, дозволить підвищити ефективність виявлення аномальних показників і збоїв у процесі роботи, що сприятиме запобіганню появи серйозних аварійних ситуацій шляхом усунення їх причин на ранніх стадіях виникнення [6].

Серед європейських судновласників все більшої популярності набуває встановлення комплексних систем моніторингу робочих параметрів двигунів. Подібні системи дозволяють зменшити витрати судновласника на заходи по ремонту та подовжити час експлуатації двигунів за рахунок переходу від періодичних (планових) детальних інспекцій двигуна до інспекцій, зумовлених його фактичним станом [7,8], періодичність яких значно менша.

Комплексні системи діагностики суднових двигунів забезпечують моніторинг і автоматичний контроль більшості їх експлуатаційних. При цьому людино-машинний інтерфейс дозволяє оператору в зручній для нього формі здійснювати віддалений контроль процесу роботи ЕУ.

Головним недоліком подібних систем можна вважати високу ціну, що робить економічно не обґрунтованим їх встановлення на суднах, що обладнані старими, зношеними двигунами, ресурс яких практично вичерпано. До даного класу відноситься велика кількість суден морського та річкового флоту України, зокрема науково-дослідницьке судно «Дельта» Національного університету кораблебудування, що обладнане головним дизель-редукторним двигуном 6NVD26-2.

Найбільш доцільним для підвищення надійності експлуатації зношених енергетичних установок представляється комбінування штатних систем діагностики двигунів з сучасними комп'ютерними SCADA-системами [9] (Supervisory Control And Data Acquisition). Розвиток даного підходу дозволить здійснювати автоматичний контроль експлуатаційних показників двигунів, а також створювати простий, інтуїтивно-зрозумілий інтерфейс системи діагностики [10].

Темою статті є синтез структури, алгоритмів і людино-машинного інтерфейсу комп'ютерної системи автоматичної діагностики суднового дизельного двигуна моделі 6NVD26-2 без наддуву, а також аналіз можливостей обміну інформацією між програмованими логічними контролерами і SCADA-системами через структуровану базу даних.

## 1. Структура системи автоматичної діагностики

На рис. 1 наведена запропонована авторами структура комп'ютерної системи автоматичної діагностики, яку можна розділити на три основні складові: датчики контрольно-вимірювальних пристроїв (КВП) двигуна, головний виконавчий модуль, який реалізовано на базі програмованого логічного контролера (ПЛК) та панель оператора.

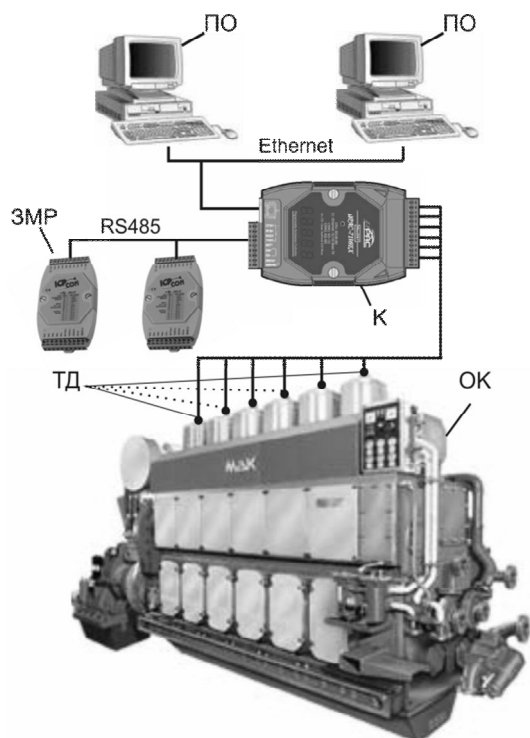


Рис. 1. Структура комп'ютерної системи автоматичної діагностики:

ПО – панель оператора, ЗМР – зовнішній модуль розширення, К – контроллер, ОК – об'єкт контролю, ТД – температурні датчики

Головним завданням системи автоматичної діагностики (рис. 1) є моніторинг температурних показників двигуна [11]. Реалізація даної концепції дозволяє підтримувати працеспроможний стан ЕУ, оскільки вимірювання температури вихідних газів по кожному з циліндрів двигуна, а також температури газів у випускному колекторі дозволяє здійснювати аналіз правильності функціонування двигуна, оцінку теплонапруженості, а також запобігати виникненню аварійних ситуацій.

Задачі вимірювання температурних показників двигуна покладено на датчики штатних КВП двигуна. Головний виконавчий модуль приймає отримані з інформаційного модуля дані, здійснює їх автоматичний контроль та передає необхідну інформацію до панелі оператора. Для забезпечення високої швидкодії системи, а також можливості її подальшої

модернізації в якості головного виконавчого модулю системи обрано ПЛК фірми ICP DAS μPAC 7186EX-SM.

Панель оператора реалізована на базі SCADA-системи TraceMode 6 і забезпечує відображення поточної інформації про стан теплонапруженості двигуна на екран віддаленого диспетчерського пункту, а також у разі наявності аварійної ситуації сповіщає про можливі шляхи вирішення проблеми, що надає системі експертні властивості.

В разі ідентифікації системою аварійної ситуації комп'ютерна система сповіщає технічний персонал відповідним повідомленням на екрані панелі оператора, а також додатково звуковим сигналом, подачу якого здійснює контролер. Застосування двох окремих систем оповіщення дозволяє підвищити ефективність інформування персоналу судна та гарантувати своєчасну фіксацію помилки, що дозволить зменшити негативний вплив аварії на двигун.

## 2. Алгоритм контролю температурних показників

Аналіз роботи 6-ти циліндрового двигуна 6NVD26-2 для гарантування гарантоздатності його роботи доцільно проводити за наступними показниками:

– контроль поточної частоти обертів  $n$  на відповідність робочому інтервалу значень

$$n_{xx} \leq n \leq n_{max}, \quad (1)$$

де  $n_{xx}$  – частота обертів при холостому ході двигуна;  $n_{max}$  – максимальна частота обертів дизеля;

– перевищення допустимого інтервалу температур  $T_{доп}$  вихідних газів циліндрів

$$T_{доп} = T_i \pm \Delta T, (i = 1 \dots 6) \quad (2)$$

при поточних обертах двигуна  $n_{пот}$  у відповідності із статичною характеристикою

$$T = T_{xx} + K_n \cdot n_{пот},$$

де  $T_i$  – температура  $i$ -го циліндру;  $\Delta T$  – допустима величина відхилення температури;  $T_{xx}$  – еталонна температура циліндрів на холостих обертах двигуна;  $K_n$  – частотний коефіцієнт пропорційності;

– перевищення величини розкиду  $\Delta T_{роз}$  температурних показників циліндрів

$$|T_i - T_{сер}| \leq \Delta T_{роз}, (i = 1 \dots 6), \quad (3)$$

де  $T_i$  – температура  $i$ -го циліндру;  $T_{сер}$  – середнє значення температури за циліндрами.

У разі невідповідності будь-якій з умов (1–3) контролер сигналізує оператору про порушення нормального режиму функціонування енергетичної установки звуковим сигналом оповіщення.

Для гарантування правильної роботи двигуна система має забезпечити доступ персоналу до зібраних, недостатньо здійснювати тільки контроль поточних температурних показників.

### 3. Програмне забезпечення системи діагностики

Структура запропонованої системи діагностики (рис. 1) обумовлює необхідність постійного обміну даними між контролером та персональним комп'ютером (ПК), на базі якого організована панель оператора.

Слід зауважити, що людино-машинний інтерфейс системи діагностики реалізовано з використанням безкоштовної базової версії SCADA-системи TraceMode 6, в комплект якої не входять драйвери для забезпечення комунікацій між SCADA-системою та ПЛК.

#### 3.1. Автоматичне архівування даних

Зв'язок між контролером та TraceMode 6 реалізовано через структуровану базу даних. При цьому підході SCADA не має прямого доступу до інформації, яку постійно надсилає контролер. Дані зчитуються сторонньою програмою-архіватором та зберігаються у базі даних (БД) MS Access. TraceMode 6 зчитує записану в БД інформацію та виводить її на екран панелі оператора в найбільш зручній формі. Використання даної моделі обміну інформацією між компонентами системи не зменшує її продуктивності, адже на TraceMode 6 покладені лише функції відображення інформації.

За рахунок обраної структури комп'ютерної системи діагностики обмін даними між архіватором та ПЛК відбувається на основі моделі «клієнт-сервер» через мережу Ethernet, в якій сервером виступає контролер. Відповідно, до серверу можна одночасно підключити кількох клієнтів, тобто організувати розгалужену мережу диспетчерських пунктів, функціональні можливості та кількість доступної інформації яких можуть бути обмежені як на рівні програми-архіватора, так і на рівні SCADA-системи (рис. 1). В той же час створення диспетчерських пунктів, що можуть дублювати функціональні можливості один одного, дозволить підвищити гарантоздатність системи діагностики в разі виходу з ладу одного із пунктів (екранів).

Клієнтський модуль, реалізований за допомогою Visual Studio 2008 являє собою програму, яка зберігає отримані від ПЛК дані поточного стану параметрів двигуна в БД системи діагностики.

Отже, за рахунок запропонованої структури та синтезованих алгоритмів контролю і обміну даними

комп'ютерна система діагностики дозволяє суттєво підвищити працеспроможність та гарантоздатність головного двигуна судна в умовах плавання. Гнучкість реалізованої системи дозволяє оперативно змінювати граничні значення та кількість контрольованих параметрів. Для тестування та налагодження нових режимів роботи в клієнтській модуль системи діагностики вмонтовано симулятор роботи дизельного двигуна без наддуву.

#### 3.2. Вбудований симулятор роботи дизельного двигуна 6NVD26-2

У випадку дослідження головного двигуна, як об'єкта регулювання частоти обертання вала, динамічні режими його роботи описуються диференціальним рівнянням [12]

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_d - M_c, \quad (4)$$

де  $J$  – приведений момент інерції рухомих елементів двигуна (колінчастого вала, маховика, редуктора, валопроводу, гребного гвинта з приєднаними масами води);

$M_d = f(\omega, h)$  – рушійний момент, що залежить від кутової частоти обертання вала двигуна  $\omega$  і положення рейки паливного насоса  $h$ ;

$M_c = f(\omega, \lambda)$  – момент опору (навантаження), що залежить від кутової частоти обертання вала двигуна  $\omega$  і відносного поступу гвинта  $\lambda$ .

Після лінеаризації рівняння (4) з використанням методу розкладання в ряд Тейлора-Маклорена отримуємо

$$T_d \frac{d\Delta\omega}{dt} + \Delta\omega = K_h \Delta h - K_\lambda \Delta \lambda, \quad (5)$$

де  $T_d$  – постійна часу двигуна, с;

$$K_h = \left[ \frac{\partial M_d}{\partial h} \right]_0 / F_y - \text{коефіцієнт підсилення по}$$

положенню рейки ТНВТ,  $\text{с}^{-1}\text{м}^{-1}$ ;

$$K_\lambda = \left[ \frac{\partial M_c}{\partial \lambda} \right]_0 / F_y - \text{коефіцієнт підсилення по}$$

навантаженню двигуна,  $\text{с}^{-1}$ .

Введемо в рівняння (5) наступні позначення безрозмірних параметрів [5]:

$$\varphi = \frac{\Delta\omega}{\omega}, \mu = \frac{\Delta h}{h}, \vartheta = \frac{\Delta \lambda}{\lambda},$$

$$K_h^x = K_h \frac{h_0}{\omega_0}, K_\lambda^x = K_\lambda \frac{\lambda_0}{\omega_0},$$

де  $\omega_0, h_0, \lambda_0$  – базисні значення параметрів, в якості яких приймаються номінальні значення відповідних параметрів.

В результаті одержимо безрозмірну форму рівняння динаміки двигуна без наддуву, що працює на гвинт фіксованого кроку (ГФК)

$$T_D \frac{d\varphi}{dt} + \varphi = K_h^x \mu - K_\lambda^x \vartheta. \quad (6)$$

Якщо всі коефіцієнти рівняння (6) розділити на коефіцієнт при координаті  $\mu$ , то можна отримати рівняння динаміки двигуна нормоване по каналу паливоподачі

$$T_a \frac{d\varphi}{dt} + \delta\varphi = \mu - K_\lambda^y \vartheta, \quad (7)$$

де  $\delta = 1/K_h^x$  – коефіцієнт самовирівнювання двигуна;

$K_\lambda^y = K_\lambda^x / K_h^x$  – коефіцієнт підсилення по каналу навантаження;

$T_a = T_D / K_h^x$  – постійна часу розгону двигуна, що визначає тривалість перехідного процесу по каналу подачі палива.

Вибір параметрів математичної моделі дизельного двигуна здійснюється окремо для кожного режиму роботи і характеру навантаження. Розрахунків передаточної функції проведено для двигуна

(6NVD26-2) судна «Дельта» потужністю  $N_0=135$  кВт, з частотою обертів  $\omega_1 = 500$  об/хв для номінального усталеного режиму. Умовою рівноваги є рівність потужності двигуна потужності навантаження  $N_d = N_c$ , де  $N_d = f(\omega, h)$ .  $N_c = f(\omega, \theta)$ .

В результаті проведених досліджень отримано передаточну функцію (ПФ) дизельного двигуна 6NVD26-2

$$W(p) = \frac{\varphi(p)}{\mu(p)} = \frac{1}{0,99p + 2,61} = \frac{0,3831}{0,378p + 1}. \quad (8)$$

Вбудований симулятор роботи дизельного двигуна без наддуву базується на використанні ПФ замкненої системи автоматичного керування.

З метою визначення оптимального закону керування проведено аналіз роботи системи під навантаженням (рис. 2) для двох синтезованих регуляторів, що реалізують ПІ (9) та ПІД-закони (10) керування з наступними параметрами:

$$W_{PI}(p) = \frac{3,4281(1+0,38p)}{p}, \quad (9)$$

$$W_{PID}(p) = \frac{0,535p^2 + 3,541p + 4,1}{0,01p^2 + p}. \quad (10)$$

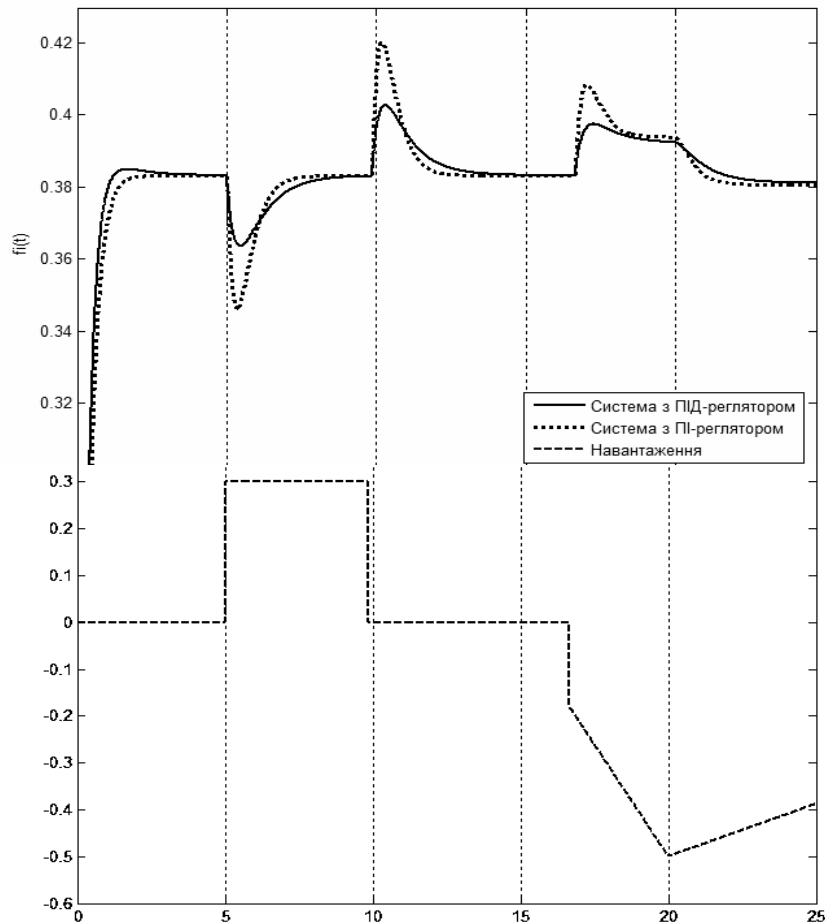


Рис. 2. Моделювання системи автоматичного керування з ПІ та ПІД-регуляторами при змінному навантаженні

В результаті проведеного аналізу (рис. 2) виявлено, що система з ПД-регулятором швидше реагує на зовнішні збурення. Використання ПД-регулятора дозволило на 78% зменшити величину спадів обертів двигуна при подачі позитивного значення навантаження та стрибків обертів при подачі від'ємного за знаком навантаження, а отже зменшити теплонпруженість двигуна та збільшити його працеспроможність. Прикладами раптової зміни навантаження, якщо дизель працює на генератор, можуть служити раптові підключення потужної апаратури і обладнання (крани, рульові пристрої тощо) – для позитивного значення стрибку навантаження. Аналогічно від'ємне значення навантаження моделює зменшення споживання електроенергії судновою апаратурою.

Розглянута математична модель автоматичної системи керування частотою обертів валу дизельного двигуна покладена в основу вбудованого симулятора програми-архіватору.

#### 4. Людино-машинний інтерфейс системи діагностики

Використання існуючої на судні системи моніторингу температурних показників двигуна 6NVD26-2 вимагає безперервної участі людини-оператора при проведенні спостережень [13], а та-

кож значно ускладнює процес збору статистичної інформації про робочі процеси двигуна. Впровадження комп'ютерних систем технічної діагностики, синтезованих на основі використання сучасних контролерів і SCADA-систем [14], дозволить значно покращити гарантоздатність роботи двигуна за рахунок безперервного контролю його температурних показників.

Реалізована за допомогою інструментів, які надає базова версія SCADA-системи TRACE MODE 6 [15], панель управління забезпечує наочне відображення експлуатаційних показників двигуна на ПК.

Головний екран монітору реального часу (рис. 3) дозволяє проводити спостереження за температурними параметрами всіх циліндрів одночасно. Кольорова диференціація температурних інтервалів роботи двигуна полегшує роботу людини-оператора, в автоматичному режимі інформуючи про входження робочої температури в небезпечну зону.

Для спостереження динамічних змін експлуатаційних показників передбачена додаткова графічна панель, яка відображає тренди кожного з сигналів термомпар, а також величину обертів двигуна.

В разі виявлення аварійної ситуації система діагностики виводить на екран відповідне вікно сповіщення (рис. 4), що відповідає даній аварії, містить всю необхідну інформацію для її аналізу, а також рекомендації по усуненню аварійної ситуації.

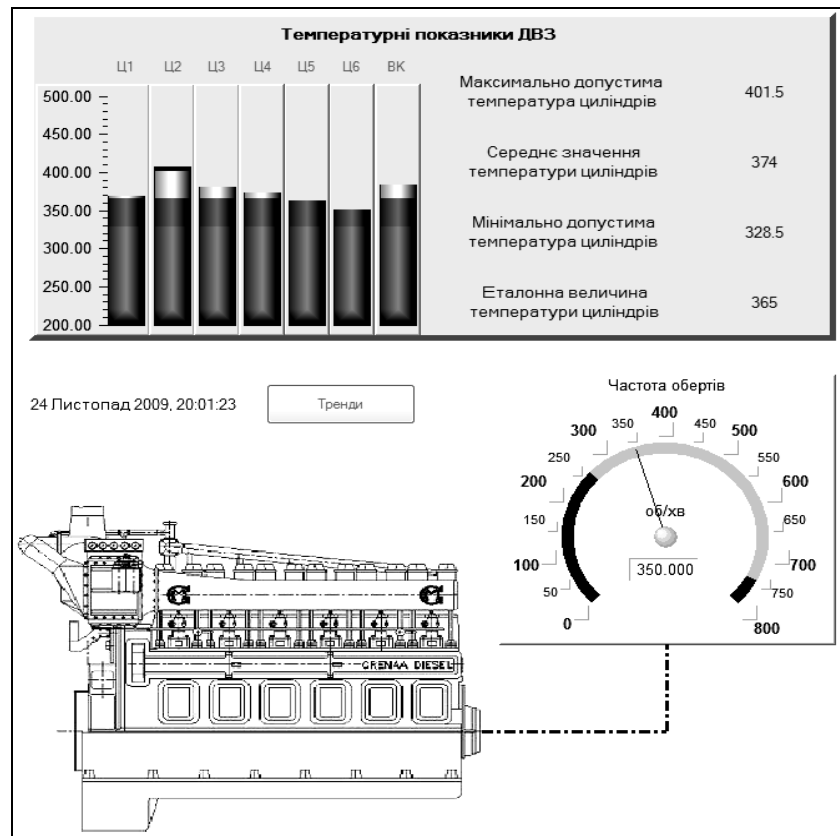


Рис. 3. Головний екран панелі керування системи діагностики

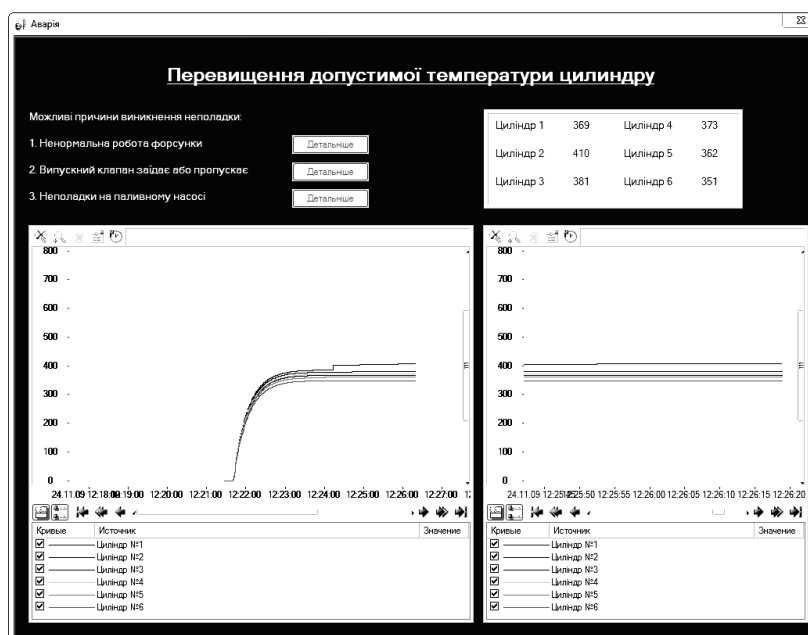


Рис. 4. Екран-сповіщення про виникнення аварійної ситуації

## Висновки

Запропонована система автоматичної діагностики з експертними функціями забезпечує підвищення якості контролю процесу роботи головного двигуна судна. Структура та складові компоненти системи діагностики обрані з метою забезпечення високої гнучкості та можливості подальшого вдосконалення функціональних можливостей системи.

Реалізований алгоритм контролю поточних показників технічних параметрів двигуна дозволяє підвищити гарантоздатність експлуатації судових енергетичних установок в режимі плавання.

Функція архівації зібраних даних в БД дозволяє проводити детальний аналіз роботи енергетичних установок після закінчення їх експлуатації з метою вивчення параметрів працеспроможності судових двигунів.

Створений на базі SCADA-системи TraceMode 6 диспетчерський інтерфейс забезпечує відображення інформації в зручній для людини-оператора формі та містить рекомендації по усуненню можливих аварійних ситуацій.

В подальшому для підвищення гарантоздатності функціонування судових дизельних двигунів доцільним є введення в систему функцій контролю стану підшипників кривошипно-шатунної та деталей циліндрово-поршневої груп двигунів.

## Література

1. Мясковский И.Г. Тепловой контроль и автоматизация тепловых процессов / И.Г. Мясковский. – М.: Стройиздат, 1990. – 254 с.

2. Никитин Е.А. Диагностирование дизелей / Е.А. Никитин, А.В. Станиславский, З.А. Улановский и др. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.

3. Horn E. Protection system for two stroke engines / E. Horn // Schiff&Haffen – 06. 2007.

4. Okamoto K. Effective Condition Monitoring Methods for Diesel Main Bearing / K. Okamoto; H. Shiihara; Y. Nagayama; T. Kurosawa // JIME – 2007. – № 4 (42).

5. Ланчуковский В.И. Автоматизированные системы управления судовыми дизельными и газотурбинными установками / В.И. Ланчуковский, А.В. Козьминых. – М.: Транспорт, 1990. – 335 с.

6. Кончаков Е.И. Техническая диагностика судовых энергетических установок / Е.И. Кончаков. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 112 с.

7. Сыромятников В.Ф. Автоматика как средство диагностики на морских судах / В.Ф. Сыромятников. – Л.: Судостроение, 1979. – 312 с.

8. Monitor or open up / The Full Picture Magazine [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/5C288D149E34094AC12575760063D611>.

9. Куцевич Н. SCADA-системы или муки выбора [Электронный ресурс] / Н. Куцевич // Средства и системы компьютерной автоматизации. – Режим доступа.: <http://www.asutp.ru/?p=600055>.

10. Коробко О.В. Особенности застосування SCADA TRACE MODE для автоматизації технологічних процесів / Коробко О.В., Махмуд Мохаммед Салем Аль-Суод // Інформаційно-керуючі системи і комплекси: Матеріали Всеукр. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів, молодих вчених з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2008. – сс. 21-25.

11. Ключин И.Л. Измерения при эксплуатации судовых силовых установок / И.Л. Ключин. – М.: Транспорт, 1964. – 231 с.

12. Крутов В.И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания / В.И. Крутов. – М.: Машиностроение, 1979. – 615 с.

13. Ю.П. Кондратенко. Компьютерная система распределенного термометрирования для диагностики судовых энергетических установок / Ю.П. Кондратенко, А.В. Коробко, Г.В. Кондратенко, Э.А. Швец // Проблемы информатики і моделювання. Матеріали дев'ятої міжн. наук.-техн. конф. (26-28 листопада 2009 р.). – Х.: НТУ «ХПИ», 2009. – С. 19-20.

14. Пидопригора Д. TRACE MODE идет в сеть / Д. Пидопригора // Мир автоматизации. – № 5. – 2007. – С. 22- 24.

15. Цвіркун Л.І. Прогресивні інформаційні технології в системах контролю кар'єрного транспорту / Л.І. Цвіркун, Р.В. Липовий // 16 міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика – 2009»: Тези доповідей. – Чернівці: Книги – XXI, 2009. – С. 394-396.

Надійшла до редакції 23.02.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.В. Павлов, директор Інституту автоматики та електротехніки, зав. кафедри комп'ютеризованих систем управління, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв.

### КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

*Ю.П. Кондратенко, А.В. Коробко*

В статье рассмотрены современные тенденции развития судовых систем диагностики, обеспечивающих повышение гарантийности судовых энергетических установок. Представлена структура компьютерной системы автоматического термометрирования судового дизельного двигателя 6NVD26-2. Приведены алгоритмы контроля главных температурных показателей двигателя. Рассмотрен подход обмена данными между ПЛК и SCADA-системой через структурированную базу данных. Проведен анализ выбора оптимального закона регулирования для системы управления частотой оборотов вала дизельного двигателя. Человеко-машинный интерфейс системы синтезирован в базовой версии SCADA TRACE MODE 6.

**Ключевые слова:** судовой дизельный двигатель, автоматическая диагностика, ПЛК, SCADA-система, человеко-машинный интерфейс, структурированная база данных.

### COMPUTER SYSTEM OF SHIP ENGINES AUTOMATIC DIAGNOSIS

*Y.P. Kondratenko, O.V. Korobko*

The article deals with issues related to development of ship systems diagnostics that increase dependability of ship engines. The structure of the computer system for automatic temperature measurements of marine diesel engine 6NVD26-2 is given. Basic algorithm for the main engine temperature indicators control are presented in the article. Considered the approach for data exchange between PLC and SCADA-system through a structured database. The analysis of the optimal control law for control system of shaft rotation frequency of the diesel engine is given. Human-machine interface is synthesized in the basic version of SCADA TRACE MODE 6.

**Keywords:** marine diesel engine, automatic diagnostics, PLC, SCADA-system, human-machine interface, a structured database.

**Кондратенко Юрій Пантелійович** – д.т.н., проф., проф. кафедри комп'ютеризованих систем управління Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна; д.т.н., проф., проф. кафедри комп'ютерних технологій ЧДУ ім. П. Могили, Миколаїв, Україна, email: y\_kondratenko@gambler.ru.

**Коробко Олексій Володимирович** – студент кафедри комп'ютеризованих систем управління Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна, email: korobko@live.ru.