

*М. Г. ШУЛЬЖЕНКО, Н. Г. ГАРМАШ, Ю. Г. ЄФРЕМОВ, О. В. ДЕПАРМА, В. Й. ЦИБУЛЬКО*

### **ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ ДАТЧИК ВІБРОПЕРЕМІЩЕННЯ З ФУНКЦІЯМИ КОНТРОЛЮ Й АНАЛІЗУ ВІБРАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕНЕРГООБЛАДНАННЯ**

Для вимірювання параметрів вібрації елементів енергетичного обладнання пропонуються інтелектуальні датчики вібропереміщення з цифровою обробкою сигналу. Датчики визначають спектральні складові та розмах вібропереміщення у заданих смугах частот вимірювання, сигналізують про перевищення розмахом вібропереміщення заданих рівнів та про різку зміну (стрибок) вібрації. Датчики використано для оцінки вібраційного стану турбоагрегатів К-300-240 та К-200-130.

**Ключові слова:** вихорострумний перетворювач, мікроконтролер, вібрація, вібропереміщення, спектр, турбоагрегат.

### **Н. Г. ШУЛЬЖЕНКО, Н. Г. ГАРМАШ, Ю. Г. ЕФРЕМОВ, А. В. ДЕПАРМА, В. И. ЦЫБУЛЬКО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ДАТЧИК ВИБРОПЕРЕМЕЩЕНИЯ С ФУНКЦИЯМИ КОНТРОЛЯ И АНАЛИЗА ВИБРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ**

Для измерения параметров вибрации элементов энергетического оборудования предлагаются интеллектуальные датчики виброперемещения с цифровой обработкой сигнала. Датчики определяют спектральные составляющие и размах виброперемещения в заданных полосах частот измерения, сигнализируют о превышении размахом виброперемещения заданных уровней и о резком изменении (скачке) вибрации. Датчики использованы для оценки вибрационного состояния турбоагрегатів К-300-240 та К-200-130.

**Ключевые слова:** вихретоковый преобразователь, микроконтроллер, вибрация, виброперемещение, спектр, турбоагрегат.

*М. SHULZHENKO, N. GARMASH, I. IEFREMOV, V. TSYBULKO, O. DEPARMA*

### **INTELLIGENT VIBRATORY DISPLACEMENT SENSOR WITH CONTROL AND ANALYSIS FUNCTIONS OF THE VIBRATION PARAMETERS OF ENERGY EQUIPMENT**

A reliable estimation of the vibration state of the units depends to a great extent on the accuracy and reliability of the hardware and software and an accurate and reliable vibration parameter control. A development of the sensors of vibratory displacement that provide appropriate level of metrological and performance characteristics in a full volume in the real time mode is an important scientific and engineering problem the vitality of which is defined by the requirements set to the sensors of a new generation. Using the contemporary element base with the microcontroller of a STM 32 type we designed the intelligent sensor of vibratory displacement to assess the vibration state of the rotary parts of equipment. The sensor has a contact-free eddy-current primary transducer and a functional signal processing converter. The sensor software executes the temperature influence compensation function and the primary transducer nonlinear amplitude characteristic compensation function and the self-control function of failure-free operation. Using the sensors we obtained the spectral characteristics of the vibratory displacement of the rotor of turbine plant and the sweep trends of the vibratory displacement of contact rings of the brush-contact apparatus.

**Key words:** eddy current transducer, microcontroller, vibration, vibratory displacement, the spectrum and the turbine plant.

#### **Вступ**

В Україні розробкою або виробництвом датчиків вібрації займаються декілька підприємств (НВФ «Промвтех», ІПЦ «Вібродіагностика», «Пьезосенсор» та ін.). В ІПМаш ім. А.М. Підгорного НАН України створена і впроваджена на 8 блоках потужністю 100–300 МВт (Київська ТЕЦ-5, Харківська ТЕЦ-5, Запорізька ТЕС, Кременчуцька ТЕЦ, Трипільська ТЕС) система автоматизованого контролю і діагностування вібростану турбоагрегату. Для оцінки параметрів вібрації роторів у системах використано вимірювальні канали з вихорострумними перетворювачами переміщень, раніше розробленими в ІПМаш НАН України.

У світі розробкою або виробництвом датчиків вібрації займаються ряд відомих закордонних фірм («Shenck» та «IFM» Німеччина, «Bruel&Kjaer» Данія, «Metrix» США та ін.). Термін «smart sensor» (розумний або інтелектуальний датчик) вперше було введено менеджером Honeywell Industrial Measurement and Control Томом Гріфітом (Tom Griffiths).

Актуальність роботи пов'язана з підвищенням надійності та безпеки експлуатації енергетичного обладнання, яке на багатьох електростанціях України знаходиться на межі вичерпання ресурсу та працює як на стаціонарному, так і на перехідних режимах. Жорсткі умови експлуатації енергоагрегатів призводять до прискореного спрацювання ресурсу, що може викликати підвищення їх вібрації й привести до руйнування. Визначальним фактором у забезпеченні надійності і безпеки експлуатації при спрацюванні ресурсу є достовірність даних про вібраційний стан, який являється інформативним чинником появи дефектів. На вірогідність оцінки вібраційного стану агрегатів істотно впливає точність і надійність технічних засобів і програмно-методичного забезпечення визначення й контролю параметрів вібрації. Тому необхідно вирішити задачі щодо зниження погрішності вимірювання у робочому діапазоні температур, розширення динамічного, частотного діапазону вимірювання та підвищити надійність засобів діагностування. Сучасний рівень розвитку мікроелектроніки дозволяє створити інтелектуальні датчики, що за-

© М. Г. Шульженко, Н. Г. Гармаш, Ю. Г. Єфремов, О. В. Депарма, В. Й. Цибулько, 2018

безпечують у повному обсязі необхідний рівень метрологічних та експлуатаційних характеристик у режимі реального часу. Інтелектуальний датчик – це засіб вимірювання з мікроконтролером, використання якого дозволяє виконувати наступні функції:

- цифрової обробки сигналів;
- автоматичної компенсації впливу параметрів навколишнього середовища;
- автоматичної перевірки справності функціонування (самодіагностування);
- дистанційного конфігурування (діапазону вимірювань, одиниць вимірювань);
- передавання інформації з використанням протоколів промислових мереж.

### Мета роботи

На цей час на ринку України відсутні інтелектуальні датчики вібрації вітчизняного виробництва. Створення датчиків вібропереміщення, що забезпечують у повному обсязі необхідний рівень метрологічних та експлуатаційних характеристик у режимі реального часу є важливою науково-технічною задачею, актуальність якої визначається вимогами до датчиків нового покоління.

### Основний матеріал

Інтелектуальний датчик вібропереміщення для оцінки вібраційного стану обертових частин обладнання складається з однокомпонентного вихорострумowego безконтактного первинного та функціонального перетворювачів. На базі розробленого раніше пристрою для вимірювання відстані до струмопровідної поверхні [1] розроблено безконтактний однокомпонентний вихорострумовой первинний перетворювач. Вихорострумовой первинний перетворювач призначено для перетворення фізичної величини (вібропереміщення) у частотно-модульований сигнал. Відмінність нового вихорострумowego первинного перетворювача полягає в тому, що у його структуру було уведено додаткові елементи для забезпечення функції компенсації впливу температури (датчик температури, мікроконтролер типу PIC10 та ін.). За рахунок оптимізації топології друкованої плати первинного перетворювача та використання сучасних електронних компонентів покращено форму вихідного частотно-модульованого сигналу, що призводить до підвищення перешкодостійкості датчика. Для мінімізації розміру вихорострумowego первинного перетворювача електронні компоненти скомпоновано на двох друкованих платах. На одній платі розташовані електронні компоненти для компенсації впливу температури, на другій платі – електронні компоненти для перетворення вібропереміщення у частотно-модульований сигнал.

Для мікроконтролера первинного перетворювача розроблена програма обробки сигналу з температурного датчика та формування значення температури у цифровому вигляді.

Створено безконтактний однокомпонентний вихорострумовой первинний перетворювач V-01.1 (рис. 1а) та його модифікації V-01.2, V-01.K, V-01.3 (рис. 1б–г). Вони розрізняються за формою і розміром вимірювальної котушки індуктивності, габаритами та матеріалом, з якого зроблено корпус первинного перетворювача. Розмір та форма вимірювальної котушки індуктивності впливає на діапазон вимірювання вібропереміщення (переміщення). Корпус первинного перетворювача V-01.K зроблено з діелектричного матеріалу для використання в умовах, за яких з'являється вірогідність появи електричної дуги. У табл. 1 приводяться діапазони вимірювання вібропереміщення (переміщення) для різних модифікацій первинного перетворювача та рекомендації щодо їх використання (призначення).

Таблиця 1 – Рекомендації щодо використання первинних перетворювачів

Модифікація	Діапазон вимірювання розмаху вібропереміщення, мкм	Діапазон вимірювання переміщення, мм	Призначення
V-01.1	20-500	0-4	Контроль вібропереміщення ротора, осевого зсуву, викривлення ротора
V-01.2	20-1000	0-10	Контроль вібропереміщення ротора, відносного розширення ротора
V-01.K	20-1000	0-10	Контроль вібропереміщення контактних кілець щітково-контактного апарата турбоагрегату
V-01.3	20-1000	0-100	Контроль теплового розширення циліндра турбіни

Функціональний перетворювач призначено для цифрової обробки сигналу первинного перетворювача та видачі вібровимірювальної інформації у аналоговому та цифровому вигляді. Функціональний перетворювач включає наступні модулі, які зібрані на мікросхемах з навісними елементами й відповідними зв'язками:

- вхідний модуль для подачі електроживлення на первинний перетворювач, посилення і обмеження частотно-модульованого сигналу первинного перетворювача;

- мікроконтролер типу STM32 для обробки сигналу первинного перетворювача;
- вихідний модуль для нормування сигналу, пропорційного вимірювальній величині.

Розроблено топологію друкованої плати функціонального перетворювача. На відміну від розробленого функціонального перетворювача інтелектуального датчика віброшвидкості [2] в новому функціональному перетворювачі додано контроль живлення перетворювача.

Для мікроконтролера функціонального перетворювача розроблена програма, яка працює за наступним алгоритмом:

- за параметрами частотно-модульованого сигналу визначається розрив лінії або коротке замикання у первинному перетворювачі;
- проводиться демодуляція частотно-модульованого сигналу та його перетворення у цифровий сигнал;
- дискретним перетворенням Фур'є цифровий сигнал розкладається на гармонічні складові;
- визначається температура первинного перетворювача;
- за градувальними коефіцієнтами корегується амплітудна характеристика датчика;
- за корегуючими коефіцієнтами в залежності від температури первинного перетворювача корегується амплітудна характеристика датчика;
- розраховується розмах відносного вібропереміщення у двох діапазонах частот вимірювання (робочому: від 5 Гц до 500 Гц; низькочастотному: від 10 Гц до 25 Гц). Повний діапазон частот вимірювання від 0,04 Гц до 1000 Гц. Границі робочого та низькочастотного діапазонів програмується при налаштуванні датчика;
- визначається коефіцієнт перетворення розмаху вібропереміщення у токовий сигнал;
- визначається коефіцієнт перетворення переміщення у сигнал по напрузі;
- розраховується амплітуда і фаза  $\frac{1}{2}$ , 1 та 2 обертових гармонічних складових вібропереміщення (при наявності сигналу фазової мітки);
- виконується перевірка досягнення розмаху вібропереміщення аварійних рівнів та перевірка різкого росту (стрибка) вібрації;
- формується пакет даних для передачі його по цифровому інтерфейсу RS-485 у вимірювальні системи.

Створено функціональний перетворювач (рис. 2) для цифрової обробки сигналу первинного перетворювача та видачі вібровимірювальної інформації у аналоговому та цифровому вигляді.

Функціональний перетворювач має:

- вхід для підключення первинного перетворювача;
- цифровий інтерфейс RS-485;
- аналоговий вихід для видачі аналогового сигналу поточних миттєвих значень вібропереміщення.

Налаштування датчика виконується з використанням розробленої програми (рис. 3). Програма налаштування датчика дозволяє:

- визначати градувальні коефіцієнти для корекції амплітудної характеристики датчика та коефіцієнти підсилення і перетворення;
- налаштування часу усереднення розмаху вібропереміщення, границь частотного діапазону вимірювання, значення аварійних рівнів вібрації;
- зберегти градувальні таблиці та службову інформацію (ідентифікатор виробника, код моделі, серійний номер та інші параметри) у внутрішній пам'яті мікроконтролера датчика або у файлі на комп'ютері;
- проводити перевірку роботи функціонального перетворювача.

Проведено стендові випробування інтелектуального датчика вібропереміщення. У табл. 2 наводиться амплітудна характеристика датчика на базовій частоті 80 Гц при встановлюваному зазорі 2 мм. Зміна встановлюваного зазору практично не впливає на результати вимірювання розмаху вібропереміщення (табл. 3). Інтелектуальний датчик вібропереміщення має практично лінійні амплітудо-частотну (рис. 4) та фазо-частотну характеристики (рис. 5).

Таблиця 2 – Амплітудна характеристика датчика

Задане значення амплітуди вібропереміщення, мкм	Отримане значення амплітуди вібропереміщення, мкм
9	8
26	26
49	53
100	98
150	147
200	204
253	251
501	503
750	754
1007	1004

Таблиця 3 – Вплив зазору на вимірювання розмаху вібропереміщення

Зазор, мм	Вібропереміщення, мкм
0,5	100
1,0	98
1,5	98
2,0	99
2,5	98
3,0	100
3,5	98
4,0	98

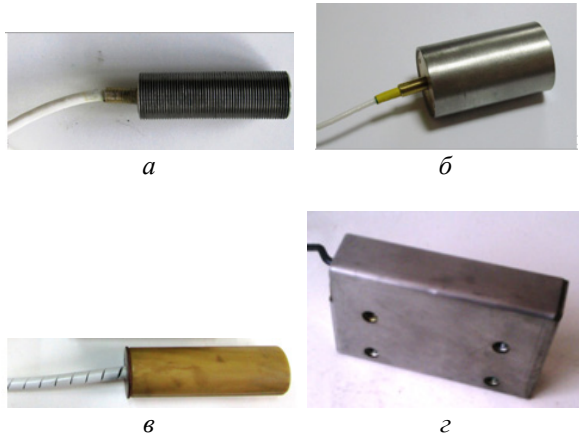


Рис. 1 – Зовнішній вигляд первинних перетворювачів  
 а – V-01.1; б – V-01.2; в – V-01.К; г – V-01.3

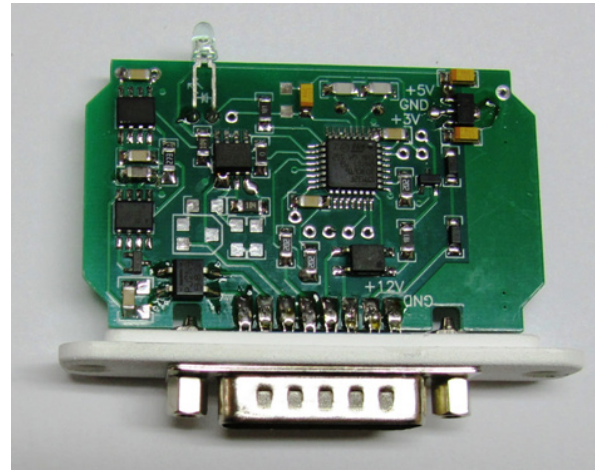


Рис. 2 – Зовнішній вигляд друкованої плати функціонального перетворювача

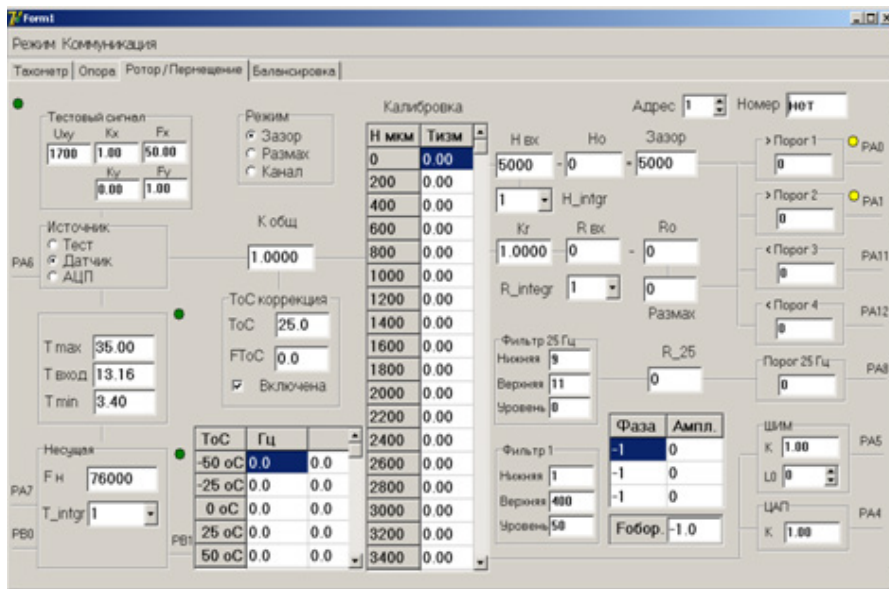


Рис. 3 – Інтерфейс програми налаштування датчика

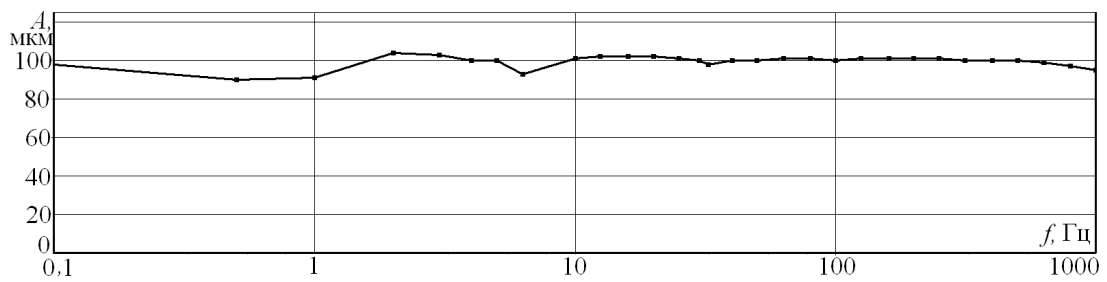


Рис. 4 – Амплітудно-частотна характеристика датчика

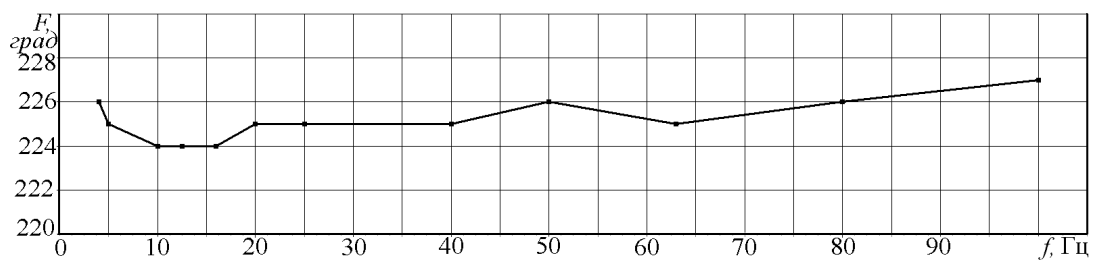


Рис. 5 – Фазо-частотна характеристика датчика



Рис. 6 – Інтелектуальні датчики вібропереміщення з первинними перетворювачами модифікації V-01.K



Рис. 7 – Установка первинних перетворювачів на щітково-контактному апараті

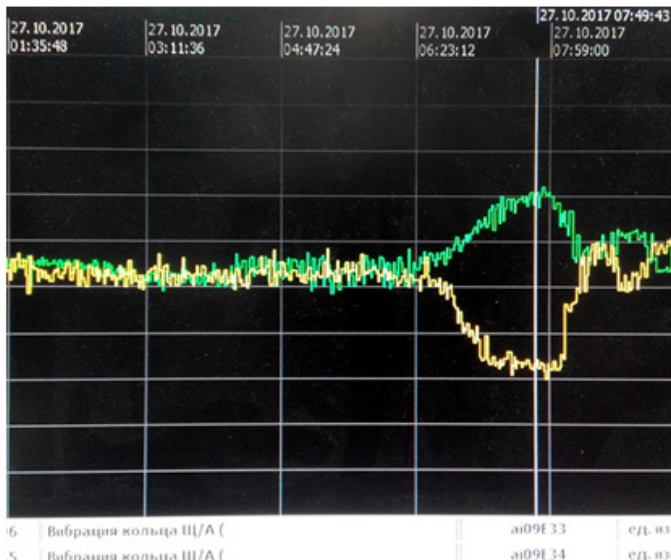


Рис. 8 – Скріншот екрану монітора з трендом розмаху вібропереміщення контактних кілець

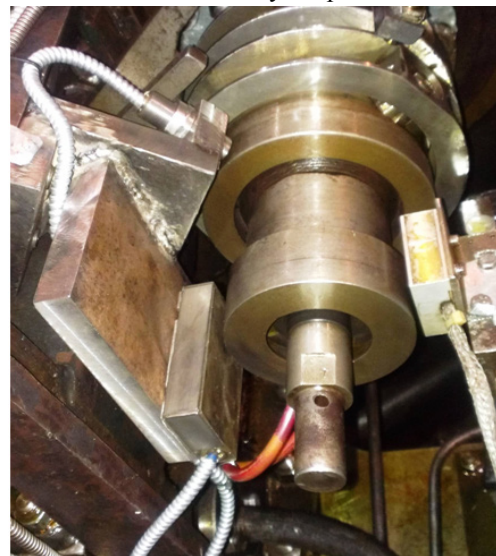


Рис. 9 – Установка первинних перетворювачів для контролю вібропереміщення ротора і відносного розширення ротора ЦВТ

У ННЦ «Інститут метрології» проведено калібрування інтелектуального датчика вібропереміщення ІД-ВП-01 та отримано сертифікат калібрування.

Для контролю контактних кілець щітково-контактного апарату турбоагрегату К-200-130 створено два інтелектуальних датчики вібропереміщення з первинними перетворювачами модифікації V-01.K (рис. 6). Функціональні перетворювачі та блоки живлення змонтовано на *DIN*-рейку та встановлено на блочному щиті керування енергоблоком. Токовий вихід з інтелектуальних датчиків підключено до пристроїв реєстрації автоматизованої системи керування енергоблоком.

Первинні перетворювачі встановлено на щітково-контактному апараті для контролю вібропе-

реміщення у вертикальному та горизонтальному напрямках (рис. 7). Інтелектуальні датчики вібропереміщення знаходяться у дослідній експлуатації на енергоблоці № 9 Луганської ТЕС

Розмах вібропереміщення контактних кілець реєструється з використанням штатного програмного забезпечення (рис. 8). Перевірка результатів вимірювання розмаху вібропереміщення контактних кілець інтелектуальними датчиками вібропереміщення проводилася персоналом електростанції з використанням штатного віброметра. Результати вимірювання практично співпали з показаннями штатної апаратури. Зауважень по роботі датчиків немає.

Для контролю вібропереміщення ротора, відносного розширення ротора циліндра високого

тиску та розширення циліндрів високого та середнього тиску турбоагрегату Т-250/300-240 створено чотири інтелектуальних датчики вібропереміщення з первинними перетворювачами модифікації V-01.1 і V-01.3.

На рис. 9, 10 приводяться приклади установки первинних перетворювачів на об'єкті контролю.



Рис. 10 – Установка первинного перетворювача для контролю розширення ЦВТ



Рис. 11 – Установка функціональних перетворювачів

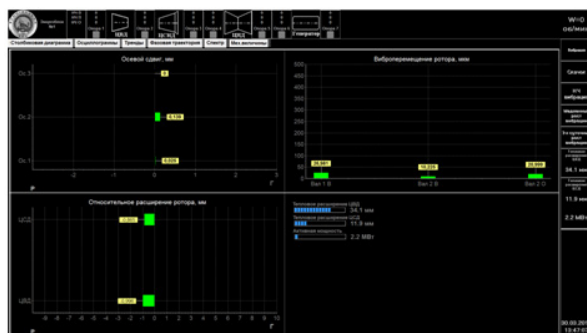


Рис. 12 – Интерфейс для визуализации параметров механических величин

Функціональні перетворювачі, блоки живлення змонтовано на *DIN*-рейку (рис. 11) та встановлено на блочному щиті керування енергоблоком. Токовий вихід з інтелектуальних датчиків підключено до пристроїв реєстрації та індикації автоматизованої системи керування енергоблоком. Інтелектуальні датчики вібропереміщення (переміщення) знаходяться у дослідній експлуатації на енергоблоці № 1 Харківської ТЕЦ-5.

Для контролю вібропереміщення ротора циліндра високого тиску, осьового зсуву, відносного розширення роторів циліндрів високого та середнього тиску турбоагрегату К-300-240 створено підсистему контролю параметрів механічних величин з використанням інтелектуальних датчиків. Для реєстрації параметрів механічних величин інтелектуальні датчики підключено до робочої станції штатної автоматизованої системи вібродіагностики турбоагрегату К-300-240. Створено інтерфейс для візуалізації параметрів механічних величин (рис. 12).

Із використанням інтелектуальних датчиків вібропереміщення проведено оцінку вібраційного стану ротора (опора № 1, № 2) турбоагрегату. Вібраційний стан ротора (опора № 1, № 2) турбоагрегату не відповідає нормам вібрації [3], максимальне значення розмаху вібропереміщення зареєстровано у вертикальному напрямку на опорі № 1 і дорівнює 240 мкм. На рис. 13 приводяться спектральні характеристики вібропереміщення ротора (опора № 1). Для діагностування причин підвищеної вібрації необхідно проведення додаткових досліджень.

Інтелектуальні датчики вібропереміщення (переміщення) знаходяться у дослідній експлуатації на енергоблоці № 1 Трипільської ТЕС.

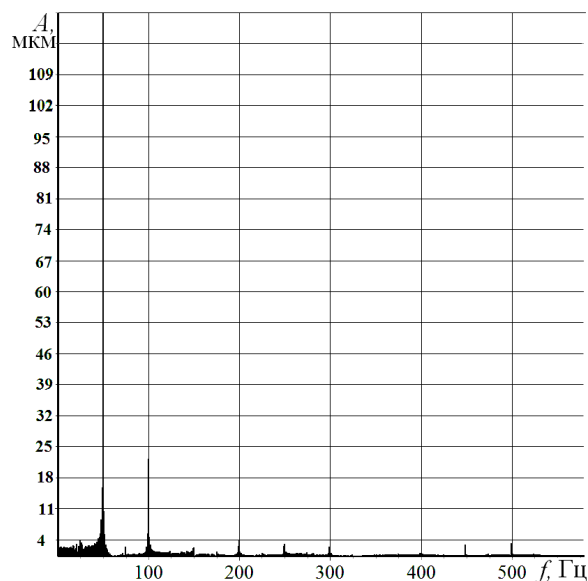


Рис. 13 – Спектральні характеристики вібропереміщення ротора (опора № 1)

## Висновки

Розроблено інтелектуальний датчик вібропереміщення (переміщення) для оцінки вібраційного стану обертових частин обладнання. Очікувані діапазони вимірювання наступні: діапазон частот вимірювання датчиком вібропереміщення обертових частин обладнання від 0,04 Гц до 1000 Гц, діапазон вимірювання розмаху вібропереміщення від 20 мкм до 1000 мкм із дискретністю 1 мкм, діапазони вимірювання переміщення від 0 мм до 4 мм, від 0 мм до 10 мм, від 0 мм до 100 мм. Датчик дозволяє визначити спектральні складові та розмах вібропереміщення у заданих полосах частот, сигналізувати про перевищення розмаху вібропереміщення заданих рівнів та про стрибок вібрації.

Створений інтелектуальний датчик вібропереміщення у порівнянні з аналоговими датчиками вібрації, що використовуються в теперішній час на ТЕС та ТЕЦ України, дозволяє:

- підключати датчик у локальну комп'ютерну мережу для двохстороннього обміну даними і в процесі експлуатації проводити конфігурування датчика, вибирати режими його роботи та проводити перевірку функціонування функціонального перетворювача;

- автоматичну перевірку справності функціонування (контроль частоти несучого сигналу первинного перетворювача);

- автоматичну компенсацію впливу температури та нелінійності амплітудної характеристики первинного перетворювача;

- контролювати розмах вібропереміщення у заданих смугах частот вимірювання та амплітуди спектральних складових вібропереміщення.

Датчики випробувано на турбоагрегатах К-300-240, К-200-130 та Т-250/300-240. З використанням датчиків отримано спектральні характеристики вібропереміщення ротора турбоагрегату і тренди розмаху вібропереміщення контактних кілець щітково-контактного апарата. У ННЦ «Інсти-

тут метрології» отримано сертифікат калібрування інтелектуального датчика вібропереміщення.

Створені інтелектуальні датчики вібропереміщення призначаються для оцінки вібраційного стану обертових частин механізмів ТЕС і ТЕЦ та інших промислових об'єктів.

## Список літератури

1. Шульженко Н. Г., Метелев Л. Д., Цыбулько В. И., Чугреев А. И., Гуров Ю. Н., Ефремов Ю. Г. Помехоустойчивые измерители вибрации. *Вибрация машин: измерение, снижение защита: материалы 2-й Международ. науч.-техн. конф.* Донецк: ДонНТУ, 2004. С. 35–39.
2. Шульженко М. Г., Єфремов Ю. Г., Депарма О. В., Цыбулько В. И. Датчик віброшвидкості з функціями контролю і аналізу вібраційних параметрів енергообладнання. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 8(1230). С. 63–68. Бібліогр.: 7 назв. ISSN 2078-774X. doi: 10.20998/2078-774X.2017.08.09.
3. *Агрегаты паротурбинные стационарные. Нормы вибрации валопроводов и общие требования к проведению измерений: ГОСТ 27165-97*. Взамен ГОСТ 27165-86; введ. 1999-07-01. Москва: ИПК Изд-во стандартов, 1998. 8 с.

## References (transliterated)

1. Shulzhenko, M. G., Meteliov, L. D., Tsybulko, V. Y., Chuhreiev, A. I., Gurov, Y. N. and Yefremov, Y. H. (2004), "Fail-safe vibration meters [Pomehoustoychivyye izmeriteli vibratsii]", *Vibratsiya mashin: izmerenie, snizhenie zaschita* [Vibration machines: measurement, reduction of protection], No 2, pp. 35–39.
2. Shulzhenko, N., Iefremov, I., Deparma, O. and Tsybulko, V. (2017), "Vibration Rate Sensor with the Power Equipment Vibration Parameter Control and Analysis Functions", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 8(1230), pp. 63–68, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.08.09.
3. (1998), *Agregaty paroturbinnyye statsionarnyye. Normy vibratsii valoprovodov i obschie trebovaniya k provedeniyu izmereniy. GOST 27165-97* [Land-based steam turbine-generator sets. Evaluation of machine vibration by measurement on rotating parts and general requirements for the measurement of vibration. GOST 27165-97], Publishing House of Standards, Moscow, Russia.

Надійшла (received) 07.03.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Шульженко Микола Григорович (Шульженко Николай Григорьевич, Shulzhenko Nikolay Grigor'evich)** – доктор технічних наук, професор; м. Харків, Україна; e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua.

**Гармаш Наталія Григорівна (Гармаш Наталия Григорьевна, Garmash Nataliya Grigor'evna)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу вібраційних і термомісисних досліджень, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Подгорного Національної академії наук України; м. Харків, Україна; e-mail: garm.nataly@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4890-8152>.

**Єфремов Юрій Геннадійович (Ефремов Юрий Геннадиевич, Iefremov Iurii Gennadijovych)** – кандидат технічних наук, директор «СКБ «Вібрації та ресурсу»; м. Харків, Україна; e-mail: iefremov.ua@gmail.com, ORCID 0000-0002-2559-5747

**Депарма Олександр Вадимович (Депарма Александр Вадимович, Deparma Oleksandr Vady'movych)** – головний електронік, «СКБ «Вібрації та ресурсу»; м. Харків, Україна.

**Цыбулько Вадим Йосипович (Цыбулько Вадим Иосифович, Tsybulko Vadym Yosypovych)** – головний конструктор, «СКБ «Вібрації та ресурсу»; м. Харків, Україна.