

УДК 621.165.539.4

## ДІАГНОСТУВАННЯ ВІБРАЦІЙНОГО СТАНУ, ТЕРМОМІЦНОСТІ ТА РЕСУРСУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ АГРЕГАТІВ



**ШУЛЬЖЕНКО**

**Микола Григорович** — доктор технічних наук, професор, завідувач відділу вібраційних та термоміцнісних досліджень Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України

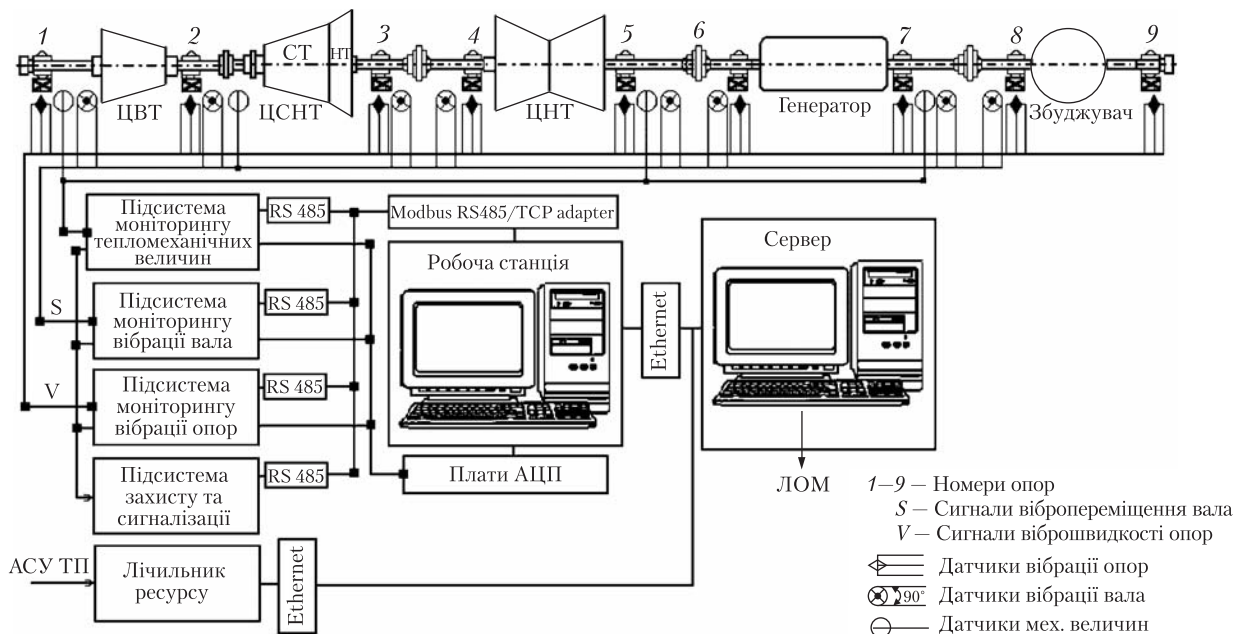
*Розглянуто розроблені розрахунково-експериментальні методи та засоби діагностування вібраційного стану, термоміцності, тріщиностійкості та ресурсу відповідальних вузлів енергетичних агрегатів. Наведено приклади використання створених сучасних автоматизованих стаціонарних систем та мобільних засобів вібродіагностики, оцінювання пошкодженості і ресурсу найбільш напружених елементів і вузлів турбомашин та енергетичного обладнання для підвищення надійності і безпечності їх роботи.*

**Ключові слова:** вібрації, міцність, ресурс, енергетичні агрегати.

На сьогодні в Україні понад 70% турбоагрегатів електростанцій уже виробили свій ресурс, причому не лише парковий, а й продовжений. Подальша їх експлуатація пов'язана з дедалі зростаючим ризиком аварій, тому питання про можливість продовження терміну роботи працюючих турбоагрегатів набуває все більшої актуальності [1].

Безпечність експлуатації агрегатів оцінюється насамперед за їхнім вібраційним станом, тому в Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного (ІПМаш) НАН України розроблено методи, засоби та відповідне математичне забезпечення розрахунків, контролю, моніторингу і діагностування вібростану турбоагрегатів у різних варіантах їх застосування. У період з 1994 по 2004 р. створено стаціонарні автоматизовані системи діагностики, які впроваджено на 5 турбоагрегатах (К-220-130 Луганської ТЕС, Т-250/300-240 Київської ТЕЦ-5, двох агрегатах К-300-240 Запорізької ТЕС та Т-250/300-240 Харківської ТЕЦ-5). Ці системи забезпечують виявлення несправностей агрегата, що спричинюють зміну вібрації і можуть досягти небезпечного рівня. У 2006–2010 рр. проведено модернізацію апаратних і програмних засобів систем діагностики турбоагрегатів Київської ТЕЦ-5 і Запорізької ТЕС.

Новітні інформаційні технології і засоби автоматизованого аналізу та діагностування вібраційного і тепломеханічного



**Рис. 1.** Схема автоматизованої системи діагностування вібраційного стану турбоагрегата та оцінки пошкодження роторів і ресурсу роторів

стану потужних турбоагрегатів створено на основі фундаментальних наукових досягнень у цій галузі [2], і за своїми функціональними можливостями і технічними характеристиками вони відповідають усім вимогам керівних документів з експлуатації електростанцій і мереж, що діють в Україні. У пристроях вимірювання і аналізу вібрації роторів, опор підшипників, частоти обертання, крутильних деформацій, осевих зміщень роторів та інших механічних величин використовуються вихорострумові датчики, розроблені в ППМаш НАН України. Вихідний сигнал з датчиків без проміжних пристроїв передається по одній екранованій лінії на відстань до 1000 м. Датчики стійкі до впливу експлуатаційних факторів, їх надійність підтверджена багаторічним використанням на різних електростанціях, а пріоритетність захищена відповідними патентами. Пристрої мають однотипове схемотехнічне рішення функціональних перетворювачів, яке повністю відповідає умовам серійного виробництва.

Автоматизовані системи діагностування вібростану турбоагрегатів включають (рис. 1):

- підсистеми моніторингу вібрації роторів валопроводу, опор підшипників та інших тепломеханічних величин;
- засоби прийому, цифрової обробки, аналізу, візуалізації та архівації даних;
- математичне та програмно-методичне забезпечення автоматизованого функціонування системи.

Зазначені системи забезпечують:

- одночасне визначення параметрів вібрації в контрольованих точках, період опитування — 80 мкс;
- безперервний, паралельний збір і реєстрацію параметрів вібрації роторів, опор та основних технологічних параметрів енергоблока;
- аналіз відповідності вібрації роторів і опор чинним нормам;
- запобігання розвитку нештатних ситуацій;
- спектральний, гармонічний, кореляційний, статистичний аналізи віброхарактеристик;
- формування трендів контрольованих величин, траєкторій руху вала і опор та їх амплітудно-фазочастотних характеристик;

- експертну оцінку розвитку небезпечних дефектів.

Контроль і діагностування вібраційного стану турбоагрегата здійснюються на різних режимах його роботи: валоповорот, пуск, вибіг, холостий хід, навантаження, робота під навантаженням. У разі підвищення вібрації агрегата виконується імовірна оцінка розвитку дефектів за характерними віброознаками їх наявності: тріщини в роторі; порушення з'єднання роторів і розцентрування опор; дисбаланси обертових елементів валопроводу; прогини ротора; порушення стійкості руху роторів у підшипниках ковзання та зачіпання ротора за статор [3].

Оснащення турбоагрегатів великої потужності розробленими в ІПМаш НАН України автоматизованими системами дозволяє на всіх режимах експлуатації, в тому числі й при швидких пусках, попередити розвиток позаштатних ситуацій, підвищити безпеку експлуатації турбоагрегатів, зберегти їхні техніко-економічні показники та уповільнити спрацювання ресурсу. Так, запобігання розвитку лише однієї аварійної ситуації повністю окупає витрати на оснащення агрегата цими системами.

Крім стаціонарних автоматизованих систем діагностики розроблено мобільний багатофункціональний вимірювально-діагностичний комплекс неруйнівного контролю, експресдіагностики і оцінки технічного стану енергетичних і транспортних систем [3]. Комплекс має 32 канали і забезпечує паралельне визначення параметрів вібрації і обладнання та обертових частин роторів у доступних місцях з використанням акселерометрів, проксиметрів та інших датчиків (рис. 2).

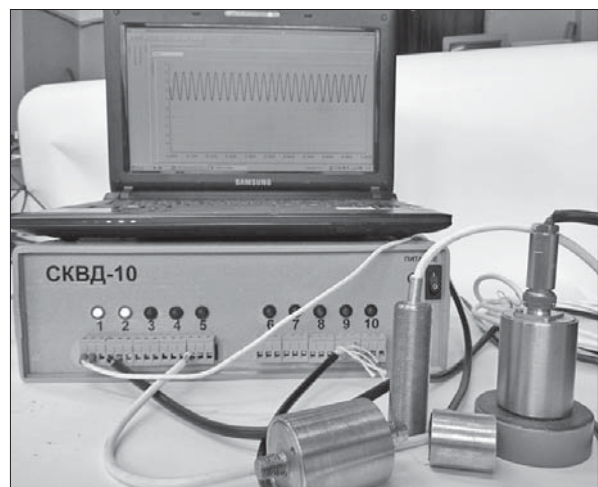
Функціональні модулі забезпечують:

- реєстрацію, візуалізацію і первинну обробку інформації (нормалізацію, фільтрацію та обчислення основних показників сигналу);
- автоматизований контроль технічного стану обладнання, що відповідає чинним нормативним документам;
- визначення спектральних характеристик і трендів вібропараметрів, а також оцінку наявності дисбалансу роторів (розрахунку сис-

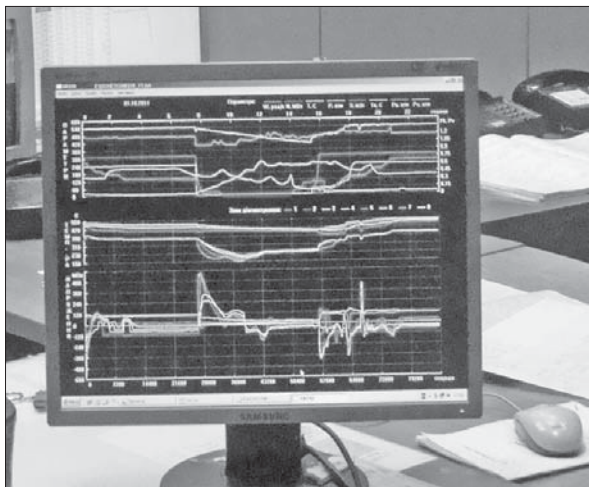
теми вантажів за відомими значеннями динамічних коефіцієнтів впливу в одній або двох площинах).

Основні складові стаціонарних систем та мобільного комплексу використано на Трипільській, Зміївській, Запорізькій, Курахівській, Луганській ТЕС, Кременчуцькій, Білоцерківській, Харківській і Київській ТЕЦ для визначення причин підвищеної вібрації турбоагрегатів і допоміжного енергетичного обладнання та розроблення рекомендацій щодо її зниження.

На основі багаторічного досвіду розрахункового діагностування та оцінювання ресурсу елементів енергомашин в ІПМаш НАН України на замовлення Міненерговугілля України вперше розроблено нормативний документ «Визначення розрахункового ресурсу та оцінка живучості роторів і корпусних деталей турбін. Методичні вказівки», який набув чинності 5 жовтня 2011 р. [4]. У ньому використано класичні положення з малоциклової втоми й повзучості і запропоновано нові методики, критерії, нормативну базу та рекомендації, які становлять основу розрахункової оцінки індивідуального ресурсу та живучості високотемпературних роторів і корпусних деталей парових турбін із застосуванням сучасних наукових досягнень [5]. Використання цього



**Рис. 2.** Основні складові мобільної системи вібродіагностики машин



**Рис. 3.** Візуалізація результатів діагностування термонапруження ротора

документа на практиці дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо технічного стану і термінів надійної та безпечної експлуатації парових турбін.

Розрахункову оцінку ресурсу високотемпературних роторів було здійснено для турбоагрегатів К-300-240 Запорізької та Зміївської ТЕС і Т-250/300-240 Харківської та Київської ТЕЦ-5. У процесі прийняття рішення щодо продовження ресурсу конкретної турбіни розрахункову оцінку доповнюють результатами контролю металу, який можуть здійснити Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України та Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

Згідно з положеннями нормативного документа, вперше в Україні розроблено автоматизовану систему діагностування термонапруженого стану та оцінки спрацювання ресурсу (лічильник ресурсу) для високотемпературних роторів турбоагрегатів на прикладі ротора циліндра високого тиску парової турбіни Т-250/300-240. Система пройшла дослідну експлуатацію в умовах електростанції на турбоагрегаті Т-250/300-240 Харківської ТЕЦ-5 [6]. Її можливості розширено для автоматизованої оцінки ресурсу ротора циліндра середнього тиску турбіни.

Лічильник оцінює спрацювання ресурсу роторів за фактичними режимами роботи агрегата, які визначаються за параметрами АСУ ТП енергоблока. За визначеними характеристиками пари і теплообміну в ступенях і ущільненнях ротора турбіни системою розв'язуються нестационарні задачі теплопровідності й термомпружності, а потім визначається пошкодженість матеріалу від малоциклової втоми і повзучості за час роботи турбоагрегата.

За допомогою лічильника ресурсу можна визначити щадні маневрені режими експлуатації агрегата за накопиченням пошкодженості в небезпечних зонах ротора та спрацюванням його ресурсу.

Розроблену методологію автоматизованого діагностування термонапруженого стану та оцінки спрацювання ресурсу можна поширити на ротори інших турбін з урахуванням їх конструктивних особливостей та умов експлуатації. Впровадження таких лічильників ресурсу не потребує додаткового обладнання крім комп'ютера з можливістю підключення до локально-обчислювальної мережі АСУ ТП (рис. 3).

Створено також методики розрахункової оцінки вібраційного і термонапруженого стану, малоциклової втоми, повзучості та тріщиностійкості елементів і конструкцій енергетичних машин на основі використання експериментальних даних про тепломеханічні властивості матеріалів [5, 7]. Використання сучасних тривимірних моделей з урахуванням найбільш впливових експлуатаційних факторів дало змогу отримати низку нових наукових і практичних результатів з вібро- та термоміцності і надійності роботи відповідальних вузлів енергомашин [5, 8, 9]. Ці результати було впроваджено на ВАТ «Турбоатом», і їх використовують під час проектування та модернізації основних вузлів парових і гідравлічних турбін: робочих коліс, лопаткового апарата, роторів, корпусів, зварних діафрагм, регулювальних клапанів тощо. Зазначені розробки застосовують при проектуванні та експертизі позаштатних ситуацій, а також при дослідженні вібраційних характе-



ристик робочих коліс турбін низки вітчизняних та закордонних ГЕС.

Ці методи використано при визначенні ресурсу барабанів котлів Зміївської, Старобешівської ТЕС і Харківської ТЕЦ-5 та для оцінки можливих причин їх руйнування; для аналізу міцності валопроводів турбогенераторів у разі можливих нештатних режимів експлуатації; при визначенні тріщиностійкості зварних роторів турбіни К-1000-60/1500, що експлуатуються на АЕС України. Отримані результати було впроваджено також на Харківському за-

воді «Електроважмаш», КБ «Південне», КБ «Хартрон-Аркос», Держкоматомі України та інших підприємствах.

Апаратні засоби контролю механічних величин і діагностики вібраційного стану обладнання та методики розрахунково-експериментальної оцінки його пошкоженості й ресурсу можуть використовуватися як автономні вимірювальні засоби, а також у складі діагностичних і дослідницьких комплексів.

Запропоновані засоби діагностики можуть бути адаптовані до потреб замовника.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Мацевитый Ю.М., Шульженко Н.Г., Голощанов В.Н. и др.* Повышение энергоэффективности работы турбоустановок ТЭС и ТЭЦ путем модернизации, реконструкции и усовершенствования режимов их эксплуатации. — К.: Наук. думка, 2008. — 366 с.
2. *Шульженко Н.Г., Гонтаровский П.П., Зайцев Б.Ф.* Задачи термпрочности, вибродиагностики и ресурса энергетических агрегатов. — Харьков: ХНАДУ, 2011. — 444 с.
3. *Шульженко Н.Г., Ефремов Ю.Г., Цыбулько В.И., Депарма А.В.* Вибродиагностирование роторных агрегатов автоматизированными стационарными и мобильными системами // Вібрації в техніці та технологіях. — 2014. — № 3. — С. 101–110.
4. Визначення розрахункового ресурсу та оцінка живучості роторів і корпусних деталей турбін: СОУ-Н МЕНВ 40.1-21677681-52:2011. — К.: ОЕП ГРІФРЕ; М-во енергетики та вугільної пром-ті України, 2011. — 42 с. — (Нормативний документ Міненерговугілля України. Методичні вказівки).
5. *Шульженко Н.Г., Гонтаровский П.П., Зайцев Б.Ф.* Задачи термпрочности, вибродиагностики и ресурса энергоагрегатов (модели, методы, результаты исследований). — Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. — 370 с.
6. *Шульженко М.Г., Гонтаровський П.П., Матюхін Ю.І. та ін.* Розробка системи діагностики термонапруженого стану та лічильника ресурсу роторів турбін (проект 2.10) // Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин»: зб. наук. статей / Ін-т електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. — К., 2012. — С. 92–96.
7. *Шульженко М., Матюхін Ю., Гонтаровський П., Гармаш Н.* Розрахункова оцінка накопичення розсіяних пошкоджень та розвитку тріщин в елементах машин при їх повзучості та малоцикловій втомі // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій: зб. праць V міжнар. конф. — Львів: Фізико-механічний ін-т ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2014. — С. 49–54.
8. *Шульженко Н.Г., Асаенок А.В., Зайцев Б.Ф. и др.* Анализ ползучести сварной диафрагмы паровой турбины // Проблемы прочности. — 2012. — № 4. — С. 99–111.
9. *Шульженко Н.Г., Гонтаровский П.П., Протасова Т.В.* Влияние окружной неравномерности механических свойств материала на деформирование роторов энергетических агрегатов // Проблемы прочности. — 2014. — № 4. — С. 50–61.

Стаття надійшла 19.11.2014.

*Н.Г. Шульженко*

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного Национальной академии наук Украины  
ул. Пожарского, 2/10, Харьков, 61046, Украина

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ВИБРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ,  
ТЕРМОПРОЧНОСТИ И РЕСУРСА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ

Описаны разработанные расчетно-экспериментальные методы и средства диагностирования вибрационного состояния, термостойкости, трещиностойкости и ресурса ответственных узлов энергетических агрегатов. Приводятся примеры использования созданных современных автоматизированных стационарных систем и мобильных средств вибродиагностики, оценки повреждаемости и ресурса наиболее напряженных элементов и узлов турбомашин и энергетического оборудования для повышения надежности и безопасности их работы.

**Ключевые слова:** вибрации, прочность, ресурс, энергетические агрегаты.

*N.G. Shulzhenko*

Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems of National Academy of Sciences of Ukraine  
2/10 Pozharsky St., Kharkiv, 61046, Ukraine

DIAGNOSTICS OF VIBRATION, THERMOSTABILITY,  
AND RESOURCE OF POWER UNITS

Experimental-calculated methods and tools for vibration diagnostics, thermostability, fracture toughness and resource of important components of power units are described. Usage examples of modern automatic stationary and portable systems for vibrodiagnostics, determination of material damage and resource of the most intense elements and components of turbine and power equipment for reliability and safety of operation are shown.

**Keywords:** vibrations, strength, resource, power units.