

даних, що підвищує ефективність контролю якості та дозволяє своєчасно коригувати параметри ущільнення без відбору кернових зразків.

Основним обмеженням поточного етапу є використання синтетично згенерованих навчальних даних та обмежений набір порівнюваних архітектур. У подальших дослідженнях планується розширити аналіз на моделі SVR, XGBoost та гібридні DNN-ансамблі, включити до прогнозованих параметрів динамічний модуль пружності E^* та стабільність за Маршаллом, а також верифікувати моделі на реальних польових вимірюваннях. Фінальним результатом стане інтеграція найточнішої моделі у замкнену систему автоматизованого керування укладанням асфальтобетону [5] як модуль прогнозування якості у зворотному зв'язку.

Ключові слова: нейронна мережа, асфальтобетон, регресія, контроль якості.

Література

- [1] Wang S., Sui X., Leng Z., Jiang J., Lu G. Asphalt pavement density measurement using non-destructive testing methods: current practices, challenges, and future vision , *Construction and Building Materials*, vol. 344, Art. no. 128154, 2022.
- [2] Dao D. V., Nguyen N.-L., Ly H.-B., Pham B. T., Le T.-T. Cost-effective approaches based on machine learning to predict dynamic modulus of warm mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement , *Materials*, vol. 13, no. 15, Art. no. 3272, 2020.
- [3] Baldo N., Miani M., Rondinella F., Celauro C. Analysis of the mechanical behaviour of asphalt concretes using artificial neural networks , *Advances in Civil Engineering*, vol. 2018, Art. no. 1650945, 2018.
- [4] Golafshani E. M., Behnood A., Arashpour M. Enhancing Marshall stability of asphalt concrete using a hybrid deep neural network and ensemble learning , *Case Studies in Construction Materials*, 2025.
- [5] Стешенко Я. В., Протасов А. Г. Автоматизована система керування технологічним процесом укладання асфальтобетонного покриття , *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, no. 2, pp. 30-35, 2025.
- [6] Androjić I., Marović I. Development of artificial neural network and multiple linear regression models in the prediction process of the hot mix asphalt properties , *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 44, no. 12, pp. 994-1004, 2017.

UDC 620.179.16

IMPROVING THE RELIABILITY OF ULTRASONIC TESTING FOR MATERIALS WITH HETEROGENEOUS STRUCTURE

Galagan R.

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

E-mail: r.galagan@kpi.ua

Ultrasonic testing is a widely used non-destructive evaluation method for assessing material integrity. In heterogeneous materials, such as ceramic insulators, structural non-uniformity significantly affects wave propagation characteristics.

A key diagnostic parameter is the ultrasonic wave velocity [1]:

$$v = H / t,$$

where H is the propagation path length and t are the measured time-of-flight.

Materials with heterogeneous internal structure, such as electrotechnical porcelain, exhibit significant spatial variability of physical and mechanical properties caused by technological manufacturing factors [2]. To determine the integrity of the internal structure of a heterogeneous material, it is necessary to perform ultrasonic measurements at different points of the product in order to cover as much of its volume as possible. To ensure the possibility of using statistical criteria, n measurements ($n > 20$) are performed at each spatially distributed point.

However, due to spatial variability of material properties, instability of coupling conditions, and operator and instrumentation errors measurement datasets often contain outliers and increased dispersion, which reduces diagnostic reliability.

In this case the main challenges are:

- presence of gross errors (outliers);
- inconsistency of measurement precision across points;
- lack of built-in mechanisms for system self-diagnostics.

Therefore, there is a need for approach that ensure statistical robustness of measurement data, evaluate the repeatability and consistency of results, and increase the overall reliability of defect detection.

Proposed approach.

To solve these problems, an approach consisting of two stages has been proposed:

- 1. Stage 1: Outlier Detection and Removal.**
- 2. Stage 2: Self-Diagnostics via Variance Analysis.**

On the stage 1, for each measurement point, a sample of size n is obtained. Outliers are detected using statistical criteria such as: Dixon's test, Chauvenet's criterion, Romanovsky criterion, Irwin test.

On the stage 2, to evaluate measurement consistency, the homogeneity of variances across different measurement points is analyzed. For two datasets, the Fisher criterion is applied. For multiple datasets, Cochran's test is used.

If the hypothesis of variance homogeneity is rejected, the system identifies unstable measurement conditions, or potential equipment malfunction, or insufficient repeatability.

Fig. 1 presents a flowchart of the proposed approach.

The main contribution of proposed approach:

- integration of a self-diagnostic statistical module into ultrasonic testing systems;
- combined use of outlier rejection and variance homogeneity testing;
- interpretation of variance consistency as a criterion of measurement reliability in heterogeneous materials.

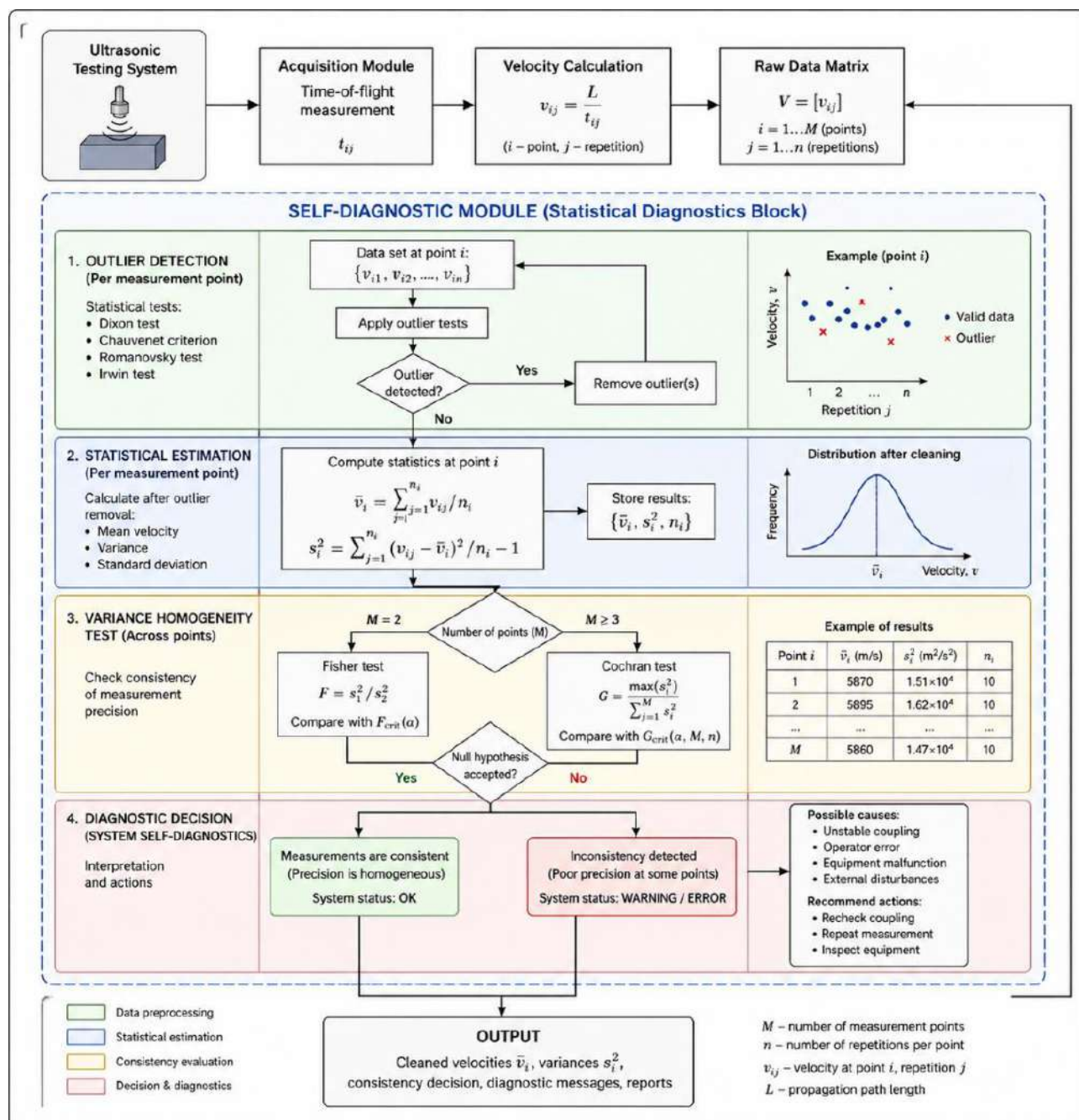


Fig. 1. Flowchart of the proposed approach (generated using AI)

Conclusion

A statistical framework for improving the reliability of ultrasonic NDT in heterogeneous materials has been developed. The approach combines:

- outlier detection;
- repeatability assessment;
- variance homogeneity testing.

The integration of a self-diagnostic module enhances the robustness and credibility of ultrasonic inspection results.

The proposed statistical framework can be further extended in several directions. First, an important promising direction is to extend the method to the case of non-normal distributions of measurements [3]. In real conditions of ultrasonic testing, data often have asymmetry or heavy tails, so it is advisable to explore the use of non-parametric criteria (e.g., Levene's test, Brown-Forsythe test) to assess the homogeneity of dispersions.

Second, it is advisable to develop adaptive algorithms for detecting outliers, in particular using machine learning methods, which will allow taking into account the context of measurements, the type of material and the history of equipment operation.

Third, it is promising to implement spatial-statistical models that take into account the correlation between control points. This will increase the sensitivity to local defects, such as microporosity clusters.

Finally, the integration of the developed approach in the form of a built-in software module into modern ultrasonic flaw detectors or automated non-destructive testing systems will allow implementing the concept of intelligent (smart) NDT, combining measurement, statistical analysis and self-diagnosis in real time.

Keywords: ultrasonic NDT, reliability, statistical analysis, variance analysis.

References

- [1] Krautkrämer J., Krautkrämer H. *Ultrasonic Testing of Materials*. Springer.
- [2] Єременко В.С., Галаган Р.М. Шляхи мінімізації сумарної похибки вимірювання швидкості ультразвуку в матеріалах з неоднорідною структурою. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. Науково-технічний журнал. Одеса. 2012. № 06 (82). С. 39 – 45.
- [3] Montgomery D.C. *Introduction to Statistical Quality Control*. Wiley, 2019

УДК 519.25:621.45

ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛІЗУ ВІБРОСИГНАЛІВ БАГАТОВАЛЬНИХ АВІАЦІЙНИХ ГТД НА ОСНОВІ КАСКАДНОЇ ПНВП- ДЕКОМПОЗИЦІЇ

^{1,2)}Сбродов Є.В., ^{3,4)}Юзефович Р.М., ¹⁾Торба Ю.І.

¹⁾Акціонерне товариство “Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро “Прогрес”
імені академіка О. Г. Івченка”, Запоріжжя, Україна

²⁾Національний університет “Запорізька політехніка” Запоріжжя, Україна

³⁾Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

⁴⁾Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, Україна

E-mail: sbrodov@ukr.net, roman.yuzefovych@gmail.com, torba.yuriy@gmail.com

Вібраційний стан авіаційних газотурбінних двигунів (АГТД) формується внаслідок накладання (суперпозиції) множини складних коливних процесів. Однією з ключових проблем вібродіагностики багатовальних систем є необхідність високоточного розділення детермінованих роторних гармонік та флуктуаційної (стохастичної) складової вібрації в умовах нестационарних режимів експлуатації. Найбільш адекватною математичною моделлю для опису таких коливань є теорія періодично нестационарних випадкових процесів