

## АНОТАЦІЯ

**Свердлова А.Д. Інформаційно-вимірювальна система діагностування складних теплоенергетичних об'єктів із використанням ретроспективної інформації.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня докторки філософії за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка». – Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, Київ, 2020.

У дисертації отримані такі нові наукові результати:

1. Набули подальшого розвитку моделі векторного випадкового процесу, що описують динаміку інформаційних полів за фіксованих просторових координат, які зі свого боку описують процеси в складних теплоенергетичних об'єктах (СТО). Це дало можливість визначити основні параметри діагностування елементів СТО та обґрунтувати загальні вимоги до систем діагностування.

2. Набули подальшого розвитку методи прогнозування аномальних станів СТО з використанням алгоритмів глибинного навчання з архітектурами LSTM і автокодувальника, що дає змогу розробити ефективну, керовану даними систему, яка може обробити події, що сталися тисячі дискретних часових кроків тому, і запам'ятати їх.

3. Уперше обґрунтовано метод діагностування елементів СТО, який базується на застосуванні поточної та ретроспективної інформації, що дало змогу порівнювати прогнозовані показники з поточними, а також урахувати попередні дані експлуатації СТО.

4. Уперше розроблено метод прогнозування відмов елементів СТО в умовах малої кількості аномальних відхилень, що дало змогу підвищити ймовірність прогнозування.

Практичне значення одержаних у дисертаційній роботі результатів полягає в тому, що вперше розроблено інформаційно-вимірювальну систему діагностування із застосуванням нейромережеві технології, що дає змогу оцінювати поточний стан роботи, вчасно виявляти аномальні стани, запобігати можливим вимушеним відключенням, передбачати та планувати заходи з технічного обслуговування. У тому числі: розроблено структуру, виготовлено та експериментально перевірено дослідний зразок модулю багаторівневої системи діагностування елементів СТО, до складу якого можуть входити сенсори різних типів, кількість яких обмежена числом шин зв'язку; розроблено апаратно-програмне забезпечення багаторівневої системи діагностування, що базується на використанні бездротових сенсорних мереж, та використовує mesh-топологію як основний спосіб зв'язку для передачі даних; створено 96 моделей (модифікацій нейронних мереж) для аналізу поточних та ретроспективних даних за температурою поверхні котлів, кожна модель була проаналізована за різних параметрів сигналів та статистично оцінена.

У вступі обґрунтовано актуальність даного напрямку досліджень та вибір теми дисертаційної роботи, сформульовано мету й завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, вказано зв'язок із науковими програмами, особистий внесок здобувача, стан публікацій та апробацію результатів дисертаційного дослідження, наведено відомості про їх впровадження та зазначено структуру роботи.

У першому розділі дисертаційної роботи описано, що загальний технічний стан котелень підприємств комунальної теплоенергетики оцінюється, як незадовільний. Проаналізовано засоби масової інформації щодо аварій на котлоагрегатах за останні роки та причини, що сприяють у них виникненню дефектів. Розглянуто традиційні методи діагностування СТО та особливості методів їх неруйнівного контролю.

У роботі проведено порівняльний аналіз видів обслуговування теплоенергетичного обладнання. Показано переваги прогнозованого обслуговування перед реактивним або профілактичним. Розглянуто принципи Smart Grid в інфраструктурі СТО, показана відмінність від традиційного підходу до обслуговування СТО.

За результатами проведеного аналізу сформульовано мету дослідження у вигляді удосконалення процесу діагностування та прогнозування технічного стану СТО за допомогою розроблення моделей, методів та інформаційно-вимірювальної системи діагностування (ІВСД) стану теплоенергетичних об'єктів із використанням поточної та ретроспективної інформації.

У другому розділі запропоновано функціональну схему процесу діагностування, що дає змогу конкретизувати основні напрямки дослідження, методів опрацювання інформації та технічних рішень, що можуть бути використані під час побудови ІВСД. Запропоновано загальну математичну модель динаміки змін у часі значень вимірювальної величини у вигляді векторного випадкового поля за фіксованих просторових координат.

Досліджено методи інтелектуального аналізу даних для прогнозування та бінарної класифікації часових рядів. Показано що недоліками даних методів є брак формальної теорії, на базі якої будуються такі алгоритми.

Розглянуто методи виявлення аномалій, описано режими розпізнавання «з вчителем», «частково з вчителем» та «без вчителя». Показано, що одними з найбільш широко вживаними механізмами реалізації розпізнавання аномалій за допомогою класифікації є нейронні мережі.

Проаналізовано методи виявлення аномалій за допомогою нейронних мереж, їх переваги та недоліки. Показано, що перевагою глибоких нейронних мереж є автоматичне виділення з даних важливих ознак, однак даний алгоритм часто не є ефективним у разі, коли навчальна вибірка велика, оскільки для обробки всіх її елементів потрібно багато часу. Використання алгоритму

зворотного поширення помилки для ефективного глибокого навчання недостатньо через проблему зникаючого градієнту. Запропоновано та обґрунтовано використання архітектури нейронної мережі з довгою короткочасною пам'яттю LSTM, що дає змогу реалізувати точну керувану даними систему. Основною перевагою запропонованої архітектури є можливість обробляти події, що сталися тисячі дискретних часових кроків тому, і запам'ятовувати їх.

Третій розділ присвячено розробленню апаратної та програмної складників інформаційно-вимірювальної системи. Запропоновано ієрархічну структуру системи технічного діагностування СТО на основі концепції «розумних мереж» Smart Grid, застосування якої дає змогу проводити: первинний добір та підготовку діагностичних сигналів; первинне математичне опрацювання, прийняття первинних діагностичних рішень, сигналізацію про можливі дефекти; накопичення, повноцінне опрацювання та глибокий аналіз даних, швидке реагування на аварійні сигнали з нижчого рівня, прийняття діагностичних рішень щодо об'єкта загалом, архівацію статистичних даних. Основні переваги запропонованої структури: багаторівневість, імплементовані принципи Smart Grid, реалізація у вигляді розподіленого модульного комплексу, можливість використання як дротових, так і бездротових технологій.

Розроблено електричну схему та друковану плату вимірювального модуля, до якого можуть бути включені сенсори тих фізичних величин, які використовуються під час діагностування конкретно заданої системи: магнітні, вібраційні, температури, метеорологічні, твердих часток, контролю концентрації різних речовин та ін. Розроблена узагальнена структура вимірювального каналу для контролю температури поверхні котлоагрегату, на основі якої обрано застосування модулю термопари К-типу з цифровим підсилювачем на мікросхемі MAX6675ISA+T.

Розроблено програмне забезпечення, що складається з програмних пакетів нижнього рівня, верхнього рівня, збору та реєстрації даних, яке дає змогу уніфікувати формати даних та протоколів обміну даними для різних типів сенсорів і засобів зв'язку підсистем, а також між підсистемами. Застосування протоколів для створення самоорганізованої мережі дає змогу представити ІВСД як модульну систему, що забезпечує додавання нових і видалення застарілих модулів із системи без її повної рекомпіляції.

Четвертий розділ присвячено експериментальному дослідженню моделей нейронних мереж та ІВСД. Сформована варіація навчальних параметрів для моделей нейронних мереж із різними навчальними періодами, кількістю прихованих шарів та нейронів. Розроблено програму навчання нейронних мереж.

Наведено критерії оцінювання моделей нейронних мереж на основі коефіцієнту детермінації. Здійснено валідацію та перевірку розроблених моделей нейронних мереж. Модель 2С8 з періодом навчання 12 місяців, 4 прихованими шарами та 90 прихованими нейронами показала дуже добрий результат ( $0,85 < R^2 \leq 1,0$ ) та була обрана в якості еталонної моделі. Це дало змогу прогнозувати аномальний стан СТО з коефіцієнтом детермінації 0,965 на основі вимірювання температури поверхні теплоенергетичного обладнання, що може бути використано як показник технічного стану.

Проаналізовано набір варіацій навчальних параметрів серед розроблених моделей та вплив кількості прихованих нейронів на ефективність моделі. Показано, що навчальний період в один місяць є занадто коротким, щоб мережа повністю ідентифікувала особливості процесу. Моделі з навчальним періодом 4 місяці мають кращі характеристики прогнозування, проте продуктивність моделей із навчальним періодом 12 місяців відрізняється найбільше. Точність моделей зростає із додаванням двох прихованих шарів.

За результатами тестування розробленої системи встановлено, що досягнуті процентні співвідношення виявлених і помилкових спрацьовувань є

прийнятними показниками для використання цих даних в експлуатації та під час ремонту, скорочення тривалості позапланового простою обладнання.

Перевірка результатів експериментального дослідження системи прогнозування відмов обладнання в реальних умовах показала збільшення достовірності прогнозування аномальних станів на 9 %.

Обґрунтовано, що метрологічне забезпечення вимірювань із застосуванням інформаційно-вимірювальної системи діагностування базується на встановленні метрологічних характеристик її вимірювальних каналів. Основним методом визначення метрологічних характеристик вимірювальних каналів під час діагностування СТО є розрахунковий, що включає оцінювання метрологічних характеристик їхніх компонентів.

У роботі набув подальший розвиток метод діагностування та прогнозування технічного стану СТО, який базується на застосуванні поточної та ретроспективної інформації, що дало змогу порівнювати прогнозовані показники з поточними, а також враховувати попередні дані експлуатації СТО.

Результати дослідження впроваджені та знайшли практичне застосування в ТОВ НВП «Машинобудування» (м. Дніпро) при розробленні методу та структури системи діагностування теплотехнічного обладнання, що базується на технології «розумних мереж» Smart Grid (акт від 22.11.2016), при розробленні математичних моделей добору діагностичних ознак конструктивних елементів теплоенергетичних об'єктів та створенні структури вимірювального модуля системи діагностування теплоенергетичного обладнання (акт від 23.11.2017).

**Ключові слова:** інформаційно-вимірювальна система, діагностування, теплоенергетичне обладнання, нейронні мережі, машинне навчання, метрологічне оцінювання.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, у яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Бабак, В.П., Запорожець, А.О., & Сverdлова, А.Д. (2016). Технологія Smart Grid в системах моніторингу об'єктів теплоенергетики. *Промислова теплотехніка*, ISSN 0204–3602, 38(6), 71–81. <https://doi.org/10.31472/ihe.6.2016.10>
2. Бабак, В.П., Запорожець, А.А., & Сverdлова, А.Д. (2016). Диагностика технического состояния объектов теплоэнергетики на базе распределенных вычислительных инфраструктур. *Научные известия ИТСМ Болгарской академии наук*, ISSN 1310–3946, 187(1), 85–89.
3. Запорожець, А.О., & Сverdлова, А.Д. (2017). Особенности применения технологии Smart Grid в системах мониторинга и диагностирования теплоэнергетических объектов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, ISSN 0235–3474, 2, 33–41. Doi: 10.15407/tdnk2017.02.05
4. Babak, V., Babak, S., Zaporozhets, A., & Sverdlova, A. (2019). Method of Statistical Spline Functions for Solving Problems of Data Approximation and Prediction of Objects State. In D. Luengo, S. Subbotin, P. Arras, Y. Bodyanskiy, K. Henke, I. Izonin, V. Levashenko, V. Lytvynenko, A. Parkhomenko, A. Pester, N. Shakhovska, A. Sharpanskykh, G. Tabunshchik, C. Wolff, H.-D. Wuttke, & E. Zaitseva, Proceedings of the Second International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2019) (pp. 810–821). CEUR Workshop Proceedings, ISSN 1613–0073, Vol. 2353. **SCOPUS**

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Запорожець, А.О., & Свердлова, А.Д. (2016). Розроблення ієрархічної системи діагностування теплоенергетичного обладнання. Збірник доповідей 8-ї Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2016». (с. 152–157). Київ, 22–25 листопада.

6. Запорожець, А.О., & Свердлова, А.Д. (2017). Особливості застосування машинного навчання в системах діагностики енергетичних об'єктів. Тези доповідей X Міжнародної конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики», Київ, 23–26 травня.

7. Запорожець, А.О., & Свердлова, А.Д. (2018). Розроблення вимірювальних модулів ієрархічної системи діагностування енергетичного обладнання на базі Smart Grid технологій. Збірник тез науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. ГЄ Пухова НАН України (до 100-річчя Національної академії наук України). (с. 65–66). Київ, 16 травня.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

8. Запорожець, А.О., Редько, А.А., & Свердлова, А.Д. (2016). Разработка многоуровневой системы диагностики теплотехнического оборудования. *Мультидисциплинарный научный журнал «Архивариус»*, 13(1), 89–94.

9. Запорожець, А.О., & Свердлова, А.Д. (2017). Аналіз методів діагностування теплоенергетичних об'єктів. *Наукоємні технології*, 35(3), 259–265. doi: 10.18372/2310–5461.35.11846



10. Свердлов, А.Д. (2019). Особенности mesh-сети для диагностирования энергетического оборудования на базе мультисенсорных систем, *Мультидисциплинарный научный журнал «Архивариус»*. 7(1), 85–91.

11. Eremenko, V., Zaporozhets, A., & Sverdlova A. (2019) Application of the Hilbert transform in diagnosis using the impedance method. *IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 764–769.

## SUMMARY

**Sverdlova A. Information and measurement system for diagnosing complex thermal power facilities using retrospective information.** – Qualifying scientific work on the basis of handwriting.

Thesis for a PhD degree on a specialty 152 «Metrology and information-measuring techniques». – Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2020.

In the dissertation the following new scientific results are obtained:

1. Models of vector random processes that describe the dynamics of information fields at fixed spatial coordinates that describe processes in complex thermal power objects have been developed further. This made determining the basic parameters for diagnosing elements of complex thermal power facilities (CTPF) and to substantiate the general requirements for diagnostic systems possible.

2. Methods for predicting anomalous complex heat and power facility states using in-depth learning algorithms with LSTM architecture and autocoder have been further developed, which allows to develop an accurate data-driven system that can process events thousands of discrete time steps back and remember these events.

3. For the first time, a method of diagnosing complex heat and power facility elements was substantiated, which is based on the use of current and retrospective information, which made it possible to compare the forecast indicators with the current ones, as well as take into account preliminary data on operation of CTPF.

4. For the first time, a method for predicting failures of complex heat and power facility elements in the conditions of a few anomalous deviations was developed, which made it possible to increase the probability of forecasts.

The practical significance of the results obtained in the dissertation is that for the first time developed an information-measuring system of diagnosis, which includes neural network technologies that allow to assess the current state of work, detect abnormalities, prevent possible shutdowns, anticipate and plan measures of maintenance. In particular, a structure was developed, a module prototype of a multilevel system for diagnosing elements of CTPF was developed and experimentally tested, which may include sensors of different types, the number of which is limited only by the number of communication buses; hardware and software for a multi-level diagnostic system based on the use of wireless sensor networks were developed and use the mesh topology as the main method of communication for data transmission; 96 models (modifications of neural networks) were created for analysis of current and retrospective data on boiler surface temperature, each model was analyzed at different signal parameters and statistically evaluated.

In the first section, the relevance of this area of sufficiency and the choice of the topic of the dissertation, formulated the purpose and tasks of the research, the scientific novelty and the practical significance of the results obtained, the link with the scientific programs, the personal contribution of the applicant, the state of publications and the approbation of the results of the dissertation research, information on their implementation and the structure of work were showed on the introduction.

In the dissertation work it is described that the general technical condition of boiler-house enterprises of municipal heat power is rated as unsatisfactory. Mass media on boiler room accidents in recent years and the reasons that contribute to the occurrence of defects are analyzed. Traditional methods of diagnosing complex thermal power objects and features of non-destructive testing methods are considered.

The comparative analysis of types of service of the heat power equipment is carried out in this work. The advantages of the forecasted service in comparison to the reactive or preventive one are shown. The principles of Smart Grid in the infrastructure of complex heat facilities are considered, the difference from the traditional approach to the maintenance of complex heat facilities is shown.

As the result of the analysis the purpose of the research is to improve the process of diagnosing and forecasting the technical condition of CTPF by developing models, methods and information-measuring systems for diagnosing (IMSD) the condition of thermal power facilities using current and retrospective information.

In the second section the functional scheme of the diagnostic process is proposed, which allows to specify the main direction of research, methods of information processing and technical solutions that can be used in the construction of information and measuring system of diagnosis. A general mathematical model of the dynamics of changes in time of the values of the measured quantity in the form of a vector random field at fixed spatial coordinates is proposed.

Methods of data analysis for forecasting and binary classification are studied. It is shown that the disadvantages of these methods are the lack of an official theory on the basis of which such algorithms are built.

Methods of anomaly detection are considered, modes of recognition with the supervised learning, partially with the supervision and without the supervision are described. It is shown that one of the most widely used mechanisms of realization of anomaly recognition by means of classification is neural networks.

Methods of detecting anomalies using neural networks, their advantages and disadvantages are analyzed. It is shown that the advantage of deep neural networks is the automatic selection of these important features, but this algorithm is often not effective when the training sample is large, as it takes a long time to process all its elements. The error backpropagation algorithm is not sufficient for effective deep learning due to the disappearing gradient problem. The use of neural network

architecture with long short-term LSTM memory is proposed and substantiated, which allows the execution of an accurate data-driven system. The main advantage of this architecture is the ability to process events that occurred thousands of discrete time steps back, and remember these events.

The third section is devoted to the development of hardware and software components of the information and measurement system. The hierarchical structure of the system of technical diagnostics of complex thermal power objects on the basis of the concept of «smart networks». Smart Grid is proposed, the application of which allows to carry out the following: initial selection and preparation of diagnostic signals; primary mathematical processing, primary diagnostic decisions, warning of possible defects; accumulation, full-fledged processing and deep analysis of data, fast response to warnings from the lower level, making diagnostic decisions on the object as a whole, archiving of statistical data. The main advantages of the proposed structure are: multilevel of the structure, implemented principles of Smart Grid, implementation in the form of a distributed modular complex, the ability to use both wired and wireless technologies.

The electric scheme and printed circuit board of the measuring module which can include sensors of those physical sizes which are used for diagnostics of a specific system: magnetic, vibrating, temperature, meteorological, firm particles, control of concentration of various substances, etc. is developed. A generalized structure of the measuring channel for temperature control of the boiler unit has been developed, on the basis of which the application of the K-type thermocouple module with a digital amplifier of the MAX6675ISA + T chip has been selected.

Software has been developed consisting of lower-level, upper-level software packages, data collection and registration, which allows to unify data formats and data exchange protocols for different types of sensors and communication subsystems, as well as between subsystems. The use of protocols for the creation of a self-organized network allows to present the information-measuring systems for diagnosing as a

modular system that provides the addition of new and removal of obsolete modules from the system without its complete recompilation.

The fourth section is devoted to the experimental study of neural network models and IMSD. Variation of educational parameters for models of neural networks with different educational periods, number of hidden layers and neurons is formed. A training program for neural networks has been developed.

The criteria for evaluating neural network models based on the coefficient of determination are given. Validation and verification of the developed models of neural networks are carried out. Model 2C8 with a training period of 12 months, 4 hidden layers and 90 hidden neurons showed very good results and was selected as a reference model. This made it possible to predict the anomalous condition of the complex heat and power facility with a coefficient of determination of 0.965 based on the measurement of the surface temperature of thermal power equipment, which can be used as an indicator of technical condition.

The set of variations of educational parameters among the developed models and the influence of the number of hidden neurons on the efficiency of the model were analyzed. It is shown that the training period of one month is too short for the network to learn about the process. Models with a training period of four months have better forecasting characteristics, but the performance of models with a training period of 12 months differs the most. The accuracy of the models increases with the addition of two hidden layers.

According to the results of testing the developed system, it is established that the achieved percentages of detected and false positives are acceptable indicators for the use of these data in operation and during repair, reducing the duration of unscheduled equipment downtime.

Verification of the results of the experimental study of the system for forecasting equipment failures in real conditions showed an increase in the reliability of forecasting anomalous states by 9 %.

It is substantiated that metrological support of measurements with application of information-measuring system of diagnostics is based on establishment of metrological characteristics of its measuring channels. The main method of determining the metrological characteristics of measuring channels in the diagnosis of CTPF is the calculation, which includes estimates of metrological characteristics of their components.

The work further developed the method of diagnosing and prediction of the technical condition of the CTPF, which is based on the use of current and retrospective information, which allowed to compare the predicted indicators with the current ones, as well as take into account the previous data from the operation of the CTPF.

The research results are implemented and found practical application in LLC SPE «Machine Building» (Dnipro) in the development of the method and structure of the diagnostic system of heating equipment based on the technology of «smart networks» Smart Grid (acceptance act from 22.11.2016), in the development of mathematical models selection of diagnostic features of structural elements of thermal power facilities and creation of the structure of the measuring module of the system for diagnosing thermal power equipment (acceptance act of 23.11.2017).

**Keywords:** information-measuring systems, diagnosis, thermal power equipment, neural networks, machine learning, metrological evaluation.

## LIST OF PUBLICATIONS OF THE APPLICANT

*Scientific works major scientific results of the thesis are published at:*

1. V. P. Babak, A. A. Zaporozhets and A. D. Sverdlova, «Smart Grid Technology in Monitoring Systems for Thermal Power Facilities», «Industrial Heat Engineering, ISSN 0204–3602, vol. 38, No. 6, pp. 71–81, 2016., DOI: 10.31472/ihe.6.2016.10

2. V. P. Babak, A. A. Zaporozhets and A. D. Sverdlova, «Diagnostics of the technical state of thermal power facilities based on distributed computing,»Scientific news of NTSM, ISSN 1310–3946, vol. 187, No. 1, pp. 85–89, 2016.

3. A. A. Zaporozhets and A. D. Sverdlova, «Features of application of Smart Grid technology in monitoring and diagnostics systems of thermal power facilities,»Technical diagnostics and non-destructive testing, ISSN 0235–3474 No. 2, pp. 33–41, 2017. DOI: 10.15407/tdnk2017.02.05

4. V. Babak, S. Babak, A. Zaporozhets and A. Sverdlova, «Method of Statistical Spline Functions for Solving Problems of Data Approx-imation and Prediction of Objects State," in *Proceedings of the Second International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2019)*, CEUR Workshop Proceedings, 2019, pp. 810–821. **SCOPUS**

*Scientific works certifying approbation of the thesis material:*

5. A. A. Zaporozhets and A. D. Sverdlova, «Development of a hierarchical system for diagnosing thermal power equipment," at the 8th National Scientific and Technical Conference UkrNDT-2016, Kyiv, 2016.

6. A. A. Zaporozhets and A. D. Sverdlova, «Features of the use of machine learning in the diagnostic systems of energy facilities," in the X International Conference «Problems of Thermophysics and Thermal Power Engineering,»Kyiv, 2017.

7. A. A. Zaporozhets and A. D. Sverdlova, «Development of measuring modules of the hierarchical system for diagnosing energy equipment based on Smart Grid technologies," at the Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists of the G.E. Pukhova Institute of Modeling



Problems in Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2018.

*Scientific works that additionally reflect the scientific results of the thesis:*

8. Zaporozhets, A. A. Redko and A. D. Sverdlova, «Development of a multi-level diagnostic system for thermal equipment,» *Multidisciplinary scientific journal «Archivist,* vol. 1, No. 13, pp. 9–13, 2016.

9. Zaporozhets and A. D. Sverdlova, «Analysis of methods for diagnosing thermal power facilities,» *Science-intensive technologies,* pp. 259–265, 2017. DOI: 10.18372/2310–5461.35.11846

10. Sverdlova, «Special Features of Mesh-Merezhi for the Diagnostuvannya of Energetic Possessed on the Basis of Multisensory Systems,» *Multi-Disciplinary Science Magazine «Archivarius,* vol. 1, No. 13, pp. 9–13, 2019.

11. V. Eremenko, A. Zaporozhets and A. Sverdlova, «Application of the Hilbert transform in diagnosis using the impedance method,» in *IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology,* Kyiv, 2019.