МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ПАВЛИК ВОЛОДИМИР ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 628.517.622.691.4.052

ДИСЕРТАЦІЯ

КОМПЛЕКСНИЙ МЕТОД І СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ

05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин
(шифр і назва спеціальності)

15 – автоматизація та приладобудування
(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

/ В. В. Павлик/

Ідентичність всіх примірників дисертації

Засвідчую

Вчений секретар спеціалізованої

вченої ради Д 20.052.03 /Т. В. Гуменюк/

Підпис Т. В. Гуменюка засвідчую:

Учений секретар університету / В. Р. Процюк/

Науковий керівник – д. т. н., професор Заміховський Леонід Михайлович

Івано-Франківськ - 2021

АНОТАЦІЯ

Павлик В.В. Комплексний метод та система контролю технічного стану газоперекачувальних агрегатів великої потужності. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, 2021.

Проаналізовано переваги і недоліки методів діагностування ГПА з САУ та обґрунтована можливість використання методів ідентифікації об’єктів, а також сучасних інформаційних технологій щодо обробки віброакустичних процесів для вирішення поставлених в роботі задач.

Розроблені теоретичні засади методу діагностування технічного стану САУ ГТК-25і за їх розгінними характеристиками. При цьому технічний стан САУ ГПА визначається за зміною площі, яка утворена перехідною характеристикою і є діагностичною ознакою, зміна якої характеризує зміну технічного стану ГПА .

Для визначення технічного стану ГТК-25і запропоновано використати двошарові ієрархічні нейронні мережі прямого поширення, що тренуються за алгоритмом зворотного поширення похибки, а моделювання «дефектного» та «номінального» станів проводити на основі отриманих результатів вимірювання і обробки характеристик акустичних процесів, які генеруються ГПА в процесі експлуатації.

Досліджені статистичні характеристики акустичних процесів ГТК-25і та визначені діагностичні ознаки, які можуть бути покладені в основу методів контролю його технічного стану.

За результатами експериментальних досліджень розроблені: метод параметричної діагностики технічного стану ГТК-25і, що базується на визначенні найбільших значень дискримінантних функцій досліджуваного ГТК-25і для

кожного з його технічних станів за 16 технологічними параметрами; метод, діагностичною ознакою якого є величина норми вейвлет-складової деталізації п'ятого порядку D5, отримана шляхом обробки акустичних процесів супроводжуючих роботу ГТК-25і; штучна нейронна мережа, яка пройшла навчання на експериментальних даних, результати якого дозволяють чітко розрізнити два стани «незадовільний» та «номінальний».

Розглянута процедура визначення показника готовності на основі статистичних даних по відмовах САУ ГТК-25і та розраховане його значення $П_г$=0.93, що підтверджує ефективність розробленого методу діагностування САУ ГТК-25і.

Ключові слова: методи діагностування, діагностична ознака, технічний стан, розгінна характеристика, експериментальні дані, ГПА, САУ, штучні нейронні мережі, вейвлет-перетворення, дискримінантний аналіз, акустичний процес, система діагностування.

АННОТАЦИЯ

Павлык В.В. Комплексный метод и система контроля технического состояния газоперекачивающих агрегатов большой мощности. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 - приборы и методы контроля и определения состава веществ. - Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, г. Ивано-Франковск, 2021.

Проанализированы преимущества и недостатки методов диагностирования ГПА с САУ и обоснована возможность использования методов идентификации объектов, а также современных информационных технологий по обработке виброакустических процессов для решения поставленных в работе задач.

Разработаны теоретические основы метода диагностирования технического состояния САУ ГТК-25i по их разгонным характеристикам. При этом техническое состояние САУ ГПА определяется изменением площади, образованной переходной характеристикой, являющейся диагностическим признаком, изменение которого характеризует изменение технического состояния ГПА.

Для определения технического состояния ГТК-25i предложено использовать двухслойные иерархические нейронные сети прямого распространения, тренирующиеся по алгоритму обратного распространения ошибки, а моделирование «дефектного» и «номинального» состояний проводить на основании полученных результатов измерения и обработки характеристик акустических процессов, генерируемых ГПА в процессе его эксплуатации.

Исследованы статистические характеристики акустических процессов ГТК-25i и определены диагностические признаки, которые могут быть положены в основу методов контроля его технического состояния.

По результатам экспериментальных исследований разработаны: метод параметрической диагностики технического состояния ГТК-25i, основанный на определении наибольших значений дискриминантных функций исследуемого

ГТК-25i для каждого из его технических состояний за 16 технологическими параметрами; метод, диагностическим признаком которого является величина нормы вейвлет-составляющей детализации пятого порядка D5, полученная путем обработки акустических процессов, сопровождающих работу ГТК-25i; искусственная нейронная сеть, которая прошла обучение на экспериментальных данных, результаты которого позволяют четко различить два состояния «дефектное» и «номинальное».

Рассмотрена процедура определения показателя готовности основанная на статистических данных по отказам САУ ГТК-25i и рассчитано его значение *Пг*=0.93, которое подтверждает эффективность разработанного метода диагностирования САУ ГТК-25i.

Ключевые слова: методы диагностики, диагностический признак, техническое состояние, разгонная характеристика, экспериментальные данные, ГПА, САУ, искусственные нейронные сети, вейвлет-преобразования, дискриминантный анализ, акустический процесс, система диагностирования.

ABSTRACT

Pawlyk V.V. **An integrated method and system for monitoring the technical condition of high-capacity gas-pumping units. - Qualifying scientific work as a manuscript.**

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.11.13 - devices and methods for monitoring and determining the composition of substances. - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2021.

The advantages and disadvantages of methods for diagnosing a gas pumping unit with an automatic control system are analyzed, the absence of a systematic approach to their development is established and the possibility of using methods for identifying objects, as well as modern information technologies for processing vibroacoustic processes when modernizing existing and developing new diagnostic methods for a gas pumping unit with an automatic management. The theoretical foundations of the method for diagnosing the technical state of the GTK-25-I automatic control system and by their acceleration characteristics have been developed. In this case, the technical state of the automatic control system of the gas pumping unit is determined by the change in the area formed by the transient characteristic and is a diagnostic feature that characterizes the change in the technical state of the gas pumping unit. To determine the technical state of GTK-25-i, it is proposed to use two-layer hierarchical neural networks of feedforward propagation, training according to the error backpropagation algorithm, and modeling the "defective" and "nominal" states based on the obtained measurement results and processing the characteristics of acoustic processes generated by the gas pumping unit in during operation. Methodological, technical and software support has been developed for conducting experimental studies, taking into account the peculiarities and operating conditions of the GTK-25-i, the selection and installation of additional sensors of technological parameters is justified, an acoustic monitoring system of its state and a complex software package for monitoring the state of the GTK-25-I have been done.

The statistical characteristics of the acoustic processes of GTK-25-I certain diagnostic features that can be used as the basis for methods for monitoring its technical

condition have been investigated. Based on the results of experimental studies, the following have been developed: a method for parametric diagnostics of the technical state of GTK-25-I, based on the determination of the highest values of the discriminant functions of the GTK-25-I under study and for each of its technical states for 16 technological parameters; method, the diagnostic feature of which is the value of the norm of the wavelet component of the fifth-order detailing D5, obtained by processing the acoustic processes accompanying the operation of the GTK-25-I; an artificial neural network that was trained on experimental data, the results of which make it possible to clearly distinguish between two states "unsatisfactory" and "nominal". The procedure for determining the readiness indicator on the basis of statistical data on failures of the GTK-25-i automatic control system is considered and its value *Ri*=0.93 is calculated, which confirms the effectiveness of the developed method for diagnosing the GTK-25-i automatic control system. *Key words:* diagnostic methods, diagnostic feature, technical condition, acceleration characteristic, experimental data, gas pumping unit, automatic control system, artificial neural networks, wavelet transformations, discriminant analysis, acoustic process, diagnostics system.

ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Reseach of the characteristics of acoustic processes using wavelet transformation for detecting a diagnostic sign of the technical state of gas pumping units. Zamikhovskiy L., Zamikhovska O., Pavlyk V. Technology audit and production reserves, 2021. № 1/2(57). P. 6-12. DOI: 10.15587/2706-5448.2021.224432 (***Фахове видання, Index Copernicus***).

2. Development method for estimating the technical condition of gas pumping units by their accelerating characteristic. M. Gorbiychuk, O. Zamikhovska, L. Zamikhovskyi, V. Pawlyk. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. № 3/2 (105). 2020. P. 48 – 57 (***Фахове видання, Scopus***).

3. Заміховський Л. М. Удосконалення системи автоматичного управління газоперекачувальними агрегатами з врахуванням їх технічного стану. Л. М. Заміховський, О. Л. Заміховська, Н.І. Іванюк, В.В. Павлик. Нафтогазова енергетика. 2020. № 2(34). С. 84-95 (***Фахове видання***).

4. Заміховський Л.М. Методика контролю технічного стану газоперекачувального агрегату ГТК-25і в процесі експлуатації. Л. М. Заміховський, О.Л. Заміховська, В.В. Павлик. Науковий вісник ІФНТУНГ. 2020. № 2(49). С. 106-116 (***Фахове видання***).

5. Замиховский Л.М. Исследование диагностических признаков технического состояния газоперекачивающих агрегатов ГТК - 25і фирмы Нуово-Пиньоне. Л. М. Замиховский, В.В. Павлык. Молодой ученый. 2014. №15(74). С. 75-79. (***Index Copernicus***).

6. Заміховський Л. М., Павлик В. В. Дослідження вібраційного стану осьового компресора ГПА ГТК 25і фірми «Нуово Піньйоне». Методи і прилади контролю якості. 2014. № 1(32). С.28-38 (***Фахове видання***).

7. Павлик В.В. Напрямки підвищення ефективності експлуатації газоперекачувальних агрегатів в умовах Богородчанського ЛВУМГ. В.В. Павлик. Наукові вісті Галицької Академії. № 2(22). Івано-Франківськ, 2012. С.44-49.

8. Павлик В.В. Контроль стану повітряних фільтрів осьового компресора

В. В. Павлик, І.М. Вовк. Трубопровідний транспорт. № 2(80), березень-квітень 2013. С. 30-31.

9. Павлик В.В. Модернізація ГТС. Зроблено в Україні. В. В. Павлик, З. Й. Концур, І.М. Вовк, В.В. Дихнілкін. Журнал «Мир Автоматизации» №3(37), вересень 2012. С.84-88.

10. Павлик В.В. Епоха модернізації: модернізація загальностанційної системи керування КС-21 «Союз»; створення інформаційно – вимірювально системи на КС-7 магістрального газопроводу «К-А-Ч-Б» Богородчанського ЛВУМГ. В. В. Павлик, З. Й. Концур, Б. Ф. Труфан. Трубопровідний транспорт. № 4 (64), липень-серпень 2010. С. 16-18.

11. Павлик В. В. Організація комп'ютеризованого контролю рівня охолоджувальної рідини в розширювальних баках ГПА (газоперекачувальних агрегатів) ГТК 10-і. В.В. Павлик, З. Й. Концур. Трубопровідний транспорт. № 4(54), листопад-грудень 2008. С. 20-21.

12. Павлик В.В. Модернізація реєструючих пристроїв, систем керування на КС (компресорній станції) №39 газопроводу «Уренгой-Помари-Ужгород» Богородчанського ЛВУМГ. В. В. Павлик, І. М. Вовк, В. Я. Вигодованок. Трубопровідний транспорт». № 4(54), листопад-грудень 2008.С. 21-23.

13. Павлик В.В. Модернізація системи обліку паливно-пускового газу на КС №21 газопроводу «Союз». В.В. Павлик. Інформаційний огляд ДК «Укртрансгаз», 2000. № 3(5). 6 с.

14. Estimation of the readiness indicator of the diagnostic system of gas-pumping units. L. Zamikhovskyi, S. Zikratyi, N. Ivanyuk, V. Pawlyk. Science and education: problems, prospects and innovations. Abstracts of the 3rd International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Kyoto, Japan. 2020. P. 134-139.

15. A complex approach to the development of methods of control and diagnosis of the technical condition of gas pumping units. L. Zamikhovskyi, N. Ivanyuk, O. Mirzoieva, V. Pawlyk. The 10th International scientific and practical conference "Dynamics of the development of world science" (June 10-12, 2020) Perfect Publishing, ISBN 978-1-4879, Vancouver, Canada. 2020. P. 215-224.

16. Zamikhovskyi L. Diagnosing the technical condition of the gas pumping unit type GTK-25 on the basis of modern information technologies. L. Zamikhovskyi, V. Pawlyk. Open conference systems, innovative ideas in science 2017. 2018. Режим доступу до ресурсу: http://conf.cunbm.utcluj.ro/index.php/iis/iis2018/author/submission/262.

17. Заміховський Л. М. Контроль технічного стану газоперекачувальних агрегатів на базі штучних нейромереж. Л. М. Заміховський, В. В. Павлик. Нафтогазова енергетика - 2017: Міжнародна науково-технічна конференція, Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017 р. С. 317-318.

18. Zamikhovskyi L. Methods of diagnosing the technical state of the gas-pumping unit GTC -25I of Nuovo Pignone company. L. Zamikhovskyi, V. Pawlyk. Open conference systems, innovative ideas in science 2017. Banja Luka on 02 - 03 November 2017, Bosnia and Herzegovina.2017. Режим доступу до ресурсу: http://conf.cunbm.utcluj.ro/index.php/iis/iis2017/paper/view/233.

19. Заміховський Л.М. Використання вейвлет-перетворення для визначення технічного стану газоперекачувальних агрегатів. Л.М. Заміховський, Н.І. Іванюк, В.В. Павлик. Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйн. контролю і техн. діагност. машинобуд. і нафтогазопром. обладн.: VIII Міжнар. наук.-техн. конф., Івано-Франківськ, 14-16 листопада 2017р. С.132-133.

20. Заміховський Л.М. Дослідження технічного стану ГПА ГТК 25і методами дискримінантного аналізу. Л.М. Заміховський, В.В.Павлик. Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах: IV Міжнародна наукова конференція, Вінниця, 31 жовтня - 02листопада 2017 р. С.258-259.

21. Заміховський Л. М. Використання дискримінантного аналізу для вибору діагностичної ознаки технічного стану газоперекачувальних агрегатів ГПА. Л. М. Заміховський, В.В. Павлик. Summer Info Com 2017: Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 1-2 червня 2017р. К.: Вид-во ТОВ «Інжиніринг», 2017. С. 32-33.

22. Заміховський Л.М. Дослідження статистичних характеристик параметрів ГПА ГТУ - 25і . Л.М. Заміховський, В.В. Павлик. Вимір., контр. та діагност. в

техн. системах: III-а Міжнар. наук. конф., Вінниця, 27-29 жовтня 2015 р. С. 145-146.

23. Заміховський Л. М. Контроль вібраційного стану осьового компресора. Л. М. Заміховський, В. В. Павлик. Нафтогазова енергетика 2013: Міжнародна науково-технічна конференція, Івано-Франківськ, 07-11 жовтня 2013 р. С.249-250.

24. Заміховський Л.М. Дослідження діагностичних ознак вібраційного стану осьового компресора ГТК 25і. Л. М. Заміховський, В. В. Павлик. Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах: II-а Міжнародна наукова конференція, Вінниця, 29-30 жовтня 2013 р. С. 74.

25. Заміховський Л.М. Модернізація, підвищення надійності роботи агрегатних, загальностанційних систем автоматичного керування на газоперекачувальних компресорних станціях, організація сучасного моніторингу, діагностики стану технологічного обладнання. Л. М. Заміховський, В.В. Павлик. Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу: матеріали Міжн. наук.-техн. конф. 15-18 трав. 2012р. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2012. С. 105-106.

26. Заміховський Л.М. Діагностування технічного стану газоперекачувальних агрегатів в процесі експлуатації. Л. М. Заміховський, В. В. Павлик, Н. І. Іванюк. Вчені Прикарпаття – сталому розвитку краю: обласна науково-практична конференція.Збірник тез доповідей [Упорядкування і загальна редакція д.е.н., проф. Петренка В. П.] – Івано-Франківськ : ПП Курилюк, 2012. С. 81-84.

27. Заміховський Л. М. Контроль технічного стану осьового компресора газоперекачувального агрегата. Л. М. Заміховський, В. В. Павлик. Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах: I Міжнародна наукова конференція, Вінниця, 18-20 жовтня 2011 р. С. 97.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І ОДИНИЦЬ…….. 14
ВСТУП…….. 15
1. СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ…….. 22
1.1 Конструктивні особливості ГПА ГТК-25і з точки зору контролепридатності…….. 22
1.2 Аналіз статистичних даних по відмовах ГТК-25і і причини, що їх зумовлюють…….. 24
1.2.1 Аналіз статистичних даних з відмов механічного обладнання ГТК-25і і причини, що їх зумовлюють……... 29
1.2.2 Аналіз статистичних даних по відмовах систем автоматичного управління ГТК-25і і причини, що їх зумовлюють……..... 31
1.3 Аналіз методів діагностування технічного стану ГПА…… 34
1.3.1 Аналіз методів параметричної діагностики технічного стану ГПА….. 35
1.3.2 Аналіз методів віброакустичної діагностики технічного стану ГПА… 41
1.4 Аналіз методів діагностування систем автоматичного управління…….. 44
1.5 Висновки і постановка задачі досліджень……... 47
2. МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ РОЗРОБКИ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ГТК-25І ТА ЙОГО САУ…… 50
2.1 Теоретичні передумови розробки методу діагностування стану САУ…. 50
2.2 Метод діагностування технічного стану системи автоматичного управління ГТК-25і за зміною площ його нормованих передавальних функцій….. 56
2.3 Використання штучних нейронних мереж для діагностування технічного стану ГПА. Вихідні положення…….. 60
2.4 Вибір структури нейромережі для діагностуання технічного стану ГТК-25і та її вхідних параметрів…….…… 62

Висновки до розділу 2…….. 66
3. РОЗРОБКА ДІАГНОСТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГТК-25і і САУ ТА ЇХ РЕЗУЛЬТАТИ…… 67
3.1 Методика проведення експериментальних досліджень……... 67
3.2 Технічне забезпечення експериментальних досліджень…….. 68
3.2.1 Обгрунтування місця встановлення давача акустичних коливань на корпусі осьового компресора та його вибір……... 71
3.3 Програмне забезпечення експериментальних досліджень…….. 75
3.4 Експериментальні дослідження вібраційного стану осьового компресора ГТК-25і…… 80
3.5 Дослідження статистичних характеристик акустичних процесів ГТК-25і…….. 95
Висновки до розділу 3…… 101
4. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГТК-25І ТА ЙОГО САУ…… 103
4.1 Розроблення методу діагностування САУ ГТК-25і…….. 103
4.2 Комплексний метод діагностування технічного стану ГТК-25і на базі дискримінантного аналізу……... 108
4.3 Використання вейвлет-перетворення для контролю технічного стану ГТК-25і…… 117
4.4 Побудова штучної нейронної мережі для діагностування технічного стану ГТК-25і…….. 123
4.5 Оцінка показника готовності системи діагностування САУ ГТК-25і……... 129
Висновки до розділу 4…… 134
ВИСНОВКИ…… 136
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……... 138
ДОДАТКИ……... 151

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І ОДИНИЦЬ

АПО – апарат повітряного охолодження

АЧХ – амплітудо-частотна характеристика

ВН – відцентровий нагнітач

ГТУ – газотурбінна установка

ГПА – газоперекачувальний агрегат

ГТС – газотранспортна система

САУ– система автоматичного управління

ДМ – діагностична модель

КС – компресорна станція

ЛВУМГ – лінійне виробниче управління магістральних газопроводів

ОД – об’єкт діагностування

ОК – осьовий компресор

ТВТ – турбіна високого тиску

ТНТ – турбіна низького тиску

ТЗД – технічні засоби діагностування

ФЧХ – фазо-частотна характеристика

ШНМ – штучні нейронні мережі

ВСТУП

Актуальність роботи. Газотранспортна система (ГТС) України є однією з найбільших у світі як за протяжністю, так і за обсягом транзиту газу. Кількість компресорних станцій (КС) ГТС становить 72, де встановлено 702 газоперекачувальних агрегатів (ГПА) загальною потужністю 5,4 тис. МВт. Кількість типів ГПА, які використовуються у складі КС, нараховує понад 25 різновидів, з яких газотурбінні ГПА становлять - 76,7% (20 типів). Серед ГПА з газотурбінним приводом частка ГПА великої потужності – 25 МВт типу ГТК-25і та ГПА-25С складає 18,6%, що становить значний відсоток від загальної потужності газотурбінних ГПА. ГПА типу ГТК-25і італійської фірми «Нуово-Піньйоне» були введені в експлуатацію на початку 80-років після завершення будівництва трансконтинентального газопроводу «Уренгой-Помари-Ужгород».
6 ГПА-25С вітчизняного виробництва були введені в експлуатацію протягом останніх 6 років, всього на газопроводі «Уренгой-Помари-Ужгород» встановлено 120 ГПА потужністю 25МВт.

Сьогодні більше 60% ГПА ГТК-25і відпрацювали встановлений моторесурс, або близькі до цього. Подальша їх експлуатація не забезпечує надійної і ефективної роботи, у зв’язку з чим виникають багаточисельні відмови та аварії, що призводять до значних економічних збитків.

Враховуючи, що разом з ГТК-25і поставлялися системи автоматичного управління (САУ), які на даний час є морально застарілими і практично вичерпали свій ресурс, то актуальною є задача підвищення ефективності і надійності роботи ГТК-25і в комплексі з САУ, що вимагає застосування методів і засобів технічної діагностики, які забезпечать експлуатацію ГТК-25і за фактичним технічним станом.

Сьогодні стосовно ГПА відома значна кількість методів параметричного та вібраційного діагностування технічного стану як ГПА в цілому, та і окремих його вузлів. Суттєвий вклад в їх розробку внесли вітчизняні та зарубіжні вчені – І. І. Артоболєвський, Ф.Я. Балицький, В.И. Бєльський, И.А., Бесклетний,

Ю.Н. Васильєв, А.А. Вітта, З.Т. Галіулін, Н.Т. Гаркаві, М.Д. Гєнкін, Н.В. Григорьєв, В.Я. Грудз, С.В. Єпіфанов, Л.М. Заміховський, С.П. Заріцький, В.Г. Засецький, Є.О. Ігуменцев, В.І. Костін, В.Н., П.П. Пархоменко, А.А. Петросян, Б.П. Поршаков, К.М. Рагульскис, Д.Ф. Симбірський, В.Я. Сковородін, А.Г. Соколова, В.А. Соляник, Н.Г. Шульженко, Л.А. Шубенко-Шубін, В.Л. Христинзен, Sterzl Jskar, C.R. Burrows, O.C. Turkay, R Monk і ін..

Щодо діагностування САУ ГПА то сьогодні практично відсутні методи їх діагностування, що обумовлюється відсутністю системного підходу до визначення технічного стану існуючих САУ ГПА за даними експлуатації.

Таким чином, не дивлячись на високий рівень методів параметричної і вібраційної діагностики ГПА, стосовно ГПА великої потужності, зокрема ГТК-25і, існує ряд не вирішених науково-технічних задач, пов’язаних з розробкою методів і засобів діагностування його механічних вузлів та САУ.

У зв’язку з цим, їх вирішення є актуальною задачею, яка має важливе народно-господарське значення.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертації є частиною планових науково-дослідних програм із розвитку нафтопромислового комплексу України і базується на результатах науково-дослідної роботи «Наукові засади побудови на базі сучасних інформаційних технологій розподілених систем моніторингу, контролю, управління та діагностування об’єктів нафтогазового комплексу України», номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ №018U006957, «Методологічні засади побудови систем управління, діагностування та енергозберігаючих систем частотного управління електроприводом для об'єктів нафтогазового комплексу» номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ №0112U006551, а також госпдоговірної теми № 1703000635 з АТ «Укртрансгаз» «Розробка діагностичного забезпечення (методичної та нормативної бази) технічного стану систем автоматики на об’єктах філії УМГ «ПРИКАРПАТТРАНСГАЗ» номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ № 0117U003214.

Мета роботи: Розроблення комплексу методів параметричної і віброакустичної діагностики ГПА великої потужності та методу діагностування САУ, а також системи для їх реалізації, використання яких дозволить отримувати оперативну і достовірну інформацію про технічний стан ГПА та їх САУ в процесі експлуатації та проводити ремонтні роботи за фактичним технічним станом.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

– проаналізувати сучасні тенденції розвитку методів і засобів діагностування технічного стану ГПА великої потужності (стосовно ГТК-25і) та їх САУ;

– провести теоретичне обгрунтування методу діагностування САУ та методологічне обґрунтування щодо вдосконалення методу діагностування ГТК-25і на базі штучних нейронних мереж;

- розробити методичне, технічне і програмне забезпечення експериментальних досліджень технічного стану ГТК-25і з його САУ та проаналізувати результати експериментів;

– розробити методи параметричної і акустичної діагностики ГТК-25і та метод діагностування його САУ;

– провести розрахунок ефективності діагностування технічного стану ГТК-25і та його САУ;

Об'єкт дослідження – процеси зміни технічного стану ГТК-25і та його САУ, які викликані розвитком дефектів його механічних вузлів і елементів САУ, що призводять до зниження ефективності і надійності роботи ГТК-25і з САУ та виникнення аварійних ситуацій.

Предметом дослідження є розробка методів параметричного і акустичного діагностування осьового компресора ГТК-25і та методу діагностування САУ.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використовувалися методи технічної діагностики, основні положення віброакустичної діагностики машин і механізмів, методи теорії надійності і математичної статистики, методи ідентифікації об'єктів, методи спектрального і

кореляційного аналізу, методи дискримінантного аналізу, методи обробки сигналів. При розробці технічного забезпечення використовувались методи системо- і схемотехніки, а при розробці програмного забезпечення – методи об'єктно-орієнтованого програмування.

Наукова новизна отриманих результатів:

– вперше з використанням метода параметричної ідентифікації (методу Симою) досліджена діагностична ознака – площа нормованих передавальних функцій ГПА та встановлено її взаємозвязок зі зміною технічного стану САУ ГТК-25і, що покладений в основу методу діагностування САУ ГТК-25і, використання якого, на відміну від відомих методів діагностування САУ ГПА, дозволить підвищити вірогідність діагностування до 0,93;

- вперше з використанням вейвлет-перетворення при обробці

акустичного процесу, що супроводжує роботу ГПА, виявлена діагностична ознака - значення норми апроксимації та норм деталізації по відношенню до норми сигналу (у відсотках) для п'ятирівневого вейвлет-розкладу, зміна якої, на відміну від відомих методів обробки сигналів, при зміні технічного стану ГПА описується лінійною залежністю;

– вперше розроблено метод діагностування ГТК-25і, що грунтується на визначенні найбільших значень дискримінантних функцій його технологічних параметрів та вібраційних і акустичних характеристик, який є комплексним методом, на відміну від існуючих методів параметричної і віброакустичної діагностики ГПА, та не вимагає для своєї реалізації додаткових технічних засобів так, як використовує інформацію з вдосконаленої САУ ГТК-25і;

– отримав подальший розвиток метод обробки акустичних процесів, що супроводжують роботу ГТК-25і, з використанням штучних нейронних мереж для його діагностування, використання якого дозволило зі значенням метрики F1 не менше 0,8 розрізнити три стани ГТК-25і: «номінальний», «поточний» та «дефектний», а подальше навчання нейронної мережі дасть можливість прогнозувати зміну технічного стану ГТК-25і та проводити ремонтні роботи за його фактичним станом.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці:

- методики отримання розгінних характеристик САУ ГПА за вхідними впливами у режимі пуску ГПА, що дало змогу отримати експериментальні дані для побудови нормованих передавальних функцій ГПА;
- алгоритмів визначення технічного стану осьового компресора ГТК-25і за його технологічними параметрами та вібраційними і акустичними характеристиками, використання яких дозволяє прогнозувати момент виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних з відмовою вузлів та елементів ГТК-25і;
- вдосконаленої системи контролю ГТК-25і на КС-39 «У-П-У» Богородчанського ЛВУМГ шляхом додаткового контролю вібраційних і акустичних процесів, що супроводжують його роботу ГТК-25і та температури корпусу ОК;
- з використанням SCADA - програми WIZCON 8.3, спеціального програмного пакету з мнемосхемами і трендами, прив'язаними до технологічних схем ГТК 25і, який виконує функцію опитування давачів, а також візуалізації, архівації технологічних параметрів;
- програми обробки сигналів з електретного мікрофона з використанням програмного пакета Steinberg Nuendo 3.2.0 для подальшої детальної обробки і збереження результатів запису акустичних сигналів та ведення інформаційної бази даних, яке надалі може бути покладене в основу експертної системи;
- програми обробки у середовищі MatLab розгінних характеристик ГТК-25і для визначення діагностичної ознаки стану його САУ – площі нормованих передавальних функцій.

Розроблені методи контролю і діагностування пройшли промислову апробацію на КС-39 «У-П-У» Богородчанського ЛВУМГ (акт від 12.08.2020 р.) і рекомендовані до впровадження та на КС-3 Долинського ЛВУМГ (акт від 18.07.2019 р.)

Результати теоретичних і експериментальних досліджень впроваджено в навчальному процесі – в робочих програмах навчальних дисциплін «Об'єкти і

процеси управління нафтогазового комплексу» та «Методи і засоби діагностування об'єктів нафтогазового комплексу» (акт від 19.05.2020 р.), які читаються студентам спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» за освітньою програмою «Комп'ютеризовані системи управління та автоматика».

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно [7]. У співавторстві: проаналізовано спектр акустичних сигналів компресора ГТК 25і та запропоновано діагностичні ознаки його стану [82,84], запропонована система контролю технологічних параметрів і віброакустичних характеристик та їх отримання під час пуску осьового компресора і в різний період його напрацювання [77,78], запропоновано метод діагностування САУ ГТК 25і та отримані його розгінні характеристики протягом року напрацювання [6], обгрунтовано використання віброакустичних характеристик ОК ГТК 25і для контролю його технічного стану [52,76,95], удосконалено систему управління та модернізовано реєструючі пристрої систем управління на КС Богородчанського ЛВУМГ [7-9,10-13], запропонована методика проведення експериментальних досліджень технічного стану лопатей осьового компресора ГПА [83,97], проведена оцінка статистичних характеристик параметрів ГПА ГТК-25і [86], запропоновані методика і процедура використання дискримінантного аналізу для виявлення діагностичних ознак технічного стану ГПА ГТК 25і при використанні вібраційної і акустичної діагностичної інформації [8,92,93], побудована двошарова ієрархічна ШНМ прямого поширення, що тренується за алгоритмом зворотного поширення похибки, з метою контролю технічного стану ГПА [71], використано для обробки віброграм симплет-вейвлет четвертого порядку та розглянуто процедуру опрацювання віброграм [98,99], запропоновано метод діагностування САУ ГТК 25і в складі комплексного методу діагностування ГПА [85], запропоновано процедуру розрахунку показника готовності [106].

Апробація результатів досліджень. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на I, II, III і IV Міжнародній науковій

конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах», Вінниця. – 2011, 2013, 2015 та 2017 роках, Обласній науково-практичній конференції «Вчені Прикарпаття – сталому розвитку краю», Івано-Франківськ. – 2012р. Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу», Івано-Франківськ. – 2012 р., Міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика 2013», Івано-Франківськ. – 2013р., II Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості», Івано-Франківськ. - 2015р., IV Міжнародній науково-практичній конференції «Summer InfoCom 2017», Київ. – 2017р., VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання», Івано-Франківськ. – 2017р., Open conference systems, innovative ideas in science 2017, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina. – 2017, Міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика – 2017», Івано-Франківськ. - 2017, The 10th International scientific and practical conference "Dynamics of the development of world science" (June 10-12, 2020), Vancouver, Canada. 2020, The 3rd International scientific and practical conference "Science and education: problems, prospects and innovations" (December 2-4, 2020). - Kyoto, Japan. 2020.

Публікації. За результатами досліджень, які викладені в дисертації, опубліковано 27 робіт, з яких 5 - у виданнях, включених ДАК України до переліку фахових видань, 3 входять до міжнародних науко-метричних баз Scopus, Index Copernicus, 15 - у збірниках матеріалів вітчизняних та міжнародних наукових конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота викладена на 189 сторінках, із них 136 сторінок основного тексту, складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 106 позицій, містить 49 рисунків, 24 таблиці та 8 додатків.

РОЗДІЛ 1
СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ

1.1 Конструктивні особливості ГПА ГТК-25і з точки зору контролепридатності

В склад ГПА ГТК-25і (рис.1.1) входить наступне основне обладнання:

- двохвальна газова турбіна MS 5352;

- відцентровий нагнітач PCL 804/2-36 фірми «Нуово-Піньоне» (технічні характеристики наведені в Додатку А).

Одним з найважливіших вузлів газоперекачувального агрегату ГТК 25і “Нуово-Піньйоне” (рис. 1.1) є осьовий компресор (ОК) (рис. 1.2), який призначений для засмоктування атмосферного повітря, стиснення в 16-ти ступенях і подачі стиснутого повітря в камери згоряння з продуктивністю 360 000 нм/год.

Рисунок 1.1 – Загальний вигляд ГТК 25і “Нуово-Піньйоне”.

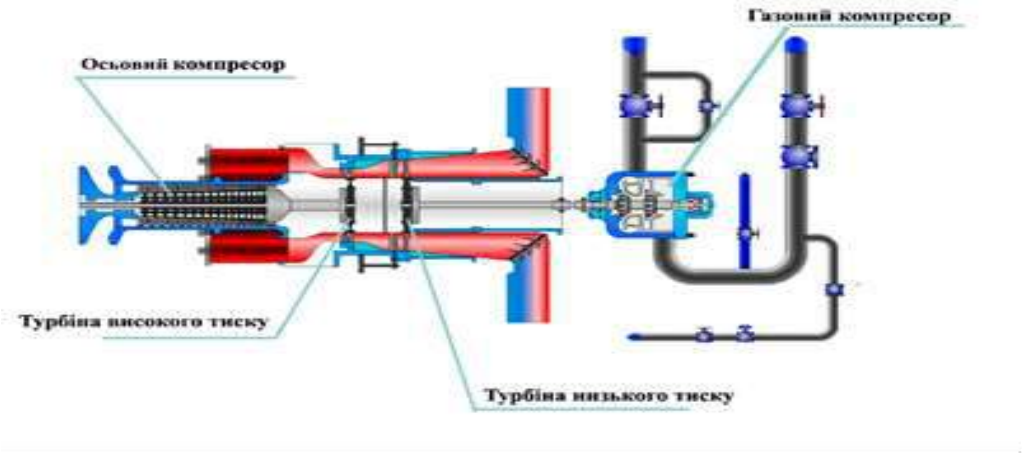


Рисунок 1.2 – Схема розташування осьового компресора в технологічній обв'язці ГТК 25і.

Для контролю технологічних параметрів роботи ГТК-25і останні були оснащені САУ, які постачали провідні світові виробники - Дженерал Електрик, Нуово Піньйоне, AEG Kanis. В період введення КС в експлуатацію вищевказані САУ були взірцем реалізації інженерних рішень на сучасній, на той час, елементній базі, проте на протязі тривалої (понад 30 років) експлуатації, виявився ряд недоліків, прорахунків, які посилювались по мірі фізичного і морального старіння обладнання автоматики. Збої, відхилення в роботі САУ приводили до хибних аварійних зупинок ГПА, КС, зриву контрактних зобов'язань АТ "Укртрансгаз".

Для контролю технічного стану осьового компресора ГПА ГТК -25і виробництва фірми «Нуово Піньйоне» виробником були передбачені наступні засоби автоматизації:

- контроль температури повітря на вході-виході ОК (індикація);
- контроль вібрації підшипника №1 (індикація і аварійний захист);
- контроль температури масла змащування на зливі з підшипника №1 (індикація);
- контроль обертів валу ОК (індикація, реєстрація на паперовій діаграмі, аварійний захист);

- розрідження повітря на вході ОК (аварійний захист на базі контактного давача).

Практика експлуатації осьових компресорів ГПА ГТК - 25і показала, що наявних засобів контролю недостатньо для організації моніторингу, діагностики стану підшипників, проточної частини ОК.

Крім того, ГТК-25і не були обладнані системами діагностування, що не дозволяло контролювати зміну їх технічного стану в процесі експлуатації. Це було обумовлено тим, що при проектуванні конструкції ГТК-25і не передбачалися місця для встановлення штатних давачів, за допомогою яких можна було б проводити діагностування його стану. Тривалий термін експлуатації ГТК-25і призвів до того, що сьогодні актуальною постала задача розробки методів його діагностування, а також обґрунтування місць встановлення давачів на корпусі ГТК-25і та їх типорозмірів, що вимагає проведення експериментальних досліджень.

1.2 Аналіз статистичних даних по відмовах ГТК-25і і причини, що їх зумовлюють

За своєю фізичною природою відмови можуть характеризуватися як [1,2]:

- пов'язані з руйнуванням деталей і їх поверхонь - поломки, різні види пошкоджень і зносу, корозія, старіння;

- не зв'язані з руйнуваннями - недостатня в'язкість масла, облітерація каналів подачі палива і мастила, ослаблення різьбових, пресових і ін. з'єднань, порушення регулювання вузлів, дисбаланс. Відповідно до цього, відмови усувають заміною деталей або комплектів, регулюванням або очищенням.

За характером виникнення відмови поділяються на раптові (аварійні) і поступові (знос, старіння, забруднення і т. д).

Найбільшу небезпеку для ГПА представляють раптові відмови, в результаті яких руйнується механічна частина агрегату, тому раннє виявлення дефектів в агрегатних вузлах ГПА є однією з найбільш важливих задач їх діагностування. Виникнення таких відмов призводить до необхідності аварійної зупинки ГПА з

метою попередження значних наслідків руйнувань (наприклад, лопатевого апарату) та безпеки персоналу компресорного цеху. Тому попередження таких відмов шляхом раннього діагностування дефектів агрегатів ГПА підвищує їх надійність і суттєво знижує експлуатаційні витрати на відновлення агрегату.

Виникнення відмов, як правило, пов'язано з появою дефектів конструктивного або експлуатаційного характеру і їх поступовим розвитком, що погіршують працездатність агрегату, тобто в період нормальної експлуатації ГПА відмови є наслідком недосконалості окремих конструктивних елементів або різкої зміни режимів експлуатації.

Як показує аналіз причин виникнення дефектів ГПА їх можна класифікувати наступним чином [3, 4]:

- процеси зношення, в результаті якого зношені деталі змінюють свою початкову форму (зношення елементів проточних частин ГТУ і нагнітача, зношення лабіринтних і масляних ущільнень, зношення підшипників, зношення елементів зубчастих зачеплень і ін.);

- деформації і руйнування деталей вузлів агрегатів через конструктивні, виробничі або експлуатаційні фактори (викривлення корпусів турбін, нерівномірний прогрів дисків турбін через порушення роботи системи охолодження, прогари в камерах згоряння, руйнування лопатей, ослаблення посадки робочих коліс нагнітачів або дисків турбін, ослаблення натягів вкладишів підшипників, розцентрування валів, не співвісність підшипників і ін.);

- розрегулювання агрегатів і систем в результаті ослаблення кріплень, з’єднань, зміни настановних положень регуляторів, зміни співвісності вузлів і механізмів (ослаблення кріплень маслопроводів, відмови в роботі елементів гідродинамічного регулювання, пневматичних і електричних систем і ін.);

- ерозійне зношення елементів проточної частини при порушенні умов експлуатації (попадання пилу в компресор з атмосфери при несправності у вхідних пристроях, неякісна підготовка перекачуваного газу і ін.);

- механічні пошкодження деталей при попаданні сторонніх предметів в проточну частину ГТУ і нагнітача;

- порушення умов роботи елементів (вузлів) і систем внаслідок неправильної експлуатації (невідповідність встановленим вимогам якості масла, несвоєчасна заміна маслофільтра і фільтрів пневматичних систем, порушення очищення сіток в системі підготовки циклового повітря, паливного газу, транспортованого газу, неправильне завантаження нагнітачів в схемі КС і ін.).

Перелік відмов вузлів і елементів ГПА у відсотковому відношенні по спадаючій частоті:

- робочі лопатки, ротор, направляючі лопатки і діафрагма турбіни;
- підшипники;
- камера згоряння і газоходи гарячих газів;
- робочі лопатки і ротор компресора; направляючі лопатки компресора;
- теплообмінники та вихідні газоходи;
- корпус і ущільнення;
- допоміжні пристрої та системи;
- фундамент та інші, представлений у табл. 1.1 [1,4].

Таблиця 1.1 - Перелік відмов вузлів і елементів ГПА

№ п/п	**Вузли і елементи ГПА**	**Число відмов від загальної кількості,%**
1	Робочі та направляючі лопаті ОК	7,1
2	Направляючі і робочі лопатки ТВТ	9,4
3	Направляючі і робочі лопаті ТНТ	2,2
4	Ротор турбокомпресора	1,8
5	Ротор ТНТ	4,8
6	Ротор ВН	8,3
7	Робоче колесо ВН	1,3
8	Вкладиші підшипників	32,3
9	Колодки підшипників	15,7
10	Торцеві ущільнення ВН	12,3
11	Елементи камери згоряння	4,8

В [5, 6] наведена статистика відмов ГПА по АТ «Укртрансгаз» за 2009 рік за типами обладнання, а на рис.1.3 – за 2018 рік. Аналіз дефектів основних вузлів ГПА в процесі експлуатації показав, що основна частина аварійних зупинок і тривалих вимушених простоїв пов'язані з дефектами механічного обладнання.

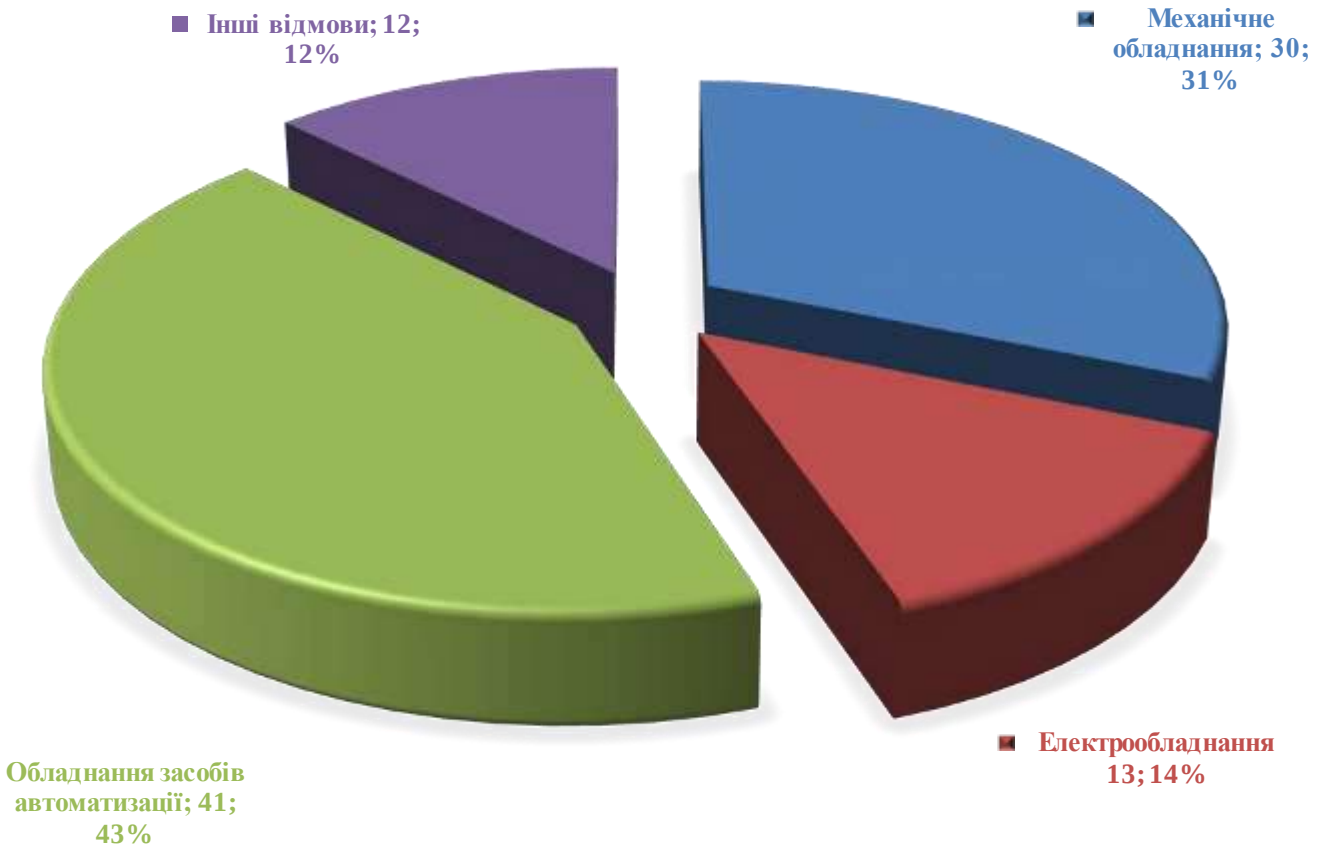


Рисунок 1.3 - Статистика відмов ГПА по АТ «Укртрансгаз» за типами обладнання за 2018 рік: механічне обладнання складає - 31%; обладнання засобів КВПіА – 43% ; електрообладнання -14%; інші відмови – 12%.

Тривалість аварійно-відновлювальних робіт механічного обладнання сягає трьох-чотирьох місяців, а на деяких ГПА значні поломки основних вузлів повторюються неодноразово.

Зупинимося більш детально на аналізі відмов ГПА типу ГТК-25і в цілому. Так, в табл. 1.2 наведені результати відмов по 21 ГТК-25і по роках починаючи з 2012 року у вигляді аварійних (АЗ) та вимушених зупинок (ВЗ). При цьому в

стовбці 7 наведено час напрацювання агрегатів, на яких відбулися аварійні та вимушені зупинки, зумовлені виходом з ладу усіх типів обладнання.

В табл. 1.2 наведені також розраховані показники надійності – час напрацювання на відмову та інтенсивність відмов з якої видно, що найбільший час напрацювання на відмову мав місце в 2015 році – 4773 год., далі 4150 год. в 2019 р. і 3569 год. - в 2014 р.

Таблиця 1.2 - Відмови ГПА ГТК-25і по роках

№ з/п	Тип ГПА	Кіль-кість ГПА	АЗ	ВЗ	Разом	Напрацювання агрегатів, на яких відбулися аварійні та вимушені зупинки, зумовлені виходом з ладу усіх типів обл., годин	Напрацю-вання на відмову, годин	Інтенсив-ність відмов, 1/тис.год.	Рік
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
1	ГТК-25і	21	8	1	9	16 888	1 876	0,53	2012
2	ГТК-25і	21	10	1	11	31 153	2 832	0,35	2013
3	ГТК-25і	21	3	0	3	10 707	3 569	0,28	2014
4	ГТК-25і	21	1	0	1	9 545	4 773	0,10	2015
5	ГТК-25і	21	6	0	6	16 140	2 690	0,372	2016
6	ГТК-25і	21	16	3	19	29 631	1 975	0,51	2017
7	ГТК-25і	21	9	2	11	24 226	2 692	0,37	2018
8	ГТК-25і	21	7	1	8	20 751	4 150	0,24	2019

Для більшої наочності на рис. 1.4 наведені графіки розподілу відмов ГТК-25і по типам зупинок. Як видно з рис. 1.4 найбільша кількість аварійних зупинок мала місце в 2017р. – 16; 2013р. 10 і 2018р. – 9.

Рисунок 1.4 – Графіки розподілу відмов ГТК-25і по типах зупинок

Вказана інформація не дозволяє визначити, які мали місце відмови – по механічному обладнанню, чи САУ з тим, щоб проаналізувати причини їх виникнення та розробити заходи щодо подальшого їх попередження в майбутньому.

1.2.1 Аналіз статистичних даних з відмов механічного обладнання ГТК-25і і причини, що їх зумовлюють

Проаналізуємо більш детально статистичні дані з відмов механічного обладнання ГТК-25і. На рис. 1.5 наведено графік зміни відмов механічного обладнання ГТК-25і по АТ «Укртрансгаз» за 2012 – 2019 роки.

Рисунок 1.5 – Графік зміни відмов механічного обладнання ГТК-25і по роках

З графіку на рис. 1.5 видно відсутність чіткої закономірності зміни відмов по роках, хоча апроксимуючи дані отримаємо наступну закономірність, яка вказує на тенденцію до подальшого зростання кількості відмов. У зв'язку з цим доцільно детально розглянути відмови, які мали місце.

Проведений аналіз видів дефектів основних вузлів ГПА ГТН-25і в процесі експлуатації показав, що основна частина часу вимушених простоїв пов'язана з дефектами механічного обладнання складає (96%).

Агрегати на період аналізу виходу з ладу вузлів напрацювали в межах 130 – 138 тис. годин.

Проведений аналіз показує, що середній термін часу на відновлення працездатності ГПА у випадку виходу з ладу засобів автоматики – 2 год., при пошкодженнях проточної частини осьового компресора ремонтний період становить не менше 1-го місяця. Тривалість аварійно-відновлювальних робіт по механічній частині в деяких випадках досягала 2-х місяців, наприклад ремонт проточної частини ОК ГПА №3 КС-39 МГ "У-П-У" тривав в 2008 році 60 днів.

На рис. 1.6 показані характерні дефекти лопатевого апарата ОК ГТК-25і.

Рисунок 1.6 - Характерні дефекти лопатевого апарата ОК ГТІ

1.2.2 Аналіз статистичних даних по відмовах систем автоматичного управління ГТК-25і і причини, що їх зумовлюють

З рис. 1.3 видно, що відмови САУ займають перше місце (43%) за загальною кількістю відмов. Якщо взяти 2002 рік, то кількість відмов по САУ ГПА по АТ «Укртрансгаз» склала 42%, в той час, як по механічному обладнанню - 49%, тобто спостерігається зворотна картина [5]. Це обумовлено тим, що на момент напрацювання основної кількості ГПА по магістральних газопроводах «Союз», «Уренгой-Помари-Ужгород» свого паспортного ресурсу (100 тис. мотогодин) і подвійного напрацювання ресурсу систем автоматичного управління ГПА була створена комісія АТ «Укртрансгаз» і фірми «Нуово Піньйоне», метою роботи якої було обстеження стану ГПА в комплексі з системами автоматичного управління, енергозабезпечення та розробка на основі аналізу отриманої інформації рекомендацій щодо продовження терміну експлуатації обладнання КС. Було розроблено ряд рекомендацій та методик стосовно заміни, модернізації окремих елементів і вузлів ГПА, використання яких дозволить продовжити ресурс ГПА ще на 100 тис. годин. Щодо апаратно-програмних засобів САУ висновок був однозначний – повна заміна. Додаткове обстеження систем автоматичного управління на КС по основних експортних магістральних газопроводах показало, що вони фізично і морально застаріли, двічі відпрацювали паспортний ресурс і потребують негайної заміни. Однак заміна САУ ГПА вимагає значних як фінансових витрат (наприклад, в цінах 2004 р. вартість однієї САУ становила 6 млн. гривень), так і часових - триває не менше року на зупиненому технологічному обладнанні.

Щодо заміни агрегатів і вузлів механічного обладнання то фінансові витрати є на порядок вищими, з продовженням терміну їх напрацювання відсоток відмов зростає.

Проаналізуємо тенденцію відмов та аварійних зупинок САУ ГТК потужністю 25 МВт за період 2000 -2019 роки по 27 агрегатах АТ «Укртрансгаз» (табл.1.3). На 21 агрегаті типу ГТК-25і експлуатуються штатні системи автоматичного керування типу Спідтронік, на 3-х ГПА-25С КС №37 “Бар” та 3-х

ГПА-25С КС-33 «Гребінка» в 1997-2000 рр. САУ Спідтронік замінено на системи автоматичного керування фірми ССС.

Таблиця 1.3 - Відмови САУ ГТК 25 МВт по АТ «Укртрансгаз» за 2012 р. - 1-ше півріччя 2019 р.

Рік	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	1-ше півр. 2019
К-сть відмов САК ГТК-25і типу Спідтронік	5	7	1	1	4	2	5	3
К-сть відмов САК ГТК-25і типу ССС	-	1	3	2	3	5	2	-
Загальна к-сть відмов засобів автоматики по УТГ	39	46	44	35	44	53	41	25

Як видно з проведеного аналізу, незначне підвищення надійності САУ та засобів автоматики обумовлено тим, що фахівцями служб КВПіА КС розробляється ряд інженерно-технічних рішень, які дозволяють продовжити термін експлуатації САУ, адаптувати сучасні мікропроцесорні засоби автоматизації до існуючих транзисторно-релейних систем управління та зменшити кількість хибних аварійних зупинок технологічного обладнання, що призводить з роками до зменшення відсотка відмов по САУ. Для прикладу, основні заходи з підвищення надійності роботи САУ ГПА, які були проведені в Богородчанському ЛВУМГ, полягали в наступному [7-13]:

- проведена заміна низько надійних давачів тиску і перепаду тиску систем антипомпажного захисту нагнітачів з 4-х провідною схемою підключення на мікропроцесорні давачі фірми Хонівел типу STG 97, STD 924 зі струмовим вихідним сигналом і 2-х провідною схемою підключення;

- для контролю рівня антифризу в розширювальних баках на ГПА і мастила в маслобаках турбін додатково до штатних контактних сигналізаторів, змонтовано мікропроцесорні давачі фірми Хонівел типу STD 110, STD 924, які видають світлові і звукові попереджувальні сигнали на головний щит управління і

дозволяють проводити відображення та архівацію значення рівнів антифризу і масла на ПК змінного інженера;

- проведена заміна фізично і морально застарілих електромеханічних самописців температури вихлопних газів ТНТ ГПА на комп'ютеризовану систему відображення і архівації на базі 12- канального контролера UA-112 і ПК змінного інженера з спеціально розробленою програмою;

- проведена заміна низько надійних контактних давачів тиску газу на нагнітанні ГПА і тиску мастила змащування підшипників компресора на інтелектуальні давачі фірми Хонівел типу STG 97, STD 930 в комплекті з мікропроцесорними реєстраторами МТР-8, які забезпечують відображення і архівацію технологічних параметрів на ПК змінного інженера;

- на головному щиті управління КС додатково виведено і організовано відображення, архівацію на ПК наступних важливих технологічних параметрів: тиску паливного газу на виході БППГ, тиску робочого імпульсного газу, рівня напруги 110В, 24В, температури газу на вході - виході АПО, температури і вологості навколишнього середовища та атмосферного тиску;

- проведена заміна фізично і морально застарілих регуляторів температури газу на виході АПО типу «Протронік» на мікропроцесорні комп'ютеризовані регулятори МІК-51зі спеціально розробленою програмою управління, яка забезпечує рівномірне завантаження вентиляторів охолодження;

- проведена заміна низько надійних перетворювачі тиску загально станційної САУ на мікропроцесорні давачі фірми Хонівел типу STG 97 з струмовим вихідним сигналом;

- проведена заміна фізично і морально застарілих електромеханічних самописців загально станційних технологічних параметрів на комп'ютеризовану систему відображення і архівації на базі мікропроцесорного реєстратора МТР-8 і ПК змінного інженера зі спеціально розробленою програмою;

- додатково до штатних контактних сигналізаторів в системах гідравлічного масла ГПА змонтовано 3 мікропроцесорні давачі РТХ 7500, які дозволяють

проводити відображення і архівацію значення тиску мастила на ПК змінного інженера;

- проведена заміна низько надійних реле тиску типу UE в системах гідравлічного масла ГПА на безвідмовні контактні давачі тиску типу CCS.

Використання мікропроцесорних реєстраторів МТР-8 було обумовлено тим, що це новий клас сучасних цифрових регуляторів, які призначені як для автономного, так і комплексного використання в системах управління технологічними процесами.

Проте, впровадження інженерно-технічних рішень, які дозволяють продовжити термін експлуатації САУ ГПА та заміна САУ застарілого типу на нові не призводять для значного підвищення надійності роботи ГПА.

У роботі [14] проведений ґрунтовний аналіз сучасного стану оцінки надійності САУ ГПА. Він показав, що на сьогодні при вирішенні різноманітних завдань надійності використовують рішення, які засновані на застосуванні різних теоретичних моделей надійності, що призводять до значної розбіжності в отриманих результатах.

Виходячи з викладеного, актуальною є наукова задача розроблення методів контролю і діагностування технічного стану як механічної частини ГПА, так і його САУ. Розв’язання такої задачі дасть змогу проводити ремонтні роботи за їх фактичним технічним станом та забезпечить надійність і ефективність експлуатації ГПА та їх САУ.

1.3 Аналіз методів діагностування технічного стану ГПА

Сьогодні відома значна кількість наукових праць, присвячених розробці методів діагностування технічного стану механічної частини ГПА в процесі їх експлуатації. За допомогою таких методів вирішують три задачі діагностики: контролю працездатності (ступеня працездатності), дефектів, прогнозування технічного стану, або поєднання цих задач. Всі відомі методи діагностування ГПА можна розділити на дві великі групи [15].

– методи параметричної діагностики, які базуються на обробці і аналізі технологічних параметрів, що характеризують процес експлуатації ГПА;

– методи віброакустичної діагностики, які базуються на обробці і аналізі віброакустичних коливань, що генеруються вузлами і елементами ГПА в процесі експлуатації і несуть інформацію про його технічний стан.

При розробці методу діагностування основною задачею є вибір діагностичної ознаки стану ГПА (параметра або характеристики), зміна якої характеризує зміну технічного стану ГПА. Діагностичні ознаки вибираються в результаті аналізу діагностичної моделі.

1.3.1 Аналіз методів параметричної діагностики технічного стану ГПА

Сутність параметричної діагностики полягає в [1, 16-18]:

- постійному або періодичному контролі поточних параметрів газового потоку і стану проточної частини;

- порівнянні отриманих даних з еталонними характеристиками;

- кількісному і якісному визначенні відхилень, з огляду на похибки вимірювання;

- попередженні обслуговуючого персоналу ГПА про наближення режиму його роботи до критичних точок (задовго до спрацьовування аварійних систем) або появі небажаних явищ в роботі газового тракту.

Визначення технічного стану газового тракту відцентрового нагнітача (ВН) ГПА (а також ОК при використанні газотурбінного приводу) здійснюється методами функціонального діагностування [1, 18], заснованого на аналізі результатів вимірювань відхилень основних вимірюваних робочих параметрів (ознак) - прямий метод аналізу. У разі, якщо деякі значення діагностичних параметрів не піддаються безпосередньому вимірюванню, їх значення визначаються математичною обробкою інших Реальні показники можуть відрізнятися від розрахункових, які пов'язані з ними фізичними і математичними залежностями з урахуванням можливих похибок систем і способів вимірювання (непрямий метод аналізу).

Метод дозволяє виявити тільки ті дефекти та відмови, які викликають зміну відхилень термогазодинамічних параметрів (тиску, температур, витрат газу) від середніх, заданих технічною документацією, значень. Основна складність контролю технічного стану проточної частини відцентрового нагнітача полягає в труднощі математичного моделювання або кількісної оцінки процесів, що протікають в нагнітачі, що призводить до складних проблем встановлення достовірного діагнозу за прийнятний проміжок часу.

Слід зазначити, що, незважаючи на складність складання методик параметричної діагностики та проведення розрахунків за розробленими математичними моделями, цей метод оцінки технічного стану проточної частини ГТУ і ВН, як показали експериментальні перевірки, дає досить задовільний результат.

Для своєчасного отримання інформації про стан проточної частини і характер перебігу потоку газу необхідно провести оцінку поточних параметрів газового потоку, відхилення яких від допустимих норм може призвести до виходу з ладу вузлів і агрегатів компресора. Своєчасне виявлення небезпечних режимів, в разі їх виникнення, дозволить запобігти відмовам і уникнути аварійних ситуацій [18].

В [19] розглядаються результати дослідних випробувань методології комплексної параметричної ідентифікації фактичних характеристик (КПІФХ) ГТК-10 на КС «Бердичів», яка розроблена на базі алгоритму параметричної ідентифікації фактичних характеристик [20-22]. Одними із основних результатів випробувань, як відмічається в [19] є можливість здійснення прогнозування стану агрегату на найближчу перспективу за рахунок ідентифікації фактичних характеристик експлуатації на новому якісному рівні, а також можливість діагностування та упередження на ранніх стадіях незворотних негативних відхилень параметрів й технічного стану як окремих вузлів, так і агрегату в цілому від нормованих допустимих значень та стану, що підвищує рівень техногенної та екологічної безпеки експлуатації ГПА, КС, МГ.

При визначенні технічного стану ГТД методами параметричної діагностики в розроблюваних критеріях необхідно виключити вплив режимних параметрів, для чого потрібно відслідковувати зміну не окремих параметрів двигуна і його вузлів, а їх характеристик [23]. Виходячи з цього в роботі [24] розробляються алгоритми для визначення дійсних основних параметрів ГТД в експлуатаційних умовах ГПА на основі математичного моделювання та рівнянь матеріальних балансів з використанням непрямих вимірювань. Робиться висновок, що розроблений алгоритм визначення потужності і ККД ГТД за непрямими вимірюваннями в поєднанні з діагностичними ознаками дефектів ГТД може бути використаний для їх виявлення.

В роботі [25] на основі аналізу літературних джерел, присвячених визначенню функціонально-технічного стану ГПА в цілому, автори відмічають, що незважаючи на значну кількість спроб створення методів та моделей діагностики ГПА, немає єдиного комплексного підходу до розв`язання задачі оцінки фактичного технічного стану ГПА. Останнє не дозволяє розробити такі методи. Пропонується методологія обрахунку комплексу техніко-економічних показників роботи ГПА за алгоритмом параметричної ідентифікації його фактичних характеристик, який будується на основі реалізації послідовних дій. В той же час в роботі не наводяться результати апробації запропонованої методології.

В [26] основну увагу приділено методам оцінки технічного стану ГПА з використанням емпіричних і напівемпіричних залежностей, зокрема для ВЦН. До недоліків розроблених методів слід віднести відсутність методики отримання реальних експериментальних даних технологічних параметрів роботи ГПА та складність аналітичного описання процесів, що протікають в ньому.

Розглядаються питання діагностування ГПРА-Ц-16С методами параметричної діагностики. При цьому за діагностичну ознаку стану вибрано ККД агрегату. В результаті проведених досліджень встановлено, що суттєве «розшарування» параметрів роботи ГПА в загальному супроводжується зменшення політропного ККД нагнітача до 30 % і супроводжується пропорційним

збільшенням споживаної потужності, що пояснюється значним погіршенням технічного стану машин. Отримані результати не можуть бути використані для оперативної оцінки технічного стану ГПА, оскільки отримані на основі усереднених статистичних даних.

В [27] аналізуються методи уточнення характеристик відцентрових нагнітачів, зокрема політропного ККД, оскільки вони можуть дати суттєве збільшення точності визначення розрахункових величин по ВН, а значить і підвищити точність параметричних методів, в яких використовуються ці величини. Пропонується процедура діагностування ВН з використанням графіка відносної приведеної внутршньої потужності з приведених характеристик для розрахунків по ВН, технічний стан яких змінився. Проведена експериментальна перевірка розробленої методики і порівняння результатів розрахунків з відомими експлуатаційними даними по ГПА показали відповідність визначених даних, отриманим при обстеженні розібраних ВН при ремонті. Відмічено, що розроблений алгоритм пристосований для практичного використання експлуатаційним персоналом в умовах КС.

Аналіз методів і критеріїв оцінювання технічного стану газоперекачувального агрегату наведений в [28]. Зроблено висновок, що застосування одного окремо взятого методу не дає повної картини технічного стану. Кожен із методів дозволяє виявити дефекти лише одного чи кількох вузлів, агрегатів, елементів або однорідних за походженням і природою дефектів. Якщо ж оцінювати ефективність кожного з розглянутих методів окремо, то найефективнішим з них є метод з використанням комплексних параметричних критерів та методи вібродіагностики.

Один з ефективних методів багатовимірного статистичного аналізу - метод факторного аналізу на прикладі вирішення задачі параметричного діагностування ГТД розглянуто в [29]. Метод не вимагає додаткової вимірювальної апаратури і засновується на статистичній обробці параметрів, зареєстрованих штатними приладами. Застосування пакета Statistica виключає необхідність використання додаткових обчислювальних засобів і робить аналіз наочним і зрозумілим для

користувача. Встановлено, що факторний аналіз параметрів ГТД дозволяє виявити на ранній стадії зміни робочого процесу (виникнення дефекту), яке часто неможливо помітити шляхом безпосереднього спостереження за параметрами його роботи. Це пояснюється тим, що порушення кореляційних зв'язків між параметрами виникає значно раніше, ніж порушення рівня сигналу в одному вимірювальному каналі.

В [30] розглядаються актуальні питання параметричної діагностики ГПА, зокрема розглядаються узагальнені вимоги, які необхідно врахувати при складанні параметричної діагностики газотурбінних ГПА, що використовуються для оцінки стану агрегату і уточнення його технологічних показників, а також особливості параметричної діагностики на КС «Крупська». Розглядаються результати експериментальних досліджень та зроблені висновки щодо ефективності запропонованої параметричної діагностики. В той же час відсутня інформація щодо процедури і порядку її проведення на інших КС.

В [31] показано, що методи об'єднання інформації, такі як байєсовські мережі, нечітка логіка або імовірнісні нейронні мережі, можуть використовуватися для реалізації системи підтримки прийняття рішень, яка може застосовуватися для параметричної діагностики газових турбін. В той же час в запропонованій системі підтримки рішень відсутня інформація про технічний стан САУ ГПА, що не дозволяє використовувати її для контролю працездатності САУ. Метод параметричної діагностики стану газотурбінної електростанції (ГТеС), заснований на ідентифікації стану її компонентів (компресора, камери згоряння, турбіни) з використанням математичної моделі робочих процесів, представлених у вигляді моделі штучної нейронної мережі розглянуто в [32]. Метод дозволяє виявляти дефекти на ранній стадії їх розвитку, навіть якщо значення технологічних параметрів знаходяться в допустимих межах. При цьому питання контролю стану САУ як невід’ємної складової ГТеС, без якої вона не може функціонувати, не розглядається. На основі основних принципів газових турбін і дискримінантного аналізу Фішера (FDA) в [33] представлений новий індикатор виявлення несправностей гарячих компонентів в газових турбінах. Його

використання дозволяє уникнути завад, пов'язаних з невизначеністю, та підвищити чутливість раннього виявлення несправностей в гарячих компонентах газової турбіни. Поставлена в роботі задача розглядалася без врахування як стану камери згорання, так і САУ, від якої залежить ефективність роботи турбіни. В [34] розглядається метод параметричної діагностики стану двохпотокового турбореактивного двигуна, заснований на ідентифікації стану компонентів (компресора, камери згоряння, турбіни) із застосуванням математичної моделі робочого процесу, представленої у вигляді моделі штучної нейронної мережі, подібної до [32]. Параметри стану компонентів двигуна є інтегральними критеріями, які дозволяють ідентифікувати його технічний стан з високим ступенем надійності. Наведено послідовність розробки моделі і результати дослідження її характеристик при параметричній діагностиці стану двигуна. Недоліки роботи аналогічні стосовно роботи [32]. Методам діагностування дефектів газового тракту газотурбінних установок (ГТУ) присвячені роботи [35, 36]. Нова методика моделі класифікації діагностики несправностей газового тракту газової турбіни у вигляді ймовірнісної нейронної мережі (PNN) розглядається в [35]. Проводиться її порівняння з раніше запропонованими методиками, результати якого показують, що PNN не поступається іншим методам. В [36] запропоновано новий комбінований метод на базі штучної нейронної мережі і машини опорних векторів для діагностики газового тракту двохвального газотурбінного двигуна.

Проведені результати випробувань показали, що пропонований метод може бути використаний для діагностування множинних несправностей газових турбін з обмеженими вимірюваннями технологічних параметрів. Діагностування технічного стану газового тракту ГТУ з використанням розглянутих методів [34, 35] проводиться без врахування технічного стану інших складових ГТУ, в тому числі і її САУ, які можуть впливати на результат діагностування, що вимагає проведення додаткових досліджень.

1.3.2 Аналіз методів віброакустичної діагностики технічного стану ГПА

Основні положення віброакустичної діагностики машин і механізмів базуються на тому, що при їх роботі всі агрегатні вузли і їх деталі дійснюють вимушені і резонансні коливання, які залежать від величини і характеру збурюючих сил, пружно-масових характеристик елементів конструкцій. На останні, в свою чергу, впливає ряд конструктивних, технологічних і експлуатаційних факторів. Стосовно ГПА з газотурбінним приводом, то в загальному випадку його вимушені коливання агрегатних вузлів і елементів мають в основному, механічне та аеродинамічне походження. До джерел коливань механічного походження відносяться: неврівноважені сили процесу, обумовлені силами тертя (кочення або ковзання) і взаємодія елементів конструкцій через пружні зв'язки. Джерела коливань аеродинамічного походження - змінні сили, що збурюються потоком газу в проточній частині агрегату внаслідок його пульсації, нерівномірність потоку в радіальному і осьовому напрямках, змінні імпульси, що створюються обертовими лопатями ротора, нерівномірність згоряння палива, вібрація трубопроводів і ін.

Для ГПА і його вузлів одним із найбільш ефективних за глибиною аналізу видів діагностики є методи вібродіагностики [37 - 40]. До її переваг відноситься те, що вібраційними параметрами представлені практично всі основні вузли агрегатів, а також відносна простота одержання діагностичної інформації.

Перспективність використання методів вібраційної діагностики в газовій промисловості обумовила значну кількість досліджень в цьому напрямку, які проводилися в 70-90 роках минулого століття [2, 14, 41- 48 та інші]. Вийняток становить робота [14].

У вказаних роботах розглядаються: математично-діагностичні моделі основних вузлів ГПА та ГПА в цілому [2, 14, 44, 51, та інші], алгоритми діагностування дефектів і діагностування основних вузлів ГПА та прогнозування їх стану [2, 43, 48-51 та інші].

Так, в [2] розглядаються моделі коливних процесів, в основному лопатевого апарату ГПА, пропонуються методи його діагностування та технічні засоби для їх

реалізації. Представлені моделі не дозволяють оцінити вібраційний стан ГПА в цілому і його вплив на роботу САУ ГПА. В [3] розглядають теоретичні основи динамічних характеристик і вібраційних процесів ГПА та компресорних установок, на базі яких розробляються діагностичні ознаки технічного стану їх вузлів і елементів. При цьому не розглядається взаємозв'язок впливу зміни технічного стану окремих вузлів ГПА (турбіни високого ТВТ і низького ТНТ тисків, осьового компресора ОК) на технічний стан силових елементів – підшипників, чи стан камери згорання, які також визначають ефективність процесу компримування газу і стан САУ ГПА, яка контролює цей процес. Аналіз спектрів вібраційного і акустичного сигналів (шуму) осьового компресора ГТК-25і, побудованих з використанням метода Уелча, наводиться в [52]. Метою аналізу є виявлення діагностичних ознак його технічного стану. Встановлено, що акустичні коливання більш інформативні, характеризуються широким неперервним спектром з окремими дискретними складовими. В той же час засоби автоматики ГПА не завжди адекватно реагують на різкі зміни амплітудних складових акустичного спектру коливань ОК, що можуть призвести до виникнення аварійних ситуацій. Це вимагає дослідження вказаного явища і розробки методу контролю стану засобів автоматики. Дослідження по визначенню технічного стану лопатей компресора і турбіни ГТД, які аналізуються як у вигляді окремих компонентів, так і в складі робочих коліс, наводяться в [53]. В роботі також розглядається аналіз зварних швів камери згорання методом вільних коливань. Визначено інформативні параметри, що характеризують коливальний процес, та розроблені методи виявлення дефектів складових деталей ГПА. Однак в роботі не вказується, як на значимість досліджених інформативних параметрів стану ОК, ТНТ та камери згорання впливають коливні процеси, що генеруються силовими елементами ГПА і турбіною нагнітача, та як на ці зміни реагує САУ ГПА. У роботі [54] подано короткий огляд і порівняння різних перетворень, які можуть бути виконані при обробці вібраційних процесів повітряного компресора для оцінки трьох його станів. Були використані наступні перетворення: швидке перетворення Фур'є, дискретне косинусне перетворення,

автокореляційна функція, розподілу класів Коена, S-перетворення і різні вейвлет-перетворення.

Алгоритм діагностики несправностей повітряного компресора, заснований на використанні вейвлет-перетворення та штучних нейромереж, розглядається в [55]. При цьому посилання в роботі на результати практичної реалізації розробленого алгоритму за допомого технічних засобів чи в складі САУ ГПА відсутні. В [56] розв'язана задача визначення впливу конструкції ГПА-16Р «Уфа» на його хвильову газову динаміку, а також виявлення діагностичних ознак дефектів в двигунах при експлуатації. Для вирішення поставленої задачі використовувалися чисельні методи моделювання хвильових процесів в поєднанні з методами дослідження вібрації. Задача розглядалася без врахування впливу динамічних процесів в ГПА на стан його САУ, зміна якого може призвести до хибного спрацювання систем захисту ГПА. В [57] пропонується поєднання дискретного вейвлет-перетворення і аналізу огинаючої для вилучення характеристичного спектра даних вібрації підшипника кочення. Потім коефіцієнт взаємної кореляції спектра застосовується для визначення різних умов експлуатації підшипників кочення та його технічного стану. В роботі не досліджувався вібраційний стан лопатевого апарату ГПА з метою його врахування при визначенні стану підшипників кочення, що дозволило б підвищити надійність діагностування їх стану. При цьому взаємозв’язок умов експлуатації підшипників кочення з алгоритмом роботи ГПА, який реалізується її САУ і визначає ефективність експлуатації ГПА, не розглядався.

Стосовно питання контролю і діагностування ГПА типу ГТК-25і, то сьогодні практично відсутні публікації щодо розроблених методів їх діагностування за виключенням [52], що вимагає подальшої розробки таких методів.

1.4 Аналіз методів діагностування систем автоматичного управління

Стабільність всієї ГТС безпосередньо залежить від надійності і безпеки роботи ГПА та систем їх управління, що вимагає застосування методів оцінки надійності, зокрема САУ та методів їх діагностування.

Не дивлячись на значну кількість робіт з оцінки надійності як структурних елементів так і САУ в цілому, сьогодні відсутні ефективні методики визначення їх фактичного технічного стану Вирішення проблеми оцінки надійності ГТС вимагає розробки системного, комплексного підходу, який би розглядав надійність всіх елементів системи.

Парк ГПА АТ «Укртрансгаз» є достатньо значним, налічує сотні ГПА, на яких встановлені САУ Ці системи побудовані на різноманітних апаратно-програмних засобах, зокрема релейної автоматики, а отже номенклатура є морально застарілою. За даними [58] аналіз поточного стану САУ ГПА в УМГ «Київтрансгаз» свідчить, що для 67% систем перевищено паспортний ресурс експлуатації, ще 17% вичерпають свій ресурс протягом 1-3 років, по системах САУ КС відповідно 59% та 18%. Відсутність запчастин, які не випускаються, відсутність деяких виробників САУ та розробників програмного забезпечення САУ унеможливлює забезпечення безвідмовної роботи систем автоматики.

Враховуючи, що сьогодні відома незначна кількість робіт стосовно діагностування САУ ГПА проаналізуємо ці роботи.

Одними з перспективних методів діагностування, які можна віднести до двох розглянутих вище груп, залишаються методи ідентифікації, короткий аналіз яких наведений в [6]. Методи параметричної ідентифікації можуть бути використані для контролю працездатності САУ ГПА. При цьому діагностичною ознакою є параметри діагностичної моделі САУ, яка може бути представлена у вигляді диференційних рівнянь. Різновидністю діагностичних моделей на основі диференційних рівнянь є передавальна функція.

Передавальна функція визначає як якісну, так і кількісну сторони зміни станів САУ. Структура передавальної функції визначає якісні сторони (коливний,

аперіодичний характер процесу), а її параметри визначають кількісні зміни, що відбуваються в САУ.

На практиці, як опція працездатності САУ широко використовуються як їх амплітудні частотні A(ω) (АЧХ) і фазові частотні φ(ω) (ФЧХ) характеристики, так і дійсна Re(ω) і уявна Im(ω) складові передавальних функцій. Найчастіше використовують частотні характеристиками A(ω) і φ(ω), які придатні для оцінки якості функціонування як лінійних, так і нелінійних (по крайній мірі, в рамках гармонійної лінеаризації) систем і володіють високими інформаційними властивостями. При відомій структурі контрольованої системи вони можуть бути визначені за характеристиками найпростіших динамічних елементів.

У багатьох випадках оцінку стану динамічної системи доцільно проводити на основі аналізу її перехідного процесу при деякому типовому вхідному впливі, як правило, це одиничний стрибок.

Для об’єктів, динаміка яких описується диференційними рівняннями не вище другого порядку, параметри моделі визначають безпосередньо за розгінною характеристикою. Такий спосіб визначення параметрів моделі можна успішно застосовувати у тих випадках, коли об’єкт (до якого можна віднести ГПА), знаходиться під дією незначних завад. У роботі [6] запропонований метод, в основі якого лежить процедура визначення площ k-тих порядків через моменти допоміжної функції, що дає змогу визначити як параметри, так і структуру передавальної функції. В роботі наводяться результати апробації методу щодо визначення динамічних властивостей ГПА з САУ без прив’язки до його технічного стану. Використовуючи спосіб ідентифікації коефіцієнтів передавальної функції замкнутої динамічної системи шляхом впливу на неї тестового сигналу у вигляді одиничного стрибка, в [59] запропоновано метод контролю і діагностики відмов САК ГПА. Реєстрація відгуків системи виконується в інтервалі часу завершення перехідних процесів. Проводячи обробку зареєстрованих відгуків системи за відповідним обчислювальним алгоритмом, здійснюється ідентифікація, контроль і діагностика її відмов. У загальному випадку контрольовані коефіцієнти передавальної функції замкнутої

системи виражаються через параметри діагностування у вигляді нелінійних рівнянь, що ускладнює їх обчислення і, відповідно, процес діагностування технічного стану САУ ГПА.

Комбінаційний метод контролю і діагностики САУ ГПА заснований на використанні загального алгоритму ідентифікації в просторі змінних, якими є коефіцієнти передавальної функції [60]. Він дає змогу отримати інтегральну інформацію, яка забезпечує оцінку контролю працездатності і виявлення відмов у досліджуваній системі шляхом побудови таблиць несправностей. Алгоритми контролю і діагностики на основі комбінаційного методу здатні забезпечити контроль працездатності та виявлення відмов параметрів всіх функціональних вузлів досліджуваних систем. В той же час, в роботі не наводяться результати апробації методу, що не дозволяє оцінити його ефективність та можливості практичного застосування. Запропонований в [61] послідовний метод контролю і діагностики відмов САУ ГПА будується на основі модифікованого алгоритму ідентифікації. Він дає змогу синхронно з процесом ідентифікації здійснювати контроль і діагностику відмов у реальному масштабі часу без побудови таблиць несправностей, що забезпечує високу швидкодію реалізованих на його основі алгоритмів. Автори відмічають, що метод є інформативнішим у порівнянні з комбінаційним методом, оскільки інформація по кожному контрольованому і діагностичному коефіцієнту видається автономно і синхронно з процесом ідентифікації. Така інформація включає коефіцієнти, що характеризують статичні властивості системи, та параметри поліномів чисельника і знаменника передавальної функції, які характеризують динамічні властивості системи. При цьому відсутні результати практичного підтвердження ефективності запропонованого методу. Метод діагностування САУ ГПА на основі їх декомпозиції заснований на ідентифікації передавальної функції всієї системи в цілому з подальшою декомпозицією отриманої передавальної функції та передавальної функції агрегатних вузлів системи [62]. При ідентифікації використовується загальний запис функції передачі системи, а ідентифікація здійснюється за один експеримент в автоматизованому режимі, при цьому

послідовно визначаються коефіцієнти поліномів чисельника і знаменника. При побудові і реалізації алгоритмів контролю і діагностики приймається гіпотеза про малоймовірну появу двох і більше одночасних відмов параметрів, функціональних вузлів системи в межах відрізка часу ідентифікації, що підтверджується відповідним розрахунком ймовірностей появи відмов. Підтвердження працездатності вказаного методу вимагає його експериментальної перевірки.

1.5 Висновки і постановка задачі досліджень

Проведений аналіз конструктивних особливостей ГТК-25і з точки зору контролепридатності показав, що при проектуванні конструкції ГТК-25і не передбачалися місця для встановлення штатних давачів, за допомогою яких можна було б проводити ефективне діагностування його технічного стану. У звязку з цим вони не обладнані системами діагностування, що не дозволяє контролювати зміну їх технічного стану в процесі експлуатації. Наявність штатних засобів контролю технологічних параметрів, як показала тривала практика експлуатації ГТК-25і, недостатня для організації моніторингу та діагностики стану підшипників, проточної частини ОК і інших його вузлів.

Тривалий період експлуатації ГПА (більше 30 років) призвів до того, що значний відсоток ГПА по АТ «Укртрангаз» відпрацював свій установлений моторесурс або близький до цього. Подальша експлуатація ГПА призводить до погіршення їх технічного стану і, як наслідок, виникнення відмов і аварійних ситуацій.

Наведений в роз. 1.2 аналіз дефектів основних вузлів ГПА в процесі експлуатації показав, що основна частина аварійних зупинок і тривалих вимушених простоїв пов’язані з дефектами механічного обладнання. При цьому тривалість аварійно-відновлювальних робіт може бути до двох-трьох місяців (на деяких ГПА значні поломки основних вузлів повторюються неодноразово). Вартість таких робіт у залежності від їх складності та складності вузла ГПА, що

відмовив, може сягати значних фінансових витрат. Друге місце за тривалістю простоїв та кількістю відмов (рис.1.3) займають системи автоматичного управління (САУ) та автоматики (більше 40 %). На час вводу в експлуатацію САУ ГПА були розроблені на сучасній, на той час, елементній базі провідними світовими виробниками – General Electric (GE), Nuovo Pignone, Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft (AEG), однак тривалий період їх експлуатації виявив ряд недоліків та прорахунків, кількість яких збільшувалась по причині фізичного і морального старіння апаратно-програмних засобів САУ. Все це призводило до збоїв в їх роботі і, як наслідок, – до хибних аварійних зупинок ГПА, КС.

Проведені обстеження САУ на КС, які експлуатуються на основних експортних магістральних газопроводах, показали [5], що вони фізично і морально застаріли, двічі відпрацювали паспортний ресурс і потребують негайної заміни, яка вимагає значних фінансових витрат. Впровадження інженерно-технічних рішень, які дозволяють продовжити термін експлуатації САУ ГПА, та заміна САУ застарілого типу на нові, як показав проведений аналіз, не призводить до значного підвищення надійності роботи ГПА.

Проведений аналіз методів діагностування ГПА та їх САУ показав:

– при розробці методів віброакустичної і параметричної діагностики, як правило, механічних вузлів і деталей ГПА – лопатевого апарату, камери згорання, силових елементів (підшипників), стану ОК, ТВТ, ТНТ і ін. дослідники основну увагу приділяють виявленню діагностичних ознак їх стану.

Для цього обробка віброакустичних сигналів і технологічних параметрів з метою виявлення діагностичних ознак їх стану, проводиться з використанням різних перетворень: швидкого перетворення Фур'є, дискретного косинусного перетворення, автокореляційної функції, розподілу класів Коена, S-перетворення, різних вейвлет-перетворень та ін. Обробка отриманих даних проводиться з використанням методів регресійного, кореляційного, дискримінантного аналізу, штучних нейронних мереж, генетичних алгоритмів та ін. методів;

– сьогодні відсутній системний підхід до розробки методів діагностування, при якому ГПА з САУ розглядається як єдина динамічна система, складовими

якої є як агрегатні вузли і деталі, так САУ та засоби автоматики. Тому при розробці методу діагностування конкретної складової цієї системи потрібно враховувати вплив її інших складових на результат діагностування.

В той же час вирішення вказаної задачі може ґрунтуватись на методах параметричної ідентифікації. Вони передбачають проводити оцінку стану динамічної системи, якою є ГПА з САУ, на основі аналізу її перехідного процесу при деякому типовому вхідному впливі та знаходженні параметрів передавальної функції основних контурів управління ГПА.

Виходячи з викладеного основними задачами подальшої роботи є:

– теоретичне обгрунтування методу діагностування САУ та методологічне обґрунтування щодо вдосконалення методу діагностування ГТК-25і на базі штучних нейронних мереж;

- розробка методичного, технічного і програмного забезпечення експериментальних досліджень технічного стану ГТК-25і з його САУ, їх проведення та аналіз результатів експериментів;

– розробка методів параметричної і акустичної діагностики ГТК-25і та методу діагностування його САУ;

– розрахунок ефективності діагностування технічного стану ГТК-25і та його САУ.

РОЗДІЛ 2
МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ РОЗРОБКИ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ГТК-25І ТА ЙОГО САУ

2.1 Теоретичні передумови розробки методу діагностування стану САУ

Аналіз об'єкту з метою визначення його стану передбачає побудову математичної моделі. Теоретичний аналіз об’єкту діагностування (ОД) при розв'язуванні задач діагностування передбачає деяку ідеалізацію, яка абстрагує потрібним чином вибрані істотні властивості об'єкта. Реальний об'єкт при цьому замінюється діагностичною моделлю (ДМ) - формалізованим описом ОД, необхідним для розв'язання задач діагностування Опис може бути представлено в аналітичній, табличній, векторній, графічній і іншій формі..

Оцінка стану САК ГПА здійснюється за діагностичними ознаками (параметрами і характеристиками). Зазвичай в якості параметрів приймаються параметри ДМ. В цьому випадку вибір або побудова адекватної ДМ має істотне значення для оцінювання стану ОД [63].

ДМ в загальному випадку визначає залежність вихідних параметрів (сигналів) об'єкта від його структурних (діагностичних) параметрів і вхідних сигналів. В деяких випадках у ДМ враховують час.

Найбільш широке застосування для опису процесів функціонування систем керування отримали диференційні рівняння. Коефіцієнти диференційних рівнянь є діагностичними параметрами. Вони дозволяють виявити дефекти, які з'являються як в статичних, так і в динамічних режимах. Задача діагностування полягає в визначенні коефіцієнтів диференційного рівняння (коефіцієнтів передачі і постійних часу) і порівнянні їх з допустимими значеннями.

Різновидністю ДМ на основі диференційних рівнянь є функція передачі, що визначається відношенням $Y(p)$ і $X(p)$ перетворень Лапласа вихідного $Y(t)$ і вхідного $X(t)$ процесів.

Функція передачі визначає як якісну, так і кількісну сторони зміни станів

ОД. Характер структурної побудови функції передачі визначає якісну сторону (коливний, аперіодичний характер процесу), а основні параметри визначають кількісні зміни, що відбуваються в ОД. Отже, контролюючи ступінь зміни основних параметрів *W(p)*, можна судити про зміни працездатності ОД. На практиці для діагностування використовується така модель до 3-го порядку.

В основу запропонованого методу контролю і діагностики відмов САК ГПА може бути покладений спосіб ідентифікації коефіцієнтів функції передачі замкнутої динамічної системи шляхом впливу на неї тестового сигналу у вигляді одиничного стрибка. Реєстрація відгуків системи виконується в інтервалі завершення перехідних процесів.

За реєстрованими відгуками і відповідним обчислювальним алгоритмом здійснюється ідентифікація, контроль і діагностика відмов системи.

Ідентифікація є першим етапом процедури контролю, в результаті чого відбувається визначення виду функції передачі, встановлюється перелік контрольованих і діагностичних величин, а також їх поточні значення [59].

Другий етап контролю полягає в порівнянні поточних значень контрольованих параметрів функцій передачі замкнутої системи з їх номінальними значеннями і виявленні ознак появи відмов по гранично допустимих значеннях їх відносних відхилень.

При наявності ознак появи відмов параметрів функції передачі замкнутої системи вступає в силу процедура діагностування відмов. Для цього здійснюється перехід від функції передачі замкнутої системи до функції передачі розімкнутої системи і встановлення зв'язків між контрольованими параметрами функції передачі і діагностованими параметрами регулятора, під яким розуміється САУ і об'єкта регулювання - ГПА.

У загальному випадку контрольовані коефіцієнти функції передачі замкнутої системи виражаються через діагностовані параметри у вигляді нелінійних рівнянь, що ускладнює їх обчислення.

На підставі застосування гіпотези про неможливість появи двох і більше одночасних відмов параметрів регулятора і об'єкта в межах малого інтервалу часу

ідентифікації встановлюються ознаки появи відмов елементів регулятора або об'єкта і від алгебраїчних виразів здійснюється перехід до логічних операцій додавання.

Далі складається таблиця станів системи при відмовах із вказуванням елемента регулятора або об'єкта, що відмовив, і логічна схема алгоритму діагностування.

Після цього здійснюється поглиблене діагностування відмов до функціональних елементів для конкретної технічної реалізації регулятора і об'єкта.

Математична основа контролю і діагностування САУ ГПА полягає в формуванні функції передачі замкнутої системи $W_{зс}(p)$ з одиничним зворотнім зв’язком через відомі функції передачі об’єкта регулювання $W_o(p)$ і регулятора $W_p(p)$, які одержані на етапі проектування САК:

$$W_{зс}(p) = \frac{W_p(p)W_o(p)}{1 + W_p(p)W_o(p)}. \qquad (2.1)$$

Коефіцієнти функцій передачі $W_{зс}(p)$ виражаються через коефіцієнти функцій передачі $W_p(p)$ і $W_o(p)$, відмову яких необхідно встановити за допомогою алгоритмів контролю і діагностування.

Виявлення відмов коефіцієнтів $W_o(p)$ і $W_p(p)$ базується на допусковому контролі параметрів системи, які визначають якість її роботи. З цією метою використовується нормована функція передачі $W^*_{зс}(p)$, для якої існує таблиця розрахункових значень параметрів і відповідні їм перехідні процеси.

Оцінка якості САУ по виду кривої перехідного процесу проводиться за допомогою прямих показників якості: перерегулювання, допустимої кількості коливань і часу перехідного процесу. Після операції ідентифікації коефіцієнтів функції передачі проводиться їх порівняння з номінальними значеннями. З умови тотожної рівності функцій передачі встановлюється співвідношення між ідентифікованими коефіцієнтами і параметрами регулятора і об’єкта регулювання, а також параметрами стандартної нормованої функції передачі.

Використовуючи встановлені залежності між коефіцієнтами функцій передачі обчислюються номінальні значення і допуски на відмову коефіцієнтів b_j і a_i функції передачі $W_{зс}(p)$.

Експериментальні дослідження показали, що динамічні характеристики газоперекачувального агрегату (ГПА) природного газу і в загальному випадку їх функції передачі є такими [64]:

$$W(s) = k\frac{1+\sum_{j=1}^{m} b_j s^j}{1+\sum_{i=1}^{n} a_i s^i}, \tag{2.2}$$

де k – коефіцієнт передачі об'єкта; a_i, $i=\overline{1,n}$, b_j, $j=\overline{1,m}$ – постійні величини – параметри функції передачі (2.2).

У виразі (2.2) завжди має місце нерівність $m<n$.

Замість функції передачі (2.2) будемо розглядати її нормовану функцію передачі [6]

$$W(s) = \frac{1+\sum_{j=1}^{m} b_j s^j}{1+\sum_{i=1}^{n} a_i s^i}, \tag{2.3}$$

для якої k=1.

При експериментальних дослідженнях вихідна величина об'єкта (ГПА) $Y(t)$ є розмірною величиною.

Для отримання нормованої перехідної характеристики вихідну величину $Y(t)$ подамо у відносних одиницях

$$y(t_k) = \frac{Y(t_k)}{Y_{max}}, k=\overline{1,N}, \tag{2.4}$$

де Y_{max} значення вихідної величини $Y(t_k)$ в експериментальному дослідженні при $t=t_N$; N – потужність масиву експериментального дослідження.

Оскільки розгінні характеристики об'єкту за своїм характером є аперіодичними, то полюси $s_i \; i=\overline{1,n}$ нормованої функції передачі (2.3) розміщені у лівій напівплощині комплексної площини коренів. Допускаємо, що серед полюсів $s_i \; i=\overline{1,n}$ немає кратних.

Величину $y(t)$ можна знайти із функції передачі (2.3) за умови, що вхідна величина $x(t)=1(t)$. У такому випадку $\lim\limits_{t\to\infty} y(t)=1$.

Тоді зображення вихідної величини $y(t)$ за Лапласом буде таким:

$$Y(s)=\frac{w(s)}{s}.$$

У відповідності з теоремою лишків [6], за відомою функцією передачі (2.3), коли $X(s)=\frac{1}{s}$, можна знайти нормовану перехідну характеристику за такою формулою:

$$Y(t)=\sum_{i=0}^{n}\lim(s-s_i)Y(s)e^{st}.$$

Оскільки $Y(s)$ має один нульовий корінь, то

$$y(t)=1+\sum_{i=0}^{n}\lim_{t\to s_i}(s-s_i)Y(s)e^{st}.$$

Беручи до уваги, що знаменник функції $w(s)$ є поліном степені n, функцію $Y(s)$ подамо у такій формі [6]:

$$Y(s)=\frac{1+\sum\limits_{j=1}^{m}b_j s^j}{s\left(1+\sum\limits_{i=1}^{n}a_i s^i\right)}, \qquad (2.5)$$

Вираз $1+\sum\limits_{i=1}^{n}a_i s^i$ розкладемо на прості множники. Тоді

$$Y(s)=\frac{1+\sum_{j=1}^{m} b_j s^j}{a_n s\prod_{i=1}^{n}(s-s_i)}.$$

З врахуванням останнього виразу формула (2.5) набуде такого вигляду:

$$y(t)=1+\frac{1}{a_n}\sum_{k=1}^{n} B_k \frac{e^{s_k t}}{s_k}\prod_{\substack{i=1,\\ i\neq k}}^{n}\frac{1}{s_k-s_i}, \tag{2.6}$$

де $B_k=1+\sum_{j=1}^{m} b_j s_k^j$; s_i, s_k – полюси функції $Y(s)$.

Технічний стан САУ ГПА будемо оцінювати за зміною площі S, яка утворена перехідною характеристикою (2.6). Очевидно, що при $t\to\infty$ площа S також буде прямувати до нескінченності. Тому кінцевий час t_f при обчисленні S виберемо із умови $y(t_f)=y_f$. Значення t_f знайдемо, розв'язавши рівняння, яке отримаємо із співвідношення (2.6)

$$\sum_{k=1}^{n} B_k \frac{e^{s_k tf}}{s_k}\prod_{\substack{i=1,\\ i\neq k}}^{n}\frac{1}{s_k-s_i}=a_n(y_f-1), \tag{2.7}$$

Рівняння (2.7) є нелінійним відносно величини t_f і для знаходження його розв'язку використаний метод половинного ділення відрізка (метод дихотомії), який вміщує локальний корінь [65].

Обчислимо площу S_f, взявши інтеграл від правої частини рівняння (2.7), коли t змінюється в межах від 0 до t_f. Отже,

$$S_f=\int_0^{t_f}\left(1+\frac{1}{a_n}\sum_{k=1}^{n} B_k \frac{e^{s_k t}}{s_k}\prod_{\substack{i=1,\\ i\neq k}}^{n}\frac{1}{s_k-s_i}\right)dt.$$

Із останнього виразу знаходимо

$$S_f = t_f + \frac{1}{a_n}\sum_{k=1}^{n}\frac{B_k}{s_k^2}\left(e^{s_k t_f} - 1\right)\prod_{\substack{i=1\\ i\neq k}}^{n}\frac{1}{s_k - s_i}. \qquad (2.8)$$

При вибраному значенню t_f, формула (2.8) дає змогу за значеннями полюсів передавальної функції визначити площу S_f, що утворена перехідною характеристикою і віссю абсцис.

Структуру функції передачі та її параметри будемо визначати методом площ (метод Симою) [59, 65].

2.2 Метод діагностування технічного стану системи автоматичного управління ГТК-25і за зміною площ його нормованих передавальних функцій

Ідея методу площ полягає у тому, що інверсна функція передачі $\tilde{w}(s) = \dfrac{1}{w(s)}$ розкладається в ряд Тейлора в околі точки s=0. При цьому в функції $w(p)$ штучно вирівнюють степені поліномів чисельника і знаменника, допускаючи, що $b_n = b_{n-1} = \cdots = b_{m+1} = 0.$ Тоді

$$\frac{1 + \sum_{i=1}^{n} a_i s^i}{1 + \sum_{j=1}^{n} b_j s^j} = 1 + S_1 s + S_2 s^2 + S_3 s^3 + \cdots .$$

Коефіцієнти розкладу S_k мають зміст площ k-го порядку [61]. Між значеннями S_k і параметрами нормованої функції передачі (2.2) існує функціональний зв'язок, який має вигляд матричного рівняння [64],

$$A\bar{\alpha} = \bar{S}, \qquad (2.9)$$

де

$$A=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & -1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & -S_1 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & -S_2 & -S_1 & -1 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 & -S_{k-1} & -S_{k-2} & -S_{k-3} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & -S_{N-1} & -S_{N-2} & -S_{N-3} & \cdots & -1 \end{bmatrix},$$

$$\bar{\alpha}=\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \cdots \\ a_n \\ \hdashline b_1 \\ b_2 \\ \cdots \\ b_m \end{bmatrix},\ \bar{S}=\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ \cdots \\ S_k \\ \cdots \\ S_N \end{bmatrix}.$$

Для обчислення значень S_k вводиться допоміжна функція $\varphi(t)=1-y(t)$, перетворення якої за Лапласом буде таким:

$$\Phi(s)=\frac{1}{s}\left(1-w(s)\right).$$

Розкладання функції $\Phi(p)$ в ряд Тейлора в околі точки p=0, то дає такий результат:

$$\Phi(p)=\mu_1+\mu_2 s+\cdots+\mu_i s^{i-1}+\cdots=\sum_{i=1}^{\infty}\mu_i s^{i-1}, \qquad (2.10)$$

де

$$\mu_i=\frac{1}{i!}\cdot\left.\frac{\mathrm{d}^i\Phi(s)}{\mathrm{d}s^i}\right|_{p=0}.$$

При відомих значеннях μ_i значення величин s_k можна визначити із матричного рівняння

$$\Delta\overline{S} = \overline{\mu}, \tag{2.11}$$

де

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -\mu_1 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -\mu_2 & -\mu_1 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -\mu_3 & -\mu_2 & -\mu_1 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -\mu_{N-1} & -\mu_{N-2} & -\mu_{N-3} & -\mu_{N-4} & \cdots & -\mu_1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\overline{S} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ \cdots \\ S_N \end{bmatrix}, \ \overline{\mu} = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \\ \mu_4 \\ \cdots \\ \mu_N \end{bmatrix}.$$

Значення S_1 дорівнює площі, яка утворена допоміжною функцією $\varphi(t)$ і віссю абсцис

$$S_1 = \mu_1 = \int_0^{t_N} \varphi(t)\,\mathrm{d}t,$$

Інші значення μ_i, $i = \overline{2,N}$, обчислювались за такою формулою:

$$\mu_i = S_i = \frac{1}{(i-1)!}\int_0^{t_N} (-t)^{i-1}\varphi(t)\,\mathrm{d}t\,,\ i = \overline{2,N}. \tag{2.12}$$

Методика обчислення площ S_i викладена в роботі [64].

Знаючи моменти допоміжної функції, із рівняння (2.8) визначимо площі

$$\overline{S} = \Lambda^{-1}\overline{\mu} \tag{2.13}$$

Після того як визначені площі S_i, $i = \overline{1,N}$, із рівняння (2.8) визначимо

параметри a_i, $i=\overline{1,n}$ та b_j, $j=\overline{1,m}$ функції передачі (2.2)

$$\bar{\alpha}=A^{-1}\bar{S}. \tag{2.14}$$

Математичний опис конкретної структури САУ будь-якого об’єкту, в тому числі ГПА, складається з функцій передачі регулятора і об’єкту (ГПА) [66].

Складання математичного опису у вигляді функції передачі замкнутої системи є підготовчим етапом в процедурах ідентифікації, контролю і діагностики.

Вид і порядок функції передачі замкнутої системи містить апріорну інформацію, необхідну для вибору і реалізації алгоритмів ідентифікації, контролю та діагностики. Порядок функції передачі визначає загальна кількість контрольованих коефіцієнтів і сумарний час, що витрачається на контроль і діагностику.

Для реалізації запропонованого в роз. 2.2 методу необхідно задати умови його працездатності. Умови працездатності можна сформулювати на основі аналізу моделі об'єкта діагностування або одержати на основі експерименту при дослідженні реального об'єкту. При цьому умови працездатності визначаються або як обмеження на зміну динамічних і діагностичних характеристик чи сукупності параметрів об'єкту, або як вимоги виконання заданих функцій у відповідності з певною логікою [67]. В даному випадку умови працездатності будемо визначати як обмеження на значення площ нормованих передавальних функцій ГТК-25і, які можна отримати на основі значної кількості статистичних даних, отриманих при технологічних і експлуатаційних пусках ГТК-25і.

2.3 Використання штучних нейронних мереж для діагностування технічного стану ГПА. Вихідні положення

Штучні нейронні мережі (ШНМ) відомі ще з 1940-х років, але до цього часу вони не працювали ефективно. Зараз вони стали надзвичайно потужними і є однією з найпопулярніших моделей машинного навчання, жодна з інших моделей не може наблизитися за якістю до ШНМ.

ШНМ є дуже потужним інструметом навчання при наявності значних масивів даних. Це означає, що нейронна мережа має достатньо даних для створення статистичних моделей, саме тому вони стають все більш успішними через значну кількість нових даних, що збільшується щороку. ШНМ - це модель обробки інформації, що подібна тому, як біологічні нервові системи обробляють інформацію. Вони вільно змодельовані за нейронною структурою кори головного мозку ссавців, але на значно менших масштабах. Простіше кажучи, це проста математична модель, яка використовується для паралельної обробки нелінійних взаємозв'язків між входами та виходами, як це робить людський мозок щосекунди [68].

Нейронні мережі використовуються для різних завдань, класифікації, регресії, діагностування та розпізнавання, кластеризації і ін.. Вони використовуються в автономних автомобілях, розпізнаванні символів, стисненні зображень, прогнозуванні фондового ринку та багатьох інших додатках.

Здатність ШНМ навчатися швидко - це те, що робить їх такими потужними та корисними для різноманітних практичних завдань. Інформація протікає через нейронну мережу двома різними шляхами. Коли модель навчається або коли модель здійснює передбачення (після навчання, валідації та тестування), інформація з набору даних надходять у мережу через вхідні нейрони, за якими розміщені шари прихованих нейронів, з яких, в свою чергу, інформація надходить на вихідні нейрони. Це називається мережею прямого розповсюдження. Кожен нейрон отримує вхідні дані від нейронів, що знаходяться ліворуч, вхідні дані помножуються на вагу з'єднань по яких вони рухаються. Кожен нейрон таким

чином складає всі вхідні дані, які він отримує, і, якщо сума перевищує певне порогове значення, нейрон «спрацьовує» і запускає нейрони, з якими він з'єднаний справа.

Для навчання ШНМ, вона повинна мати інформацію, що нею зроблено неправильно, а що - правильно, тобто мати зворотний зв'язок.

ШНМ вивчають речі за допомогою процесу зворотного зв'язку, званого зворотним розповсюдженням помилки. Тут порівнюється вихід мережі з виходом, який вона повинна була створити, і використовуючи різницю між виходами, щоб змінити ваги зв'язків між нейронами в мережі. З часом зворотнє розповсюдження призводить до того, що мережа навчається, зменшуючи розрив між вихідним та передбачуваним вихідним сигналом, тому нейронна мережа засвоює правильний вихід.

В основі будь-якої ШНМ лежить найменший будівельний блок - штучний нейрон - нелінійна математична функція яка звязує один або кілька входів з виходом [69].

Контрольоване навчання (Superwised Learning) - це один зі способів використання ШНМ. При контрольованому навчанні використовуються попередньо розмічені дані. У контрольованому навчанні кожен приклад є парою, що складається з вхідного вектора і бажаного вихідного значення.

Широкого застосування для діагностування технічного стану об'єктів різного призначення набули двошарові ієрархічні нейронні мережі прямого поширення, що тренуються за алгоритмом зворотного поширення похибки. Основна ідея цього методу полягає в поширенні сигналів помилки від виходів мережі до її входів.

Метою навчання мережі з алгоритмом зворотного поширення помилки є таке налаштування ваг її нейронів, щоб набір множини входів відповідав бажаному набору виходів.

Алгоритм зворотного поширення похибки наступний:

- ініціалізуємо ваги маленькими випадковими значеннями;
- вибираємо чергову навчальну пару з навчальної множини;

- подаємо вхідний вектор на вхід мережі;
- обчислюємо вихід мережі;
- обчислюємо різницю між виходом мережі і потрібним виходом;
- коригуємо ваги мережі для мінімізації помилки;
- повторюємо кроки для кожного вектора навчальної множини доти, поки помилка на всій множині не досягне мінімального рівня.

Метод зворотного поширення помилки є швидким та ефективним методом навчання при проектуванні мереж для вирішення задач діагностики ГПА [71, 72].

2.4 Вибір структури нейромережі для діагностуання технічного стану ГПА та її вхідних параметрів

Засноване на нейронній мережі виявлення дефектів вузлів ГПА вимагає використання технічних засобів, з застосуванням яких отримують вхідну інформацію для ШНМ з метою її подальшого навчання. Такою інформацією можуть бути технологічні параметри роботи ГПА, або характеристики вібраційних і акустичних процесів, що супроводжують його роботу.

Так, в [32] ідентифікація стану агрегатних вузлів газотурбінної електростанції - компресора, камери згоряння і турбіни проводится з використанням математичної моделі її технологічних параметрів, яка представляється у вигляді моделі штучної нейронної мережі. Аналогічна модель робочого процесу двохпотокового ТРД для ідентифікації його стану [34] також представлена ШНМ подібною до [32]. Використання ймовірнісної нейронної мережі (PNN) для діагностування дефектів газового тракту газової турбіни розглядається в [35]. В [36] запропоновано новий комбінований метод на базі штучної нейронної мережі для діагностування газового тракту двохвальної ГТУ. В [72] розглядається нова мультимережева архітектура, що заснована на принципі «Правило більшості», яка в порівнянні з багатошаровою перцептронною мережею (MLP), мережею з квантуванням вектора навчання (LVQ), модульною багатошаровою перцептронною мережею і мережею на основі радіальної базисної

функції, характеризується кращими можливостями узагальнення і надійністю. Для моделювання одного номінального і десяти дефектних станів газової турбіни використали ШНМ [74], що дозволило створити реальні набори даних для її навчання та тестування. Система діагностування на її основі дозволяє розпізнавати дефекти вузлів на стадії їх зародження. Архітектура ШНМ зі зворотним зв'язком та одним прихованим шаром, що може оновлюватися по мірі навчання, розглядається в [75].

Для розпізнавання технічних станів ГПА з використанням ШНМ необхідно провести її побудову, або використати для цього готовий нейропакет. Останнє вимагає проведення наступних етепів:

- вибору типу (архітектуру) нейронної мережі;
- її навчання шляхом підбору значення ваг.

Тип ШНМ визначається:

- кількістю входів і виходів ШНМ де кожному з них відповідає певний визначений нейрон;
- кількістю нейронів і характером зв'язків між ними;
- функцією стану і передавальною функцією.

Основними функціями кожного нейрона є:

- оцінювання вхідних значень за допомогою відповідних ваг;
- визначення суми комбінацій вхідних значень за допомогою функції стану;
- порівняння суми зі значенням порогової величини (функція активізації); визначення власного виведення даних [69].

З врахуванням викладених вище вихідних положень щодо використання ШНМ для вирішення задачі діагностування технічного стану ГПА, та досвіду використання ШНМ для контролю і діагностування стану газотурбінної електростанції (ГТеС) [32], двохпотокового ТРД [34], газового тракту газової турбіни [35], двохвальної ГТУ [36], повітряного компресора [55] та газових турбін [70] і ін., використаємо двошарову ієрархічну ШНМ прямого поширення, що

тренується за алгоритмом зворотного поширення похибки, для діагностування технічного стану ГТК-25і.

В роз. 1.3.2 при аналізі методів віброакустичної діагностики ГПА вказувалося, що віброакустичні процеси, які супроводжують роботу ГПА є найбільш інформативними, а їх обробка, зокрема з використанням ШНМ, дозволяє виявити діагностичні ознаки, зміна яких буде характеризувати зміну технічного стану ГПА. Тому для навчання ШНМ використаємо характеристики вібраційних і акустичних процесів, що супроводжують роботу ГТК-25і.

Моделювання трьох станів ГТК-25і – «дефектного» (до ремонту), «номінального» (після ремонту) та “поточного” будемо проводити на основі отриманих результатів вимірювання і обробки характеристик віброакустичних процесів, генерованих ГТК-25і. В результаті обробки віброакустичних процесів з використанням методу ШПФ та отриманням спектру процесу, а також значень середнього квадратичного відхилення для кожної їх вибірки, отримаємо вхідні дані трьох станів ГТК-25і, для подачі на вхід нейронної мережі. На вхід нейронної мережі будуть подаватись п’ять максимальних амплітудних складових спектру акустичного шуму та вібрації для «номінального». «дефектного» та “поточного” станів ГПА, а також значення середнього квадратичного відхилення для кожної вибірки, які будуть обчислені. Таким чином вхідна розмірність нейромережі 12.

Навчальний алгоритм зворотного поширення похибки полягає в тому, щоб перед початком навчання всім вагам повинні бути надані невеликі початкові значення, вибрані випадковим чином. Це гарантує, що в мережі не станеться насичення великими значеннями ваги, і запобігає ряду інших патологічних випадків. Для того, щоб визначити проблему розпізнавання образів, організуємо набір вхідних векторів у вигляді стовпців в матриці. Потім організуємо ще один набір цільових векторів (*target*), який вказує на класи, до яких відносяться вхідні вектори.

Оскільки маємо три стани «номінальний», “поточний” і «дефектний», то скористаємося підхідом для трьох класів. Тобто встановлюємо кожне “one hot” кодування для кожного класу.

Номінальному стану відповідає комбінація 001, поточному стану відповідає комбінація 010 і дефектному стану - комбінація 100 у “one hot” кодуванні.

В результаті отримаємо ШНМ, яка складається з дванадцяти входів, двох прихованих шарів, що містить 256 і 128 нейронів та вихідного шару, що містить 3 нейрони. Структурна схема такої нейронної мережі показана на рис. 2.1.

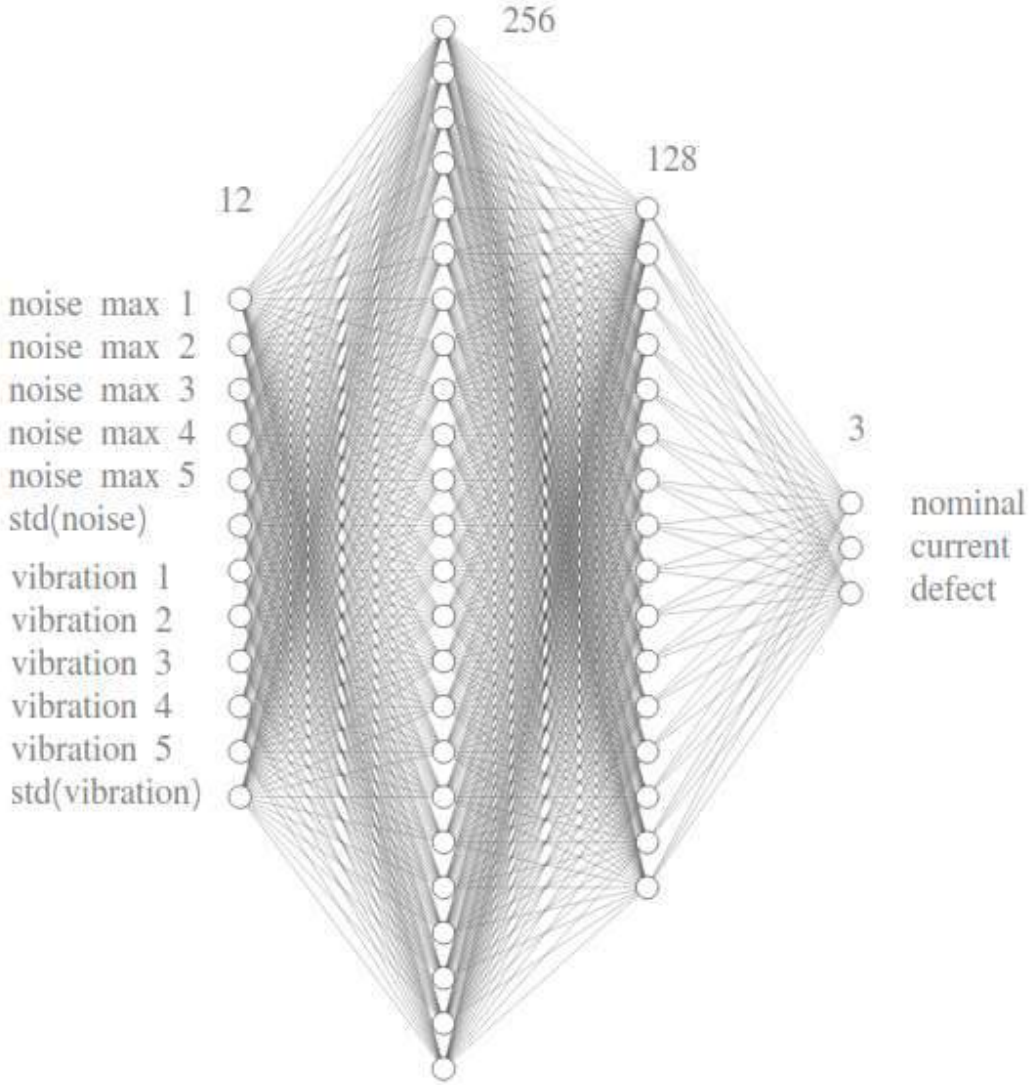


Рисунок 2.1 – Структурна схема нейронної мережі для розпізнавання трьох станів ГТК-25і

Приховані шари мають 256 та 128 нейронів. Таке число нейронів вибрано з врахуванням необхідності забезпечення потрібної ємності мережі. Якщо при

навчанні мережі виникнуть труднощі, то можна збільшити кількість нейронів цього рівня. Мережа навчається так, щоб сформувати одиницю в єдиному елементі вектора виходу, позиція якого відповідає номеру символу, і заповнити решту вектора нулями. Однак функція активації softmax на виході має оцінки ймовірностей відповідних станів. Тому на завершальному етапі вихідний сигнал обробляється функцією *argmax*, яка привласнює значення 1 єдиному елементу вектора виходу, а всім іншим – значення 0.

Для класифікації та вирішення задачі розпізнавання слід застосовувати нейрони з ReLU функцією активації в прихованих шарах.

Висновки до розділу 2.

1. Розглянуті теоретичні передумови розробки методу діагностування технічного стану САУ ГПА за зміною площі, яка утворена перехідною характеристикою ГПА, та обгрунтовано визначення структуру функції передачі та її параметрів методом площ (метод Симою).

2. Розроблена процедура визначення площ нормованих передавальних функцій ГТК-25і, як діагностичних ознак запропонованого методу, та запропоновано умови його працездатності визначати як обмеження на значення діагностичних ознак. Останні можна отримати на основі статистичних даних, отриманих при технологічних і експлуатаційних пусках ГТК-25і.

3. Виходячи з базових положень побудови штучних нейронних мереж запропоновано для діагностування технічного стану ГПА використати двошарові ієрархічні нейронні мережі прямого поширення, що тренуються за алгоритмом зворотного поширення похибки.

4. Проведено обгрунтування структури нейромережі для діагностуання технічного стану ГПА, яка складається з дванадцяти входів, двох прихованих шарів, що містить 256 і 128 нейронів та вихідного шару, що містить 3 нейрони, та її вхідних параметрів – п’яти максимальних амплітудних складових спектру акустичного шуму та вібрації для «номінального», «дефектного» і «поточного» станів ГТК-25і, а також значення середнього квадратичного відхилення для кожної вибірки, які будуть обчислені.

РОЗДІЛ 3
РОЗРОБКА ДІАГНОСТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГТК-25і з САУ ТА ЇХ РЕЗУЛЬТАТИ

3.1 Методика проведення експериментальних досліджень

Одним з найважливіших вузлів ГПА є осьовий компресор, призначений для засмоктування атмосферного повітря, стиснення в 16-ти ступенях і подачі стиснутого повітря в камери згоряння з продуктивністю 360 000 Нм/год. Для вирішення першої задачі параметричної діагностики технічного стану осьового компресора ГПА типу ГТК-25і виробництва фірми “Нуово Піньйоне”(Італія), які експлуатуються в Богородчанському ЛВУМГ, виробником передбачений контроль таких технологічних параметрів, як температура повітря на вході-виході ОК; середньоквадратичне значення вібрації підшипника №1; температура масла змащування на зливі з підшипника №1; оберти валу ОК та розрідження повітря на його вході.

Аналіз результатів тривалої експлуатації осьових компресорів ГТК -25і показав, що за зміною наведених параметрів неможливо контролювати технічний стан підшипників та проточної частини осьового компресора. В той же час результати проведених експериментів та аналіз передаварійних трендів ГТК-25і, проведений за графіками технологічних параметрів, отриманих з використанням спеціально розробленої архівної програми, дає підстави зробити висновок, що аварійній зупинці ГПА №3 8.11.2008р. передувало пониження тиску повітря на виході ОК, тобто зниження його продуктивності і, як наслідок, аварійне підвищення температури вихлопних газів. При огляді його проточної частини були виявлені чисельні пошкодження рухомих і статорних лопатей (рис. 1.6), що є підтвердженням зробленого висновку.

Виходячи з вказаного, для організації більш ефективного контролю технічного стану проточної частини та підшипників ОК було запропоновано

додатково проводити контроль наступних технологічних параметрів: нефільтрованого значення вібрації опорного підшипника №1 ОК та температури його корпусу, реєстрації тиску повітря (продуктивності) на виході осьового компресора, а також здійснювати акустичний контроль його роботи, виходячи з того, що пошкодження його лопатей та підшипників буде впливати на зміну характеристик акустичних коливань, що супроводжують роботу ГТК-25і [76, 77].

Для експериментальної перевірки розробленого методу діагностування САУ ГПА за його розгінними характеристиками методика передбачала проведення експериментів на КС-39 «У-П-У» Богородчанського ЛВУМГ шляхом зняття розгінних характеристик ГТК-25і при його технологічних і штатних пусках на протязі дев'яти місяців 2019 року з березня по грудень. Було отримано дев'ять розгінних характеристик ГПА в координатах «час-значення технологічних параметрів» (Додаток Б, Додаток В).

Зміна поточних значень вказаних параметрів, під час технологічного запусків ГПА, контролювалися за допомогою додатково змонтованих в щитах керування ГПА контролерів МТР-8 та спеціально адаптованих програмних пакетів Wizcon та Steinberg Nuendo з інтервалом 0,1 секунди.

Для подальшої обробки трендів контрольованих параметрів ГПА, дані з системи САУ були записані у вигляді файлів формату .csv (часова мітка, значення параметру), які потім були конвертовані у файли типу .xlsx.

Технологічні параметри за допомогою програм записувалися і архівувалися у вигляді таблиці Excel. З використанням додаткових технічних засобів і додатково розробленого програмного забезпечення САУ ГТК-25і записувалися і архівувалися поточні значення вібраційних і акустичних процесів, що супроводжували його роботу (Додаток В).

3.2 Технічне забезпечення експериментальних досліджень

В 3.1 було відмічено, що виробником ГТК-25і передбачений контроль наступних технологічних параметрів роботи осьового компресора (ОК):

- середньоквадратичне значення вібрації підшипника №1;

- температура масла змащування на зливі з підшипника №1;

- частота обертів валу ОК;

- перепад тиску на вхідних повітряних фільтрах,

- тиск повітря на виході.

Для організації комплексної системи діагностування технічного стану ГТК-25і було проведено удосконалення САУ ГТК-25і [78] яке передбачало:

- отримання експериментальних даних технологічних параметрів ГПА та характеристик вібраційних і акустичних процесів, що супроводжують роботу ГТК-25і, з метою їх подальшої обробки для виявлення діагностичних ознак технічного стану;

- використання отриманої інформації для вибору раціональних режимів роботи з використанням САУ та з врахуванням технічного стану ГТК-25і. Удосконалення САУ передбачало розробку і впровадження додаткового технічного і програмного забезпечення.

Технічне забезпечення полягало в монтажі давачів для вимірювання додаткових технологічних і віброакустичних параметрів: вібрації опорного підшипника №1 ОК за допомогою широкосмугового перетворювача з нефільтрованим вихідним сигналом YT2, (рис. 3.1); моніторингу температури безпосередньо його корпусу термоперетворювачем опору TT5; здійсненні акустичного контролю роботи ГТК-25і з використанням розробленої системи акустичного контролю, яка реалізована на чутливому електретному мікрофоні XT1 (рис. 3.1). Технічні характеристики додаткових давачів САУ наведені в Додатку Г.

Для підключення вихідних сигналів від додаткових давачів технологічних параметрів та вібраційних і акустичних процесів, що супроводжують роботу ГТК-25і та штатних давачів ТВТ, ТНТ, ТН на щиті управління ГПА було змонтовано два комплекти 8-ми канальних мікропроцесорних реєстраторів-регуляторів типу МТР-8. Інформація про вищевказані технологічні параметри ГПА по протоколу обміну Modbus RTU надходить на ПК з SCADA Wizcon. Сигнали з електретного

мікрофону XT1 акустичної системи контролю та широкосмугового віброперетворювача YT2 по коаксіальному кабелю підключені через аудіо модуль до окремого ПК з програмним пакетом обробки високочастотних сигналів Steinberg Nuendo. В перспективі можливо організувати автоматичний обмін діагностичною інформацією по мережі Ethernet між ПК з програмним забезпеченням Wizcon та Steinberg Nuendo.

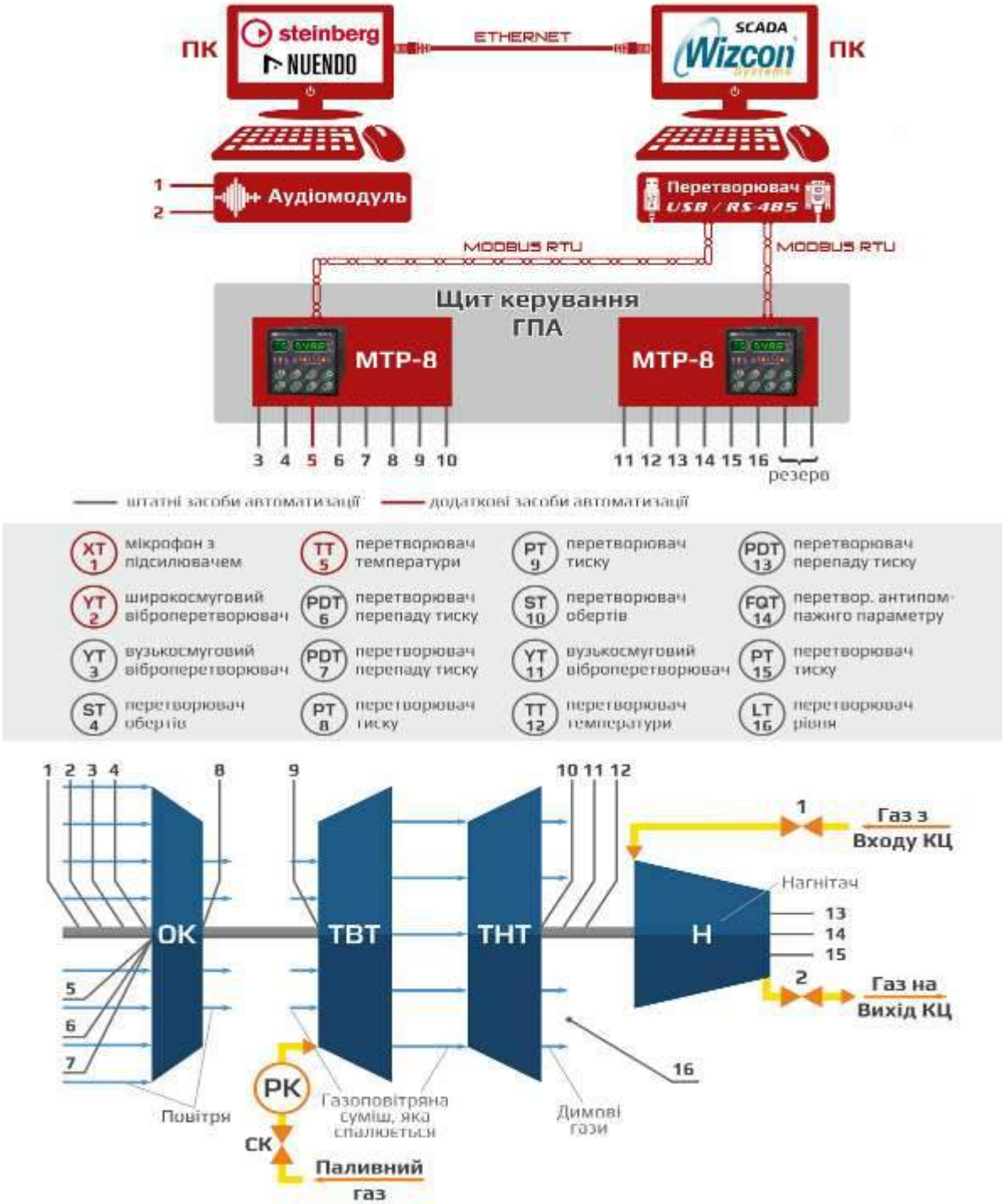


Рисунок 3.1 - Структурна схема САУ ГТК-25і

Уніфікований струмовий сигнал 4-20 мА з перетворювача температури ТТ5 підшипника №1 ОК підключений до реєстратора МТР-8 (рис. 3.1), на якому цифрове значення параметрів постійно індикується і по протоколу RS- 485 транслюється на ПК.

Вказані додаткові технологічні і віброакустичні параметри в комплексі з штатними засобами контролю технологічного стану ГТК-25і підключено через мікропроцесорні регулятори типу МТР-8 «Мікрол» до SCADA Wizcon на ПК на головному щиті керування КС-39 “У-П-У”.

3.2.1 Обгрунтування місця встановлення давача акустичних коливань на корпусі осьового компресора та його вибір

При розробці системи акустичного контролю на базі чутливого електретного мікрофона виходили з того, що дефекти лопатей та підшипників ОК будуть впливати на зміну характеристик звукових коливань, які супроводжують його роботу (рис. 3.2 а). Сам акустичний шум, який супроводжує роботу ГТК-25і, є джерелом діагностичної інформації, оскільки поява дефекту призводить до виникнення нових збурень та зміни спектра акустичних коливань.

а

б

Рисунок 3.2 – Електретний мікрофон: а – зовнішній вигляд; б - місце монтажу на ОК ГТК-25і.

Система акустичного контролю була змонтована на корпусі ОК в районі підшипника №1, в безпосередній близькості біля лопатей 0,1,2 ступеней. Місце монтажу обумовлено тим, що найбільш навантаженими елементами ОК є лопаті 0,1,2 ступеней, що підтверджується як статистикою відмов, так і дефектами лопатей. Оскільки укриття ГПА по вибухо-пожежобезпеці відноситься до 2-класу, категорії А, систему акустичного контролю з електректним мікрофоном змонтовано у вибухобезпечному корпусі (рис. 3.2 б).

Для надійної роботи мікрофона в якості вхідного буфера підсилення було використано спеціалізовану мікросхему для підсилення сигналу мікрофона CD 4007, типова схема [79] включення якої приведена на рис.3.3 (розрахунок підсилювача приведено в Додатку Д).

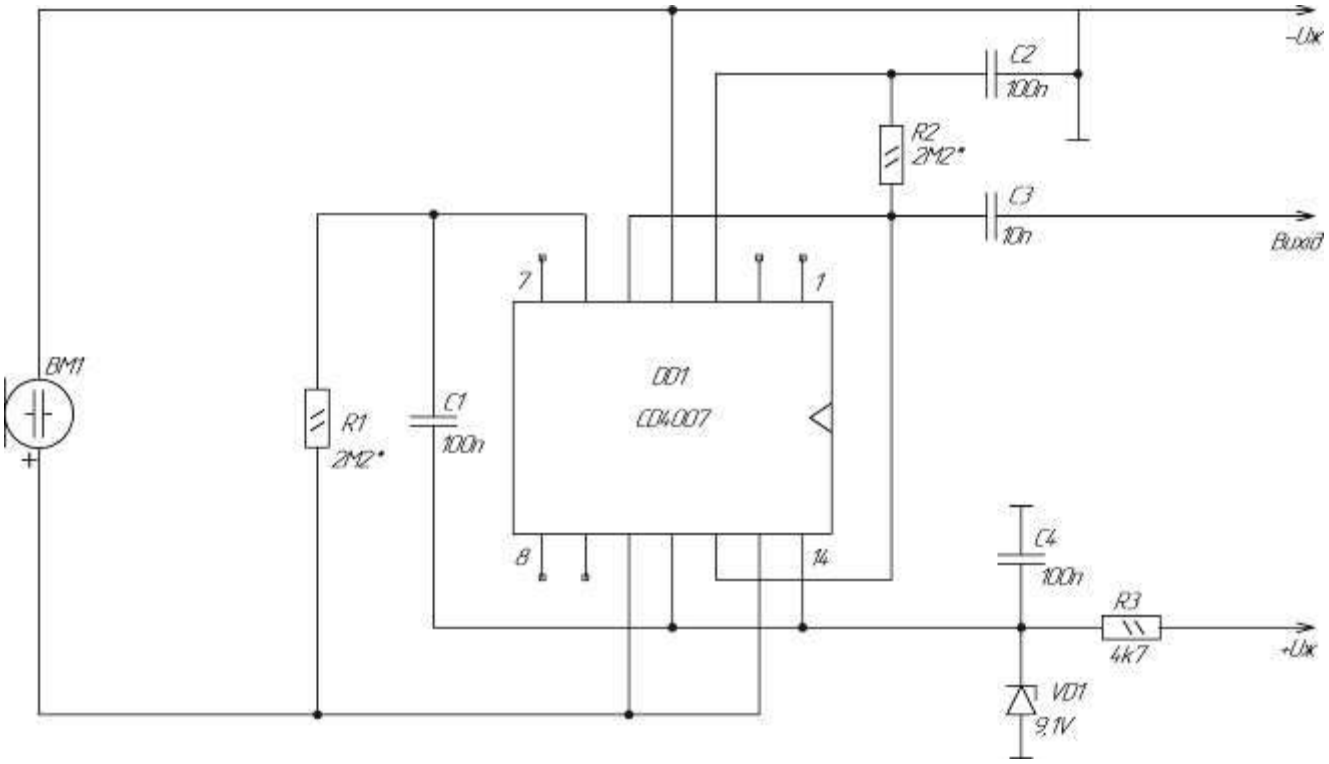


Рисунок 3.3. – Схема включення мікрофона і підсилювача CD 4007

Перевірка роботи схеми в цілому при вхідному сигналі амплітудою 1мВ була проведена з використанням програми Micro-Cap 7. Результати моделювання, наведені на рис. 3.4 і 3.5.

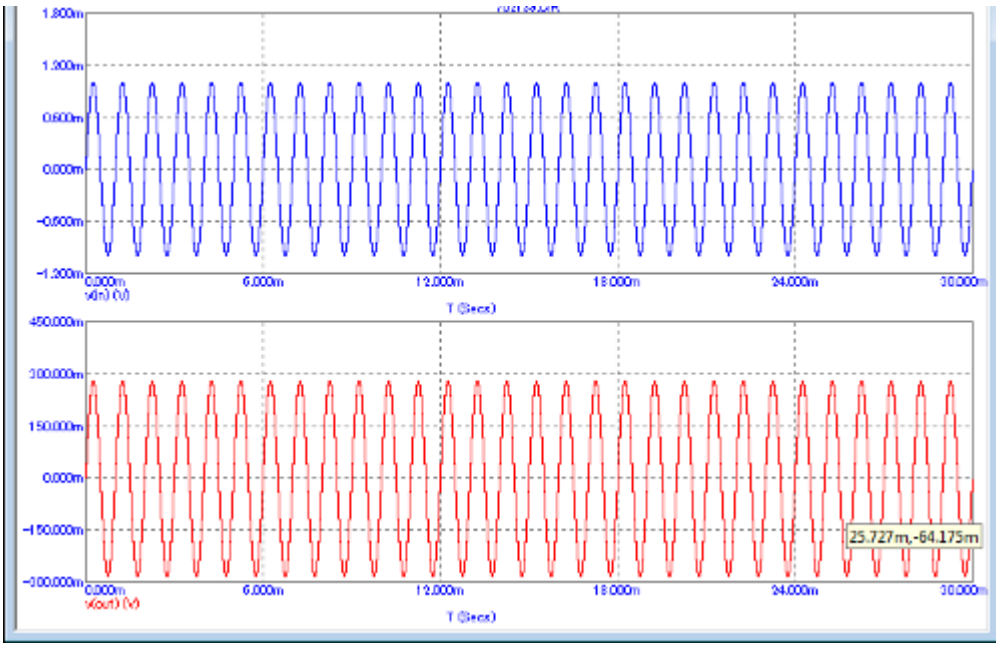


Рисунок 3.4 - Перевірка працездатності схеми. Підсилення гармонічного сигналу

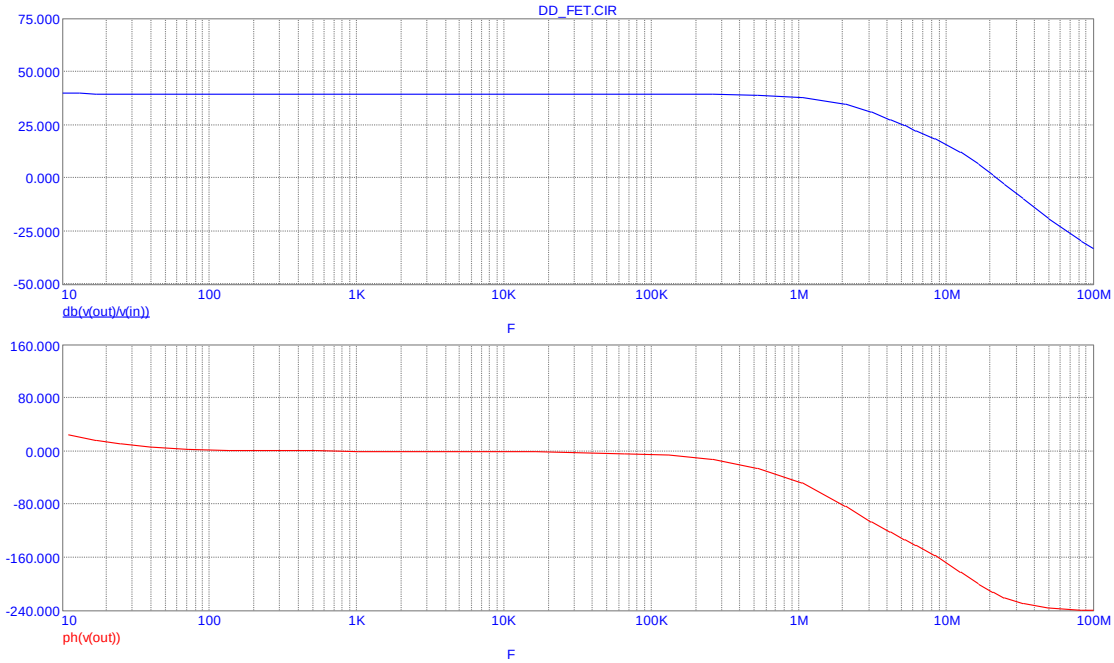


Рисунок 3.5 - АЧХ і ФЧХ підсилювача, охопленого від’ємним зворотнім зв’язком

Графіки підтверджують стійкість підсилювача до збурень а також підтверджують розрахований коефіцієнт підсилення (52.5). Графік коефіцієнту гармонік зображено нижче.

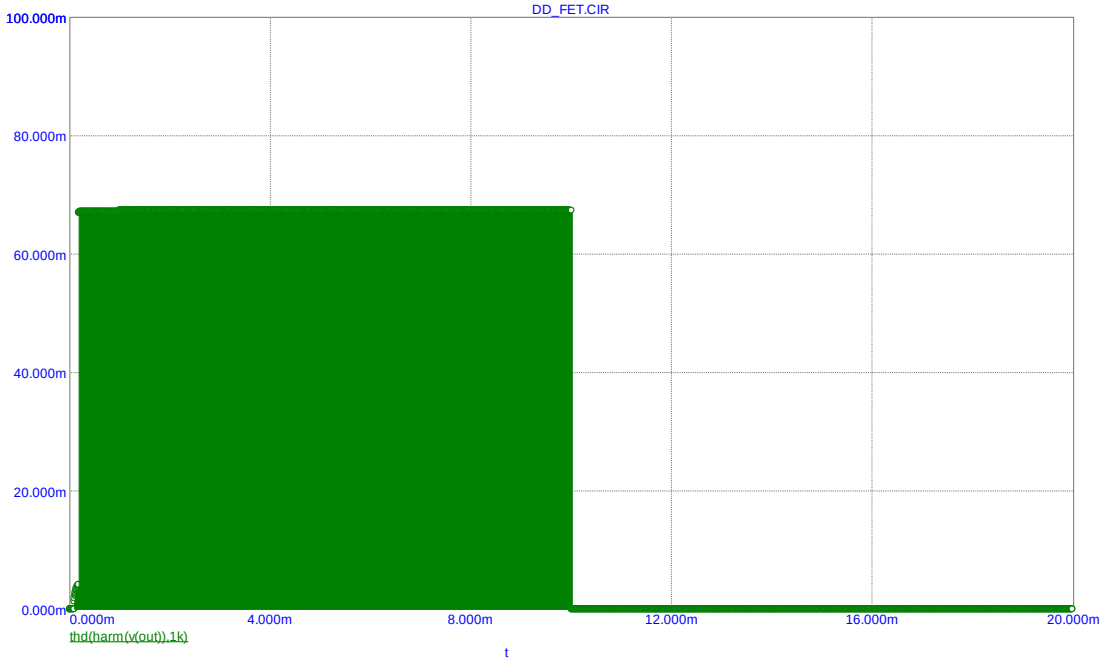


Рисунок 3.6 - Коефіцієнт гармонік проектованого підсилювача, %

Нижче на рис. 3.7 представлено принципову електричну схему підсилювача сигналу електретного мікрофона.

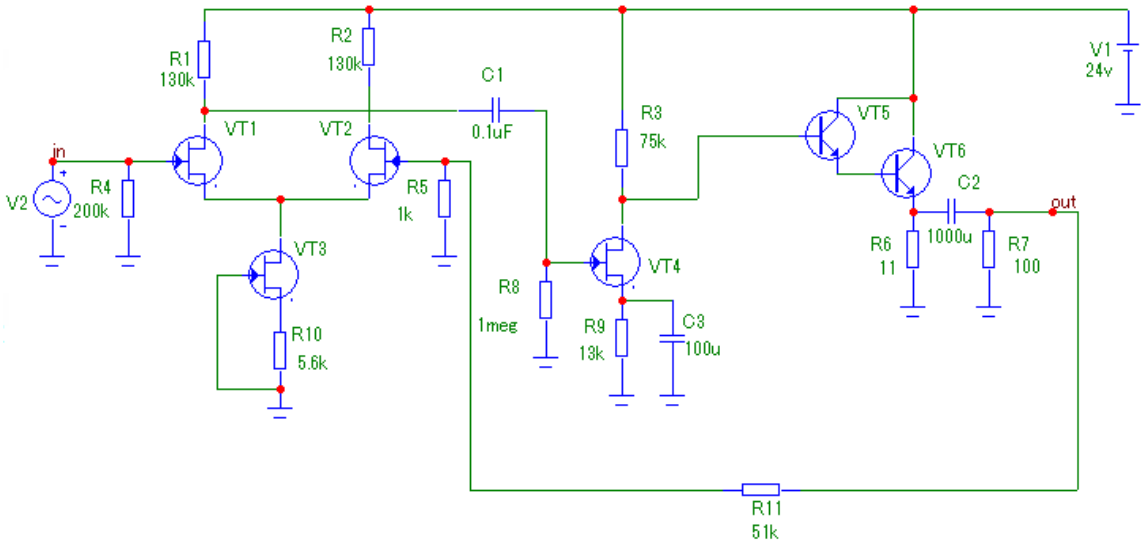


Рисунок 3.7 – Схема електрична принципова

3.3 Програмне забезпечення експериментальних досліджень

Додаткове програмне забезпечення вдосконаленої САУ на базі SCADA - програми Wizcon 8.3 [80] розроблено у вигляді спеціального програмного пакету з мнемосхемами, трендами, прив'язаними до технологічних схем ГПА ГТК 25і, що реалізує також алгоритми діагностування технічного стану ГТК-25і і його САУ, блок-схема якого наведена на рис. 3.8.

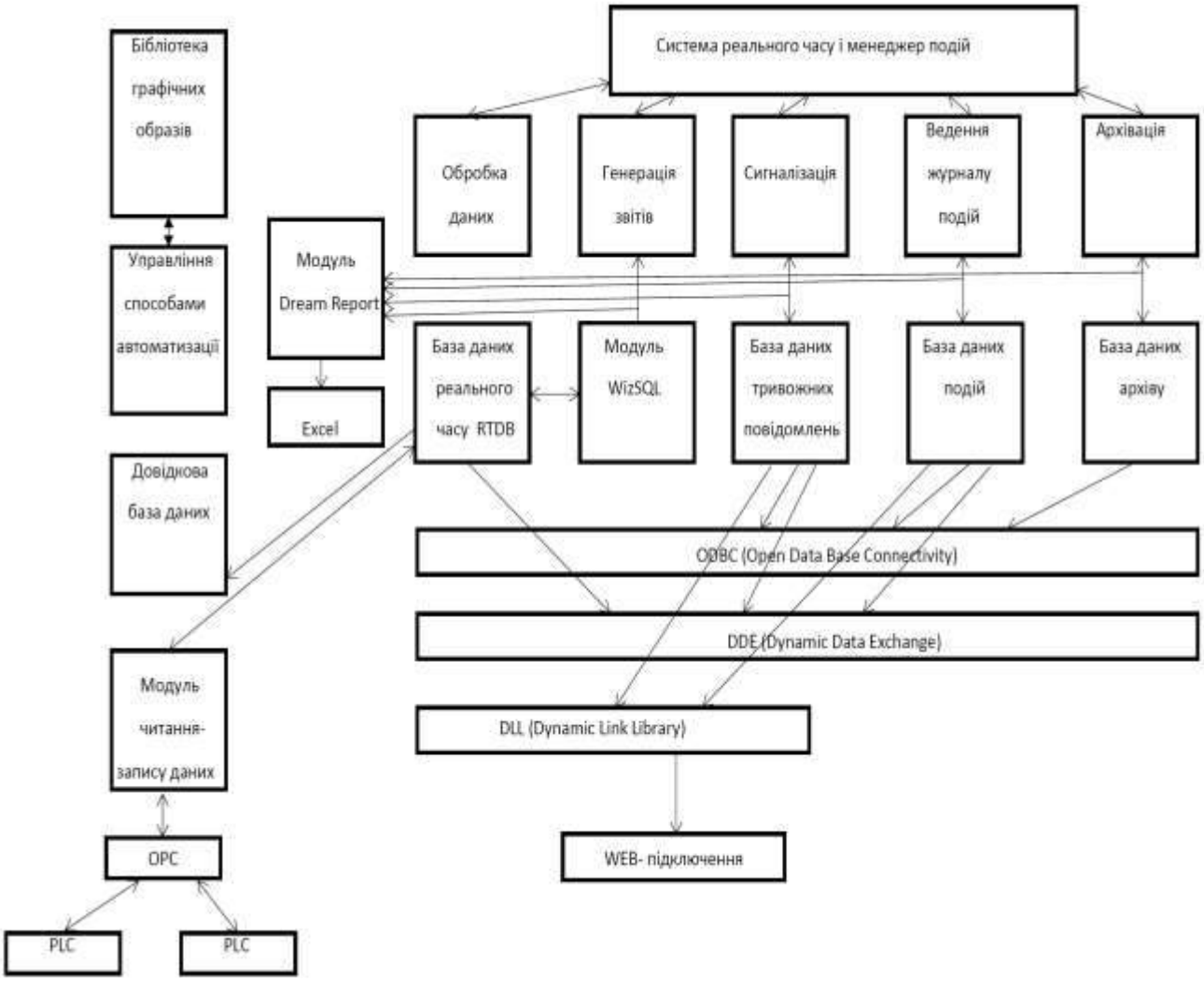


Рисунок 3.8 - Блок-схема SCADA WIZCON

Wizcon 8.3 виконує функцію опитування змонтованих в щитах керування ГПА мікропроцесорних реєстраторів МТР-8, а також візуалізації, архівації технологічних параметрів і встановлений на окремо виділеному ПК головного щита керування КС-39 «У-П-У» [10].

SCADA Wizcon - програмний пакет, призначений для розробки або забезпечення роботи в реальному часі систем збору, обробки, відображення та архівування інформації про об'єкт моніторингу або управління. Wizcon є 32-бітовою програмою і тим самим використовує всі переваги цих сучасних операційних систем. Внутрішня архітектура Wizcon реалізує багатозадачний режим и багатониткові механізми. Наприклад, Wizcon може обмінюватись інформацією з програмованими логічними контролерами (PLC- в нашому випадку контролери МТР-8) по 16 каналах зв'язку без затримки.

Основні компоненти SCADA Wizcon:

- драйвери або сервери введення-виведення — програми, що забезпечують зв'язок SCADA з промисловими контролерами, АЦП і іншими пристроями введення-виведення інформації. В даній системі застосований OPC-сервер (від англ. Open Platform Communications);
- диспетчерська система (головний термінал) (MTU англ. Master Terminal Unit) реального часу — збирає дані про процес і відправляє команди процесору (керування), забезпечує обробку даних в межах заданого тимчасового циклу з урахуванням пріоритетів;
- програмований логічний контролер (PLC англ. Programmable Logic Controller) використовується як польовий пристрій (МТР-8 Мікрол);
- комунікаційна інфраструктура (CS англ. Communication System) для реалізації промислової мережі;
- людино-машинний інтерфейс (HMI англ. Human Machine Interface) — інструмент, який подає дані про хід процесу людині операторові, що дозволяє операторові контролювати процес і управляти ним;
- програма-редактор для розробки людино-машинного інтерфейсу;
- база даних реального часу — програма, що забезпечує збереження історії процесу в режимі реального часу;
- сигналізація тривожних повідомлень — програма, що забезпечує автоматичний контроль технологічних подій, віднесення їх до категорії

нормальних, що попереджають або аварійних, а також обробку подій оператором або комп'ютером;

- генератор звітів — програма, що забезпечує створення призначених для користувача звітів про технологічні події, містить набір редакторів для їх розробки;

- модуль WizSQL (англ. Structured query language — мова структурованих запитів) — декларативна мова програмування для взаємодії користувача з базами даних, що застосовується для формування запитів, оновлення і керування реляційними БД, створення схеми бази даних та її модифікації, системи контролю за доступом до бази даних.

- зовнішні інтерфейси — стандартні інтерфейси обміну даними між SCADA та іншими додатками, мережевими з'єднаннями. Зазвичай OPC, DDE (англ. Dynamic Data Exchange — механізм взаємодії додатків в операційних системах Microsoft Windows), ODBC (англ. Open DataBase Connectivity) — це відкритий прикладний програмний інтерфейс доступу до баз даних), DLL(англ. Dynamic-link library — динамічно приєднувана бібліотека) — реалізовані компанією Microsoft загальні бібліотеки в ОС Windows .

Для організації он-лайн записів та обробки сигналів системи акустичного контролю та широкосмугового перетворювача вібрації на підшипнику №1 ОК використовувався програмний пакет Steinberg Nuendo 3.2.

Блок-схема ПЗ Steinberg Nuendo наведена на рис. 3.9. а на рис.3.10 - вікно тренду віброакустичних процесів в програмному пакеті Steinberg Nuendo 3.2.

Система реального часу — програма, що забезпечує обробку даних в межах заданого тимчасового циклу з урахуванням пріоритетів.

Редактор цифрових сигналів — програма, що забезпечує запис, багатоканальне зведення аудіо сигналів на декількох віртуальних доріжках, обробка спеціальними ефектами, очистка від шумів, перетворення аудіо в різні формати, генерацію сигналів.

Сервер документування - локальный сервер, призначений для підготовки звітів у відповідності з наявною в реальному часі інформацією.

Консоль даних – програма, призначена для збору даних, їх візуалізації, реєстрації.

Комунікатори - стандартні інтерфейси обміну даними між ПЗ Steinberg Nuendo та іншими додатками, пристроями, мережевими з'єднаннями.

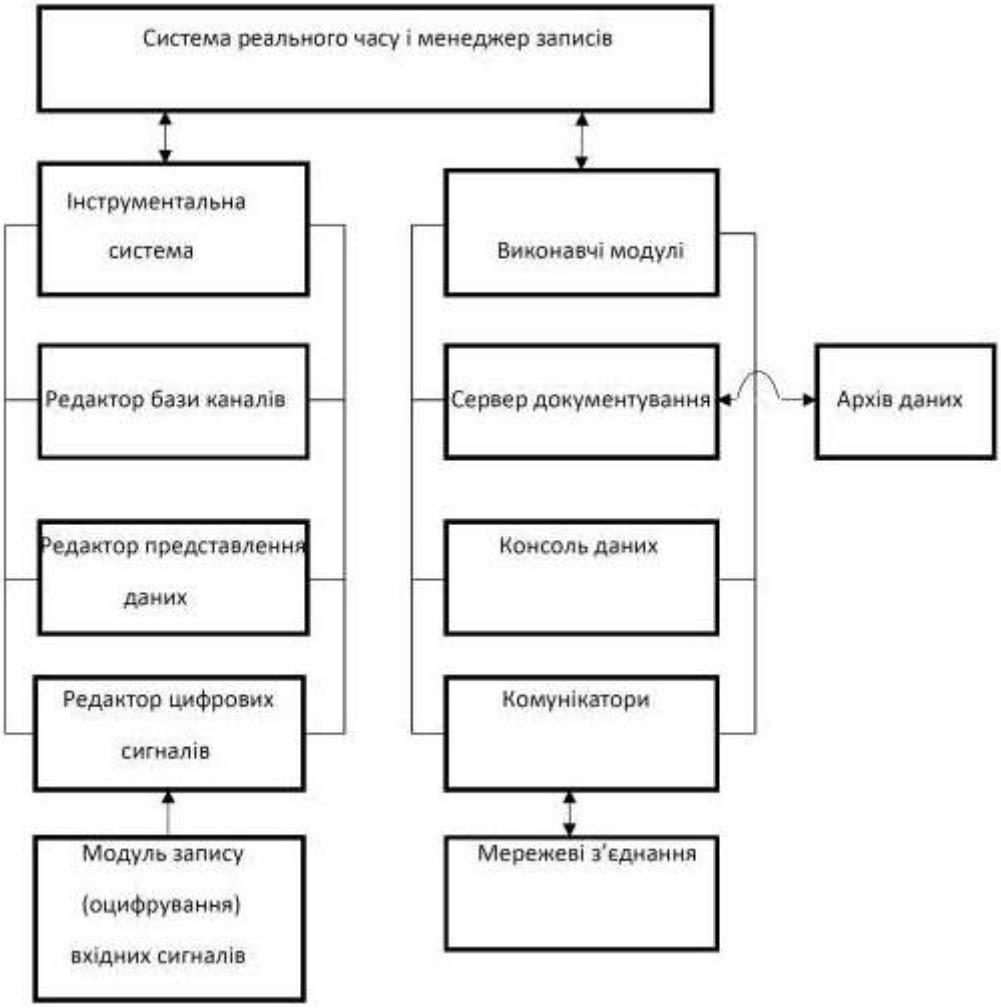


Рисунок 3.9 – Блок-схема ПЗ Steinberg Nuendo

Steinberg Nuendo 3.2.0 – сучасна багатофункційна версія програмного забезпечення для аудіо обробки звукових файлів [81].

Рисунок 3.10 – Вікно тренду віброакустичних процесів в програмному пакеті Steinberg Nuendo 3.2.0

Для реалізації методу діагностування САУ ГПА за значеннями площ розгінних характеристик у середовищі MatLab розроблено програмне забезпечення, блок-схема якого наведена на рис. 3.11.

Рисунок 3.11 – Блок схема алгоритму обчислення параметрів передавальної функції

Програмне забезпечення задачі складається із двох програмних продуктів.

Перший із них дає змогу переводити поточний час, який записується у базу даних САУ ГПА в форматі «дата-місяць-рік», «год.-хв.-с», в відрізок часу від моменту спостережень до його закінчення в секундах (хвилинах).

Другий програмний продукт складається із головної програми (Script-файл) і підпрограм (М-файлів). Програмне забезпечення має такі підпрограми:

1. Обчислення площ S_i.

2. Обчислення моментів функцій за формулою (10).

3. Формування матриці A.

4. Візуалізація результатів роботи програмного забезпечення.

5. Обчислення часу t_f. Оскільки рівняння (2.6) є нелінійним відносно шуканої величини t_f, то для його розв'язування використаний метод дихотомії [62].

6. Обчислення площі S_f за формулою (2.7).

Він передбачає діалоговий режим роботи з дослідником, коли останній вводить порядок полінома чисельника m і порядок полінома знаменника n. При цьому повинно виконуватись співвідношення $m \leq n$.

Інформацію про значення параметрів передавальної функції вміщує вектор перших n компонентів якого є параметрами a_i, а останні N–n компонентів це параметри b_j.

3.4 Експериментальні дослідження вібраційного стану осьового компресора ГТК-25і

Для отримання часових реалізацій вібраційних та акустичних процесів, що супроводжують роботу ГТК-25і, в діапазоні 40-20000 Гц для двох його станів – «поточного» та «дефектного» була використана вдосконалена САУ ГТК-25і. Подальша обробка часових реалізацій віброакустичних процесів дозволила отримати їх спектри.

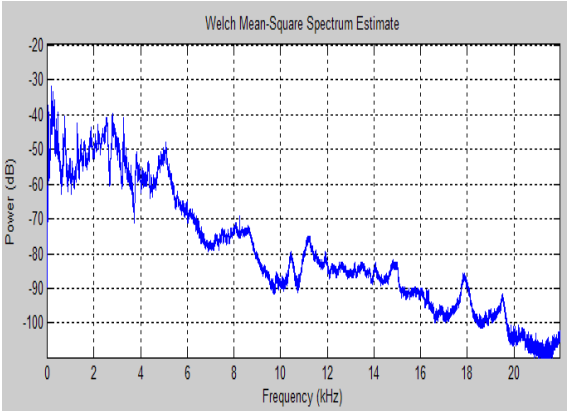
З метою попередньої оцінки динамічних властивостей спектру було побудовано частотно-часове представлення вібраційного та акустичного сигналів під час пуску осьового компресора, а також в робочому режимі за допомогою короткочасового перетворення Фур'є (STFT) з довжиною вікна 2048 відліків та функцією вікна Блекмена-Харріса (використано програму AdobeAudition) [82, 52].

Проведений аналіз частотно-часового представлення вібраційного та акустичного сигналів під час пуску ГТК-25і визначив наявність двох груп частотних складових:

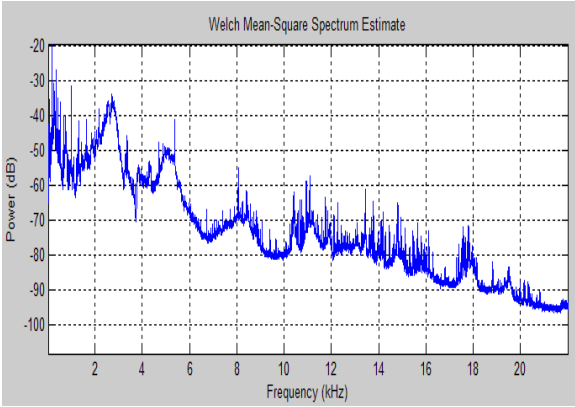
- першу групу складають частотні складові, що пропорційні частоті обертання ротора, та частотні складові, які не залежать від цієї частоти та можуть бути зумовлені (гіпотетично) коливаннями на власних частотах агрегатних вузлів та деталей ГТК-25;

- у частотному спектрі другої можуть спостерігатися "розмиті" максимуми, що зумовлено наявністю демпфування, причому степінь демпфування визначає добротність коливного контуру і, відповідно, ширину частотної смуги відповідного максимуму в спектрі.

З метою виділення групи власних частот було побудовано спектр вібраційного сигналу, записаного в процесі пуску ГТК 25і №3 17.04.2012, для інтервалів часу від 4-ї до 5-ї хвилини (перехідний процес) та від 7-ї до 8-ї хвилини (встановлений режим із відносно сталою частотою обертів). Для побудови спектру використано метод Уелча, що передбачає усереднення спектрів для послідовних інтервалів часу, що перекриваються, із зважуванням на кожному інтервалі за допомогою функції вікна (довжину вікна прийнято 65536, коефіцієнт перекриття 0.95). Результат представлено на рис. 3.12.



а)



б)

Рисунок 3.12 – Спектри вібраційного сигналу, виміряного на ГТК 25і №3 17.04.2012 р., а - для ділянки перехідного процесу та б - встановленого режиму

За рахунок інтегрування спектру в часі, що застосовується у методі Уелча, рівень складових, які мають постійну частоту на протязі інтервалу інтегрування, підсилюється, а рівень складових, частота яких змінюється в часі, зменшується. Тому на рис. 3.12,а переважно відсутні складові на частотах, кратних частоті обертання ротора.

Слід зауважити, що наявність резонансів на власних частотах окремих вузлів і деталей, призводить до збільшення рівня вібрації на частотах, близьких до цих власних частот [52]. Так, наприклад, у спектрі на рис. 3.12,б , присутній помітний максимум на частоті, що відповідає третій гармоніці лопатевої частоти для ступенів 0, 1 та 2. Такі високі рівні амплітуд на вищих гармоніках, як правило, не характерні для лопатевих механізмів, в даному випадку їх наявність можливо розглядати як ознаку наявності дефекту, оскільки її збільшення більшою мірою зумовлене близькістю до однієї із власних частот. Для порівняння на рис. 3.13 наведено спектр, розрахований аналогічним чином для фрагменту вібраційного сигналу, виміряного для ГТК-25і з «номінальним» станом, тобто за умови, коли відомо про відсутність дефектів його агрегатних вузлів та елементів. Тим не менше, рівень третьої гармоніки лопатевої частоти для 0-ої, 1-ої та 2-ої ступенів, також є досить високим і навіть перевищує рівень першої та другої гармоніки даної складової.

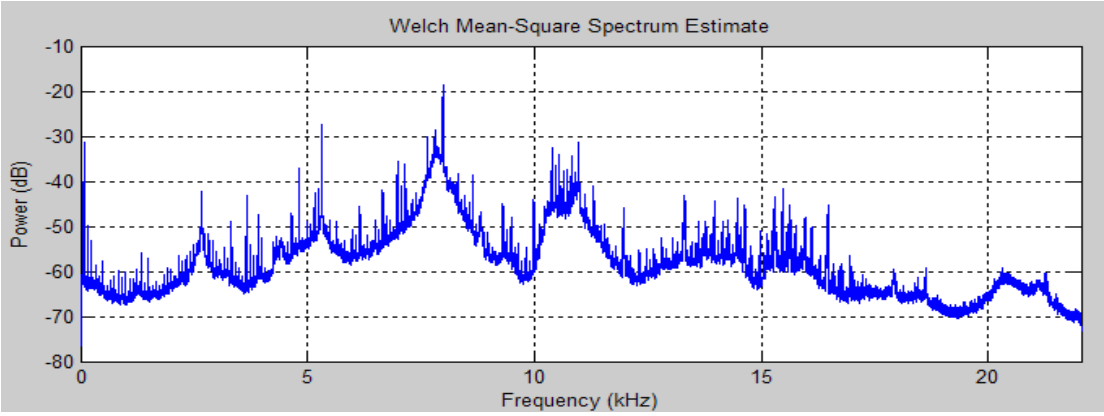


Рисунок 3.13 – Спектр вібраційного сигналу для встановленого режиму ГТК-25і №3 з «номінальним» станом, отриманий 05.02.2013р.

З метою виявлення діагностичних ознак технічного стану ГТК-25і було проведено аналіз рівнів амплітуди вібрації та акустичного шуму на частотах, пов'язаних з частотою обертання його ротора. Аналізувалися також частоти, що обумовлені конструктивними характеристиками агрегатних вузлів та елементів ГТК-25і. Часові реалізації вібраційних і акустичних процесів були записані при запуску ГТК-25і 17.04.2012р. для «дефектного» і 05.02.2013р. для «номінального» його стану. Такі ж реалізації були записані в усталеному режимі його роботи 18.04.2012р та 25.02.2013р. відповідно для «дефектного» та «номінального» станів ГТК-25і №3.

Вихідними даними для розрахунку була інформація про кількість лопатей на всіх ступенях ОК, лопатей ТВТ, а також кінематична схема редуктора та інформація про кількість зубів на колесах кожної із ступенів редуктора n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6.

В таблиці 3.1 наведено формули розрахунку та орієнтовні значення всіх частот при номінальній частоті обертів ротора $F_0 = 5106,2$ об/хв.

Таблиця 3.1 - Характерні частоти ОК

Частота	Формула розрахунку	Значення частоти при номінальній частоті обертів Гц
Частота обертання основного валу	$f_0 = \frac{F_0}{60}$	85.1
Частота обертання валу 2 (проміжний)	$f_n = f_0 \cdot \frac{n_1}{n_2}$	44.8
Частота обертання валу 3 (генератор і гідронасос)	$f_{ген} = f_0 \cdot \frac{n_3}{n_5}$	21.8
Частота обертання валу 4 (змащувальний насос)	$f_{зн} = f_0 \cdot \frac{n_4}{n_6}$	13.2
Частота зубозачеплення передачі К1-К2	$f_{K12} = f_0 \cdot n_1$	6042.1
Частота зубозачеплення передачі К3-К5	$f_{K35} = f_n \cdot n_3$	2685.4
Частота зубозачеплення передачі К4-К6	$f_{K46} = f_n \cdot n_4$	1924.5
Лопатеві частоти:		
0, 1, 2 ступені	$f_{L0} = f_0 \cdot 32$	2723.2
3 ступені	$f_{L3} = f_0 \cdot 40$	3404
4 ступені	$f_{L4} = f_0 \cdot 44$	3744.4
5, 15 ступені	$f_{L5} = f_0 \cdot 56$	4765.6
6 ступені	$f_{L6} = f_0 \cdot 58$	4935.8
7, 13, 14 ступені	$f_{L7} = f_0 \cdot 60$	5106
8 ступені	$f_{L8} = f_0 \cdot 62$	5276.2
9-12 ступені	$f_{L9} = f_0 \cdot 66$	5616.6
лопаті ТВТ	$f_{LT} = f_0 \cdot 80$	6808

Як показав аналіз спектрів вібрації, дійсна частота обертів ротора осьового компресора відрізняється від номінальної на величину порядку 20…70 об/хв, що спричиняє відхилення лопатевих частот та їх гармонік від розрахованих згідно табл. 3.1 [52]. Тому при визначенні рівнів амплітуди вібрації на характерних частотах необхідно враховувати частоту обертів на момент вимірювання.

Проведений аналіз фрагмента високочастотного спектру показав, що навіть в усталеному режимі роботи ГТК-25і відбуваються короткочасні флуктуації частоти обертання, зумовлені реакцією його САУ на зміни режиму, що призводять до зміщення характерних частот. Тому для подальшого аналізу з кожного із сигналів було виділено від 7 до 15 фрагментів (в залежності від довжини записаного сигналу) тривалістю близько 1хв. із відносно стабільною частотою обертання та без короткочасних порушень стаціонарного характеру спектру. Значення рівнів амплітуди на характерних частотах визначались як середнє арифметичне значення для вибраної кількості фрагментів сигналу.

Аналіз спектрів показав, що на частотах обертання проміжного валу, валів генератора та змащувального насосу, а також на частотах зубозачеплення редуктора помітних максимумів не спостерігається. Тому для аналізу було вибрано частоту обертання основного валу і перші п’ять її гармонік та лопаткові частоти і перші три їх гармоніки. Окремі результати наведено в табл. 3.2 – 3.9.

Амплітуди гармонік роторних частот ОК для сигналу вібрації та шуму «дефектного» ГТК 25і №3 при N_0=5076 об/хв. при його пуску (табл. 3.2) та в робочому режимі (табл. 3.3).

Амплітуди гармонік роторних частот ОК для сигналу вібрації та шуму «дефектного» ГТК 25і №3 при його пуску Таблиця 3.2

Гармоніка	Частота, Гц	Амплітуда вібрації, дБ	Амплітуда шуму, дБ
1	84.6	-22.3	-13.9
2	169.2	-45.7	-8.5
3	253.8	-41.1	-19.1
4	338.2	-50.8	-19.7
5	423	-49.2	-26.6

Амплітуди гармонік роторних частот ОК для сигналу вібрації та шуму «дефектного» ГТК 25і №3 в робочому режимі Таблиця 3.3

Гармоніка	Частота, Гц	Амплітуда вібрації, дБ	Амплітуда шуму, дБ
1	84.6	-28.726	-33.979
2	169.2	-45.094	-16.278
3	253.8	-36.006	-22.022
4	338.4	-47.752	-34.02
5	423	-47.261	-34.828

Амплітуди гармонік роторних частот ОК для сигналу вібрації та шуму «дефектного» ГТК 25і №3 при **N_0=5038 об/хв.** після пуску Таблиця 3.4

Гармоніка	Частота, Гц	Амплітуда вібрації, дБ	Амплітуда шуму, дБ
1	84	-22.4331	-23.2309
2	168	-43.725	-12.9908
3	252	-38.952	-25.493
4	336	-37.212	-27.809
5	420	-46.828	-34.272

Амплітуди гармонік роторних частот ОК для сигналу вібрації та шуму «дефектного» ГТК 25і №3 при **N_0=5038 об/хв.** після пуску та в робочому режимі

Таблиця 3.5

Гармоніка	Частота, Гц	Амплітуда вібрації, дБ	Амплітуда шуму, дБ
1	84	-37.303	-36.422
2	168	-42.049	-27.864
3	252	-57.555	-38.457
4	336	-56.541	-41.035
5	420	-64.996	-50.39

Амплітуди гармонік роторних частот ОК для сигналу вібрації та шуму «дефектного» ГТК 25і №3 при **No=5041** об/хв. в робочому режимі

Таблиця 3.6

Гармоніка	Частота, Гц	Амплітуда вібрації, дБ	Амплітуда шуму, дБ
1	84	-37.303	-36.422
2	168	-42.049	-27.864
3	252	-57.555	-38.457
4	336	-56.541	-41.035
5	420	-64.996	-50.39

Так, з табл. 3.3, 3.5, 3.6 видно, що зі зменшенням частоти обертання ротора ОК в робочому режимі від N_0=5076 об/хв. до N_0=5038 об/хв. амплітуда вібрації першої гармоніки роторної частоти $1f_p$ змінюється від $1f_p$= 28,73 дБ до $1f_p$ = 37,3 дБ на частотах N_0= 5041об/хв. і N_0= 5038об/хв. дБ, в той час, як амплітуда акустичного сигналу першої гармоніки роторної частоти $1f_p$ практично не змінюється зі зменшенням частоти обертання ротора ОК. Різниця у зміні амплітуди на частоті обертання N_0=5076 об/хв. в порівнянні з іншими частотами обертання складає 2,4дБ. Така ж картина спостерігається і по іншим гармонікам.

Стосовно розподілу амплітуди гармонік лопатевого апарату по сигналу вібрації для частоти обертання ротора ОК N_0=5076 об/хв. при запуску ГТК 25і, то мінімальна амплітуда A_{1min}=22,25дБ спостерігається на 4-ій ступені ($1f_л$=3722Гц), а максимальна A_{1max}=34,64 дБ на 5 і 15 ступенях ($1f_л$ =4737Гц). По другій гармоніці мінімальна амплітуда A_{2min}=9,94 дБ спостерігається на 8-ій ступені ($2f_л$ =5245Гц), а максимальна A_{2max}=32,03 дБ на 5 і 15 ступенях ($2f_л$=4906Гц). Щодо розподілу амплітуди гармонік лопатевого апарату по акустичному сигналу, то на відміну від роторної частоти, відмічені закономірності не спостерігаються. Так, мінімальне значення амплітуди по 1-й , 2-й і 3-й гармоніках спостерігається на 0-ій, 1-ій і 2-ій ступенях: A_{1min}=5,3дБ; A_{2min}=10,19дБ і A_{3min}=29,44дБ при 1,2,3$f_л$ =2707Гц), а максимальне A_{1max}=35,52 дБ на 9-12 ступенях ($1f_л$=5583Гц), а також

на лопаті ТВТ A_{1max}=46,71 дБ ($1f_л$ =6768Гц). По 2-ій гармоніці максимальне значення амплітуди спостерігається на 6 ступені A_{2max}=56,98 дБ ($2f_л$ =4906Гц), а по 3-ій гармоніці також на 9-12 ступенях A_{3max}=62,07 дБ ($3f_л$=5583Гц) і на лопаті ТВТ A_{3max}=68,62 дБ.

Проведений аналіз розподілу амплітуд гармонік лопатевого апарату по вібрації та акустичному сигналу для всіх ступенів ОК при різних режимах його роботи показує, що отриманих даних недостатньо для висновків щодо залежності між рівнями вібрації та шуму на лопатевих частотах та їх гармоніках, з одного боку, та технічним станом лопатевого механізму ОК, з іншого боку [52].

Більше інформації для такого висновку можна отримати по мірі напрацювання ОК. Так, для «поточного» стану ГТК-25і №3 5.02.2014 р., після 2381 мотогодин (8 пусків) його напрацювання, було проведено запис технологічних параметрів і реалізацій вібраційних та акустичних процесів під час чергового запуску ГТК-25і №3 та побудовано їх спектри. Результати проведеного аналізу спектрів вібраційних та акустичних процесів, що супроводжують роботу ГТК-25і, наведені в табл.3.7-3.9.

Амплітуди гармонік роторних частот ОК для сигналу вібрації та шуму після пуску ГТК-25і з «поточним» станом при **N_0= 5036 об/хв**

Таблиця 3.7

Гармоніка	Частота, Гц	Амплітуда вібрації, дБ	Амплітуда шуму, дБ
1	83.95	-15.781	-15.475
2	167.9	-27.817	1.702
3	251.8	-26.246	-12.845
4	335.7	-30.223	-14.887
5	419.5	-40.858	-28.064

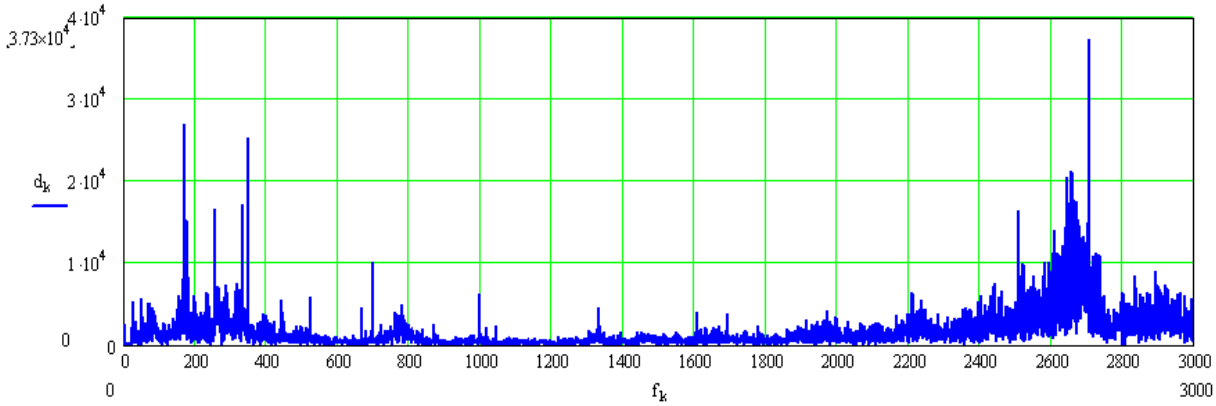
Амплітуди гармонік лопаткових частот ОК для сигналу вібрації після пуску ГТК-25і з «поточним» станом при **N_0= 5036 об/хв**. Таблиця 3.8

Ступінь	Частота, Гц	Амплітуда, дБ		
		1-ша гармоніка	2-га гармоніка	3-тя гармоніка
0, 1, 2	2685.7	-16.93	-12.455	12.807
3	3357.2	-25.246	-16.23	-17.321
4	3692.9	-29.577	-11.967	-15.841
5, 15	4700	-21.982	-21.045	-28.651
6	4868	-20.886	-26.852	-27.943
7, 13, 14	5036	-18.724	-17.321	-28.185
8	5203.7	-13.901	-10.843	-28.119
9-12	5539.4	-20.681	-15.987	-32.904
Лопать ТВТ	6714.5	-16.23	-13.846	-36.926

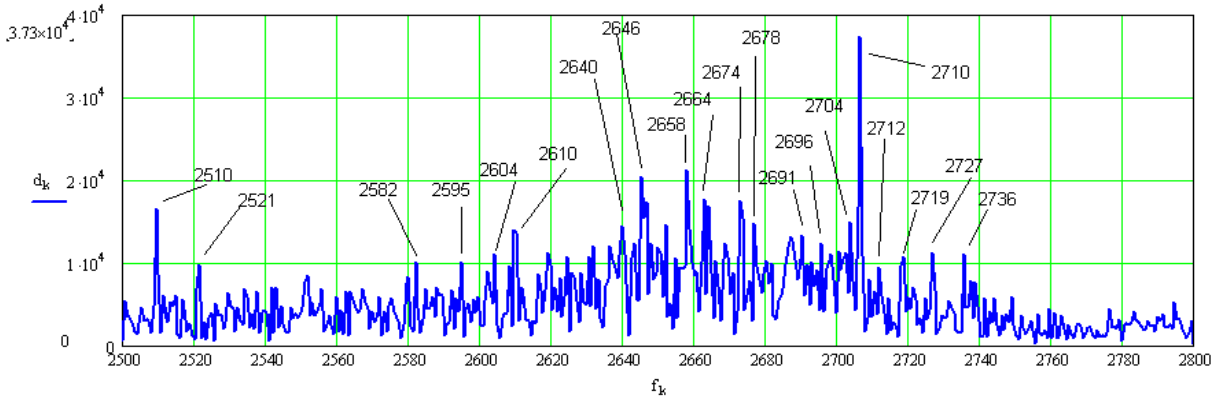
Амплітуди гармонік лопатевих частот ОК для акустичного сигналу після пуску ГТК-25і з «поточним» станом при **N_0= 5036 об/хв**. Таблиця 3.9

Ступінь	Частота, Гц	Амплітуда, дБ		
		1-ша гармоніка	2-га гармоніка	3-тя гармоніка
0, 1, 2	2685.7	-6.2237	-17.968	-17.929
3	3357.2	-26.362	-46.208	-43.913
4	3692.9	-36.535	-40.964	-40.355
5, 15	4700	-27.047	-47.413	-49.209
6	4868	-26.932	-53.765	-56.182
7, 13, 14	5036	-22.213	-43.913	-50.911
8	5203.7	-25.297	-37.249	-45.455
9-12	5539.4	-29.874	-40.423	-46.742
Лопать ТВТ	6714.5	-46.208	-36.656	-61.283

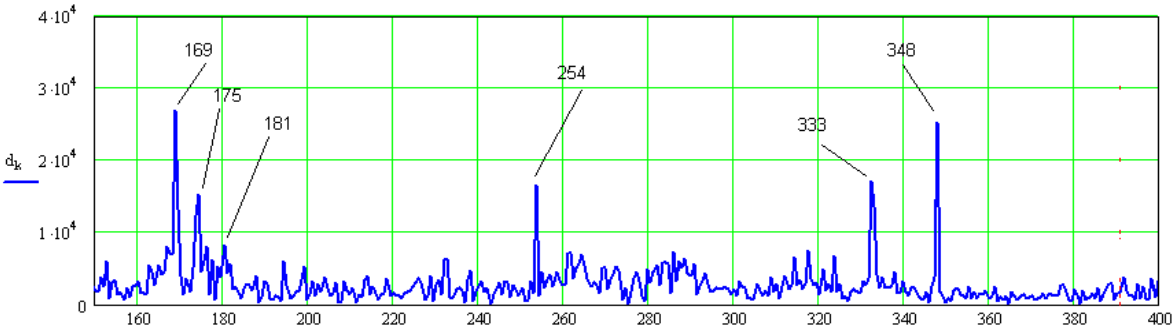
Нижче на рис. 3.14, 3.15 наведені амплітудно-частотні характеристики акустичних і вібраційних сигналів працюючого ГТК-25і, на яких чітко простежуються піки, викликані роботою найбільш навантажених вузлів (зокрема лопатей 0,1,2-ої ступенів осьового компресора).



а)

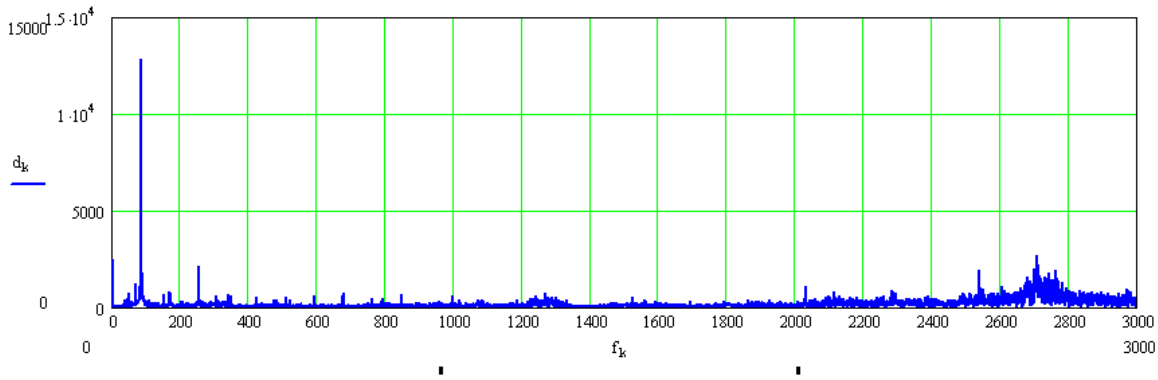


б)

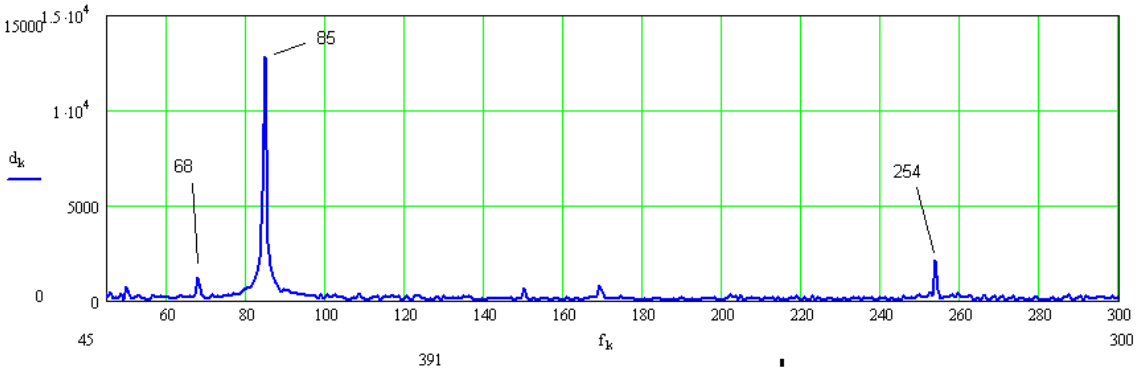


в)

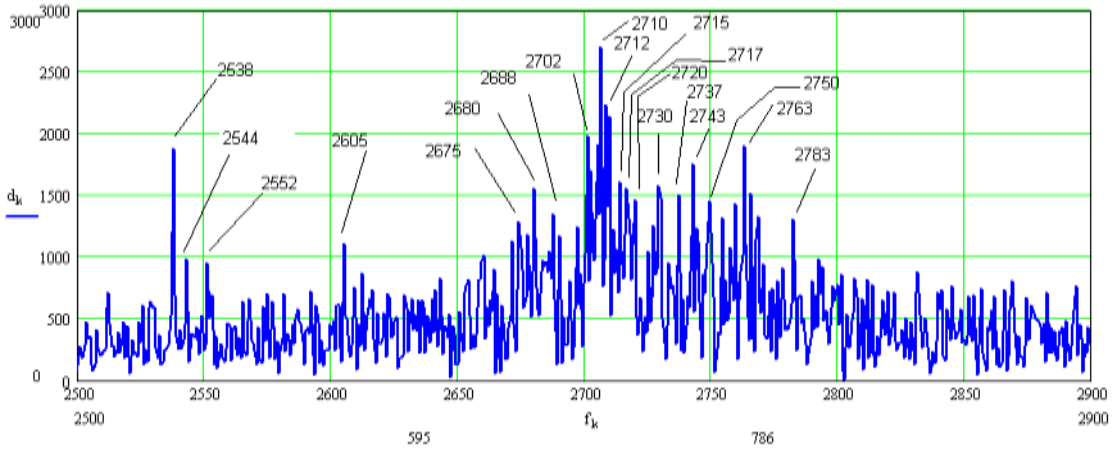
Рисунок 3.14 – Амплітудно-частотні характеристики акустичного сигналу а) - о ступені, б) – 1-ої ступені, в) – 2-ої ступені осьового компресора ГПА ГТК-25і



а)



б)



в)

Рисунок 3.15 – Амплітудно-частотні характеристики вібраційного сигналу а) – О-ої ступені, б) – 1-ої ступені, в) – 2-ої ступені осьового компресора ГПА ГТК-25і

Як видно з рис. 3.14 -3.15 акустичні коливання є більш інформативними, вони характеризуються широким неперервним спектром з окремими дискретними складовими. Склад спектру, його амплітудно-частотна характеристика (у

ймовірнісному або детерміністичному аспекті) має велике діагностичне значення для стану агрегату. Так, на рис. 3.14 можна чітко виділити максимальні значення амплітудних складових у всьому частотному діапазоні акустичного сигналу по трьох ступенях ОК, в той час, як в частотному діапазоні вібраційного сигналу максимальних значень амплітудних складових по 0 - ій ступені і 1- ій ступені (рис. 3.15) спостерігається дуже мало (3-4 значення).

Корисними для побудови еталону ОК «бездефектного» ГТК 25і можуть бути результати вимірювань по ГТК-25і №2 (напрацювання після ремонту - 5450 мотогодин, регламентний міжремонтний інтервал- 16000 мотогодин [83,84] (див. табл. 3.10).

Амплітуди гармонік акустичних сигналів ГТК 25і № 2 з «поточним» станом після 5450 год. напрацювання Таблиця 3.10

Гармоніка	Частота, Гц	Амплтуда, дБ (N_0= 5071 об/хв.)
1	84.5	-11.68
2	169	-2.5696
3	253.5	-16.38
4	338	-19.633
5	422.5	-29.168

Як видно з табл. 3.10 простежується певна закономірність зростання рівня амплітуд гармонік за винятком 2-ої гармоніки, рівень якої повинен був скласти близько 13,0 дБ, а склав 2,6 дБ.

В табл.3.11 наведено рівні амплітуд лопатевих частот по кожній із ступенів ОК і перші три їх гармоніки за результатами експериментів, проведених 12.10.2012 р на КС Богородчанського ЛУМГ по ГТК 25і № 2.

Амплітуди гармонік лопатевих частот акустичного сигналу ГТК 25і № 2 з «поточним» станом при його пуску 29.10.2012 р Таблиця 3.11

Ступень	Частота, Гц	Амплітуда, дБ (N_0= 5071 об/хв.)		
		1-а гармоніка	2-а гармоніка	3-я гармоніка
0, 1, 2	2704.6	-20.303	-34.872	-31.025
3	3380.5	-36.93	-51.924	-59.001
4	3718.4	-38.313	-55.588	-49.855
5, 15	4732.8	-40.972	-66.154	-54.047
6	4901.8	-40.079	-70.27	-67.849
7, 13, 14	5071	-37.357	-59.406	-62.01
8	5239.9	-38.065	-44.321	-68.774
9-12	5578.1	-43.404	-50.171	-74.523
Лопать ТВТ	6761.5	-51.924	-65.31	-81.615

У табл. 3.12 наведені результати аналогічних експериментів по ГТК 25і №2, проведених 18.12.2012 р, тобто після 1032 годин напрацювання.

Амплітуди гармонік лопатевих частот акустичного сигналу після пуску ГТК 25і №2 з «поточним» станом (1032 год. напрацювання) Таблиця 3.12

Ступень	Частота, Гц	Амплітуда, дБ (N_0= 5071 об/хв.)		
		1-а гармоніка	2-а гармоніка	3-я гармоніка
0, 1, 2	2706.4	-20.58	-34.072	-49.092
3	3383	-32.766	-59.767	-61.451
4	3721.3	-38.541	-54.8	-57.125
5, 15	4736.4	-43.822	-61.209	-57.433
6	4905.2	-40.537	-68.318	-65.195
7, 13, 14	5074.3	-38.566	-61.62	-64.267
8	5243.3	-38.793	-48.808	-64.376
9-12	5581.9	-44.794	-57.449	-69.206
Лопатка ТВД	6765.9	-59.767	-48.383	-75.966

Проаналізуємо дані табл. 3.11, 3.12. Як видно із зазначених таблиць після 1032 годин напрацювання простежити закономірності зміни амплітуд гармонік лопаткових частот по ступенях ОК, тобто вибрати діагностичні ознаки для оцінки його технічного стану, не представляється можливим. У той же час чітко простежується зростання рівня амплітуди 3-ої гармоніки по окремим ступеням ОК (в табл.3.11, 3.12 виділені жирним): по ступеням 0,1,2-ої на 58,33%, по 3 ступені на 9 , 73%, по 4 ступені на 14,56% і по 5 і 15 ступенях - на 6.25%. З розглянутих ступенів найбільш чутливими до зміни технічного стану являються 0,1,2 ступені - зміна на 58,33%, а також 4 ступень - зміна на 14,56%. Нижче на рис. 3.16 приведена амплітудно-частотна характеристики акустичного сигналу працюючого ГПА ГТК-25і, на якій чітко простежуються значні рівні амплітуд, викликані роботою найбільш навантажених вузлів (зокрема лопатей 0,1,2-ої ступенів ОК ГТК-25і №3 fл0,1,2 = 2710 Гц при N0 = 5085 об / хв.). Як видно з рис. 3.16 акустичні коливання більш інформативні, характеризуються широким безперервним спектром з гармонійними і субгармонійними складовими лопаткових частот ступенів ОК і окремими спектральними складовими з амплітудами досить високого рівня.

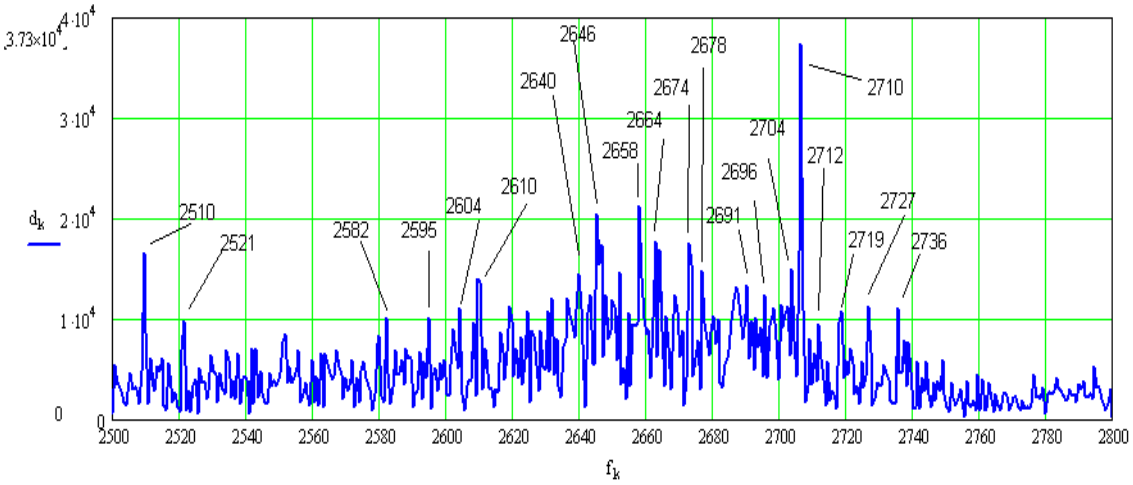


Рисунок 3.16 - Амплітудно-частотні характеристики акустичного сигналу 1-ої ступені ОК ГТК-25і №3.

Акустичні коливання, що генеруються лопатевим апаратом в процесі запуску і експлуатації осьового компресора ГПА ГТК 25і, є найбільш інформативні для оцінки технічного стану ОК.

Проведений аналіз лопаткових частот по кожній із ступенів ОК і перших трьох гармонік показав відсутність чітких закономірностей їх зміни по мірі напрацювання ГТК 25і, тобто зміни його технічного стану, що вимагає комплексного підходу до розробки методів його діагностування [85].

Найбільш чутливими до зміни технічного стану являються 0,1,2 і 4- ступені ОК ГТК 25і. Так, при напрацюванні 1032 год., зміна рівня акустичного сигналу по 0,1,2 ступеням склала 58,33%, а по 4 ступені - 14,56%, що дозволяє використовувати їх в якості діагностичних ознак при контролі технічного стану лопатевого апарату ОК ГТК 25і.

Аналіз зміни рівня амплітуди гармонічних, субгармонічних складових лопатевих частот в спектрі акустичних коливань 0,1,2 ступенів ОК ГТК 25і, а також спектральних складових значної амплітуди, дозволить виявити додаткові діагностичні ознаки, які можуть бути покладені в основу розробки методу діагностування його лопатевого апарату.

3.5 Дослідження статистичних характеристик акустичних процесів ГТК-25і

В роз. 1.4 було відмічено, що вхідними даними нейромережі є значення пяти максимумів амплітудних складових спектра акустичного сигналу для «номінального», «поточного» і «дефектного» станів ГТК-25і, а також значення середнього квадратичного відхилення для кожної вибірки. Таким чином, необхідно дослідити вибірки даних по значенням акустичного сигналу ГТК-25і №3 для «номінального», «поточного» та «дефектного» станів. До «номінального» стану віднесли стан ГТК-23і № 3 після ремонту (25.02.2013р.), до «поточного» – напрацювання 12 тис. год. і до «дефектного» стану віднесли напрацювання ГТК-23і № 3 до встановленого ресурсу до ремонту -16 тис. год. (18.04.2012). Кожну з

трьох вибірок «номінальний», «поточний» та «дефектний» стани розділено на 10 менших вибірок по 44,1 тис. значень.

Було проведено дослідження статистичних характеристик акустичного процесу, що супроводжує роботу ГТК-25і [86]. При цьому застосовували методи статистичної обробки даних [87], які передбачають:

- підпорядкування вибірки отриманих експериментальних даних певному закону статистичного розподілу;
- розрахунок математичних сподівань;
- розрахунок дисперсії та середньоквадратичного відхилення.

Дослідження кожної з вибірок на відповідність закону розподілу проводили з використанням програмного пакету MatLab. Для прикладу на рис. 3.17 наведена гістограма для вибірки «дефектний» стан ГТК-25і, на якій нанесена крива нормального розподілу.

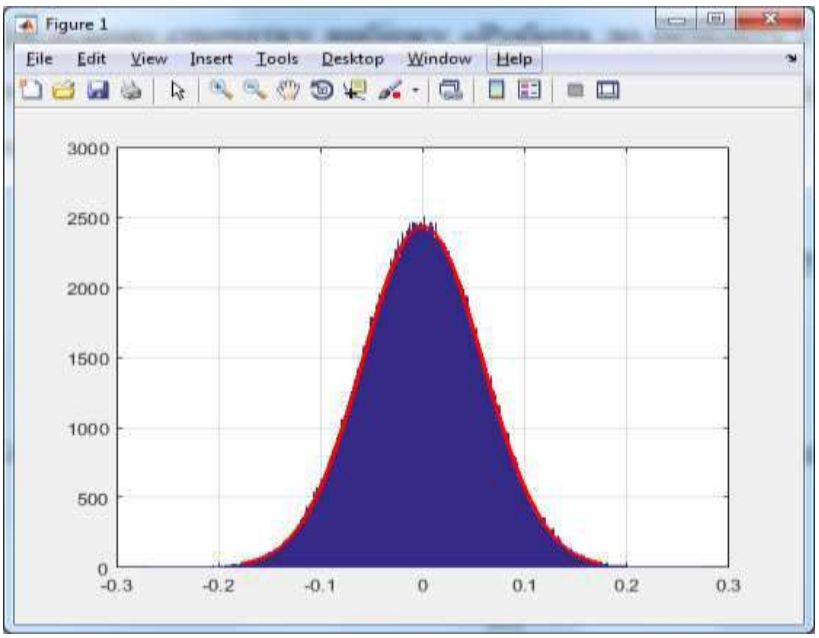


Рисунок 3.17 – Гістограма розподілу акустичного сигналу для «дефектного» стану ГТК-25і

Враховуючи, що не завжди візуальне порівняння реальної гістограми з кривою нормального розподілу є достатнім, для перевірки на відповідність закону розподілу скористалися тестом Колмогорова-Смірнова. Основою тесту є

розрахунок максимальної різниці між кумулятивними частотами обох вибірок. Ця різниця позначається величиною *z*, на підставі якої виводиться вірогідність помилки *p*.

За допомогою цього тесту можна перевірити, чи відповідає реальний розподіл змінної нормальному розподілу. Тест реалізовано за допомогою програмного пакету SPSS [88]. Результати тесту наведені в табл. 3.13.

Тест Колмогорова-Смірнова для «дефектного» стану ГТК-25і Таблиця 3.13

Вимірювальна величина – рівень запису акустичного сигналу		S_n
Кількість вибірок	N	441000
Параметр нормального розподілу	Середнє значення	-0,0002951
	Середньоквадратичне відхилення	0,0588
Z Колмогорова-Смірнова		0,831
Статистичне значення *p*		0,495

Як видно з отриманих результатів (табл. 3.13) закон розподілу акустичного сигналу $A_c(t)$ підпорядковується нормальному, оскільки для вибраного рівня значимості $p = 0{,}05$ отримали $p = 0{,}495$. Для підтвердження нормального закону розподілу $A_c(t)$ скористаємося ще одним тестом – діаграмою нормального розподілу, за якою візуально можна визначити, чи достатньо близько заданий розподіл наближається до нормального, так як кожне експериментально отримане значення $A_c(t)$ порівнюється із значенням, очікуваним при нормальному його розподілі. При цьому по осі X відкладаються експериментально отримані значення, а на осі Y – очікувані при нормальному законі розподілу і всі значення піддаються стандартизації. Як показує діаграма, отримані експериментальні значення $A_c(t)$ достатньо близькі до прямої (рис. 3.18).

Таким чином, результати проведених тестів підтверджують нормальний закон розподілу акустичного сигналу «дефектного» ГТК-25і.

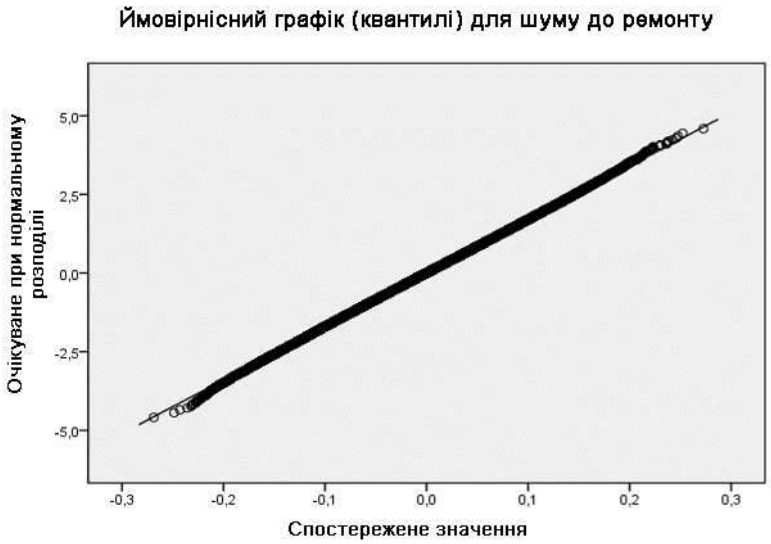


Рисунок 3.18 – Діаграма нормального розподілу акустичного сигналу «дефектного» ГТК-25і

Аналогічним чином були проведені дослідження для вибірки «номінальний» та «поточний» стани ГТК-25і №3, які підтвердили нормальний закон розподілу акустичного сигналу для вказаних вище станів ГТК-25і.

Для обробки статистичних вибірок числових характеристик акустичних сигналів для трьох станів ГТК-25і використали програмний пакет SPSS. Як приклад, на рис. 3.19, зображено інтерфейс таблиці в SPSS для вибірки даних по «дефектному» стану ГТК-25і розділеної на 10 менших вибірок.

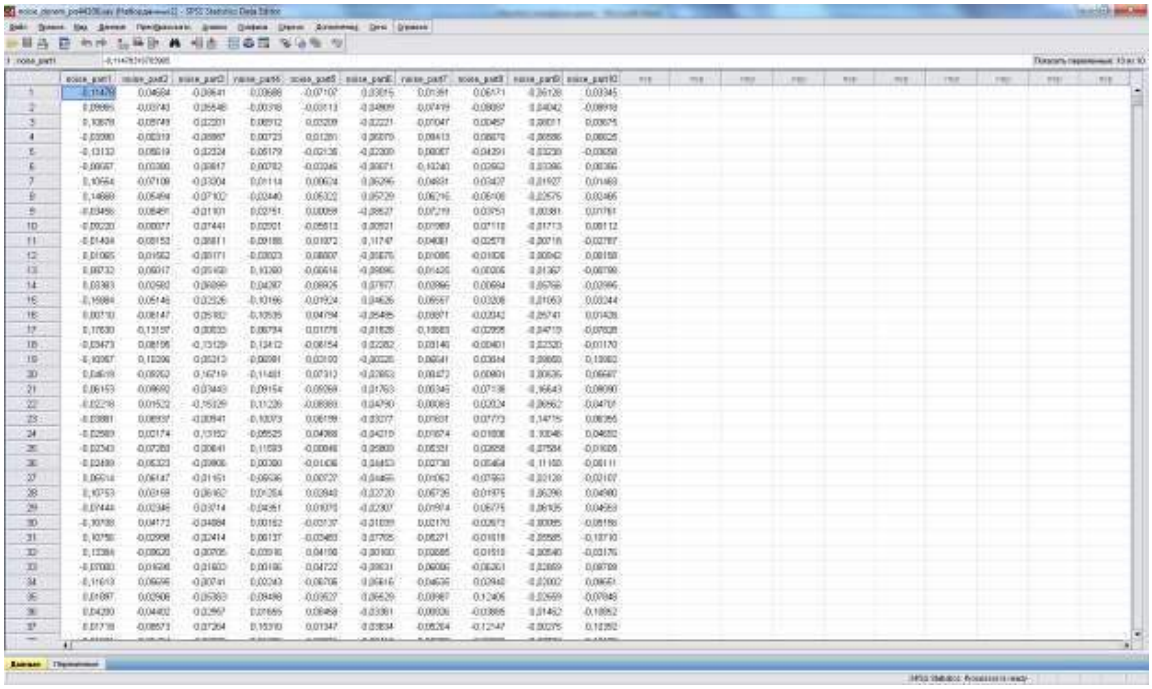


Рисунок 3.19 – Інтерфейс таблиці в SPSS для «дефектного» стану ГТК-25і

Для отримання статистики числових характеристик акустичного сигналу, було сформовані таблиці для трьох станів ГТК-25і. Як приклад, в табл. 3.14 наведені статистичні характеристики акустичного сигналу для «номінального» стану ГТК-25і

Статистичні характеристики акустичного сигналу для «номінального» стану ГТК-25і Таблиця 3.14

Статистика											
		noise_part1	noise_part2	noise_part3	noise_part4	noise_part5	noise_part6	noise_part7	noise_part8	noise_part9	noise_part10
N	**Валідні**	44100	44100	44100	44100	44100	44100	44100	44100	44100	44100
	Пропущені	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Середнє значення		-0,0002925	-0,0009320	-0,0009389	-0,0009259	-0,0009299	-0,0009267	-0,0009236	-0,0009232	-0,0009323	-0,0009333
Стд. відхилення		0,05889721	0,15904244	0,16325949	0,16416037	0,15463251	0,15497838	,15263634	0,15642922	0,15812870	0,15370938
Дисперсія		0,003	0,025	0,027	0,027	0,024	0,024	0,023	0,024	0,025	0,024

Процедура побудови спектру акустичного сигналу для різних станів ГТК-25і розглядалася в роз. 3.4.

Розглянемо 5 максимальних амплітудних значень частот акустичного сигналу, що складаються з вибірок «номінального», «поточного» і «дефектного» станів ГТК-25і.

В роз. 2.4 було прийнято використати значення п’яти амплітудних максимумів спектра і їх порядкових індексів по кожній з вибірок для трьох станів ГТК-25і при побудові ШНМ. Вибір амплітудних максимумів спектра проводили з використанням функції для сортування значень масиву по зростанню sorted і для сортування індексів значень sortingIndices програмного пакету MatLab. В результаті обробки отримали значення п’яти амплітудних максимумів спектру частот (рис. 3.20) і їх порядковий індекс (рис. 3.21).

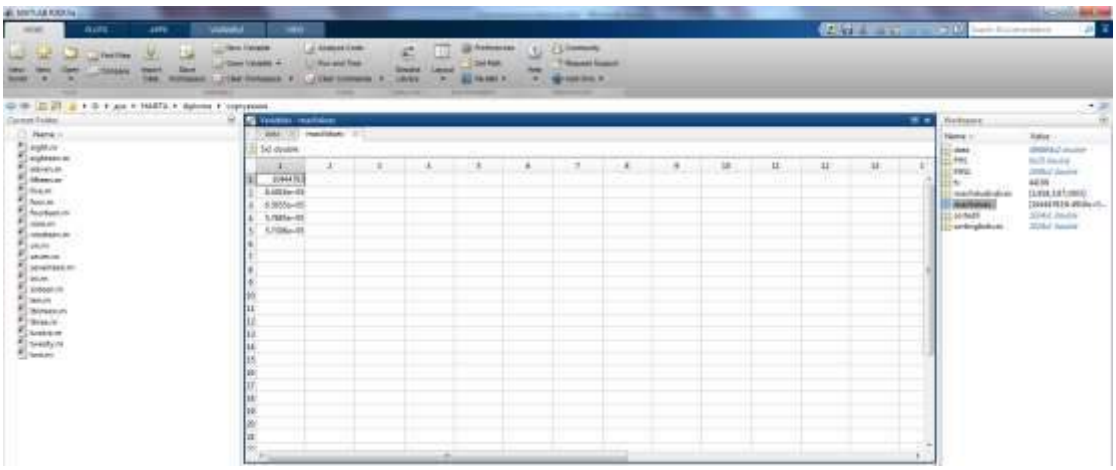


Рисунок 3.20 – Результат сортування п’яти амплітудних максимумів спектра частот

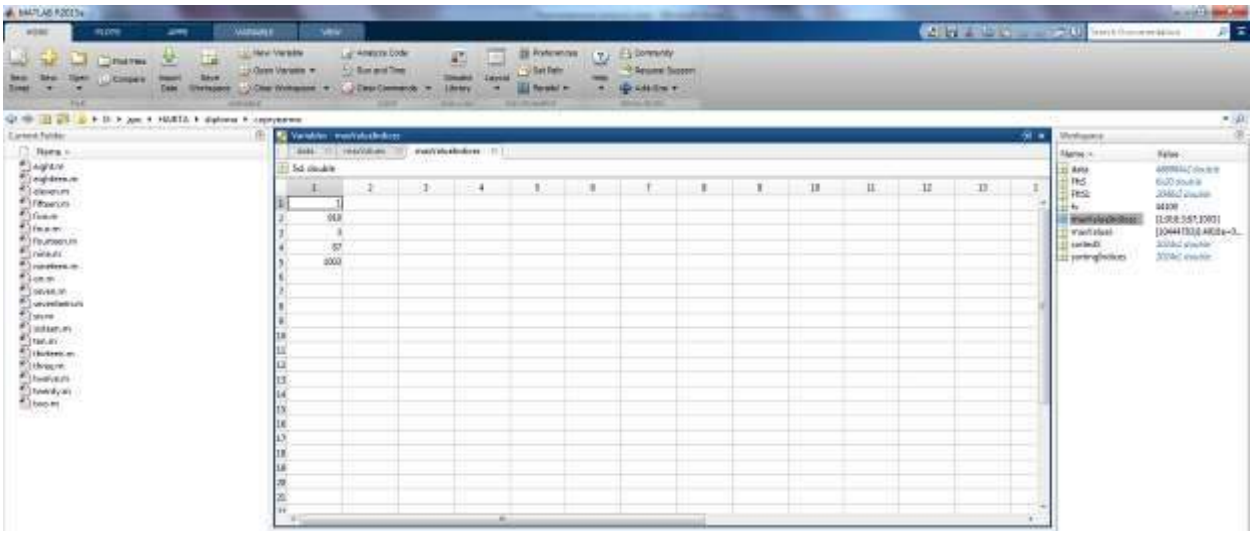


Рисунок 3.21 – Результат сортування п’яти максимумів порядкового індексу перетворення Фур’є

Аналогічним чином були опрацьовані всі вибірки. В результаті отримали матрицю максимумів порядкових індексів. В загальному було зібрано 10339 зразків акустичного сигналу для «номінального» стану, 25033 зразків для «поточного» стану та 1506 зразків для «дефектного стану» ГТК-25і.

Висновки до розділу 3.

Розроблено методичне забезпечення експериментальних досліджень з врахуванням особливостей та умов роботи ГТК-25, що дозволяє оперативно провести комплекс експериментів по збору даних технологічних параметрів режиму роботи ГТК-25і, характеристик його вібраційного стану та розгінних характеристик.

Вдосконалено систему контролю технологічних параметрів та віброакустичних процесів, що супроводжують роботу ГТК-25і шляхом оснащення ГТК-25і додатковими давачами для контролю вібрації опорного підшипника №1 осьового компресора, температури його корпусу та акустичного контролю роботи ГПА, що дозволяє провести комплекс запланованих експериментальних досліджень.

Для здійснення акустичного контролю роботи ГПА розроблена схема на базі електректного мікрофона і підсилювача, проведені його розрахунок та перевірка схеми з використанням програми Micro-Cap 7.

Розроблено комплексний пакет програмного забезпечення для моніторингу стану ГТК-25і на базі SCADA - програми WIZCON 8.3 та он-лайн записів і обробки акустичних сигналів з використанням програмного пакету Steinberg Nuendo 3.2.0.

Проведені експериментальні дослідження віброакустичної активності ГТК-25і показали:

- акустичні коливання, що генеруються лопатковим апаратом в процесі запуску і експлуатації осьового компресора ГПА ГТК 25і, є найбільш інформативні для оцінки технічного стану ОК;

- найбільш чутливими до зміни технічного стану являються 0,1,2 і 4 - ступені ОК ГТК 25і. Так, при напрацюванні 1032 год., зміна рівня акустичного сигналу по 0,1,2 ступеням склала 58,33%, а по 4 ступені - 14,56%, що дозволяє використовувати їх в якості діагностичних ознак при контролі технічного стану лопатевого апарату ОК ГТК-25і.

Дослідження статистичних характеристик акустичних процесів ГТК-25і показали, що вони характеризуються нормальним законом розподілу і їм можуть відповідати теоретичні розподіли, які достатньо добре характеризуються першим та другим початковим та центральними моментами розподілу випадкових величин.

Розглянута статистика числових змінних акустичного сигналу, отриманих з використанням програмного пакету SPSS, для «номінального», «поточного» та «дефектного» станів ГТК-25і, на базі якої розроблена процедура обробки статистичних характеристик акустичного сигналу, що дозволило обгрунтувати вибір п’яти амплітудних максимумів спектра і їх порядковий індекс по кожній з вибірок для трьох станів ГТК-25і, які будуть використані при побудові нейронної мережі.

РОЗДІЛ 4
РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГТК-25І ТА ЙОГО САУ

4.1 Розроблення методу діагностування САУ ГПА

В роз. 2.1 були розроблені теоретичні засади методу діагностуванн стану САУ в процесі експлуатації на основі визначення площ перехідних характеристик ГПА, як діагностичних ознак стану САУ. Вихідним положенням методу є припущення про те, що в процесі експлутації ГПА відбувається старіння САУ, що, в свою чергу, проявляється в погіршенні якості процесу управління ГПА. Таке погіршення процесу управління негативно впливає на технічний стан ГПА, що проявляється через розгінні характеристики за відповідними каналами передачі сигналів.

Відповідно до методики проведення експериментальних досліджень (роз. 3.1) з метою перевірки можливості діагностування технічного стану САУ ГПА за їх розгінними характеристиками здійснювалися спостереження за технологічними параметрами на протязі 2019 року з березня по грудень місяць. Було отримано дев'ять розгінних характеристик ГПА в координатах «час-значення технологічних параметрів».

Як приклад, на рис. 4.1 показана розгінна характеристика ГПА в координатах «час – частота обертання ТВТ» записана 30.05.2019 року.

За розгінною характеристикою необхідно визначити структуру функції передачі та її параметри.

Розгінну характеристику ГПА «час – частота обертання ТВТ» будемо описувати нормованою функцією передачі (2.2).

Таким чином, необхідно визначити параметри функції передачі $w(s)$ a_i, $i=\overline{1,n}$ та b_j, $j=\overline{1,m}$ за нормованою перехідною характеристикою ГПА $y(t)$, ординати якої слід обчислювати за формулою (2.2).

Структуру функції передачі та її параметри будемо визначати методом площ (метод Симою) [59,65].

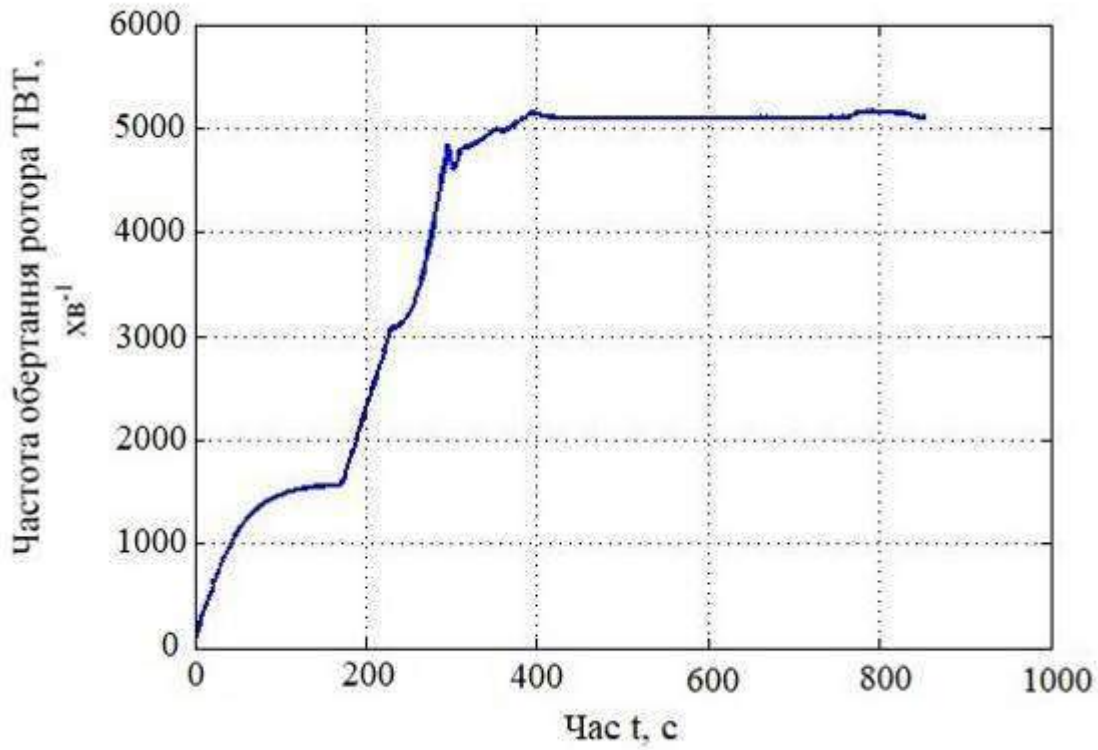


Рисунок 4.1 - Розгінна характеристика ГПА в координатах «час – частота обертання ТВТ»

Ідея методу площ детально описана в роз.2.1 (формули 2.9 -2.14).

Для реалізації методу діагностування САУ ГПА за значеннями площ розгінних характеристик у середовищі MatLab розроблено програмне забезпечення (роз. 3.3). Таке програмне забезпечення дає змогу визначити параметри передавальної функції за експериментальною кривою об'єкта та величину площі, яка обмежена перехідною функцією $y(t)$ об'єкта.

Як приклад, на рис. 4.2 показана нормована перехідна характеристика ГПА в координатах «час-частота обертання ТВТ»

Були вибрані – порядок полінома чисельника передавальної функції (2) m=1 і відповідно, порядок полінома знаменника n=2.

За допомогою розробленого програмного продукту, вхідними даними для

якого є експериментально отримана розгінна характеристика, в діалоговому режимі роботи програми, отримана нормована функція передачі

$$w(s) = \frac{b_1 s + 1}{a_2 s^2 + a_1 s + 1},$$

де $a_1 = 198{,}1189c$, $a_2 = 14011{,}6064c^2$; $b_1 = 13{,}8991c$.

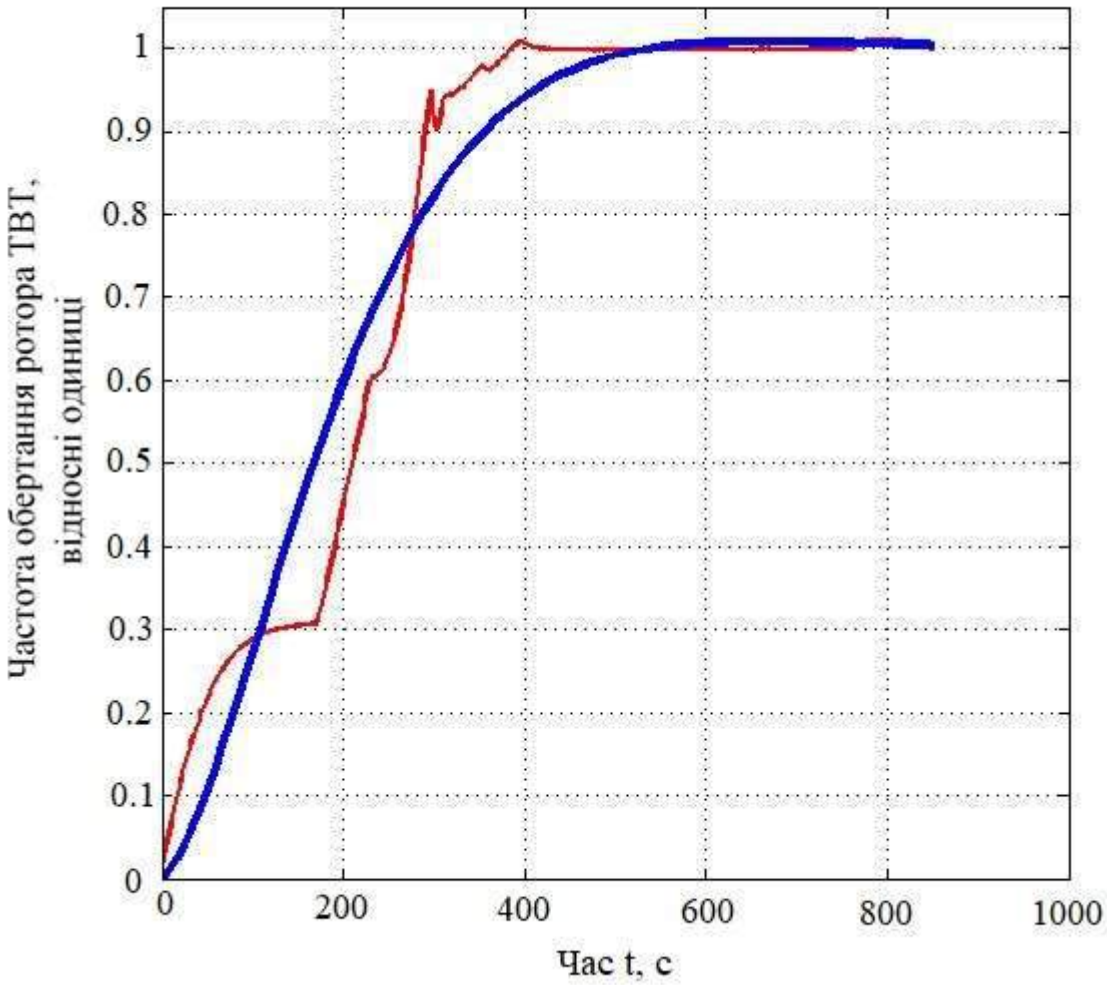


Рисунок 4.2 - Нормована перехідна характеристики ГПА в координатах «час – частота обертання ротора ТВТ» та її апроксимація

За допомогою розробленого програмного забезпечення для дев'яти розгінних характеристик були визначені нормовані передавальні функції та їх параметри. Результати розрахунків відображає табл. 4.1. Аналогічно були

визначені нормовані передавальні функції та їх параметри для інших технологічних параметрів.

Структура і параметри нормованої передавальної функцій ГПА в координатах «час – частота обертання ТВТ» Таблиця 4.1

№ п/п	Місяць	Порядок полінома чисельника, m	Порядок полінома знаменника, n	Параметри нормованої функції передачі
1	березень	1	2	$a_1 = 201{,}3810c$, $a_2 = 13619{,}5628c^2$; $b_1 = 10{,}2521c$
2	травень	1	2	$a_1 = 198{,}1189c$, $a_2 = 14011{,}6064c^2$; $b_1 = 13{,}8991c$
3	червень	1	2	$a_1 = 190{,}0050c$, $a_2 = 12304{,}2822c^2$; $b_1 = 10{,}3698c$
4	липень	1	2	$a_1 = 186{,}2889c$, $a_2 = 12076{,}0088c^2$; $b_1 = 6{,}4597c$
5	серпень	1	2	$a_1 = 184{,}3797c$, $a_2 = 11943{,}2961c^2$; $b_1 = 6{,}1001c$
6	вересень	1	2	$a_1 = 178{,}70574c$, $a_2 = 11166{,}1896c^2$; $b_1 = 2{,}8821c$
7	жовтень	1	2	$a_1 = 479{,}8242c$, $a_2 = 79952{,}1950c^2$; $b_1 = 68{,}8620c$
8	листопад	0	1	$a_1 = 185{,}4506c$
9	грудень	0	1	$a_1 = 182{,}5458c$

Аналіз табл. 4.1 показує, що з плином часу змінюється структура і параметри передавальної функції ГПА в координатах «час – частота обертання ротора ТВТ», що може бути наслідком зміни технічного стану САУ ГПА.

Технічний стан САУ ГПА будемо оцінювати за значенням величин площ S_f, які обчислювались за формулою (2.7). Для виявлення тренду в зміні значень S_f необхідно забезпечити обчислення значень S_f за тотожних умов. Це досягається вибором такого кінцевого часу t_f при якому виконується умова – $y(t_f)=y_f$. Було вибрано значення y_f=0,98.

За формулою (2.7) з використанням розробленого програмного

забезпечення для передавальних функцій, структура і параметри яких відображає табл. 4.1, були обчисленні значення S_f, які занесені в табл. 4.2.

Значення площ S_f у функції часу t Таблиця 4.2

місяці	03	05	06	07	08	09	10	11	12
S_f	302,04	288,87	294,33	293,66	270,32	272,73	311,32	576,80	570,45

Для виявлення тенденції зміни S_f у часі побудований графік у координатах S_f –t (рис. 4.3), із якого видно, що з плином часу відбулося зростання значень площ S_f .

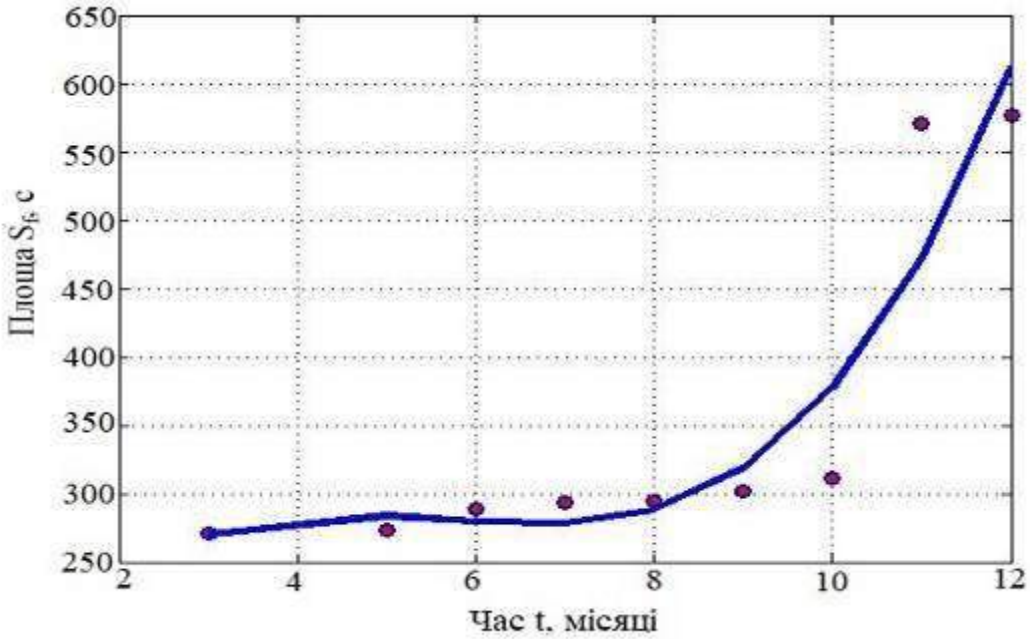


Рисунок 4.3 - Зміна значень S_f у часі

Експериментальні дані (рис. 4.3) опишемо емпіричною моделлю, яку виберемо у вигляді полінома третьої степені

$$S_f(t) = \pi_0 + \pi_1 t + \pi_2 t^2 + \pi_3 t^3. \qquad (4.1)$$

Для визначення параметрів емпіричної моделі (4.1) скористаємося методом найменших квадратів. Отже, маємо

$$\overline{\pi} = \left(F^T F\right)^{-1} F^T \overline{S}_f,$$

де

$$\overline{\pi} = \begin{bmatrix} \pi_0 \\ \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \end{bmatrix}$$

– вектор параметрів моделі (4.1);

$$F = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 & t_1^3 \\ 1 & t_2 & t_2^2 & t_2^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & t_9 & t_9^2 & t_9^3 \end{bmatrix}; \ \overline{S}_f = \begin{bmatrix} S_f^{(1)} \\ S_f^{(2)} \\ \dots \\ S_f^{(9)} \end{bmatrix}$$

– вектор значень $S_f^{(i)}, \ i = \overline{1,9}$ (табл. 4.1).

Були отримані такі значення параметрів емпіричної моделі (4.1):

π_0=68,08, π_1=124,17, π_2–23,09, π_3=–1,38.

Графік залежності (4.1) нанесений на рис. 4.3, який показує, що значення S_f до $t \leq 10$ міс. залишається практично незмінним; потім різко зростає до значення 570,45, що свідчить про погіршення технічного стану САУ ГПА.

4.2 Комплексний метод діагностування технічного стану газоперекачувального агрегату на базі дискримінантного аналізу

В останні роки в Бородчанському ЛВУМГ на КС-39 «У-П-У» здобувачем було проведено вдосконалення САУ ГТК-25і шляхом розробки її додаткового технічного і програмного забезпечення [78] (роз. 3.2).

Маючи можливість отримання інформації про технологічні і віброакустичні параметри роботи ГТК-25і було прийнято рішення застосувати дискримінантний (лінійний) аналіз для визначення діагностичної ознаки технічного стану ГТК-25і з використанням результатів спостережень за зміною

його технологічних параметрів в процесі експлуатації та вібраційних і акустичних процесів, що супроводжують роботу ГТК-25і, для трьох його станів. Технічні стани «номінальний», «поточний» та «дефектний» обумовлювалися періодом експлуатації ГТК-25і (див. роз. 3.5). При цьому визначення діагностичної ознаки не вимагає додаткової вимірювальної апаратури і засновується на статистичній обробці технологічних і віброакустичних характеристик, зареєстрованих удосконаленими штатними приладами САУ.

При розробці методу діагностування використовувалася вибірка технологічних параметрів та вібраційних і акустичних характеристик ГТК- 25і на КС-39 «У-П-У» тривалістю понад 4 роки для трьох його технічних станів [89].

Процедура визначення технічного стану ГТК-25і включає дикримінантний аналіз часових реалізацій значень технологічних параметрів, записаних через кожні 30 с для трьох технічних станів: «номінальний» (ідентифікатор “a”=”after”) «дефектний» (ідентифікатор “b”=”befor”) та «поточний» (ідентифікатор “w”=”work”). Об’єм вибірки становив 36 тис. даних, записаних через 0,2с. Для статистичної обробки даних використовувались можливості програмних середовищ R [80] та STATISTICA [91].

Було здійснено відбір технологічних параметрів (Додатки Б-Б2) зі всієї сукупності їх часових реалізацій (мета - вилучення параметрів, які корелюють між собою) з використанням програмного середовища R, в результаті чого відібрано по 340 значень з кожного набору відповідно розглянутих ситуацій. Для прикладу, в табл. 4.3 наведено отримані таким чином дані по антипомпажному параметру, а на рис. 4.4 графік його автокореляційної функції. Наступні етапи методу включають:

1. Поділ вибірки на дві частини (парні та непарні номери). За першою підвибіркою з використанням дискримінантного аналізу будується процедура визначення технічного стану ГТК-25і, а елементи другої підвибірки перевіряються на належність до наявних станів (“b”-“a”-“w”). Для цього використовується покроковий дискримінантний аналіз, реалізований в програмному пакеті STATISTICA [91].

Отриманими результатами є (табл. 4.3):

- набір характеристик (Variable), за якими можна найбільш достовірно визначити стан ГПА;

- коефіцієнти дискримінантних функцій (Classification Functions) для кожного із станів.

Розраховані значення по антипомпажному параметру Таблиця 4.3

Lag	group=a AutocorrelationFunction (R_sample.sta) Антипомпажний параметр (Standard errorsare white-noiseestimates)			
	Auto-Corr.	Std.Err.	Box& Ljung Q	p
1	-0,078635	0,053994	2,12098	0,145303
2	0,004168	0,053915	2,12696	0,345265
3	-0,039230	0,053835	2,65797	0,447429
4	0,017584	0,053755	2,76497	0,597900
5	0,012234	0,053675	2,81692	0,728185
6	0,012113	0,053595	2,86800	0,825217
7	-0,059225	0,053514	4,09281	0,769020
8	-0,106290	0,053434	8,04972	0,428653
9	0,106068	0,053353	12,00199	0,213250
10	0,005814	0,053273	12,01390	0,284178
11	-0,002892	0,053192	12,01685	0,362420
12	0,097276	0,053111	15,37148	0,221813
13	-0,002197	0,053030	15,37320	0,284700
14	0,013174	0,052949	15,43510	0,349127
15	-0,024682	0,052868	15,65307	0,405521

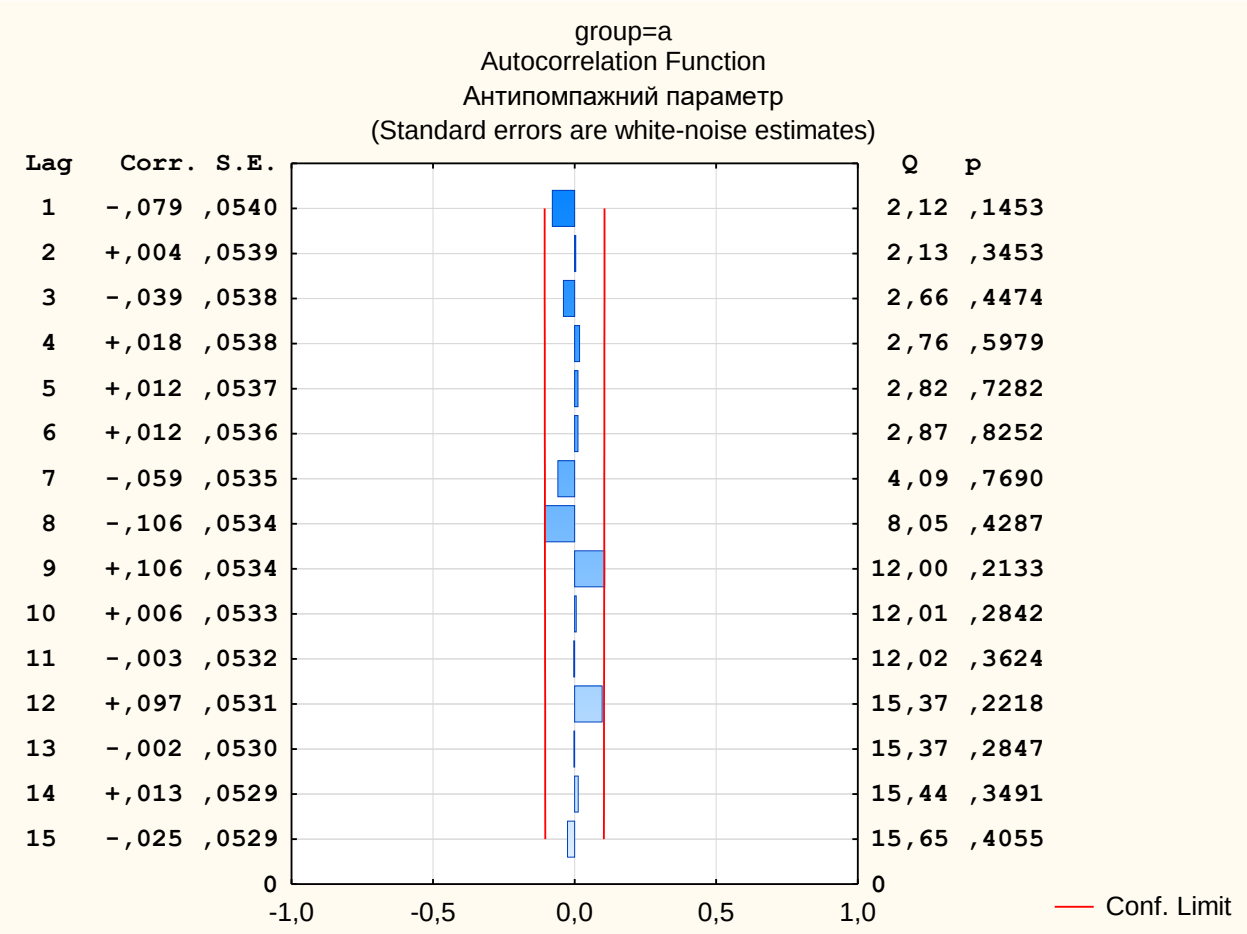


Рисунок 4.4 – Графік автокореляційної функції вибірки антипомпажного параметру, побудованого випадковим вибором з даних часових рядів

Результати дискримінантного аналізу Таблиця 4.4

Variable	Classification Functions; grouping: group (R_sample.sta) Include condition: Ceiling(v0/2)-v0/2=0		
	a p=,33333	b p=,33333	w p=,33333
Тиск на виході	210	534	471
Рівень масла в баці	354	382	395
Оберти ТВТ	32	29	29
Температура на вихлопі	-4	-6	-4
Тиск осьового компресора	270	255	265
Оберти ТНТ	-3	-4	-4
Антипомпажний параметр	118	117	119
Тиск гідравлічного масла	158	158	160
Constant	-169874	-180456	-184631

2. Визначення значення дискримінантних функцій досліджуваного ГТК-25і для кожного стану. Це лінійні комбінації значень характеристик (із стовпчика Variable) з коефіцієнтами, наведеними в стовпчиках “a”, “b” чи “w” плюс вільний член з рядка Constant;

3. Визначення стану ГПА за найбільшим значенням дискримінантних функцій для нього.

Застосувуючи описану методики до елементів другої частини вибірки, одержали результати, відображені в табл. 4.5 [92]

Таблиця 4.5

Результати визначення діагностичних ознак технічного стану ГТК-25і

Group	ClassificationMatrix (R_sample.sta) Rows: Observedclassifications Columns: Predictedclassifications Excludecondition: Ceiling(v0/2)-v0/2=0			
	Percent Correct	a p=,33333	b p=,33333	w p=,33333
a	100,000	170	0	0
b	100,000	0	170	0
w	100,000	0	0	170
Total	100,000	170	170	170

Рядки “a”, “b”, “w” табл. 4.5 відображають спостережувані (реальні) стани ГПА, а такі ж стовпчики – прогнозовані (одержані за розробленим методом). На перетині цих рядків та стовпчиків наведені кількості випадків.

Засоби R дозволяють спроектувати три групи даних – діагностичних ознак у вигляді «хмарок» на площину і відобразити їх на графіку. Найкращий напрям проектування вибирається з допомогою того ж дискримінантного аналізу.

На рис. 4.5 зображена така проекція діагностичних ознак. Кожне значення діагностичної ознаки позначено буквою (“a”, “b”, “w”), що відповідає реальному стану ГПА. LD1 та LD2 – означають координати на площині проекції.

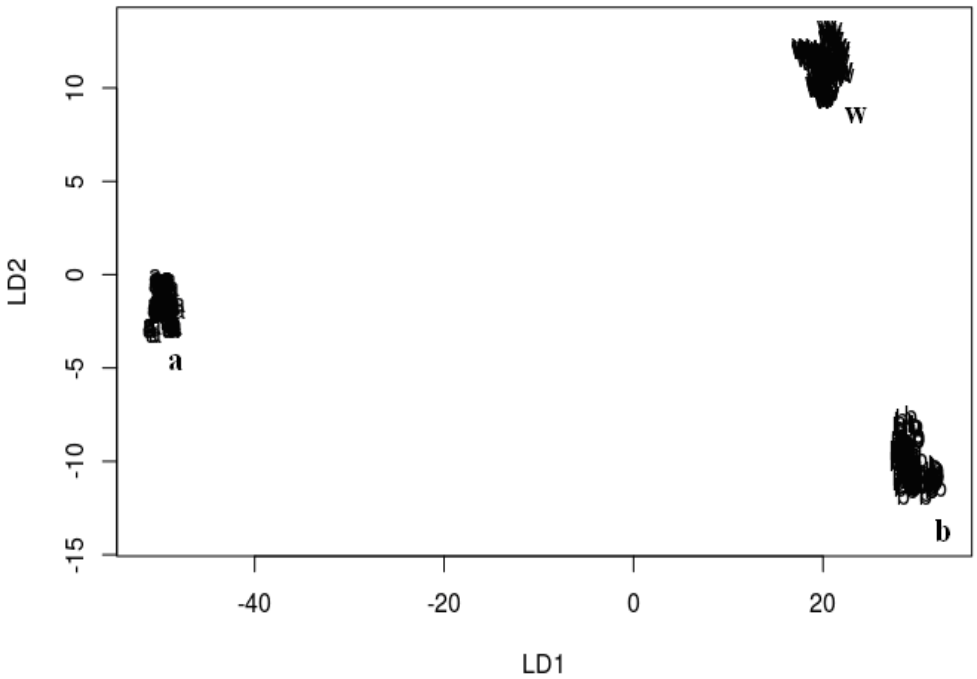


Рисунок 4.5 – Графічне представлення множини технічних станів ГТК 25і за результатами дискримінантного аналізу його технологічних параметрів

Як видно з рис. 4.5 всі три значення діагностичних ознак чітко розрізняють три стани ГПА.

Найкращий стан ГПА (a) - «номінальний» стан ГТК-25і після проведення ремонтних робіт при якому значення діагностичної ознаки знаходиться на початку площини, (b) - «дефектний» стан (перед проведенням ремонтних робіт) відповідає найбільшому значенню діагностичної ознаки і, нарешті, після тривалого напрацювання стан ГТК-25і наближається до незадовільного (w).

Описану процедуру отримання діагностичних ознак технічного стану ГПА можна застосувати не тільки до технологічних параметрів, що характеризують режим його роботи, але і до вібраційної та акустичної діагностичної інформації [93].

В цьому випадку рівні шуму та вібрації виміряні через кожних 200 мс – представляються як часові ряди, а процедура визначення діагностичної ознаки

ГТК-25і за середньоквадратичними відхиленнями його характеристик (шум, вібрація) полягає в наступному:

- з кожного часового ряду випадковим вибором відбираються частини рядів довжиною 300 вимірювань (або 60 с). Кожна з вибірок містить 1000 часових рядів;
- за кожним відібраним рядом оцінюється середньоквадратичне відхилення;
- з трьох вибірок середньоквадратичних відхилень будується категоризавана об'єднана вибірка. Категорії ідентифікуються аналогічно приведеним вище: з допомогою таких значень: «a» - «номінальний» стан, «b» – «дефектний» та «w» - «поточний».

Випадковим вибором відбирається 1000 вибіркових значень для процедури побудови дискримінантних функцій. Решта вибіркових значень (2000 спостережень) використовується для перевірки одержаної процедури класифікації.

В результаті проведення лінійного дискримінантного аналізу знайдено лінійні дискримінантні функції для кожної групи спостережень («a» - «номінальний», «b» – «дефектний» та «w» - «поточний».).

$$f_a=0{,}386*X_1+0{,}064*X_2-894{,}820;$$

$$f_b=0{,}1162*X_1+0{,}0274*X_2-97{,}3223;$$

$$f_w=0{,}0481*X_1+0{,}0039*X_2-12{,}9307,$$

де X_1 - значення середньоквадратичного відхилення характеристики (шум), X_2 — значення середньоквадратичного відхилення характеристики (вібрація).

При цьому вибрано рівні (0,33333) апріорні ймовірності належності спостережень до цих груп. Згідно розробленої таким чином процедури дане спостереження відноситься до тієї групи або технічного стану ГТК-25і («a», «b» чи «w»), для якої значення відповідної дискримінантної функції (f_a, f_b чи f_w) найбільше.

Для перевірки якості процедури класифікації застосовуємо розроблену процедуру класифікації до спостережень тестової вибірки, які не брали участі в розробці процедури. Об'єм такої вибірки становить 2000 значень. Результат

представлено в табл. 4.6.

Результати визначення діагностичних ознак технічного стану ГТК-25і Таблиця 4.6

Group	ClassificationMatrix (dat_train_test.sta) Rows: Observedclassifications Columns: Predictedclassifications Excludecondition: v1='train'			
	Percent Correct	a p=,33333	b p=,33333	w p=,33333
a	100,0000	667	0	0
b	100,0000	0	672	0
w	100,0000	0	0	661
Total	100,0000	667	672	661

Рядки табл. 4,6 (a, b, w) відповідають реальним технічним станам ГТК-25і, в яких були відібрані спостереження. Стовпчики — прогнозованим технічним станам. Як видно з табл. 4,6 в 100% випадків прогноз збігся з реальністю.

Канонічний аналіз дозволяє знайти площину (набір з двох характеристик), проекції на яку даних трьох груп найкраще розрізняються. Ці характеристики (Root 1 та Root 2) утворюються з даних (X_1 та X_2) з допомогою коефіцієнтів, тобто

$$\text{Root 1}=-0{,}0097*X1-0{,}0014*X2+20{,}8493;$$

$$\text{Root 2}=0{,}005214*X1-0{,}003754*X2+0{,}226723.$$

В системі координат Root1- Root 2 дані спостереження виглядають наступним чином (рис. 4,6).

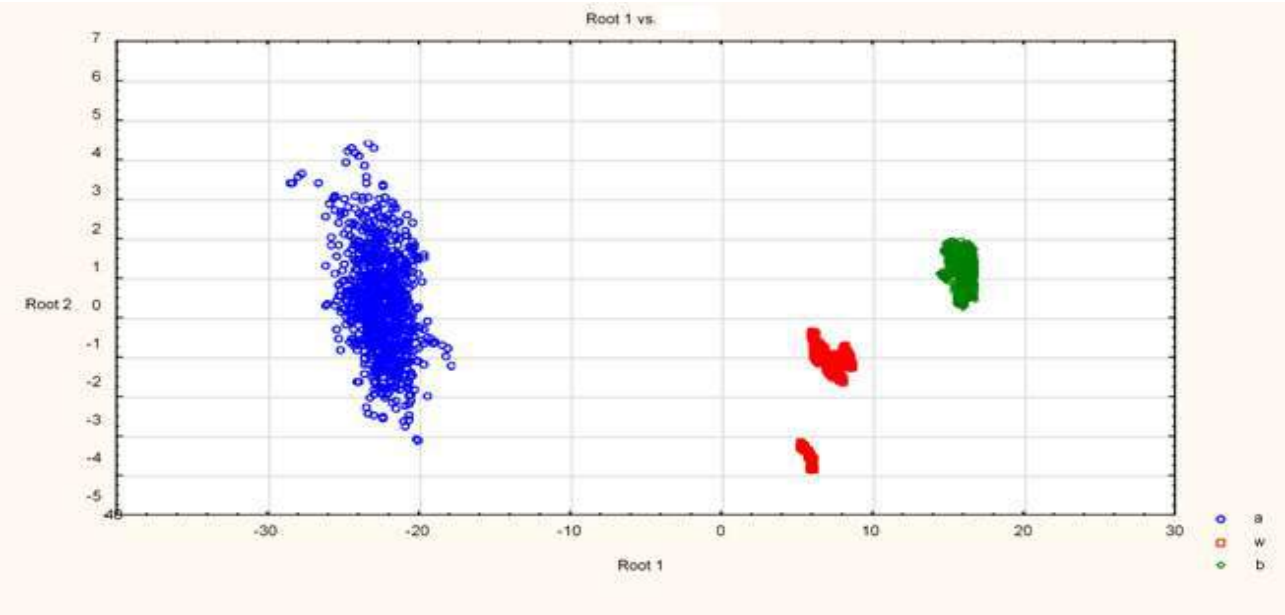


Рисунок 4.6 – Графічне представлення множини технічних станів ГТК 25і за результатами дискримінантного аналізу його віброакустичних характеристик

Як видно з рис. 4.6 дані технічні стани, як і в попередньому випадку, досить добре розрізняються. Крім того, таке графічне представлення дає можливість спрогнозувати зміну технічного стану ГПА на подальший період його експлуатації і визначити час проведення ремонтних робіт.

Таким чином, з використанням дискримінантного аналізу технологічних параметрів роботи ГТК-25і та його вібраційних і акустичних характеристик розроблено комплексний метод діагностування технічного стану ГТК-25і, що є поєднанням методів параметричної і віброакустичної діагностики.

Розроблена методика визначення діагностичних ознак технічного стану ГТК-25і, яка базується на визначенні найбільших значень дискримінантних функцій досліджуваного ГТК-25і для кожного з його трьох технічних станів за 16 технологічними параметрами та акустичними і вібраційними характеристиками. При цьому найкращим «номінальним» вважається стан ГТК-25і після проведення ремонтних робіт, «дефектний» стан» - перед проведенням ремонтних робіт, а «поточний» - після відповідного періоду напрацювання ГТК-25і.

Представлення виявлених діагностичних ознак стану ГТК-25і у вигляді «хмарок» на площині і відображенні їх на графіку дозволяє прослідкувати тенденцію зміни технічного стану ГТК-25і в часі і спрогнозувати момент виведення його з експлуатації.

Розроблений метод не вимагає для своєї реалізації додаткових технічних засобів так, як використовує інформацію з вдосконаленої САУ ГТК-25і, яка, в свою чергу, може використати отриману інформацію для управління процесом компримування газу з врахуванням технічного стану ГТК-25і.

4.3 Використання вейвлет-перетворення для контролю технічного стану ГПА.

Розглянемо особливості використання вейвлет-перетворення для визначення діагностичної ознаки технічного стану ГПА за результатами обробки віброакустичних процесів, що характеризують його роботу для трьох якісних станів ГПА – «дефектний», «номінальний» та «поточний» - після року напрацювання. Використання вейвлет-перетворення обумовлено тим, що основна область його застосування - аналіз і обробка сигналів і функцій, нестаціонарних в часі або неоднорідних в просторі. Метод аналізу не змінюється залежно від характеристики сигналу, навпаки, вейвлет-перетворення дозволяє визначити структуру сигналу, виконати його поділ на квазістаціонарні ділянки [94]. При цьому результати аналізу містять не тільки загальну частотну характеристику сигналу (розподіл енергії сигналу по частотним складовим), але і відомості про певні локальні координатах, на яких виявляють себе ті чи інші групи частотних складових, або на яких відбуваються швидкі зміни частотних складових сигналу [95].

У порівнянні з розкладанням сигналів на ряди Фур'є, вейвлети здатні з набагато більш високою точністю представляти локальні особливості сигналів, аж до розривів 1-го роду (стрибків).

Відповідно до методика проведення експериментальних досліджень (роз. 3.1) [96,97] були отримані вихідні файлах формату .mat з записом вібраційних і акустичних сигналів, які підлягали обробці.

Тривалість трьох записів для станів ГПА №3 - «дефектний», «номінальний» та «поточний» складала – по 10с з частотою дискретизації 44,1 кГц, що є стандартом для запису звукових сигналів.

Розрядність запису складає 16 біт (значення від -32768 до +32768). Рівень запису складав -35 дБ. В програмному забезпеченні, що застосовувалося для запису шуму та вібрації рівень 0 дБ відповідає вхідному сигналу 0,775 В з підсилювача. Рівень сигналу при отриманні звукових сигналів з підсилювачів

були значно вищими. Тому, для уникнення явища «кліппінгу» (обрізання) амплітуди сигналів, було застосовано програмне пониження коефіцієнта запису відповідно на 20 дБ, 30 дБ та 35 дБ.

Для визначення характеристик сигналу та відслідковування змін параметрів сигналу в часі, використаємо вейвлет-перетворення. За базову функцію виберемо симлет-вейвлет четвертого порядку (функція sym4 в середовищі Matlab) [98,99]. Вейвлети сімейства симлетів є модифікованою версією вейвлетів Добеши з кращим показником симетрії.

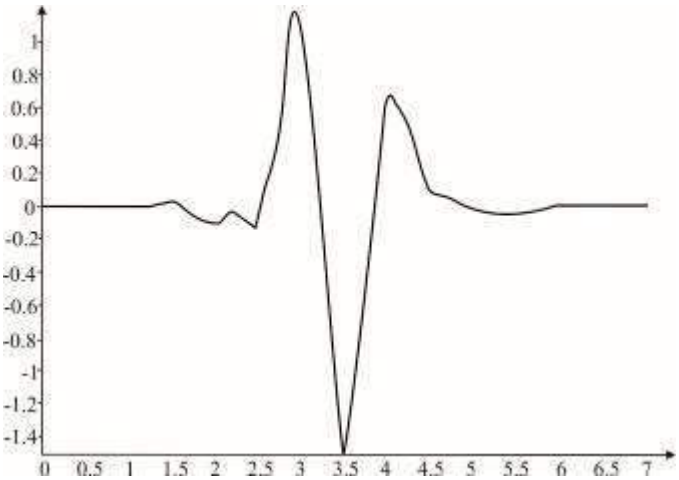


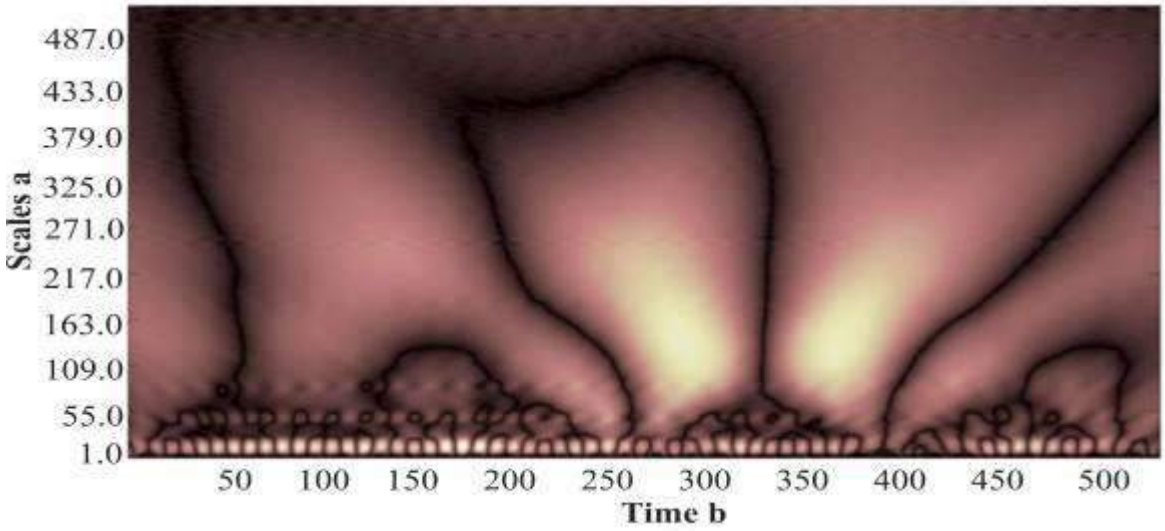
Рисунок 4.7 – Вейвлет-функція sym4

Дане сімейство вейвлетів застосовується в ряді задач, а саме: зменшенні рівня зашумленості сигналу, прогнозуванні [100] та обробці сигналів і зображень [101]. Першим етапом опрацювання була побудова спектрограм шуму.

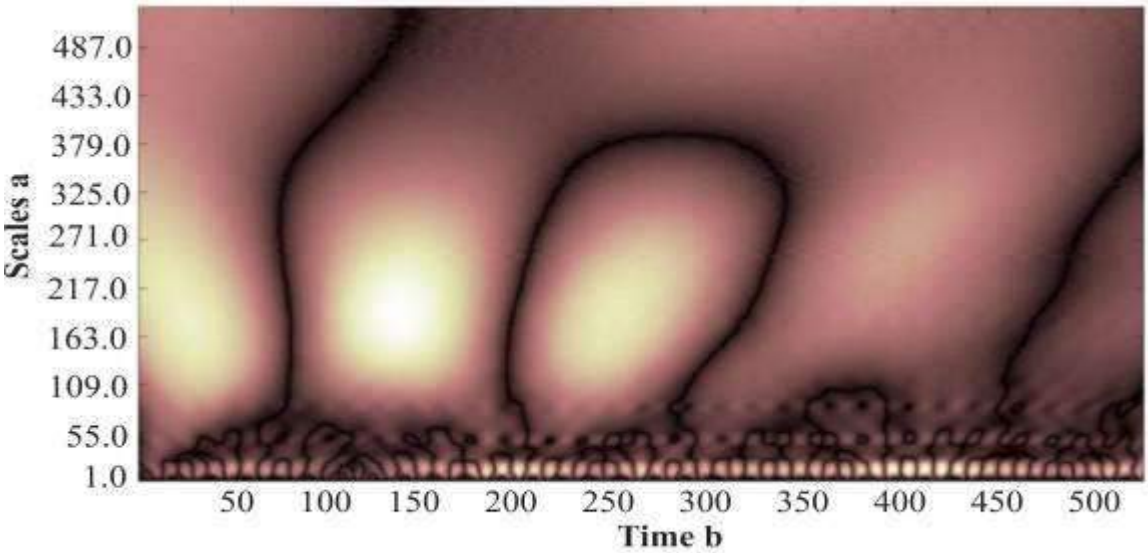
Послідовність операцій опрацювання наступна:

- завантаження даних в середовище Matlab;
- вибір масиву даних довжиною в 532 символи;
- побудова спектрограм з використанням симлет-вейвлета четвертого порядку;
- вивід спектрограми для кожного з наборів даних.

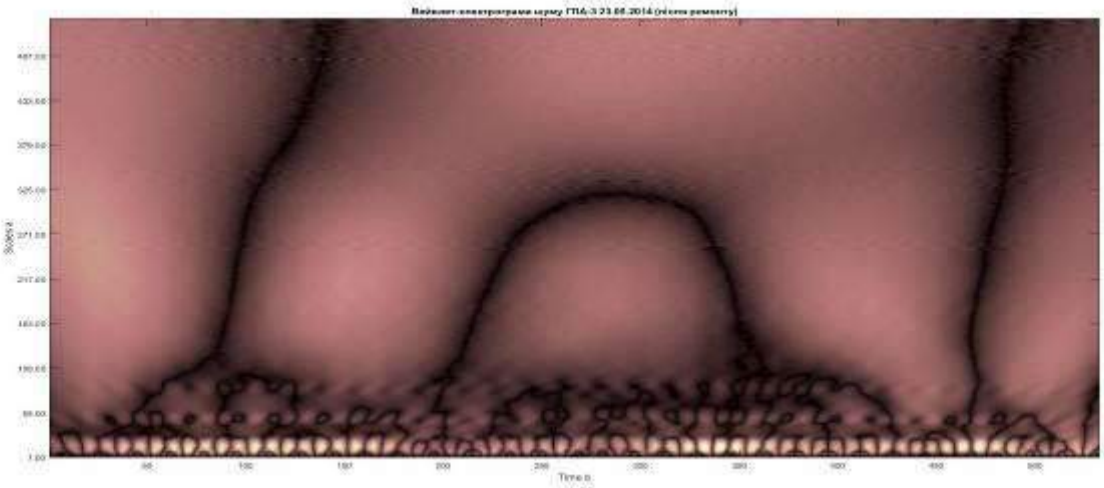
Результуючі спектрограми наведені на рис. 4.8



а



б



в

Рисунок 4.8 – Спектрограми вибірки з записів акустичного сигналу: а -«дефектного», б – «номінального» та в – «поточного» станів ГПА №3

Як видно з графіків, на малих масштабах (1-28 значень), вейвлет-спектрограма наборів даних для «номінального» стану ГПА майже повністю зберігає періодичність, тоді як набір даних «дефектного» стану має деякі відхилення в районі значень 370-530 по часовому відліку.

На масштабах 28-55 на спектрограмі рис. 4.8а спостерігається відхилення від спектрограм на рис. 4.8б,в оскільки в значеннях 200-500 зникає високочастотна складова, а спектрограма в цій області описується 5 піковими значеннями.

В подальших масштабах видно, що в значеннях 200-350 в спектрограмах на рис. 4.8б,в присутнє згладжене пікове підвищення, тоді як на рис. 4. 8а в великих масштабах (400=480) дане підвищення має межі неправильної форми.

Крім того, на великих масштабах (500 і вище) на спектрограмі рис. 4.8а з'являється незначна періодична складова, тоді як на інших двох спектрограмах вона майже не виражена.

Таким чином, можна зробити висновок, що хоч дані спектрограми мають багато подібностей, але якщо їх досліджувати на малих та великих масштабах, помітні різниці в виникненні або зникненні різних частотних складових в залежності від «поточного» стану.

Для отримання кількісних показників такої залежності, проведемо дискретне вейвлет-перетворення. У випадку нашого дослідження, дана операція дозволяє виділити характерні тренди в зміні значень шуму на різних масштабах.

Це досягається за рахунок операції розкладу на компоненти вейвлет-перетворення (рис. 4.9).

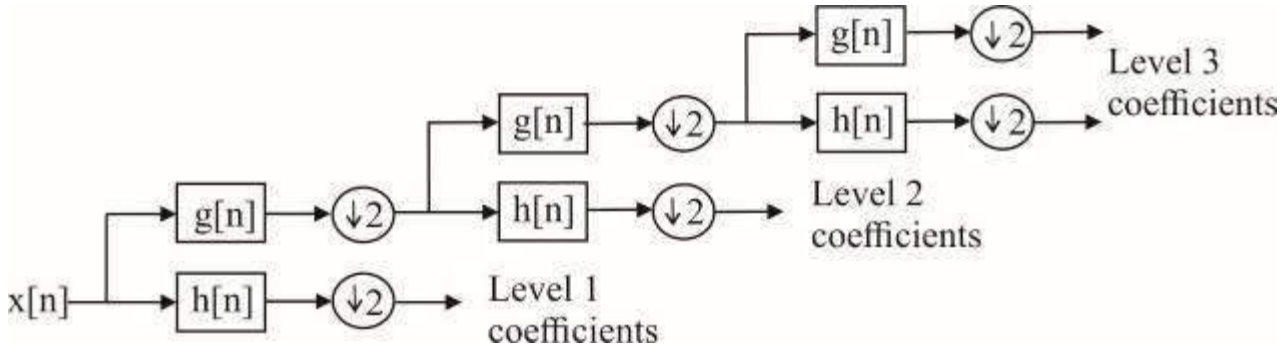


Рисунок 4.9 – Дерево (банк) вейвлет-розкладу

Типова картина вейвлет-розкладу сигналу за симлет-вейвлетом четвертого порядку за 5 компонентами подана на рис. 4.10.

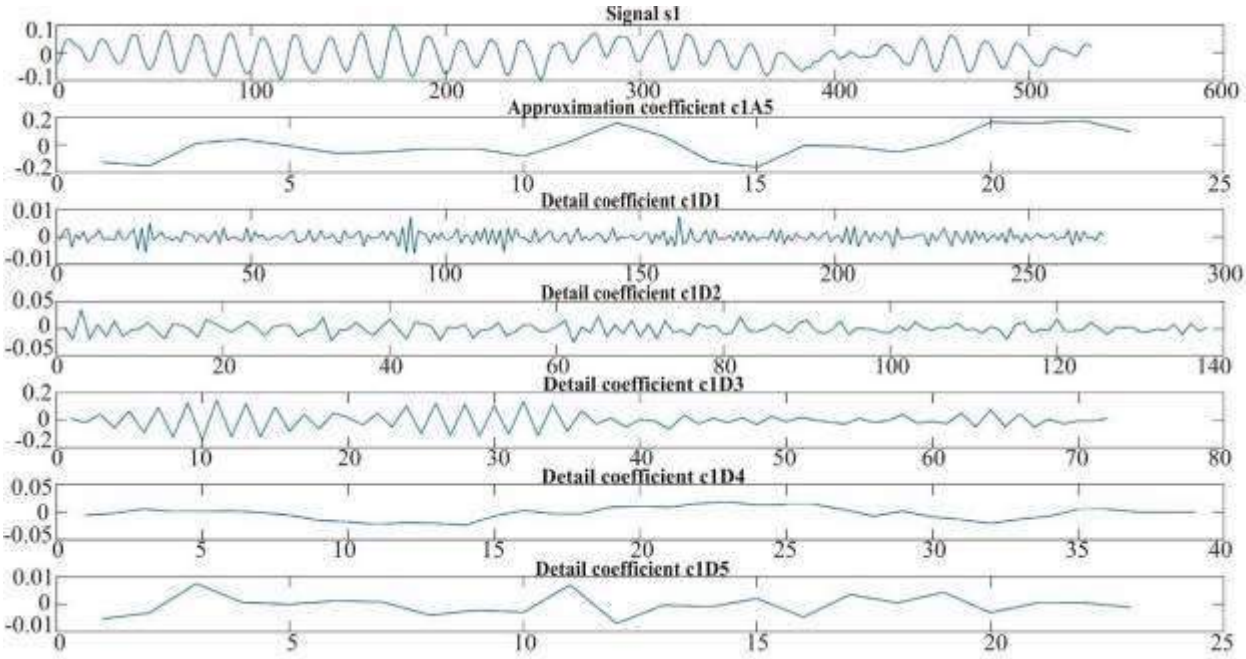


Рисунок 4.10 - Типова картина розкладу за симлет-вейвлетом четвертого порядку

Як видно з графіків, з відділенням кожної з компонент d1-d5, фільтрується високочастотна складова, при цьому залишковий сигнал a5 є по своїй суті аперіодичним. В табл. 4.7 наведено значення норми апроксимації та норм деталізації по відношенню до норми сигналу (у відсотках) для п'ятирівневого вейвлет-розкладу за описаними вище наборами даних. Характеристикою кожного з наборів даних виступало напрацювання ГПА після ремонту на годину.

Значення норми апроксимації та норм деталізації по відношенню до норми сигналу (у відсотках) для пятирівневого вейвлет-розкладу Таблиця 4.7

Компонента розкладу/ відношення норми компоненти до норми сигналу, %	«номінальний» стан – 0 год. напрацювання	«поточний» стан ГПА - 2500 год. напрацювання	«дефектний» стан ГПА -16000 год. напрацювання
S	3,3358	0,2376	0,9781
A7	37,4571	20,1177	30,6366
D1	3,0508	5,5549	3,3212
D2	18,5974	31,3913	12,0741
D3	56,9395	68,2173	60,435
D4	70,5102	61,9016	70,5607
D5	6,9896	7,6159	14,2671

Як видно з даних табл. 4.7, на 5-ій компоненті деталізації вейвлет-розкладу спостерігається зростання величини норми в залежності від напрацювання (технічного стану ГПА). Розглянемо даний графік детальніше (рис. 4.11).

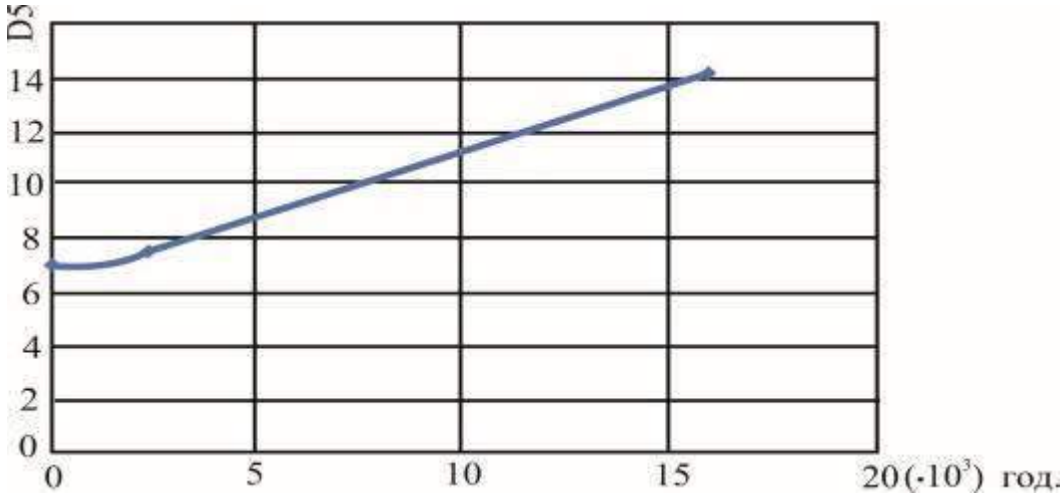


Рисунок 4.11 – Графік відношення норми вейвлет-складової деталізації п'ятого порядку до часу напрацювання ГПА

Як бачимо, на графіку спостерігається тенденція до лінійного зростання величини норми вейвлет-складової деталізації п'ятого порядку відносно часу напрацювання. Проведемо лінійну апроксимацію даної залежності (рис. 4.11).

Як видно з результатів апроксимації, залежність величини норми вейвлет-складової деталізації п'ятого порядку d_5 від часу напрацювання ГПА t описується рівнянням:

$$d_5 = 0.0005t+6.7414,$$

де t – напрацювання ГПА в годинах.

Достовірність апроксимації R^2 складає 0,9954, що є високим показником. Таким чином, дана залежність дозволяє встановити зв'язок між часом напрацювання ГПА (технічним станом) та складовими акустичного сигналу і, відповідно, досліджувати зміну його складових як ознаку появи і розвитку дефектів ГПА.

4.4 Побудова штучної нейронної мережі для діагностування трьох станів ГТК-25і

Побудова штучної нейронної мережі для діагностування ГТК-25і була проведена з використанням фреймворків TensorFlow та Keras [102, 103] на основі добре відомих підходів що обробки сигналів за допомогою штучних нейронних мереж [104, 105].

Створюємо мережу прямого поширення з двома прихованими шарами і вихідним шаром. В прихованому шарі використовується ReLU функція активації, в вихідному шарі – функція *SoftMax*.

```
model = keras.Sequential()

model.add(keras.layers.Flatten(input_shape=(12,)))
model.add(keras.layers.BatchNormalization())
model.add(keras.layers.Dense(256, activation='relu'))
model.add(keras.layers.BatchNormalization())
model.add(keras.layers.Dense(128, activation='relu'))
model.add(keras.layers.BatchNormalization())
model.add(keras.layers.Dense(3, activation='softmax'))
```

```
Model: "sequential"
_________________________________________________________________
Layer (type)                 Output Shape              Param #
=================================================================
flatten (Flatten)            (None, 12)                0
_________________________________________________________________
batch_normalization (BatchNo (None, 12)                48
_________________________________________________________________
dense (Dense)                (None, 256)               3328
_________________________________________________________________
batch_normalization_1 (Batch (None, 256)               1024
_________________________________________________________________
dense_1 (Dense)              (None, 128)               32896
_________________________________________________________________
batch_normalization_2 (Batch (None, 128)               512
_________________________________________________________________
dense_2 (Dense)              (None, 3)                 387
=================================================================
Total params: 38,195
Trainable params: 37,403
Non-trainable params: 792
```

Рисунок 4.12 – Модель мережі прямого поширення з двома прихованими шарами і вихідним шаром

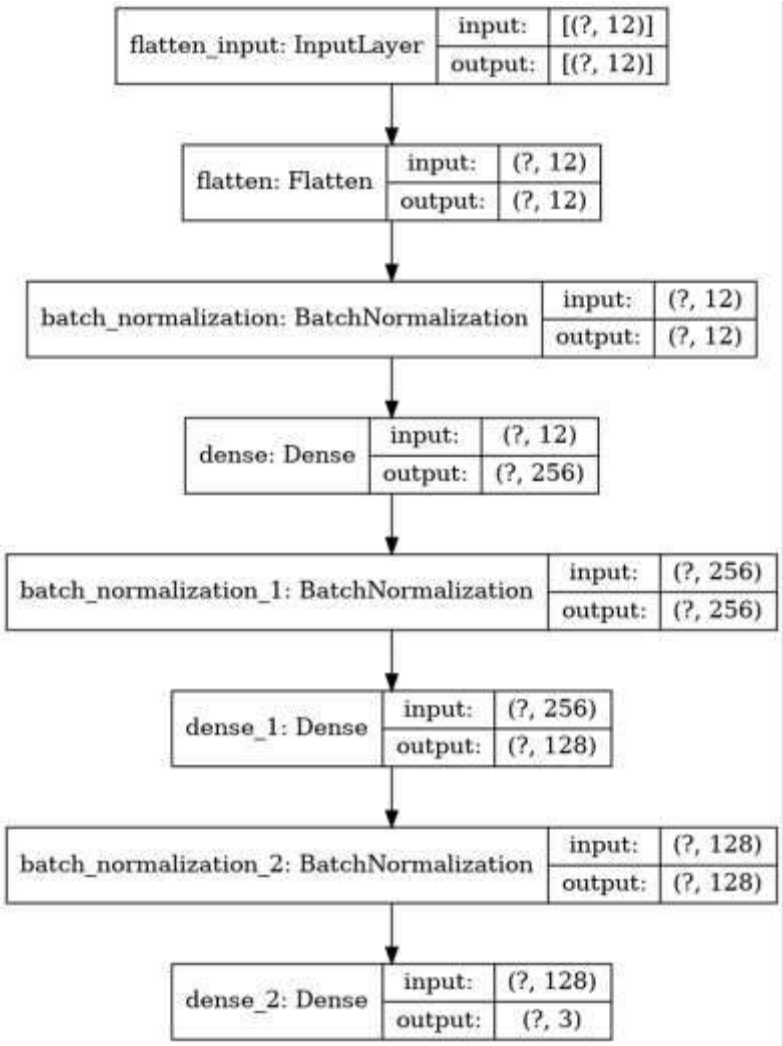


Рисунок 4.13 - Структура нейромережі та розмірності даних

Вхідні дані імпортуємо за допомогою pandas, здійснюємо необхідний препроцесінг (виділення 5 значень шуму і вібрації, переворення їх у вектор, обчислення стандартого відхилення) і перетворюємо у numpy arrays.

Наступним етапом побудови нейромережі є розподілення вхідних даних (рис. 4.14).

```
[38]: X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=101, shuffle=True)
```

Рисунок 4.14 - Розподілення вхідних даних

Наявний Data Set розбивається на три групи:

Training (тренування) – дані будуть представлені в мережу під час навчання, а мережа налаштовується відповідно до мінімізації помилки.

Validation (перевірка) – ця частина даних використовується для вимірювання якості роботи мережі та припинення навчання, коли якість зупиняє поліпшуватися.

Testing (тестування) – дані не мають впливу на навчання, так як застосовуються для вимірювання продуктивності мережі після навчання.

При таких установках, вхідні та цільові вектори будуть випадковим чином розділені на три групи наступним чином:

- 70% буде використовуватися для навчання нейронної мережі;
- 10% - для перевірки, що навчання мережі завершено;
- останні 20% будуть використані для незалежного тестування мережі.

Компілюємо модель (рис. 4.15):

```
model.compile(optimizer='adam',
              loss='categorical_crossentropy',
              metrics=['accuracy'])
```

Рисунок 4.15 – Компіляція моделі

Після цього і відбувається сам процес навчання або тренування мережі. У процесі навчання можна спостерігати за training accuracy, training loss, validation accuracy, validation loss (рис. 4.16).

```
history = model.fit(X_train,
                    y_train,
                    epochs=20,
                    verbose=1,
                    #callbacks=[tensorboard_callback],
                    validation_split=0.1,
                    batch_size=32)
```

```
Epoch 15/20
166/166 [==============================] - 0s 2ms/step - loss: 0.0290 - accuracy: 0.9881 - val_loss: 0.0664 -
val_accuracy: 0.9797
Epoch 16/20
166/166 [==============================] - 0s 2ms/step - loss: 0.0238 - accuracy: 0.9902 - val_loss: 0.0822 -
val_accuracy: 0.9729
Epoch 17/20
166/166 [==============================] - 0s 2ms/step - loss: 0.0267 - accuracy: 0.9910 - val_loss: 0.0511 -
val_accuracy: 0.9881
Epoch 18/20
166/166 [==============================] - 0s 2ms/step - loss: 0.0274 - accuracy: 0.9908 - val_loss: 0.0872 -
val_accuracy: 0.9763
Epoch 19/20
166/166 [==============================] - 0s 2ms/step - loss: 0.0267 - accuracy: 0.9902 - val_loss: 0.0690 -
val_accuracy: 0.9780
Epoch 20/20
166/166 [==============================] - 0s 2ms/step - loss: 0.0260 - accuracy: 0.9904 - val_loss: 0.0498 -
val_accuracy: 0.9746
```

Рисунок 4.16 – Процес навчання мережі

З історії навчання можна вивести графіки, що характеризують якість навчання. Зокрема, можна побудувати графік навчання мережі (рис. 4.17), що показує поведінку помилки навчання на навчальній, контрольній і тестовій множинах. Як функціонал помилки в цьому випадку використовується категоріальна крос-ентропія (перехресна ентропія).

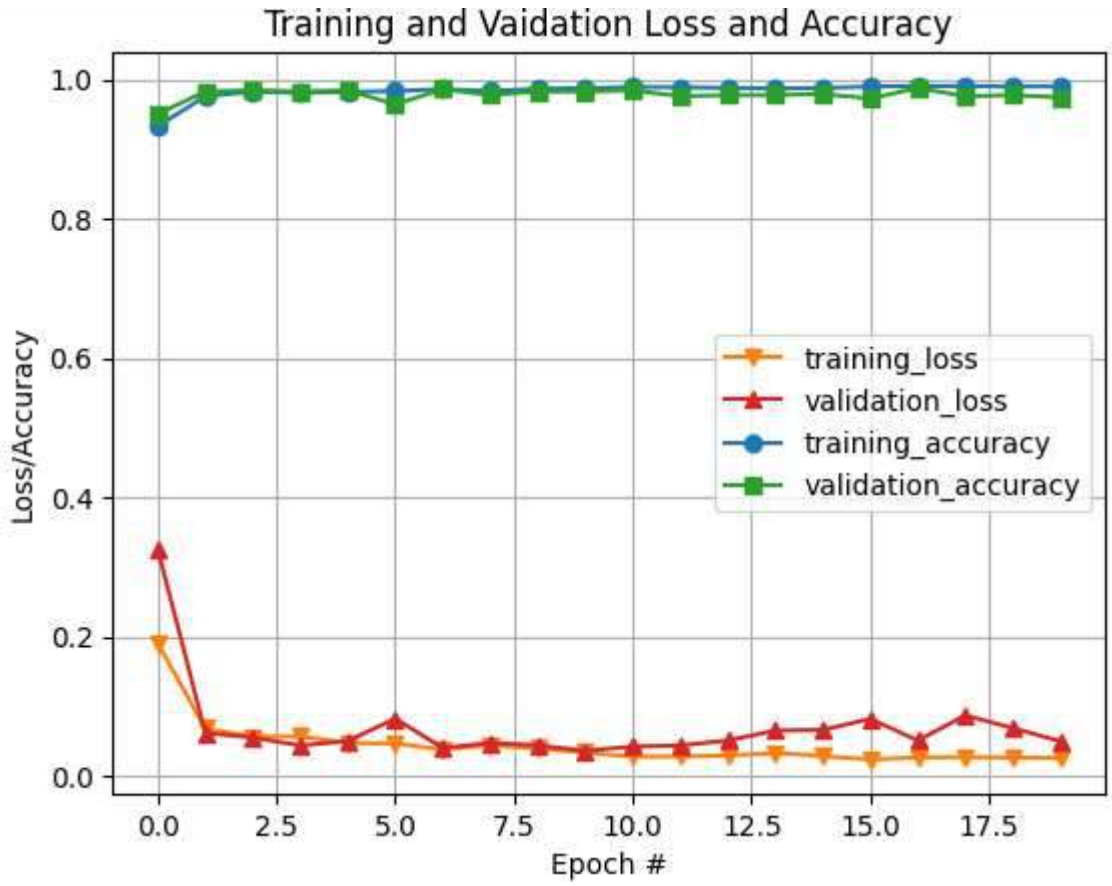


Рисунок 4.17 – Графіки навчання нейромережі

З наведених на рис. 4.17 графіків видно, що найкращу продуктивність системи отримаємо після 20 епох, коли досягається заданий рівень помилки для валідаційних даних. Як можна побачити, training accuracy досягає значення 0.9904, validation accuracy досягає значення 0.9746.

Тестування розробленої мережі проведемо на базі Test Set, розмір якого складає 1475 зразків сигналів (рис. 4.18).

```
test_loss, test_acc = model.evaluate(X_test, y_test)
print('Test accuracy:', test_acc)

47/47 [==============================] - 0s 789us/step - loss: 0.0570 - accuracy: 0.9871
Test accuracy: 0.987118661403656
```

Рисунок 4.18 – Тестування нейромережі на базі Test Set

Як можна побачити test accuracy досягає значення 0.9871. Розглянемо детальніше отримані тестові результати.

Матриця невідповідностей (помилок) мережі (Confusion) (рис. 4.19) – матриця, в якій для кожного класу спостережень наводяться результати віднесення спостережень до того чи іншого класу. Матриця дозволяє бачити чи приховує класифікатор класу. Стовпці матриці відповідають передбаченим класам, а рядки - фактичним класам.

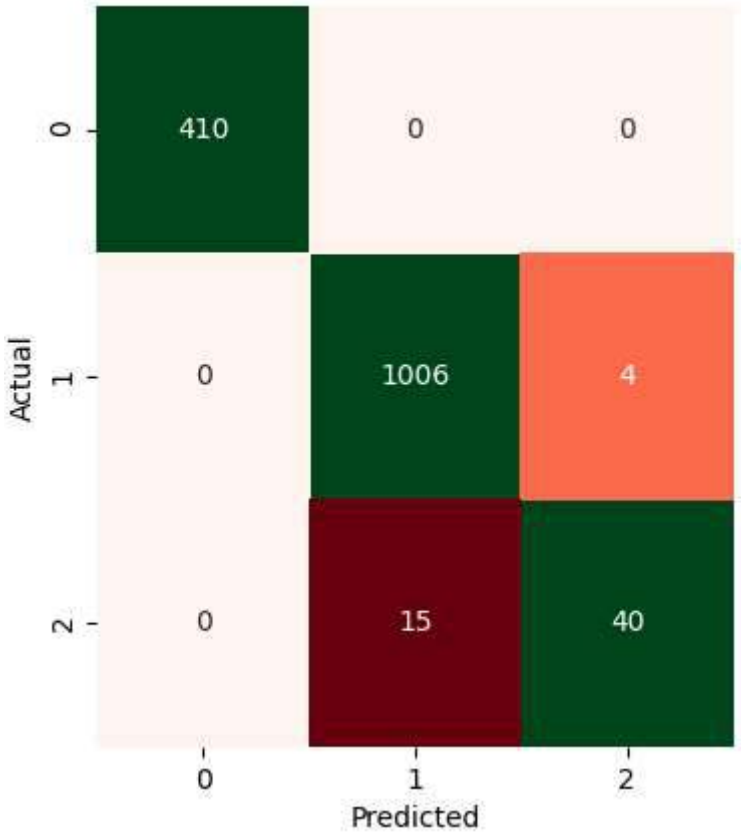


Рисунок 4.19 – Матриця невідповідностей (помилок) мережі

Матриця невідповідності побудована для тестової множини (Test Set)

Як можна побачити, для класу “номінальний” усі 410 зразків сигналів були розпізнані коректно (recall = 1.0000). Випадків некоректно розпізнаних інших класів як “номінальний” немає (precision = 1.0000). Для класу “поточний” 4 зразки з 1010 було помилково розпізнано як інші класи (recall = 0.9960), також 15 зразків інших класів було помилково розпізнано як “поточний” (precision = 0.9853). Для класу “дефектний”, 15 з 55 зразків було помилково розпізнано як інші класи (recall = 0.7273) і 4 зразки інших класів були помилково розпізнані як “дефектні” (precision = 0.9091).

Детальний звіт роботи класифікатора наведено нижче:

	precision	recall	f1-score	support
nominal	1.0000	1.0000	1.0000	410
current	0.9853	0.9960	0.9906	1010
defect	0.9091	0.7273	0.8081	55
micro avg	0.9871	0.9871	0.9871	1475
macro avg	0.9648	0.9078	0.9329	1475
weighted avg	0.9866	0.9871	0.9864	1475
samples avg	0.9871	0.9871	0.9871	1475

З використанням навченої нейронної мережі можна діагностувати технічний стан ГТК-25і за характеристиками акустичного сигналу.

4.5 Оцінка показника готовності системи діагностування САУ ГТК-25і

Система САУ ГПА діагностується на основі розгінних характеристик, які можна отримати лише в моменти пуску агрегату, паралельно з процесами запуску. Це можуть бути, або пуск агрегату в роботу, або технологічні пуски агрегатів, які тимчасово знаходяться в простої.

Отже діагностування елементів САУ ГПА здійснюється періодично, причому значення періоду діагностування є випадковим значенням і збігатиметься із значенням періоду використання ГПА в цілому. Оскільки оцінка параметрів здійснюється лише в момент пуску, то система діагностування після успішної перевірки працездатності обєкту діагностування в подальшому не буде впливати на працездатність ОД.

Спільний розгляд організації використання ОД і організації процесу діагностування, приводить до розгляду задачі оцінки ефективності системи діагностування для ОД випадково-періодичного використання при випадково-періодичному діагностуванні [10].

Розглянемо циклограму використання ОД з врахуванням проведення діагностування системи керування (рис.4.18).

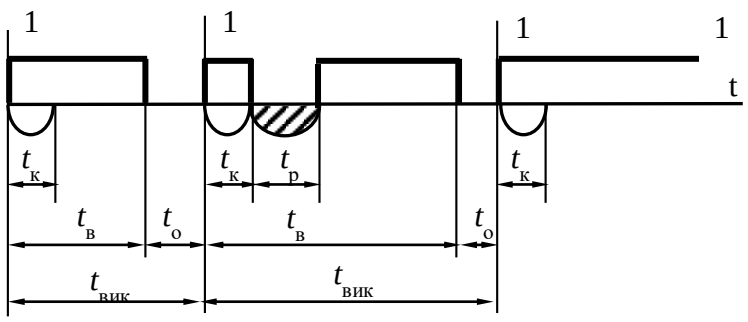


Рисунок 4.18 – Циклограма взаємодії ОД і ТЗД

На рис. 4.18 тривалість контролю ОД позначено $t_к$.

Визначаємо сукупність станів системи діагностування (СД) $S = \{s_i\}$, $i = \overline{1,n}$ на основі аналізу режимів експлуатації і циклограми (рис. 4.26).

Виходячи з рис. 4.18 можна припустити, що СД може перебувати в наступних станах:

1 – ОД і технічні засоби діагностування працездатні і перебувають в режимі контролю (режим запуску ГПА)

2 – за результатами діагностування ОД визнано працездатним, ОД перебуває в робочому режимі

3 – ТЗД непрацездатні в режимі відновлення

4 – за результатами діагностування ОД визнано не працездатним, ОД в режимі відновлення

5 – ОД вийшов з ладу під час експлуатації, ОД в режимі відновлення

6 – ОД працездатний, в режимі очікування

Враховуючи можливі переходи між даними станами отримаємо наступний граф переходів (рис. 4.19)

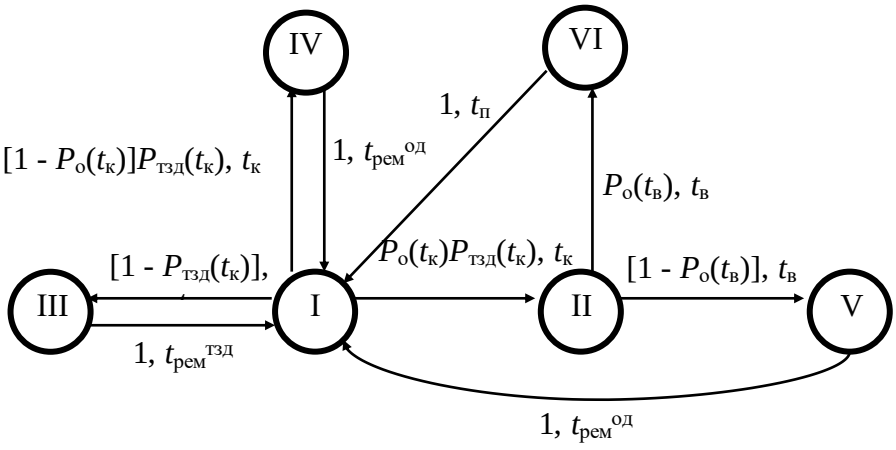


Рисунок 4.19 – Граф переходів для системи діагностування системи управління ГПА

На основі графу переходів (рис. 4.19) складаємо систему рівнянь на основі правила, що алгебраїчна сума сигналів, які входять у вершину, дорівнює 0. Число рівнянь відповідає числу вершин в графі:

$$\begin{aligned}
&\pi_1 = \pi_3 + \pi_4 + \pi_5 + \pi_6 \\
&\pi_2 = P_о(t_к)P_{тзд}(t_к)\pi_1 \\
&\pi_3 = [1 - P_{тзд}(t_к)]\pi_1 \\
&\pi_4 = [1 - P_о(t_к)]P_{тзд}(t_к)\pi_1 \\
&\pi_5 = [1 - P_о(t_в)]\pi_2 \\
&\pi_6 = P_о(t_в)\pi_2
\end{aligned} \tag{4.2}$$

4. Розв’язуємо систему рівнянь (4.2) відносно π_1.

$$\begin{aligned}
&\pi_1 \\
&\pi_2 = P_о(t_к)P_{тзд}(t_к)\pi_1 \\
&\pi_3 = [1 - P_{тзд}(t_к)]\pi_1 \\
&\pi_4 = [1 - P_о(t_к)]P_{тзд}(t_к)\pi_1 \\
&\pi_5 = [1 - P_о(t_в)]P_о(t_к)P_{тзд}(t_к)\pi_1 \\
&\pi_6 = P_о(t_в)P_о(t_к)P_{тзд}(t_к)\pi_1
\end{aligned} \tag{4.3}$$

Вибраємо π_1 в якості базової та знаходимо безрозмірні коефіцієнти $A_i = \dfrac{\pi_i}{\pi_б}$ на основі рівнянь

$$\pi_1$$
$$\pi_2 = \pi_1$$
$$\pi_3 = P_{\text{о}}(t_{\text{в}})[1 - P_{\text{тзд}}(t_{\text{в}})]\pi_1$$
$$\pi_4 = [1 - P_{\text{о}}(t_{\text{в}})]P_{\text{тзд}}(t_{\text{в}})\pi_1$$
$$\pi_5 = [1 - P_{\text{о}}(t_{\text{в}})][1 - P_{\text{тзд}}(t_{\text{в}})]\pi_1$$

тоді

$$\begin{aligned} A_1 &= 1 \\ A_2 &= P_{\text{о}}(t_{\text{к}})P_{\text{тзд}}(t_{\text{к}}) \\ A_3 &= [1 - P_{\text{тзд}}(t_{\text{к}})] \\ A_4 &= [1 - P_{\text{о}}(t_{\text{к}})][1 - P_{\text{тзд}}(t_{\text{к}})] \\ A_5 &= [1 - P_{\text{о}}(t_{\text{в}})]P_{\text{о}}(t_{\text{к}})P_{\text{тзд}}(t_{\text{к}}) \\ A_6 &= P_{\text{о}}(t_{\text{в}})P_{\text{о}}(t_{\text{к}})P_{\text{тзд}}(t_{\text{к}}) \end{aligned} \tag{4.4}$$

5. Вибираємо сукупність S^* з m станів ($S^* \subset S$), що характеризують працездатність ОД, в даному випадку це стани 1, 2 та 6.

6. Визначаємо ймовірність перебування СД в 1, 2 та 6 станах:

$$\Pi_{\text{г}} = \frac{A_1T_{01} + A_2T_{02} + A_6T_{06}}{\sum_{i=1}^{6} A_iT_i}, \tag{4.5}$$

де T_i – безумовна тривалість перебування СД в i-му стані, яку визначаємо за формулою

$$T_i = \sum_{i=1}^{l} p_{ij} M\left(\tau_{ij}\right), \tag{4.6}$$

де T_{0i} – середнє значення для безумовної тривалості відсутності дефектів на протязі T_i, яке можна знайти за формулою:

$$T_{0i} = \int_{T}^{T+\tau_{ij}} P_{\text{о}}\left(t\right)P_{\text{тзд}}\left(t\right)dt$$

На основі графу переходів і (4.6) знаходимо безумовна тривалість перебування СД в кожному стані

$$
\begin{aligned}
T_1 &= t_{\text{к}} \\
T_2 &= t_{\text{в}} \\
T_3 &= t_{\text{рем}}^{\text{тзд}} \\
T_4 &= t_{\text{рем}}^{\text{од}} \\
T_5 &= t_{\text{рем}}^{\text{од}} \\
T_6 &= t_{\text{п}}
\end{aligned}
\tag{4.7}
$$

Підставляємо (4.4) та (4.7) в (4.5)

$$
\Pi_{\text{г}} = \frac{\int_0^{t_{\text{к}}} P_{\text{о}}(t) P_{\text{тзд}}(t)\,dt + \int_0^{t_{\text{в}}} P_{\text{о}}(t)\,dt + \int_0^{t_{\text{п}}} P_{\text{о}}(t)\,dt}{t_{\text{к}} + P_{\text{о}}(t_{\text{к}}) P_{\text{тзд}}(t_{\text{к}}) t_{\text{в}} + [1 - P_{\text{тзд}}(t_{\text{к}})] \cdot t_{\text{рем}}^{\text{тзд}} + [1 - P_{\text{о}}(t_{\text{в}})] P_{\text{тзд}}(t_{\text{в}}) \cdot t_{\text{рем}}^{\text{од}} + \\ + [1 - P_{\text{о}}(t_{\text{в}})] P_{\text{о}}(t_{\text{к}}) P_{\text{тзд}}(t_{\text{к}}) t_{\text{рем}}^{\text{од}} + P_{\text{о}}(t_{\text{в}}) P_{\text{о}}(t_{\text{к}}) P_{\text{тзд}}(t_{\text{к}}) t_{\text{п}}}
$$

Врахувавши, що $t_{\text{в}} + t_{\text{п}} = t_{\text{вик}}$ – період використання, а також, що в період нормальної експлуатації відмови елементів СД можна описати показниковим законом розподілу ($P(t) = \exp(-\lambda t)$) остаточно отримаємо

$$
\Pi_{\text{г}} = \frac{\dfrac{1}{\lambda_{\text{о}} + \lambda_{\text{тзд}}} e^{-(\lambda_{\text{од}} + \lambda_{\text{тзд}}) t_{\text{к}}} + \dfrac{1}{\lambda_{\text{о}}} e^{-\lambda_{\text{од}} t_{\text{вик}}}}{t_{\text{к}} + t_{\text{рем}}^{\text{од}} + e^{-(\lambda_{\text{од}} + \lambda_{\text{тзд}}) t_{\text{к}}} \left[t_{\text{в}} + t_{\text{рем}}^{\text{од}} + e^{-\lambda_{\text{од}} t_{\text{в}}} (t_{\text{п}} - t_{\text{рем}}^{\text{од}}) \right] - e^{-\lambda_{\text{тзд}} t_{\text{в}}} t_{\text{рем}}^{\text{тзд}} + \left(1 - e^{-\lambda_{\text{од}} t_{\text{в}}}\right) e^{-\lambda_{\text{тзд}} t_{\text{в}}} t_{\text{рем}}^{\text{од}}}
$$

Проведемо розрахунок показника готовності $П_г$ для ГТК-25, для якого на основі статистичних даних можна обчислити наступні показники надійності:

1) середнє напрацювання на відмову системи керування ГТК-25 становить 6323 год, звідки $\lambda_{\text{од}} = 1.58 \cdot 10^{-4}$ 1/год

2) інтенсивність відмов ТЗД – $\lambda_{\text{тзд}} = 1 \cdot 10^{-6}$ 1/год

3) середній період використання становить $t_{\text{вик}} = 4400$ год,

4) середній час використання за призначенням – $t_{\text{в}} = 4320$ год,

5) тривалість ремонту ОД (системи керування) становить $t_{\text{рем}}^{\text{од}} = 2{,}22$ год,

6) тривалість ремонту ТЗД становить $t_{\text{рем}}^{\text{тзд}} = 1$ год;

7) тривалість контролю рівна $t_{\text{к}} = 0.5$ год

Підставляємо дані значення у (4.8). Звідки отримаємо, що показник готовності для системи діагностування САУ ГТК-25 становить *Пг* = 0.93.

Розроблені методи і система контролю пройшли промислову апробацію на КС-39 «У-П-У» Богородчанського ЛВУМГ (акт від 12.08.2020 р. в Додатку Е) і рекомендовані до впровадження та на КС-3 Долинського ЛВУМГ (акт від 18.07.2019 р. в Додатку Є), а результати теоретичних і експериментальних досліджень впроваджено в навчальному процесі – в робочих програмах навчальних дисциплін «Об'єкти і процеси управління нафтогазового комплексу» та «Методи і засоби діагностування об'єктів нафтогазового комплексу» (акт від 19.05.2020 р. в Додатку Ж), які читаються студентам спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» за освітньою програмою «Комп'ютеризовані системи управління та автоматика».

Висновки до розділу 4

Проведена промислова апробація методу діагностування САУ ГТК-25і, теоретичні засади якого грунтуються на визначенні площ перехідних характеристик як діагностичних ознак стану САУ ГПА, на експериментальних даних, отриманих протягом дев'яти місяців. Отримані результати показали, що метод є менш чутливим до перешкод, які накладаються на отримані в процесі експлуатації розгінні характеристики САУ ГПА за відповідними каналами передачі вхідних впливів.

Розроблено метод параметричної діагностики технічного стану газоперекачувального агрегату, що базується на визначенні найбільших значень дискримінантних функцій досліджуваного ГТК-25і для кожного з його технічних станів за 16 технологічними параметрами. Представлення діагностичних ознак стану ГТК-25і у вигляді «хмарок» на площині і відображенні їх на графіку дозволяє прослідкувати тенденцію зміни технічного стану ГТК-25і в часі.

Розглянута методика визначення діагностичної ознаки технічного стану ГТК-25і за результатами обробки, з використання вейвлет-перетворення, акустичних процесів, що супроводжують роботу ГТК-25і для трьох його якісних

станів – «дефектний», «номінальний» та «поточний» - після року напрацювання. Встановлена діагностична ознака - величина норми вейвлет-складової деталізації п'ятого порядку D5 та проведена апроксимація її зміни в часі, що характеризує зміну технічного стану ГТК-25і.

Розроблено архітектуру глибинної повнозв'язної нейронної мережі прямого поширення, що тренуються за алгоритмом зворотного поширення похибки. Вхідна розмірність нейромережі 12. Вихідний шар містить 3 нейрони для кожного стану відповідно. Нейромережа містить два прихованих шари, що містить 256 та 128 нейронів відповідно. Таке число нейронів вибрано на основі необхідності забезпечити потрібну ємність мережі. В прихованому шарі використовується ReLU функція активації, в вихідному шарі – функція SoftMax. Між шарами застосовується пакетна нормалізація (batch normalization). Проведено тестування і отримано числові показники якості діагностування трьох станів ГТК-25і.

Розглянута процедура оцінки ефективності системи діагностування САУ ГТК-25і для найбільш складного випадку-«випадково-періодичне використання ГТК-25і при випадково-періодичному діагностуванні САУ» шляхом визначення показника готовності на основі статистичних даних по відмовах САУ ГТК-25і. Отримане значення показника готовності становить $П_г = 0.93$, що підтверджує ефективність розробленого методу діагностування САУ ГТК-25і.

ВИСНОВКИ

У дисертації подано нове рішення науково-технічної задачі, яке полягає в розробленні методів діагностування як ГПА ГТК-25 на основі сучасних інформаційних технологій, так і системи його автоматичного управління, що сприяють забезпеченню надійності їх роботи та підвищенню ефективності процесу компримування газу.

Основні результати роботи полягають в наступному:

1. Проведений аналіз сучасних тенденцій діагностування технічного стану ГПА показав відсутність системного підходу до розробки методів діагностування ГПА з САУ, у зв'язку з чим практично відсутні методи діагностування САУ ГПА, а відомі методи діагностування механічних вузлів ГПА не завжди є ефективними.

2. З використання методу параметричної ідентифікації (метод Симою)

обгрунтовані теоретичні передумови методу діагностування САУ ГПА за зміної площі S, яка утворена перехідною характеристикою, як діагностичною ознакою стану САУ, що в значній мірі усуває суб'єктивний фактор в обчисленні параметрів передавальної функції, а також обгрунтовано використання для діагностування стану ГТК-25і двошарової ієрархічної нейронної мережі прямого поширення, що тренується за алгоритмом зворотного поширення похибки та її вхідних даних – п'яти максимальних амплітудних значень спектру акустичних процесів, що супроводжують роботу ГТК-25і з «номінальним», «поточним» та «дефектним» станами, і їх порядковими індексами для кожної вибірки.

3. Розроблено методичне, технічне та програмне забезпечення для проведення експериментальних досліджень, яке дозволяє оперативно проводити комплекс досліджень та обробку отриманих даних в режимі реального часу. Отримані результаті показали, що при напрацюванні 1032 год. 0,1,2 і 4 – ступеней ОК ГТК-25і, зміна рівня акустичного сигналу склала 58,33% по ступеням 0,1,2, а по 4 ступені - 14,56%, що дозволяє використовувати їх в якості діагностичних ознак при контролі технічного стану ГТК-25і. Дослідження статистичних характеристик акустичних сигналів для трьох станів ГТК-25і показали, що вони

характеризуються нормальним законом розподілу, а обробка статистики по спектрам акустичних сигналів дозволила обгрунтувати вибір вхідних даних при побудові нейронної мережі.

4. З використанням сучасних інформаційних технологій для обробки технологічних параметрів та віброакустичних процесів, що супроводжують роботу ГТК-25і – дискримінантного аналізу, Wavelet - перетворень і штучних нейронних мереж розроблені та апробовані на експериментальних даних:

- метод діагностування САУ ГТК-25і за значеннями площ його розгінних характеристик, як діагностичних ознак технічного стану САУ, апробація якого на експериментальних даних підтвердила його ефективність;

- комплексний метод діагностування технічного стану ГТК-25і, що базується на визначенні найбільших значень дискримінантних функцій (діагностичних ознак) досліджуваного ГТК-25і для кожного з його трьох технічних станів за 16 технологічними параметрами та вібраційними і акустичними характеристиками;

- метод діагностування стану ГТК-25і, діагностичною ознакою якого є величина норми вейвлет-складової деталізації п’ятого порядку D5, отримана шляхом обробки акустичних процесів, що супроводжують роботу ГТК-25і, і зміна якої в часі описується лінійною залежністю, що дозволяє прогнозувати технічний стан ГТК-25і на подальший період його експлуатації;

- штучна нейронна мережа прямого поширення з вхідною розмірністю 12, двома прихованими шарами, що містять 256 і 128 нейронів відповідно та вихідним шаром, що містить 3 нейрони, яка пройшла навчання на експериментальних даних - п’яти амплітудних максимумів спектра і їх порядкових індексах по кожній з вибірок, результати якого дозволяють зі значенням метрики F1 не менше 0,8 розрізнити три технічні стани ГТК-25і.

5. Розглянута процедура визначення показника готовності на основі статистичних даних по відмовах САУ ГТК-25і, розраховане значення якого становить $П_г$=0.93, що підтверджує ефективність розробленого методу діагностування САУ ГТК-25і.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кунина П.С. Диагностика газоперекачивающих агрегатов с центробежными нагнетателями. П.С. Кунина, П.П. Павленко. Ростов-на-Дону, изд-во РГУ, 2001. 362 с.

2. Вибрационный контроль технического состояния газотурбинных и газоперекачивающих агрегатов. Ю.Н. Васильев, М.Е. Бесклетний, Е. А. Игуменцев, В.Е. Хризестен. М .: Недра. 1987. 197 с.

3. Сапрыкин С.А. Методы и технические средства вибрационной диагностики газоперекачивающего оборудования. С. А. Сапрыкин.Х., 2009.368 с.

4. Семенов А.С. Классификация и анализ эксплуатационных неисправностей газоперекачивающих агрегатов. А.С. Семенов. Сб. науч. тр. «Нефть и газ. Новые технологии в системах транспорта ». Тюмень: ТюмГНГУ, 2004. С. 65-69.

5. Павлик В.В. Напрямки підвищення ефективності експлуатації газоперекачувальних агрегатів в умовах Богородчанського ЛВУМГ. В.В. Павлик. Наукові вісті Галицької Академії, № 2(22). Івано-Франківськ, 2012. С.44-49.

6. Development method for estimating the technical condition of gas pumping units by their accelerating characteristic. M. Gorbiychuk, O. Zamikhovska, L. Zamikhovskyi, V. Pawlyk. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. № 3/2 (105). 2020. P. 48 – 57.

7. Павлик В.В. Модернізація реєструючих пристроїв, систем керування на КС (компресорній станції) №39 газопроводу «Уренгой-Помари-Ужгород» Богородчанського ЛВУМГ. В.В. Павлик, І.М. Вовк, В.Я.Вигодованок. НВЖ «Трубопровідний транспорт». №4(54), листопад-грудень 2008. С. 21-23.

8. Павлик В.В. Епоха модернізації: модернізація загальностанційної системи керування КС-21 «Союз»; створення інформаційно - вимірювальної системи на КС-7 магістрального газопроводу «К-А-Ч-Б» Богородчанського ЛВУМГ. В. В. Павлик, З.Й. Концур, Б.Ф.Труфан. НВЖ «Трубопровідний транспорт. №4 (64), липень-серпень 2010. С. 16-18.

9. Заміховський Л.М. Модернізація, підвищення надійності роботи агрегатних, загальностанційних систем автоматичного керування на газоперекачувальних компресорних станціях, організація сучасного моніторингу, діагностики стану технологічного обладнання. Л.М. Заміховський, В.В. Павлик. Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу: матеріали Міжн. наук.-техн. конф. 15-18 трав. 2012р. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2012. С. 105-106.

10. Модернізація ГТС. Зроблено в Україні. В.В. Павлик, З.Й. Концур, І.М. Вовк, В.В.Дихнілкін. Журнал «Мир Автоматизации». №3(37), вересень 2012. С.84-88.

11. Павлик В.В. Модернізація системи обліку паливно-пускового газу на КС (компресорній станції) №21 газопроводу «Союз». В.В. Павлик. Інформаційний огляд ДК «Укртрансгаз», 2000. № 3(5). 6 с.

12. Павлик В.В. Контроль стану повітряних фільтрів осьового компресора. В.В. Павлик, І.М. Вовк. Трубопровідний транспорт. № 2(80), березень-квітень 2013. С. 30-31.

13. Павлик В.В. Організація комп'ютеризованого контролю рівня охолоджувальної рідини в розширювальних баках ГПА (газоперекачувальних агрегатів) ГТК 10-і. В.В. Павлик, З.Й. Концур. Трубопровідний транспорт.

№4(54), листопад-грудень 2008. С. 20-21.

14. Заміховський Л.М. Сучасний стан оцінки надійності систем автоматики газоперекачувальних станцій. Л. М. Заміховський, С.В. Зікратий, Л. О. Штаєр. Науковий вісник ІФНТУНГ. № 2(43) 2017. С. 79-88.

15. Заміховський Л.М. Концепція моніторингу технічного стану газоперекачувального обладнання. Л.М. Заміховський, С.О. Саприкін. Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: збірник наукових праць; тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. НТУ ХПІ. Харків, 2009. № 8. С. 64-68.

16. Зарицкий С.П. Диагностика газоперекачивающих агрегатов. С.П. Зарицкий, А.С. Лопатин. М.: РГУ нефти и газа им. И.М Губкина, 2003. Ч. 1. 177с.

17. Поярков В. В. Разработка и освоение в промышленных условиях алгоритмов параметрической диагностики газотурбинных установок газоперекачивающих агрегатов. В. В. Поярков. Автореф. дис. на соиск. учен, степ. канд. техн. наук. СПб.: Науч.- производ. объед. по исслед. и проектированию энергетического оборудования, 1992.

18. Технічна діагностика трубопровідних систем. [В.Я.Грудз, Я.В.Грудз, В.В.Костів та ін.]. Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2012. 512 с.

19. Приймак К.О. Дослідне випробування методології комплексної параметричної ідентифікації фактичних характеристик енергетичного об'єкту. К.О. Приймак, Н.В. Оліневич, О.П. Дащенко.- Енергетика: економіка, технології, екологія, 2015. № 1. С.47-54.

20. Варламов Г.Б. Алгоритм параметричної ідентифікації фактичних характеристик газоперекачувального агрегату компресорної станції. Г.Б. Варламов, К.О. Приймак.- Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. 2011. №12 (94). С. 10-13.

21. Патент України на корисну модель № 67093. Методика параметричної ідентифікації фактичних характеристик газоперекачувального агрегату компресорної станції. Г.Б. Варламов, К.О. Приймак, І.С. Косинський [та ін.], виданий 25.01.2012р., бюл. № 2. 10 с.

22. Загальні особливості методології параметричного визначення фактичних характеристик газоперекачувального агрегату. Г.Б. Варламов, К.О. Приймак, О.Ю. Чередніченко, Л.М. Підзирайло. Збірник проблеми нафтогазової промисловості: Збірник наукових праць. Київ. 2012. № 10. С.307- 331.

23. Герасименко В.П. Алгоритмы определения основных параметров газотурбинных газоперекачивающих агрегатов в эксплуатации. В.П. Герасименко. Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», серия «Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование», 2009. № 3. С.116-121.

24. Варламов Г.Б. Алгоритм параметричної ідентифікації газоперекачувального агрегату компресорної станції. Г.Б. Варламов,

К.О. Приймак. Энергосбережение. Энергетика, Энергоаудит, 2011. №12 (94). С.10-14.

25. Ильченко Б. С. Теоретические основы и методы расчета функционального технического состояния газоперекачивающих агрегатов. Б.С. Ильченко, Б.И. Измалков. Монография.Х.: Коллегиум, 2006. 250 с.

26. Возняк М.П. Діагностування технічного стану нагнітача газоперекачувального агрегату з використанням реальних режимних параметрів його роботи. М. П. Возняк, Т. В. Юрчило. Науковий вісник ІФНТУНГ. 2012. № 2(32). С. 215-221.

27. Ванчин А.Г. Выбор оптимальной последовательности диагностирования центробежного нагнетателя в условиях компрессорной станции магистрального газопровода. А.Г. Ванчин. Нефтепромысловое дело, 2012. том. 10. № 1.С.31-35.

28. Лановий М.Д. Аналіз методів і критеріїв оцінювання технічного стану газоперекачувального агрегату. М.Д. Лановий. Вісник НАУ, 2010. № 2. С.33-39.

29. Рыбалко В.В. Параметрическое диагностирование энергетических объектов на основе факторного анализа в среде Statistica. В.В.Рыбалко.Exponenta Pro: Математика в приложениях, 2004. № 2(6). С.78-83.

30. Купреев Е.И. Параметрическая диагностика газоперекачивающих агрегатов. Е.И. Купреев, Н.Б. Карницкий. Экономика и менеджмент инновационных технологий, 2016. № 3(90). С. 12-18.

31. A review of information fusion methods for gas turbine diagnostics (Review). V. Zaccaria, M. Rahman, I. Aslanidou, K. Kyprianidis. Sustainability (Switzerland) Volume 11, Issue 22, 1 November 2019, Article number 6202, (Open Access).

32. International Conference on Industrial Engineering, Procedia Engineering Volume 206, 2017, ICIE 2017; Saint-Petersburg; Russian Federation; 16 May 2017 through 19 May 2017; Code 131716. P. 1819-1824.

33. Early Fault Detection of Hot Components in Gas Turbines (Article). L. Jinfu, L. Jiao, W. Jie [and other]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power Volume 139, Issue 2, 1 February 2017, Article number 021201.

34. Gishvarov A.S. Parametric diagnostics of the condition of a dual-flow turbojet engine using neural network simulation of the operating process (Conference Paper). A.S. Gishvarov, J.C. Raherinjatovo. MATEC Web of ConferencesVolume 224, 30 October 2018, Article number 020572018 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2018; Sevastopol; 10 September 2018 through 14 September 2018; Code 141807, (Open Access).

35. Loboda I. Gas turbine fault diagnosis using probabilistic neural networks. I. Loboda, M.A Olivares Robles.Int. J. Turbo Jet-Engines 2015, 32, P.175–191.

36. Amare Desalegn Fentaye. Performance-based fault diagnosis of a gas turbine engine using an integrated support vector machine and artificial neural network method. Amare Desalegn Fentaye, Syed Ihtsham Ul-Haq Gilani, Aklilu Tesfamichael Baheta. First Published November 18, 2018 Research Articlehttps: doi.org/10.1177/0957650918812510.

37. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов. Ф.Я.Балицкий, М.А.Иванова, А.Г.Соколова, Е.Н.Хомякова. М.: Наука,1984.113с.

38. Измерения, контроль, испытания и диагностика. Т. III .7/В: 2-е изд, перераб. и доп. Машиностроение. Энциклопедия [Ред. совет: К. Ф. Фролов (пред.) и др.]. В.В. Клюев, Ф. Р. Соснин, В. Н. Филинов [и др.]; под общ. ред В. В. Клюева. М.: Машиностроение. 464с.

39. Йосло И. Виброконтроль машин с вращающимися валами.И. Йосло. Кэйсо, Instruventation. 1977. Bd, № 2.7.5.22-26.

40. Карасев В. А. Доводка эксплуатируемых машин. Вибродиагностические методы. В. А. Карасев, А. Б. Дойшман.М.: Машиностроение, 1986.192с.

41. Генкин М. Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М. Д. Генкин, А. Г. Соколова. М.: Машиностроение , 1987. 228с.

42. Бесклетный М.Е. Вибрационная диагностика лопаток ГТУ по предельным уровням крутильных колебаний ротора. М.Е. Бесклетный, Е.А. Игуменцев. Проблемы прочности,1981. №12. С. 114-117.

43. Система контроля и диагностики вибрационного состояния ГПА. М.Е. Бесклетный, Е.А. Игуменцев, М.В. Бойко [та ін.]. Газовая промышленность.1987.М10.С. 30-33.

44. Мызин Н. И. Вибрация газоперекачивающих агрегатов. Н.И. Мызин, А.В. Скварковский, Ю.П. Чудилов. Л., “Недра”, (Библиотека эксплуатационника магистрального газопровода), 1973. 144с.

45. Сапрыкин С.А. Вибрационные системы диагностики ГПА. С.А. Сапрыкин, М.В. Бойко. Нефтяная и газовая промышленность.1991.N1.С. 49-50.

46. Старцев В.В. Оценка вибрационного состояния лопаточного аппарата осевого компрессора ГТУ по косвенным признакам. В.В. Старцев, В.И. Дерябин, С.М. Власов. М.,1989.Деп. в ВНИИЭГазпроме 26.09.89, N 1195-гз89. 10с.

47. Бойко М.В. Исследование вибрационных характеристик газоперекачивающих агрегатов ГТН-25.М.В. Бойко. Газовая промышленность. Серия: Транспорт и подземное хранение газа. Экспресс-информация.1987. Вып.10.С.8-13.

48. Мызин Н. И. Вибрация газоперекачивающих агрегатов.Н.И. Мызин,

А. В. Скварковский, Ю. П. Чудилов.Л., “Недра”, (Библиотека эксплуатационника магистрального газопровода), 1973.144с.

49. Бесклетный М.Е. Вибрационная диагностика местонахождения дисбаланса газотурбинной установки ГТ-750-6. М.Е. Бесклетный, Е.А. Игуменцев. Энергомашиностроение, 1980. N4.С.27-29.

50. Разработка методов технической вибродиагностики систем ГПА-фундамент: Отчет МИНГиГП по теме N 126 30-84.-М.,1986.54с.

51. Способ вибродиагностирования газотурбинных двигателей. В.В. Ремизов, А.С. Сула, В.В. Михайлов, А.В. Шестериков. опубл. 23.05.93, Бюл. N19 А.С. СССР N 1816986.

52. Заміховський Л. М., Павлик В. В. Дослідження вібраційного стану осьового компресора ГПА ГТК 25і фірми «Нуово Піньйоне». Методи і прилади контролю якості. 2014. № 1(32). С.28-38.

53. Kochergin A.V. Vibroacoustic Control of Technical Conditions of GTE. A.V. Kochergin, N.V. Pavlova, K.A Valeeva. Procedia Engineering Volume 150, 2016, 2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016; Chelyabinsk; Russian Federation; 19 May 2016 through 20 May 2016; Code 123270 (Conference Paper)(Open Access). P. 363-369.

54. Signal transforms for feature extraction from vibration signal for air compressor monitoring (Conference Paper). N.K. Verma, R. Gupta, R.K. Sevakula, A. Salour. IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON Volume 2015-January, 26 January 2015, Article number 70222752014 IEEE Region 10 Conference, TENCON 2014; Bangkok; Thailand; 22 October 2014 through 25 October 2014; Category number CFP14TEN-ART; Code 112841.

55. Yang W.S. Air compressor fault diagnosis based on lifting wavelet transform and probabilistic neural network (Conference Paper). W.S. Yang, Y.X. Su, Y.P Chen. OP Conference Series: Materials Science and Engineering Volume 657, Issue 1, 25 October 2019, Article number 0120532nd International Conference on Numerical Modelling in Engineering, NME 2019; Beijing; China; 19 August 2019 through 22 August 2019; Code 153583. (Open Access).

56. Krivosheev I.A. Detection of Vibrodiagnostic Signs of Working Body Acoustic Vibrations in GPA-16R "UFA" Gas Channel (Conference Paper). I.A. Krivosheev, V.I. Akimov, D.G. Kozhinov. Procedia Engineering Volume 176, 2017, Pages 184-193Proceedings of the 3rd International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines, DVM 2016; Samara; Russian Federation; 29 June 2016 through 1 July 2016; Code 135188, (Open Access).

57. Fault diagnosis of rolling bearing based on wave lettrans forman denvelope spectrum correlation. W. Sun, G. A Yang, Q. Chen [and other]. (2013).: J. Vib. Control, vol. 19, no. 6, P. 924–941.

58. Назаренко І. В. Застосування технології розподіленого вводу-виводу в системах автоматичного керування технологічним обладнанням компресорного

цеху. І. В. Назаренко, М. Я. Николайчук, В. Д. Ференець.- Нафтогазова енергетика. 2013. № 2. С. 79-84.

59. Андрианова Л. П. Концепция автоконтроля и диагностики отказов электронных систем управления динамическими объектами на основе идентификации коэффициентов их передаточних функций. Л. П. Андрианова, Ф.Г. Гарипов, Ф. А. Шаймарданов. Проблемы машиноведения, конструктивних материалов и технологий: Сборник научных трудов. Уфа: "Гилем", 1997. С. 161-168.

60. Андрианова Л.П. Контроль и диагностика отказов САУ ГТД (научное издание) Л.П. Андрианова. Уфа: УГАТУ. 1997. 182 с.

61. Андрианова Л.П. Способ определения коэффициентов передаточних функций линейных динамических объектов. Л.П. Андрианова, Ф.А. Шаймарданов, Ф.Г. Гарипов. Патент РФ № 2125287. Опубл. Бюл. № 2, 1999.

62. Андрианова Л.П. Идентификация коэффициентов передаточных функций динамических объектов. Л.П. Андрианова, Ф.А. Шаймарданов. Уфа: УГАТУ, 1997. 195 с.

63. Стандарт ИСО 17359-2003. Контроль состояния и диагностика машин. Общее руководство.

64. Assement of dunamic properties of gas pumping units according to the results of experimental researches. M. Gorbiychuk, O. Zamikhovska, L. Zamikhovskiy [and other]. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. № 2/2 (98). 2019. P.73 – 81.

65. Симою М. П. Определение коэффициентов передаточних функцій линеаризованных звеньев и систем авторегулирования. М. П. Симою. Автоматика и телемеханика. 1957. Т. 18, выпуск 6. С. 514–528.

66. Бесекерский В. А. Теория систем автоматического управления. В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. СПб.: Профессия, 2007. 752 с.

67. Заміховський Л.М. Проектування систем діагностування: Навчальний посібник. Л. М. Заміховський, В. П. Калявін. Івано-Франківськ: в-во «Полум'я», 2003. 248 с.

68. Schmidhuber, J. (2015). Deep Learning in Neural Networks: An Overview. Neural Networks. 61: 85–117. arXiv:1404.7828.69.

69. Dreyfus, Stuart E. (1990). Artificial neural networks, back propagation, and the Kelley-Bryson gradient procedure. Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 13 (5): 926–928. Bibcode:1990JGCD...13..926D. doi:10.2514/3.25422. ISSN 0731-5090.

70. A Neural Network-Based Method for Gas Turbine Blading Fault Diagnosis. C. Angelakis, E.N. Loukis, A.D. Pouliezos, G.S. Stavrakakis. International Journal of Modelling and Simulation -Volume 21, 2001. P. 51-60.

71.Заміховський Л.М. Контроль технічного стану газоперекачувальних агрегатів на базі штучних нейромереж. Л.М. Заміховський, В.В. Павлик. Нафтогазова енергетика - 2017: Міжнародна науково-технічна конференція, Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017 р. С. 317-318.

72. Головко В.А. Нейронні мережі: навчання, організація і застосування. В.А. Головко. М.: Радіотехника, 2001. 256 с.

73. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника. Теория и практика. Ф. Уоссермен. М.:Мир, 1992. 184 с.

74. Fault Diagnosis System for an Industrial Gas Turbine by Means of Neural Networks. J. Arriagada, M. Genrup, M. Assadi, A. Loberg. Proceedings of International Gas Turbine, Tokyo, Japan. TS-001:2-7, 2003.

75. A study on intelligent performance diagnostics ofa gas turbine engine using neural networks. C. Kong, J. Ki, M. Kang, S. Kho.

76. Заміховський Л.М. Контроль технічного стану осьового компресора газоперекачувального агрегату. Л.М. Заміховський, В.В. Павлик. Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах: I Міжнародна наукова конференція, Вінниця, 18-20.10.2011. 97 с.

77. Заміховський Л.М. Діагностування технічного стану газоперекачувальних агрегатів в процесі експлуатації. Л.М. Заміховський, В.В. Павлик, Н.І. Іванюк. Вчені Прикарпаття – сталому розвитку краю: обласна науково-практична конференція ; збірник тез доповідей / [Упорядкування і

загальна редакція д. е.н., проф. Петренка В.П.] Івано-Франківськ : ПП Курилюк, 2012. С. 81-84.

78. Заміховський Л.М. Удосконалення системи автоматичного управління газоперекачувальними агрегатами з врахуванням їх технічного стану. Л.М. Заміховський, О.Л. Заміховська, Н.І. Іванюк, В.В. Павлик. Нафтогазова енергетика. 2020. № 2(34). С. 104-113.

79. Шило В.Л. Линейные интегральные схемы в радиоэлектронной аппаратуре. В.Л. Шило. М.: 1979. 368с.

80. Програмний пакет SCADA WIZCON 8.3 [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: http://www.getcontrolmaestro.com/wizcon-en.html.

81. Програмний пакет Steinberg Nuendo 3.2.0 [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: https://www.steinberg.net/index.php?id=911&L=1.

82. Заміховський Л.М. Дослідження діагностичних ознак вібраційного стану осьового компресора ГТК 25і. Л.М. Заміховський, В.В. Павлик. Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах: ІІ-а Міжнародна наукова конференція, Вінниця, 29-30 жовтня 2013 р. С.74-75.

83. Zamikhovskiy L. Methods of diagnosing the technical state of the gas-pumping unit GTC -25I of Nuovo Pignone company [Електронний ресурс].

L. Zamikhovskiy, V. Pavlik. OPEN CONFERENCE SYSTEMS, INNOVATIVE IDEAS IN SCIENCE 2017. 2017. Take place in Banja Luka on 02 - 03 November 2017, Bosnia and Herzegovina Режим доступу до ресурсу: http://conf.cunbm.utcluj.ro/index.php/iis/iis2017/paper/view/233.

84. Замиховский Л.М. Исследование диагностических признаков технического состояния газоперекачивающих агрегатов ГТК - 25і фирмы Нуово-Пиньоне. Л.М. Замиховский, В.В. Павлык. Молодой ученый. 2014. №15(74).С. 75-79.

85. A complex approach to the development of methods of control and diagnosis of the technical condition of gas pumping units. L. Zamikhovskyi, N. Ivanyuk, O. Mirzoieva, V. Pawlyk. The 10th International scientific and practical conference

"Dynamics of the development of world science" (June 10-12, 2020) Perfect Publishing, ISBN 978-1-4879, Vancouver, Canada. 2020. P. 215-224.

86. Заміховський Л.М. Дослідження статистичних характеристик параметрів ГТК-25і. Л.М. Заміховський, В.В. Павлик. Вимір., контр. та діагност. в техн. системах: III-а Міжнар. наук. конф., Вінниця, 27-29 жовтня 2015 р.С. 145-146.

87. Паклин Н.Б. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям. Н.Б. Паклин, В.И. Орешков. 2-е издание. СПб.: Питер, 2013. 704 с.

88. Бююль А. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление закономерностей. А. Бююль. СПб. и др.: ДиаСофт, 2005. 602 с.

89. Заміховський Л.М. Методика контролю технічного стану газоперекачувального агрегату ГТК-25і в процесі експлуатації. Л.М. Заміховський, О.Л. Заміховська, В.В. Павлик.Науковий вісник ІФНТУНГ. 2020. № 2(49). С. 106-115.

90. A language and environment for statistical computing [Електронний ресурс]. R Core Team (2016). R: R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Режим доступу до ресурсу:URL https://www.R-project.org/.

91. STATISTICA (data analysis software system), version 10 [Електронний ресурс]. StatSoft, Inc. (2011). Режим доступу до ресурсу. www.statsoft.com.

92. Заміховський Л. М. Використання дискримінантного аналізу для вибору діагностичної ознаки технічного стану газоперекачувальних агрегатів ГПА.

Л.М. Заміховський, В.В. Павлик. Summer InfoCom 2017: Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 1-2 червня 2017р. К.: Вид-во ТОВ «Інжиніринг», 2017. С. 32-33.

93. Заміховський Л.М. Дослідження технічного стану ГПА ГТК 25і методами дискримінантного аналізу. Л.М. Заміховський, В.В.Павлик. Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах: IV Міжнародна наукова конференція, Вінниця, 31 жовтня – 02 листопада 2017 р. С.256-259.

94. Грызлова Т.П. Методическое и программное обеспечение обработки нестационарных процессов на основании wavelet-анализа. Т.П. Грызлова, Г.Ш. Пиралишвили, В.Т. Шепель. Вестник двигателестроения, 2006. № 3. С. 138-143.

95. Заміховський Л.М. Контроль вібраційного стану осьового компресора Л.М. Заміховський, В.В. Павлик. Нафтогазова енергетика 2013: Міжнародна науково-технічна конференція, Івано-Франківськ, 07-11 жовтня 2013 р. С.249-250.

96. Теорія і практика обробки сигналів у малохвильовій (wavelet) області А.Й. Наконечний, І.І Лагун., З.Є. Верес [та ін.] під редакцією А.Й. Наконечного: Монографія. Львів: Растр-7, 2020. 470 с.

97. Zamikhovskiy L. Diagnosing the Technical Condition of the Gas Pumping Unit Type GTK-25 on the Basis of Modern Information Technologies [Електронний ресурс] / L. Zamikhovskiy, V. Pavlik. OPEN CONFERENCE SYSTEMS, INNOVATIVE IDEAS IN SCIENCE 2017. 2018. Режим доступу до ресурсу:

http://conf.cunbm.utcluj.ro/index.php/iis/iis2018/author/submission/262.

98. Заміховський Л.М. Використання вейвлет-перетворення для визначення технічного стану газоперекачувальних агрегатів. Л.М. Заміховський, Н.І. Іванюк, В.В. Павлик. Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйн. контролю і техн. діагност. машинобуд. і нафтогазопром. обладн.: VIII Міжнар. наук.-техн. конф., Івано-Франківськ, 14-16 листопада 2017р. С.132-133.

99. Reseach of the characteristics of acoustic processes using wavelet transformation for detecting a diagnostic sign of the technical state of gas pumping units. Zamikhovskiy L.,Zamikhovska O.,Pavlyk V. TECHNOLOGY AUDIT AND PRODUCTION RESERVES, 2021. № 1/2(57).P. 6-12. DOI: 10.15587/2706-5448.2021.224432.

100. Применение симлетов для шумоподавления и прогнозирования нагрузки. [Електронний ресурс]. Proceedings of the IEEE Signal Processing Workshop on High-Order Statistics. SPW-HOS '99. Режим доступу до ресурсу: http://ieeexplore.ieee.org/document/778717/

101. Bultheel Adhemar. Wavelets with applications in signal and image processing [Електронний ресурс].Adhemar Bultheel, Daan Huybrechs. August. 2014.

Режим доступу до ресурсу: https://people.cs.kuleuven.be/~daan.huybrechs/teaching/wavelets2014.pdf

102. M. Abadi, P. Barham, J. Chen, Z. Chen, A. Davis, J. Dean, M. Devin, S. Ghemawat, G. Irving, M. Isard et al., Tensorflow: a system for large-scale machine learning. In OSDI, vol. 16, 2016, P. 265-283.

103. Chollet, Francois. Keras. [Online]. Available: https://keras.io

104. M. Kozlenko, V. Vialkova. Software Defined Demodulation of Multiple Frequency Shift Keying with Dense Neural Network for Weak Signal Communications. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2020. doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235501. P. 590-595.

105. M. Kozlenko, I. Lazarovych, V. Tkachuk. V. Vialkova. Software Demodulation of Weak Radio Signals using Convolutional Neural Network. 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2020. doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160035. P. 339-342

106. Estimation of the readiness indicator of the diagnostic system of gas-pumping units. L. Zamikhovskyi, S. Zikratyi, N. Ivanyuk, V. Pawlyk. Science and education: problems, prospects and innovations. Abstracts of the 3rd International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Kyoto, Japan. 2020. P. 134-139.

ДОДАТКИ

Додаток А

Технічна характеристика газової турбіни типу MS 5002, модель - MS 5352R фірми „NUOVO PIGNONE”, Італія.

Номінальна потужність – 26 100 кВт.
Витрата паливного газу – 9 000 нм3/год.
Вага турбіни (без вихлопного короба і вихлопної шахти)– 127 400 кг.
Кількість ступеней газової турбіни– 2.
Номінальна швидкість турбіни високого тиску – 5 100 об/хв.
Номінальна швидкість турбіни низького тиску – 4 670 об/хв.
Кількість камер згорання – 12.
Пускова система – газовий турбодетандер.

Технічна характеристика нагнітача типу PCL 804-2/36 фірми „NUOVO PIGNONE”, Італія.

Номінальний тиск газу на вході – 50,7 кг/см².
Номінальна температура газу на вході – 15 ^{0}С.
Номінальний тиск газу на вході – 75 кг/см².
Номінальна температура газу на виході – 49 ^{0}С.
Коефіцієнт стиснення – 0,9.
Адіабатичний ККД – 83,2.
Потужність на муфті – 23 940 кВт.
Продуктивність – 46,85 н. млн. м3/добу.
Масовий витрата – 368 кг/с.

продовження додатку А

Технічна характеристика осьового компресора газової турбіни типу MS 5002, модель - MS 5352R фірми „NUOVO PIGNONE”, Італія.

Витрата повітря через осьовий компресор - 438 000 кг/год.

Повітряний осьовий компресор - корпус з осьовим потоком і горизонтальним роз’ємом, кількість ступенів – 16.

Номінальна швидкість осьового компресора - 5 100 об/хв.

Тиск повітря на виході осьового компресора – 7 кгс/см².

Лопатки статора ОК

	№ ступені	Кількість лопаток	
Перша половина стаора (верхня кришка)	0	60	
	1	58	
	2	64	
	3	56	
	4	80	2
	5	80	2
	6	80	2
	7	82	2
Друга половина стаора (верхня кришка)	8	102	2
	9	102	2
	10	102	2
	11	102	2
	12	102	2
	13	102	2
	14	102	2
	15	102	2
	16	104	
	17	104	
		1608	

Лопатки ротора ОК

№ ступені	Кількість лопаток
0	32
1	32
2	32
3	40
4	44
5	56
6	58
7	60
8	62
9	66
10	66
11	66
12	66
13	60
14	60
15	56
Сума загальна	856
ЛопаткаТВТ	80
Пластини	160

Маса ротора ОК 8100 кг.

Частота обертання ротора ОК 5100 об/хв.

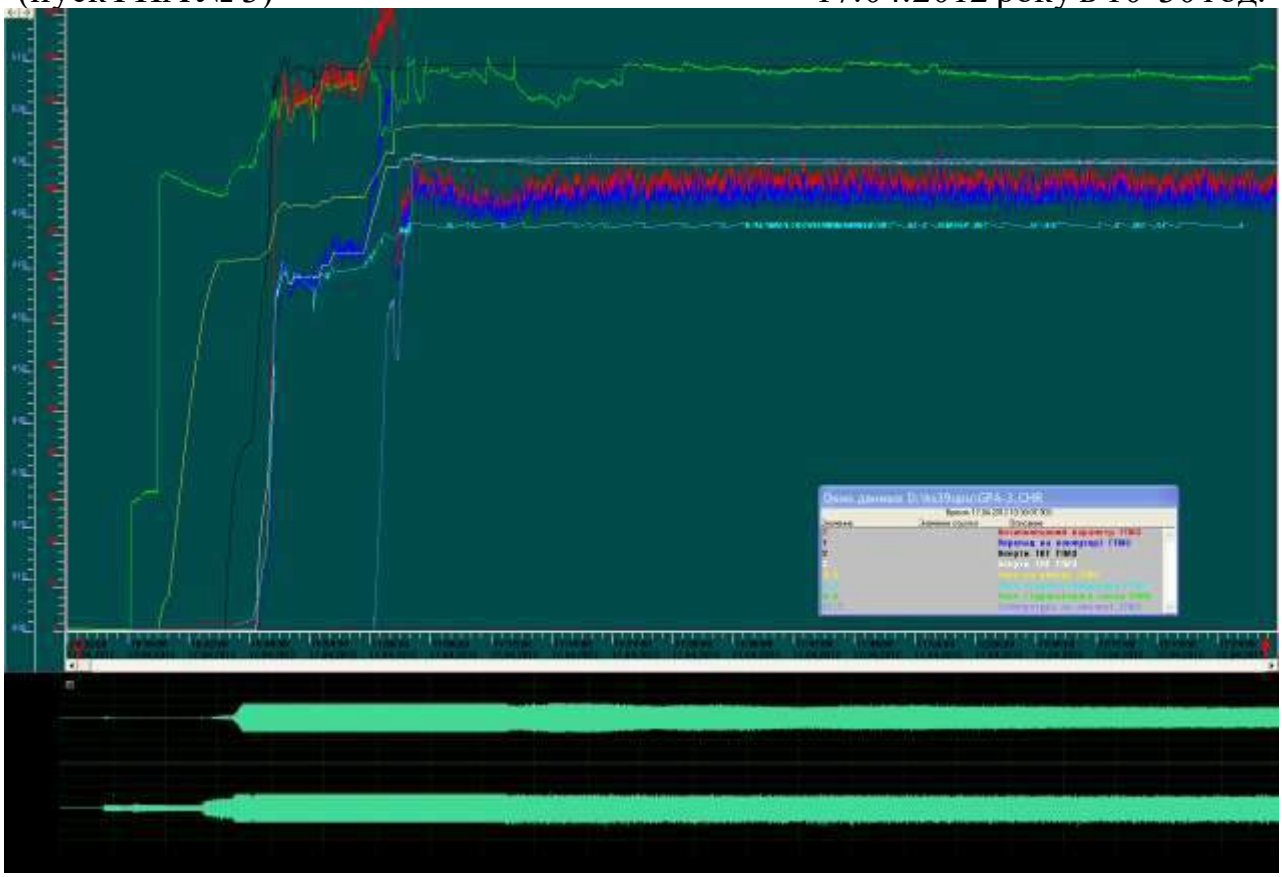
Додаток Б

Вихідна інформація для побудови розгінних характеристик (по ТВТ)

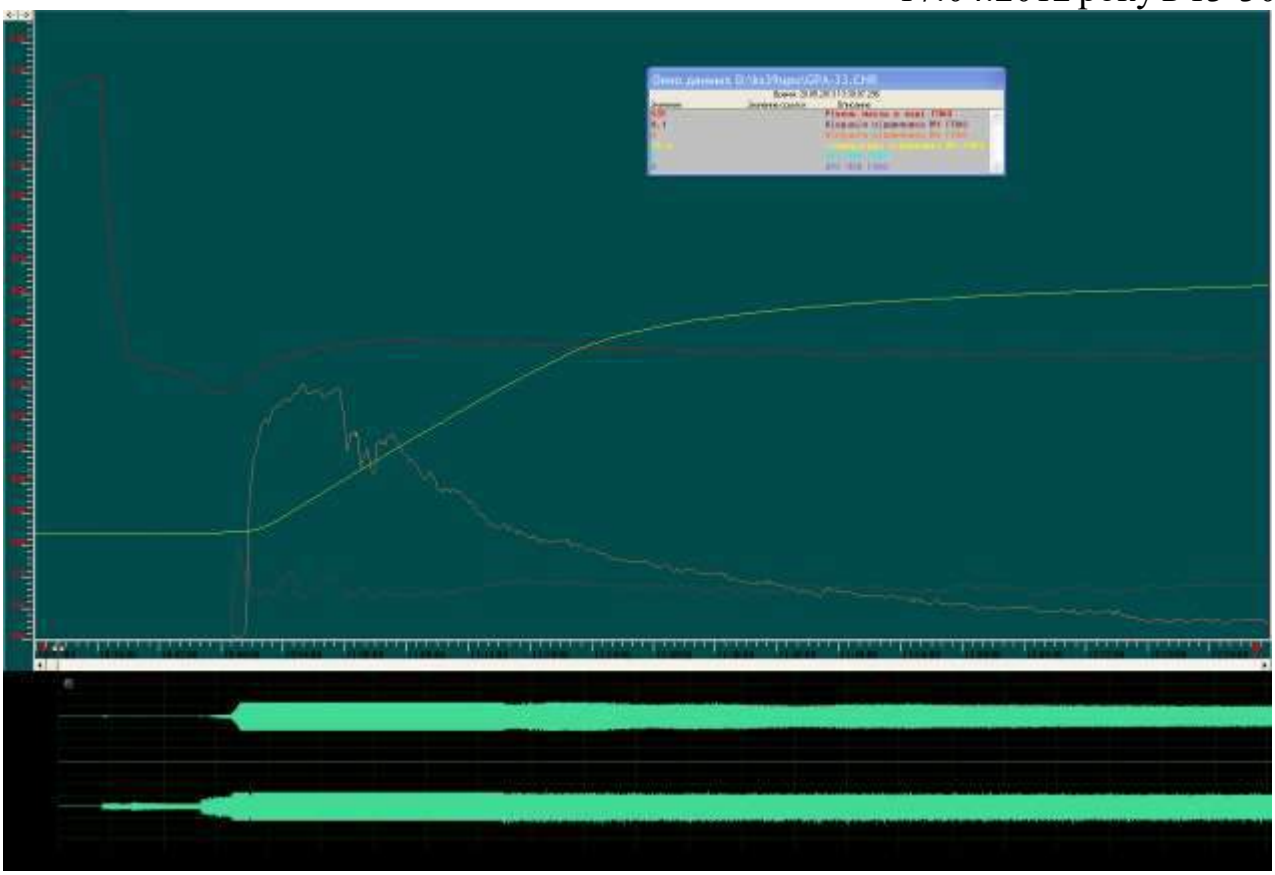
11.03.2019		30.05.2019		20.06.2019		16.07.2019		20.08.2019		17.09.2019		23.09.2019		28.11.2019		27.12.2019	
час, t	n, об/хв	час, t	n, об/хв	час, t	n, об/хв	час, t	n, об/хв	час, t	n, об/хв	час, t	n, об/хв	час, t	n, об/хв	час, t	n, об/хв	час, t	n, об/хв
10:38:21	3	16:16:35	75	11:13:45	25	09:51:55	40	12:55:47	1	11:11:58	25	10:51:37	54	11:13:00	-1	10:31:43	59
10:38:23	2	16:16:37	134	11:13:47	106	09:51:57	93	12:55:49	0	11:12:00	80	10:51:39	106	11:13:02	0	10:31:44	118
10:39:33	7	16:16:39	186	11:13:49	170	09:51:59	144	12:56:11	1	11:12:02	132	10:51:41	157	11:13:04	48	10:31:46	170
10:39:35	79	16:16:41	237	11:13:51	237	09:52:01	195	12:56:12	0	11:12:04	183	10:52:08	789	11:13:06	101	10:32:19	904
10:39:37	139	16:17:52	1367	11:14:55	1338	09:52:51	1160	12:57:52	60	11:12:59	1209	10:52:10	828	11:14:08	1252	10:32:21	936
10:39:39	192	16:17:54	1379	11:14:57	1351	09:52:52	1181	12:57:54	110	11:13:01	1228	10:53:00	1397	11:14:10	1269	10:33:01	1363
10:40:06	838	16:17:56	1390	11:14:59	1367	09:52:54	1201	12:57:56	161	11:13:03	1247	10:53:02	1407	11:15:43	1547	10:33:03	1374
10:40:08	873	16:17:58	1401	11:15:06	1417	09:52:56	1223	12:57:58	210	11:14:57	1792	10:54:00	1549	11:15:47	1548	10:34:07	1536
10:40:10	907	16:18:42	1533	11:15:08	1427	09:53:29	1443	12:58:00	259	11:14:59	1842	10:54:02	1551	11:16:57	3086	10:34:10	1538
10:40:12	943	16:18:44	1534	11:15:10	1438	09:53:31	1452	12:58:02	306	11:15:01	1892	10:55:12	1577	11:16:59	3090	10:35:14	2605
10:40:59	1420	16:18:46	1538	11:16:01	1573	09:53:33	1459	12:58:04	353	11:15:03	1945	10:55:14	1578	11:17:20	3381	10:35:16	2651
10:41:01	1430	16:18:48	1539	11:16:03	1576	09:53:35	1465	12:58:54	1221	11:16:00	3322	10:56:15	1580	11:17:22	3430	10:36:10	3663
10:41:03	1440	16:19:59	2405	11:16:05	1578	09:54:18	1550	12:58:56	1239	11:16:02	3352	10:56:23	1581	11:18:46	5058	10:36:11	3726
10:41:05	1449	16:20:01	2453	11:17:01	2371	09:54:20	1552	12:58:58	1259	11:17:56	5060	10:57:03	1581	11:18:48	5070	10:37:56	5185
10:42:08	1569	16:20:03	2507	11:17:03	2420	09:54:22	1554	12:59:00	1276	11:17:58	5059	10:57:20	1582	11:19:42	5140	10:37:58	5187
10:42:10	1570	16:21:04	3691	11:17:05	2468	09:54:24	1555	12:59:02	1292	11:18:00	5058	10:58:33	1582	11:19:44	5145	10:38:30	5129
10:42:12	1569	16:21:06	3757	11:18:04	3474	09:55:00	1977	12:59:03	1309	11:18:02	5063	10:59:41	1583	11:20:01	5123	10:38:33	5130
10:42:14	1571	16:21:08	3828	11:18:06	3534	09:55:02	2026	12:59:05	1323	11:19:37	5107	10:59:58	1622	11:20:03	5118	10:39:23	5121
10:43:42	3198	16:22:10	4887	11:18:08	3592	09:55:04	2076	12:59:07	1337	11:19:39	5108	11:00:00	1667	11:21:12	5093	10:39:25	5125
10:43:44	3218	16:22:12	4898	11:19:18	5096	09:55:06	2125	12:59:57	1530	11:20:09	5102	11:00:02	1715	11:21:14	5092	10:40:12	5128
10:43:45	3240	16:22:14	4908	11:19:20	5086	09:56:07	3298	12:59:59	1532	11:20:13	5099	11:01:03	3102	11:22:24	5094	10:40:14	5129
10:43:47	3265	16:23:09	5147	11:19:22	5093	09:56:09	3340	13:00:01	1535	11:21:12	5056	11:01:05	3117	11:22:28	5092	10:41:54	5125
10:44:36	4894	16:23:13	5143	11:20:01	5088	09:56:11	3389	13:00:03	1538	11:21:14	5057	11:02:05	4659	11:23:41	5092	10:41:56	5127
10:44:38	4741	16:23:15	5137	11:20:03	5085	09:56:12	3438	13:00:05	1540	11:22:00	5090	11:02:07	4716	11:23:43	5094	10:42:30	5128
10:44:40	4697	16:24:01	5097	11:20:07	5074	09:57:00	4773	13:00:07	1544	11:22:05	5088	11:03:11	5066	11:24:30	5094	10:42:32	5126
10:44:42	4706	16:24:09	5098	11:21:02	5078	09:57:02	4845	13:01:24	2671	11:23:03	5056	11:03:13	5065	11:24:34	5095	10:43:31	5128
10:45:52	5059	16:24:13	5096	11:21:04	5077	09:57:04	4904	13:01:26	2719	11:23:05	5057	11:04:26	5059	11:25:27	5098	10:43:35	5129
10:45:54	5058	16:25:26	5100	11:21:06	5054	09:57:06	4928	13:01:28	2767	11:24:00	5059	11:04:30	5060	11:25:29	5096	10:44:52	5123
10:45:56	5057	16:25:27	5101	11:22:19	5060	09:58:11	5066	13:01:30	2822	11:24:02	5058	11:05:22	5062	11:26:37	5095	10:44:54	5126
10:45:58	5060	16:25:31	5100	11:22:21	5071	09:58:13	5064	13:02:08	3345	11:25:14	5057	11:05:26	5061	11:26:39	5096	10:45:51	5129
10:46:21	5053	16:26:27	5099	11:22:23	5081	09:58:15	5061	13:02:10	3390	11:25:18	5060	11:06:58	5079	11:27:55	5144	10:45:53	5125
10:46:23	5054	16:26:29	5100	11:23:15	5080	09:58:16	5060	13:02:12	3442	11:26:00	5057	11:07:00	5076	11:27:57	5142	10:46:52	5124
10:46:25	5053	16:26:31	5101	11:23:19	5079	09:59:15	5053	13:02:14	3502	11:26:04	5055	11:08:02	5074	11:28:58	5117	10:46:54	5127
10:46:27	5052	16:27:16	5096	11:23:23	5078	09:59:17	5055	13:03:00	4855	11:26:58	5058	11:08:04	5071	11:28:57	5124	10:46:55	5129
10:47:00	5045	16:27:18	5097	11:23:54	5131	09:59:19	5057	13:03:02	4929	11:27:00	5057	11:09:09	5094	11:29:06	5122	10:46:59	5127
10:47:03	5046	16:27:22	5099	11:23:56	5121	09:59:21	5056	13:03:04	4982	11:27:04	5058	11:09:15	5091	11:29:12	5120	10:47:40	5130
10:47:05	5045	16:28:18	5098	11:23:58	5113	09:59:23	5057	13:04:00	5069	11:27:44	5071	11:10:53	5079	11:29:19	5121	10:47:45	5131
10:47:09	5044	16:28:20	5097	11:24:00	5107			13:04:04	5068	11:27:46	5065	11:10:59	5080	11:30:25	5097	10:47:57	5127
10:47:54	5153	16:28:22	5099					13:04:06	5066	11:27:48	5063	11:11:56	5111	11:30:27	5096	10:47:59	5128
10:47:56	5167	16:29:47	5161					13:05:35	5033			11:11:58	5109	11:30:31	5097		
10:47:58	5181	16:29:51	5158					13:05:37	5032			11:12:00	5111				
10:48:00	5194	16:29:57	5156					13:05:39	5026								
		16:30:45	5103					13:06:13	5020								
		16:30:47	5104					13:06:19	5022								

Додаток В

Вікно технологічних параметрів, вібраційних та акустичних сигналів (пуск ГПА № 3) 17.04.2012 року в 10-30 год.



17.04.2012 року в 13-30 год.



Пуск ГПА №3 17.04.2012

Продовження додатку В

№ з/п	Час заміру	Антипомпажний параметр (%)	Оберти ТВТ (об/хв)	Оберти ТНТ (об/хв)	Перепад на конфузорі (кг/см²)	Температура на вихлопі (⁰С)	*P* гідравлічного масла (кг/см²)	*P* на виході (кг/см²)	*P* осьового компресора (кг/см²)		Рівень масла в баці (мм)	Вібрація ПШ №1 (мм/с)	Вібрація ПШ №4 (мм/с)	Температура в приміщенні (⁰С)	Температура в повітряному коробі (⁰С)	Температура ПШ №1 (⁰С)	dP1 ПЗК (мм.в.с)	dP2 ПЗК (мм.в.с)	Шум (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)	Вібрація (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)
2	17.04.2012 10:30:00.0	0	2	4	0	17,6	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	21	-24
3	17.04.2012 10:30:00.200	0	2	4	0	17,6	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	-21	-28
4	17.04.2012 10:30:00.400	0	2	4	0	17,6	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	-25	-21
5	17.04.2012 10:30:00.600	0	2	4	0	17,6	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	13	-22
6	17.04.2012 10:30:00.800	0	2	4	0	17,6	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	9	-24
22	17.04.2012 10:30:04.0	0	2	4	0	17,4	0	0	0		0	0	0	0	14,8	16,7	0	0	-3	-18
23	17.04.2012 10:30:04.200	0	2	4	0	17,4	0	0	0		0	0	0	0	14,8	16,7	0	0	18	-16
24	17.04.2012 10:30:04.400	0	2	4	0	17,4	0	0	0		0	0	0	0	14,8	16,7	0	0	25	-12
25	17.04.2012 10:30:04.600	0	2	4	0	17,4	0	0	0		0	0	0	0	14,8	16,7	0	0	-19	-20
127	17.04.2012 10:30:25.0	0	3	4	0	17,4	0,5	0	0		508	0	0	0	14,7	16,6	0	0	-9	-24
128	17.04.2012 10:30:25.200	0	3	4	0	17,4	0,5	0	0		508	0	0	0	14,7	16,6	0	0	-12	-20
129	17.04.2012 10:30:25.400	0	3	4	0	17,4	0,5	0	0		508	0	0	0	14,7	16,6	0	0	-10	-17
130	17.04.2012 10:30:25.600	0	3	4	0	17,4	0,5	0	0		508	0	0	0	14,7	16,6	0	0	-12	-19
131	17.04.2012 10:30:25.800	0	3	4	0	17,4	0,5	0	0		508	0	0	0	14,7	16,6	0	0	-12	-18
1142	17.04.2012 10:33:48.0	0	3	3	0	17,5	0,3	0	0		524	0	0	12,1	14,1	16,8	0	0	24	4
1143	17.04.2012 10:33:48.200	0	3	3	0	17,5	0,3	0	0		524	0	0	12,1	14,1	16,8	0	0	-183	-5
1144	17.04.2012 10:33:48.400	0	3	3	0	17,5	0,3	0	0		524	0	0	12,1	14,1	16,8	0	0	104	1
1145	17.04.2012 10:33:48.600	0	3	3	0	17,5	0,3	0	0		524	0	0	12,1	14,1	16,8	0	0	37	3
1146	17.04.2012 10:33:48.800	0	3	3	0	17,5	0,3	0	0		524	0	0	12,1	14,1	16,8	0	0	-39	2
2002	17.04.2012 10:36:40.0	0	2	4	0	17,4	24,7	0	0		528	0	0	12,1	13,7	16,8	0	0	49	-22
2003	17.04.2012 10:36:40.200	0	2	4	0	17,4	24,7	0	0		528	0	0	12,1	13,7	16,8	0	0	-104	-21
2004	17.04.2012 10:36:40.400	0	2	4	0	17,4	24,7	0	0		528	0	0	12,1	13,7	16,8	0	0	4	-32
2005	17.04.2012 10:36:40.600	0	2	4	0	17,4	24,7	0	0		528	0	0	12,1	13,7	16,8	0	0	-117	-32
2006	17.04.2012 10:36:40.800	0	2	4	0	17,4	24,7	0	0		528	0	0	12,1	13,7	16,8	0	0	-112	-26
3167	17.04.2012 10:40:33.0	1	2	3	0	17,4	87,5	10,9	0		442	0	0	12,1	13,5	16,9	0	0	-719	31
3168	17.04.2012 10:40:33.200	1	2	3	0	17,4	87,5	10,9	0		442	0	0	12,1	13,5	16,9	0	0	-29	25
3169	17.04.2012 10:40:33.400	1	2	3	0	17,4	87,5	10,9	0		442	0	0	12,1	13,5	16,9	0	0	1148	38
3170	17.04.2012 10:40:33.600	1	2	3	0	17,4	87,5	10,9	0		442	0	0	12,1	13,5	16,9	0	0	-815	3
3171	17.04.2012 10:40:33.800	1	2	3	0	17,4	87,5	10,9	0		442	0	0	12,1	13,5	16,9	0	0	225	4
4307	17.04.2012 10:44:21.0	1	3	3	0	17,4	84,5	47,9	0		435	0	0	12,2	13,4	16,8	0	0	-1212	-126
4308	17.04.2012 10:44:21.200	1	3	3	0	17,4	84,5	47,9	0		435	0	0	12,2	13,4	16,8	0	0	-220	-175
4309	17.04.2012 10:44:21.400	1	3	3	0	17,4	84,5	47,9	0		435	0	0	12,2	13,4	16,8	0	0	-114	-20
4310	17.04.2012 10:44:21.600	1	3	3	0	17,4	84,5	47,9	0		435	0	0	12,2	13,4	16,8	0	0	1191	131
4311	17.04.2012 10:44:21.800	1	3	3	0	17,4	84,5	47,9	0		435	0	0	12,2	13,4	16,8	0	0	343	176
5042	17.04.2012 10:46:48.0	1	1464	4	0	16,1	88,8	50,5	0,1		434	0	0	12,2	13,1	16,8	0	0	95	692
5043	17.04.2012 10:46:48.200	1	1464	4	0	16,1	88,8	50,5	0,1		434	0	0	12,2	13,1	16,8	0	0	850	-400
5044	17.04.2012 10:46:48.400	1	1464	4	0	16,1	88,8	50,5	0,1		434	0	0	12,2	13,1	16,8	0	0	628	-741
5045	17.04.2012 10:46:48.600	1	1464	4	0	16,1	88,8	50,5	0,1		434	0	0	12,2	13,1	16,8	0	0	-1225	-1838
5046	17.04.2012 10:46:48.800	1	1464	4	0	16,1	88,8	50,5	0,1		434	0	0	12,2	13,1	16,8	0	0	-69	-737
6112	17.04.2012 10:50:22.0	66	4700	2177	25	340,3	102	53,8	3,9		431	2,1	0,1	12,2	14,7	16,9	0	0	-750	3724
6113	17.04.2012 10:50:22.200	66	4700	2177	25	340,3	102	53,8	3,9		431	2,1	0,1	12,2	14,7	16,9	0	0	166	7770
6114	17.04.2012 10:50:22.400	66	4700	2177	25	340,3	102	53,8	3,9		431	2,1	0,1	12,2	14,7	16,9	0	0	-946	-7328
6115	17.04.2012 10:50:22.600	66	4700	2177	25	340,3	102	53,8	3,9		431	2,1	0,1	12,2	14,7	16,9	0	0	345	4466
6117	17.04.2012 10:50:22.800	66	4700	2177	25	340,3	102	53,8	3,9		431	2,1	0,1	12,2	14,7	16,9	0	0	1185	-2076

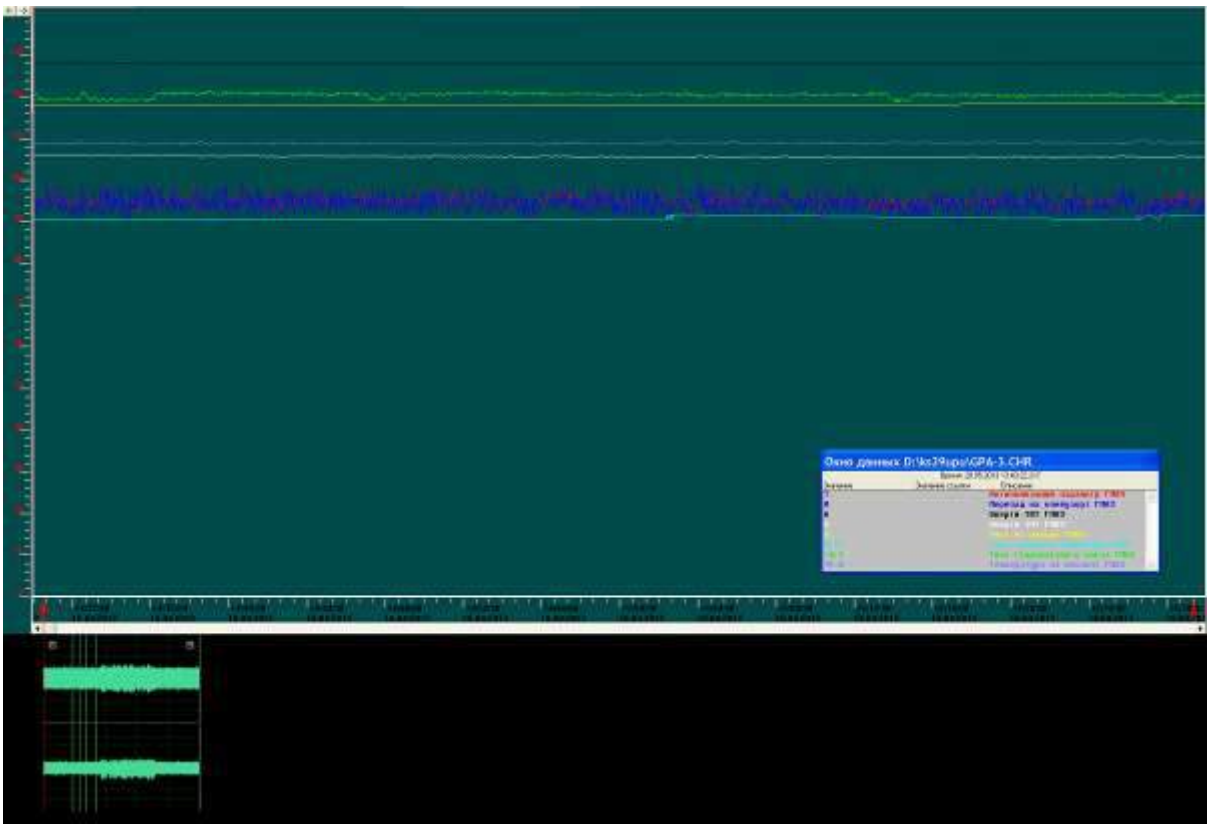
Продовження додатку В

№ з/п	Час заміру	Антипомпажний параметр (%)	Оберти ТВТ (об/хв)	Оберти ТНТ (об/хв)	Перепад на конфузорі (кг/см²)	Температура на вихлопі (⁰С)	*P* гідравлічного масла (кг/см²)	*P* на виході (кг/см²)	*P* осьового компресора (кг/см²)		Рівень масла в баці (мм)	Вібрація ПШ №1 (мм/с)	Вібрація ПШ №4 (мм/с)	Температура в приміщенні (⁰С)	Температура в повітряному коробі (⁰С)	Температура ПШ №1 (⁰С)	dP1 ПЗК (мм.в.с)	dP2 ПЗК (мм.в.с)	Шум (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)	Вібрація (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)
8082	17.04.2012 10:56:56.0	123	5140	3370	60	367,6	105	59,3	6,4		441	1,1	5,9	12,3	17,6	22,1	0	0	-379	1094
8083	17.04.2012 10:56:56.200	123	5140	3370	60	367,6	105	59,3	6,4		441	1,1	5,9	12,3	17,6	22,1	0	0	290	594
8084	17.04.2012 10:56:56.400	123	5140	3370	60	367,6	105	59,3	6,4		441	1,1	5,9	12,3	17,6	22,1	0	0	-358	-1956
8085	17.04.2012 10:56:56.600	123	5140	3370	60	367,6	105	59,3	6,4		441	1,1	5,9	12,3	17,6	22,1	0	0	-61	6394
8086	17.04.2012 10:56:56.800	123	5140	3370	60	367,6	105	59,3	6,4		441	1,1	5,9	12,3	17,6	22,1	0	0	586	-7009
10921	17.04.2012 11:06:24.0	99	5175	4211	68	490,9	107,6	68,9	7,3		444	1	4,2	13,5	18,7	31,5	0	0	494	8224
10922	17.04.2012 11:06:24.200	99	5175	4211	68	490,9	107,6	68,9	7,3		444	1	4,2	13,5	18,7	31,5	0	0	-57	-455
10923	17.04.2012 11:06:24.400	99	5175	4211	68	490,9	107,6	68,9	7,3		444	1	4,2	13,5	18,7	31,5	0	0	-146	-2220
10924	17.04.2012 11:06:24.600	99	5175	4211	68	490,9	107,6	68,9	7,3		444	1	4,2	13,5	18,7	31,5	0	0	67	-9624
10925	17.04.2012 11:06:24.800	99	5175	4211	68	490,9	107,6	68,9	7,3		444	1	4,2	13,5	18,7	31,5	0	0	-231	2936
13086	17.04.2012 11:13:37.0	96	5172	4183	66	490,9	106,6	69	7,2		444	1,2	3	14,8	18,5	38,4	0	0	1235	-3752
13087	17.04.2012 11:13:37.200	96	5172	4183	66	490,9	106,6	69	7,2		444	1,2	3	14,8	18,5	38,4	0	0	-182	866
13088	17.04.2012 11:13:37.400	96	5172	4183	66	490,9	106,6	69	7,2		444	1,2	3	14,8	18,5	38,4	0	0	-1	131
13089	17.04.2012 11:13:37.600	96	5172	4183	66	490,9	106,6	69	7,2		444	1,2	3	14,8	18,5	38,4	0	0	98	-2206
13090	17.04.2012 11:13:37.800	96	5172	4183	66	490,9	106,6	69	7,2		444	1,2	3	14,8	18,5	38,4	0	0	-304	5440
14801	17.04.2012 11:19:20.0	100	5169	4172	68	490,9	102,5	68,8	7,2		443	1,3	2,4	15,8	17,1	43,1	0	0	-111	-4733
14802	17.04.2012 11:19:20.200	100	5169	4172	68	490,9	102,5	68,8	7,2		443	1,3	2,4	15,8	17,1	43,1	0	0	-141	-554
14803	17.04.2012 11:19:20.400	100	5169	4172	68	490,9	102,5	68,8	7,2		443	1,3	2,4	15,8	17,1	43,1	0	0	36	2552
14804	17.04.2012 11:19:20.600	100	5169	4172	68	490,9	102,5	68,8	7,2		443	1,3	2,4	15,8	17,1	43,1	0	0	158	-2537
14805	17.04.2012 11:19:20.800	100	5169	4172	68	490,9	102,5	68,8	7,2		443	1,3	2,4	15,8	17,1	43,1	0	0	-302	3095
20046	17.04.2012 11:36:49.0	100	5166	4159	68	491	108	68,8	7,2		442	1,2	1,6	18,3	17,4	51,3	0	0	508	2010
20047	17.04.2012 11:36:49.200	100	5166	4159	68	491	108	68,8	7,2		442	1,2	1,6	18,3	17,4	51,3	0	0	756	244
20048	17.04.2012 11:36:49.400	100	5166	4159	68	491	108	68,8	7,2		442	1,2	1,6	18,3	17,4	51,3	0	0	-326	986
20049	17.04.2012 11:36:49.600	100	5166	4159	68	491	108	68,8	7,2		442	1,2	1,6	18,3	17,4	51,3	0	0	346	724
20050	17.04.2012 11:36:49.800	100	5166	4159	68	491	108	68,8	7,2		442	1,2	1,6	18,3	17,4	51,3	0	0	240	-1436
20746	17.04.2012 11:39:09.0	105	5164	4162	71	490,8	107,7	68,8	7,2		442	1,3	1,4	18,6	17,4	51,5	0	0	219	1679
20747	17.04.2012 11:39:09.200	105	5164	4162	71	490,8	107,7	68,8	7,2		442	1,3	1,4	18,6	17,4	51,5	0	0	-270	-1611
20748	17.04.2012 11:39:09.400	105	5164	4162	71	490,8	107,7	68,8	7,2		442	1,3	1,4	18,6	17,4	51,5	0	0	-518	-1310
20749	17.04.2012 11:39:09.600	105	5164	4162	71	490,8	107,7	68,8	7,2		442	1,3	1,4	18,6	17,4	51,5	0	0	197	2715
20750	17.04.2012 11:39:09.800	105	5164	4162	71	490,8	107,7	68,8	7,2		442	1,3	1,4	18,6	17,4	51,5	0	0	310	574
24141	17.04.2012 11:50:28.0	107	5163	4165	73	490,5	109	68,9	7,3		441	1,2	1,1	20,2	17,7	53,4	0	0	4	-279
24142	17.04.2012 11:50:28.200	107	5163	4165	73	490,5	109	68,9	7,3		441	1,2	1,1	20,2	17,7	53,4	0	0	766	3571
24143	17.04.2012 11:50:28.400	107	5163	4165	73	490,5	109	68,9	7,3		441	1,2	1,1	20,2	17,7	53,4	0	0	-688	-1172
24144	17.04.2012 11:50:28.600	107	5163	4165	73	490,5	109	68,9	7,3		441	1,2	1,1	20,2	17,7	53,4	0	0	53	1768
24145	17.04.2012 11:50:28.800	107	5163	4165	73	490,5	109	68,9	7,3		441	1,2	1,1	20,2	17,7	53,4	0	0	2	-343
29700	17.04.2012 12:09:00.0	104	5163	4165	71	490,6	106,4	68,9	7,3		440	1	0,7	22,4	18,2	55,1	0	0	-347	4143
29701	17.04.2012 12:09:00.200	104	5163	4165	71	490,6	106,4	68,9	7,3		440	1	0,7	22,4	18,2	55,1	0	0	226	-1051
29702	17.04.2012 12:09:00.400	104	5163	4165	71	490,6	106,4	68,9	7,3		440	1	0,7	22,4	18,2	55,1	0	0	-110	-169
29703	17.04.2012 12:09:00.600	104	5163	4165	71	490,6	106,4	68,9	7,3		440	1	0,7	22,4	18,2	55,1	0	0	-85	-1209
29704	17.04.2012 12:09:00.800	104	5163	4165	71	490,6	106,4	68,9	7,3		440	1	0,7	22,4	18,2	55,1	0	0	-511	1748
29995	17.04.2012 12:09:59.0	99	5164	4161	67	490,8	106,8	68,9	7,3		441	1	0,6	22,5	18,2	55,2	0	0	521	-516
29996	17.04.2012 12:09:59.200	99	5164	4161	67	490,8	106,8	68,9	7,3		441	1	0,6	22,5	18,2	55,2	0	0	181	2009
29997	17.04.2012 12:09:59.400	99	5164	4161	67	490,8	106,8	68,9	7,3		441	1	0,6	22,5	18,2	55,2	0	0	11	-837
29998	17.04.2012 12:09:59.600	99	5164	4161	67	490,8	106,8	68,9	7,3		441	1	0,6	22,5	18,2	55,2	0	0	-112	581
29999	17.04.2012 12:09:59.800	99	5164	4161	67	490,8	106,8	68,9	7,3		441	1	0,6	22,5	18,2	55,2	0	0	521	2506

Продовження додатку В

№ з/п	Час заміру	Антипомпажний параметр (%)	Оберти ТВТ (об/хв)	Оберти ТНТ (об/хв)	Перепад на конфузорі (кг/см²)	Температура на вихлопі (°С)	*P* гідравлічного масла (кг/см²)	*P* на виході (кг/см²)	*P* осьового компресора (кг/см²)		Рівень масла в баці (мм)	Вібрація ПШ №1 (мм/с)	Вібрація ПШ №4 (мм/с)	Температура в приміщенні (°С)	Температура в повітряному коробі (°С)	Температура ПШ №1 (°С)	dP1 ПЗК (мм.в.с)	dP2 ПЗК (мм.в.с)	Шум (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)	Вібрація (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)
30430	17.04.2012 12:11:26.0	108	5165	4170	74	490,7	107	68,9	7,3		440	1,2	0,6	22,7	18	55,2	0	0	-688	284
30431	17.04.2012 12:11:26.200	108	5165	4170	74	490,7	107	68,9	7,3		440	1,2	0,6	22,7	18	55,2	0	0	445	1457
30432	17.04.2012 12:11:26.400	108	5165	4170	74	490,7	107	68,9	7,3		440	1,2	0,6	22,7	18	55,2	0	0	321	3977
30433	17.04.2012 12:11:26.600	108	5165	4170	74	490,7	107	68,9	7,3		440	1,2	0,6	22,7	18	55,2	0	0	590	-374
30434	17.04.2012 12:11:26.800	108	5165	4170	74	490,7	107	68,9	7,3		440	1,2	0,6	22,7	18	55,2	0	0	103	417
31600	17.04.2012 12:15:20.0	99	5165	4163	71	490,8	107,1	68,9	7,3		441	1,1	0,6	23	18	55,3	0	0	430	138
31601	17.04.2012 12:15:20.200	99	5165	4163	71	490,8	107,1	68,9	7,3		441	1,1	0,6	23	18	55,3	0	0	-202	2468
31602	17.04.2012 12:15:20.400	99	5165	4163	71	490,8	107,1	68,9	7,3		441	1,1	0,6	23	18	55,3	0	0	602	710
31603	17.04.2012 12:15:20.600	99	5165	4163	71	490,8	107,1	68,9	7,3		441	1,1	0,6	23	18	55,3	0	0	319	-2250
31604	17.04.2012 12:15:20.800	99	5165	4163	71	490,8	107,1	68,9	7,3		441	1,1	0,6	23	18	55,3	0	0	-380	1706
32265	17.04.2012 12:17:33.0	103	5165	4164	70	490,9	107,4	68,9	7,3		441	1,2	0,6	23,4	18,2	55,4	0	0	23	677
32266	17.04.2012 12:17:33.200	103	5165	4164	70	490,9	107,4	68,9	7,3		441	1,2	0,6	23,4	18,2	55,4	0	0	115	797
32267	17.04.2012 12:17:33.400	103	5165	4164	70	490,9	107,4	68,9	7,3		441	1,2	0,6	23,4	18,2	55,4	0	0	64	140
32268	17.04.2012 12:17:33.600	103	5165	4164	70	490,9	107,4	68,9	7,3		441	1,2	0,6	23,4	18,2	55,4	0	0	-156	-376
32269	17.04.2012 12:17:33.800	103	5165	4164	70	490,9	107,4	68,9	7,3		441	1,2	0,6	23,4	18,2	55,4	0	0	696	382
33410	17.04.2012 12:21:22.0	100	5166	4166	68	490,7	106,5	68,9	7,3		441	1,2	0,5	23,6	18,1	55,7	0	0	165	1246
33411	17.04.2012 12:21:22.200	100	5166	4166	68	490,7	106,5	68,9	7,3		441	1,2	0,5	23,6	18,1	55,7	0	0	162	678
33412	17.04.2012 12:21:22.400	100	5166	4166	68	490,7	106,5	68,9	7,3		441	1,2	0,5	23,6	18,1	55,7	0	0	-73	780
33413	17.04.2012 12:21:22.600	100	5166	4166	68	490,7	106,5	68,9	7,3		441	1,2	0,5	23,6	18,1	55,7	0	0	188	2796
33414	17.04.2012 12:21:22.800	100	5166	4166	68	490,7	106,5	68,9	7,3		441	1,2	0,5	23,6	18,1	55,7	0	0	-11	1153
34670	17.04.2012 12:25:34.0	103	5165	4165	70	490,7	106,5	68,8	7,3		441	1,4	0,5	24	18,2	56	0	0	151	456
34671	17.04.2012 12:25:34.200	103	5165	4165	70	490,7	106,5	68,8	7,3		441	1,4	0,5	24	18,2	56	0	0	275	-4369
34672	17.04.2012 12:25:34.400	103	5165	4165	70	490,7	106,5	68,8	7,3		441	1,4	0,5	24	18,2	56	0	0	-438	580
34673	17.04.2012 12:25:34.600	103	5165	4165	70	490,7	106,5	68,8	7,3		441	1,4	0,5	24	18,2	56	0	0	-45	-512
34674	17.04.2012 12:25:34.800	103	5165	4165	70	490,7	106,5	68,8	7,3		441	1,4	0,5	24	18,2	56	0	0	148	976
35065	17.04.2012 12:26:53.0	98	5166	4167	67	490,7	106,7	68,9	7,3		440	1,3	0,5	24,1	18,3	56	0	0	-186	207
35066	17.04.2012 12:26:53.200	98	5166	4167	67	490,7	106,7	68,9	7,3		440	1,3	0,5	24,1	18,3	56	0	0	-267	843
35067	17.04.2012 12:26:53.400	98	5166	4167	67	490,7	106,7	68,9	7,3		440	1,3	0,5	24,1	18,3	56	0	0	496	2689
35068	17.04.2012 12:26:53.600	98	5166	4167	67	490,7	106,7	68,9	7,3		440	1,3	0,5	24,1	18,3	56	0	0	214	964
35069	17.04.2012 12:26:53.800	98	5166	4167	67	490,7	106,7	68,9	7,3		440	1,3	0,5	24,1	18,3	56	0	0	594	796
35160	17.04.2012 12:27:12.0	103	5165	4169	71	490,5	105,9	68,9	7,3		440	1,3	0,5	24,1	18,3	56,1	0	0	-674	1877
35161	17.04.2012 12:27:12.200	103	5165	4169	71	490,5	105,9	68,9	7,3		440	1,3	0,5	24,1	18,3	56,1	0	0	264	715
35162	17.04.2012 12:27:12.400	103	5165	4169	71	490,5	105,9	68,9	7,3		440	1,3	0,5	24,1	18,3	56,1	0	0	242	310
35163	17.04.2012 12:27:12.600	103	5165	4169	71	490,5	105,9	68,9	7,3		440	1,3	0,5	24,1	18,3	56,1	0	0	245	-3580
35164	17.04.2012 12:27:12.800	103	5165	4169	71	490,5	105,9	68,9	7,3		440	1,3	0,5	24,1	18,3	56,1	0	0	20	1849
35995	17.04.2012 12:29:59.0	101	5166	4166	69	490,7	108,4	68,9	7,3		440	1,3	0,5	24,5	18,3	56,1	0	0	609	-1062
35996	17.04.2012 12:29:59.200	101	5166	4166	69	490,7	108,4	68,9	7,3		440	1,3	0,5	24,5	18,3	56,1	0	0	-171	-399
35997	17.04.2012 12:29:59.400	101	5166	4166	69	490,7	108,4	68,9	7,3		440	1,3	0,5	24,5	18,3	56,1	0	0	-852	1011
35998	17.04.2012 12:29:59.600	101	5166	4166	69	490,7	108,4	68,9	7,3		440	1,3	0,5	24,5	18,3	56,1	0	0	440	-22
35999	17.04.2012 12:29:59.800	101	5166	4166	69	490,7	108,4	68,9	7,3		440	1,3	0,5	24,5	18,3	56,1	0	0	516	-315

Вікно технологічних параметрів, вібраційних та акустичних сигналів (робота ГПА № 3) 18.04.2012 року в 13-43 год.



18.04.2012 року в 13-39 год.

Робота ГПА №3 18.04.2012

Продовження додатку В

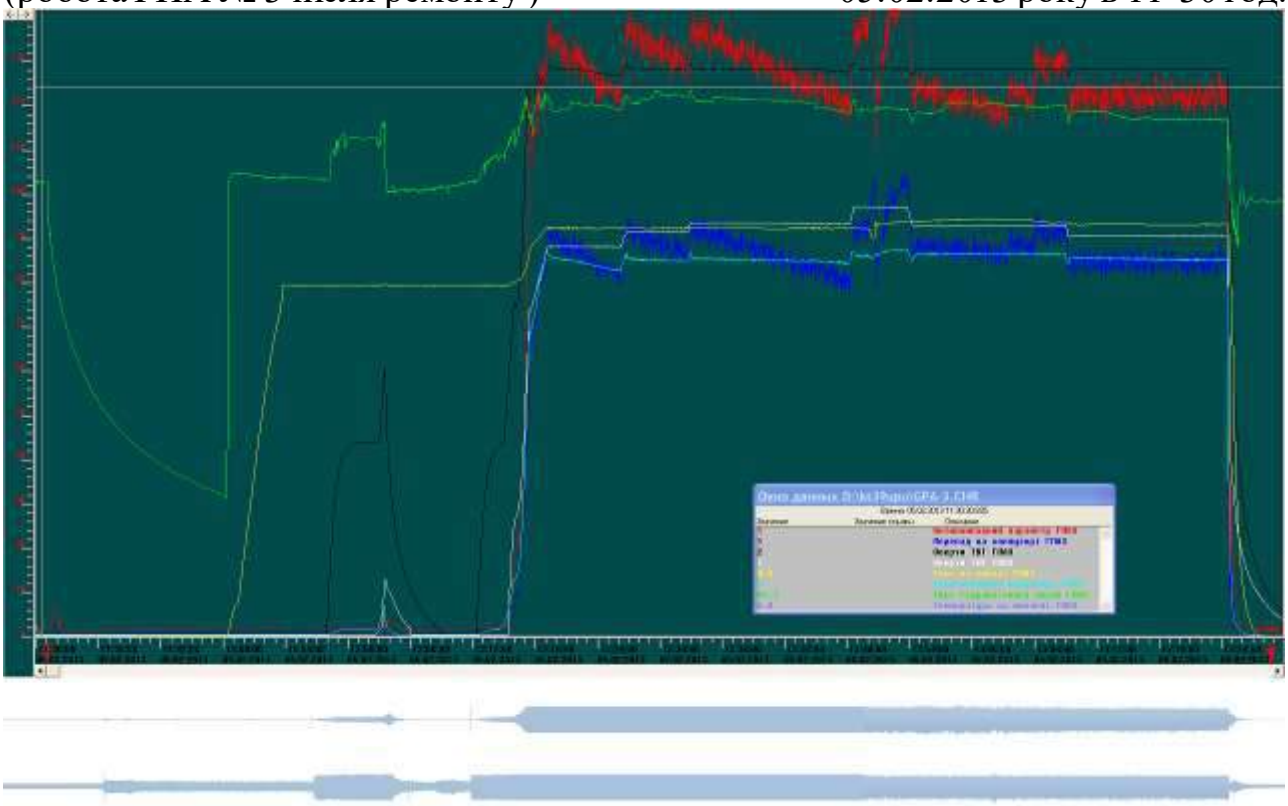
№ з/п	Час заміру	Антипомпажний параметр (%)	Оберти ТВТ (об/хв)	Оберти ТНТ (об/хв)	Перепад на конфузорі (кг/см^2)	Температура на вихлопі (^{0}C)	*P* гідравлічного масла (кг/см^2)	*P* на виході (кг/см^2)	*P* осьового компресора (кг/см^2)	Рівень масла в баці (мм)	Вібрація ПШ №1 (мм/с)	Вібрація ПШ №4 (мм/с)	Температура в приміщенні (^{0}C)	Температура в повітряному коробі (^{0}C)		Температура ПШ №1 (^{0}C)	dP1 ПЗК (мм.в.с)	dP2 ПЗК (мм.в.с)	Шум (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)	Вібрація (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)
2	18.04.2012 14:30:00.0	92	5159	4141	64	492	102,2	70,8	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,2		59,2	0	0	-619	739
3	18.04.2012 14:30:00.200	92	5159	4141	64	492	102,2	70,8	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,2		59,2	0	0	404	-2081
4	18.04.2012 14:30:00.400	92	5159	4141	64	492	102,2	70,8	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,2		59,2	0	0	1403	193
5	18.04.2012 14:30:00.600	92	5159	4141	64	492	102,2	70,8	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,2		59,2	0	0	167	-3504
6	18.04.2012 14:30:00.800	92	5159	4141	64	492	102,2	70,8	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,2		59,2	0	0	-59	-593
102	18.04.2012 14:30:20.0	95	5158	4142	66	492	100,9	70,8	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,2		59,2	0	0	-130	-2172
103	18.04.2012 14:30:20.200	95	5158	4142	66	492	100,9	70,8	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,2		59,2	0	0	-3708	3289
104	18.04.2012 14:30:20.400	95	5158	4142	66	492	100,9	70,8	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,2		59,2	0	0	-67	1745
105	18.04.2012 14:30:20.600	95	5158	4142	66	492	100,9	70,8	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,2		59,2	0	0	102	1968
106	18.04.2012 14:30:20.800	95	5158	4142	66	492	100,9	70,8	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,2		59,2	0	0	-251	1647
227	18.04.2012 14:30:45.0	100	5158	4144	67	492	101	70,8	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,2		59,2	0	0	-68	-870
228	18.04.2012 14:30:45.200	100	5158	4144	67	492	101	70,8	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,2		59,2	0	0	631	-4385
229	18.04.2012 14:30:45.400	100	5158	4144	67	492	101	70,8	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,2		59,2	0	0	-51	-2202
230	18.04.2012 14:30:45.600	100	5158	4144	67	492	101	70,8	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,2		59,2	0	0	1638	2970
231	18.04.2012 14:30:45.800	100	5158	4144	67	492	101	70,8	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,2		59,2	0	0	1561	-109
367	18.04.2012 14:31:13.0	99	5158	4146	69	491,8	101,1	70,9	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,2		59,1	0	0	-1080	3136
368	18.04.2012 14:31:13.200	99	5158	4146	69	491,8	101,1	70,9	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,2		59,1	0	0	-575	-638
369	18.04.2012 14:31:13.400	99	5158	4146	69	491,8	101,1	70,9	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,2		59,1	0	0	1305	50
370	18.04.2012 14:31:13.600	99	5158	4146	69	491,8	101,1	70,9	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,2		59,1	0	0	168	1427
371	18.04.2012 14:31:13.800	99	5158	4146	69	491,8	101,1	70,9	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,2		59,1	0	0	1408	5147
562	18.04.2012 14:31:52.0	94	5160	4142	65	492,1	101,2	70,8	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,1		59,2	0	0	858	118
563	18.04.2012 14:31:52.200	94	5160	4142	65	492,1	101,2	70,8	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,1		59,2	0	0	-495	-385
564	18.04.2012 14:31:52.400	94	5160	4142	65	492,1	101,2	70,8	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,1		59,2	0	0	-324	856
565	18.04.2012 14:31:52.600	94	5160	4142	65	492,1	101,2	70,8	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,1		59,2	0	0	-297	1813
566	18.04.2012 14:31:52.800	94	5160	4142	65	492,1	101,2	70,8	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,1		59,2	0	0	1448	-750
797	18.04.2012 14:32:39.0	97	5157	4142	67	492,2	102,1	70,8	7,1	431	1,9	0,3	29,9	16,1		59,2	0	0	26	-913
798	18.04.2012 14:32:39.200	97	5157	4142	67	492,2	102,1	70,8	7,1	431	1,9	0,3	29,9	16,1		59,2	0	0	-2169	-3306
799	18.04.2012 14:32:39.400	97	5157	4142	67	492,2	102,1	70,8	7,1	431	1,9	0,3	29,9	16,1		59,2	0	0	149	-1352
800	18.04.2012 14:32:39.600	97	5157	4142	67	492,2	102,1	70,8	7,1	431	1,9	0,3	29,9	16,1		59,2	0	0	881	-1800
801	18.04.2012 14:32:39.800	97	5157	4142	67	492,2	102,1	70,8	7,1	431	1,9	0,3	29,9	16,1		59,2	0	0	-1101	990
912	18.04.2012 14:33:02.0	95	5160	4138	66	492,2	101,5	70,9	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,1		59,2	0	0	-364	905
913	18.04.2012 14:33:02.200	95	5160	4138	66	492,2	101,5	70,9	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,1		59,2	0	0	217	-384
914	18.04.2012 14:33:02.400	95	5160	4138	66	492,2	101,5	70,9	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,1		59,2	0	0	790	821
915	18.04.2012 14:33:02.600	95	5160	4138	66	492,2	101,5	70,9	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,1		59,2	0	0	-1960	-2253
916	18.04.2012 14:33:02.800	95	5160	4138	66	492,2	101,5	70,9	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,1		59,2	0	0	1094	-996
1022	18.04.2012 14:33:24.0	98	5157	4143	69	492,2	100,5	70,8	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,1		59,2	0	0	14	-4151
1023	18.04.2012 14:33:24.200	98	5157	4143	69	492,2	100,5	70,8	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,1		59,2	0	0	-1131	4201
1024	18.04.2012 14:33:24.400	98	5157	4143	69	492,2	100,5	70,8	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,1		59,2	0	0	-2123	-782
1025	18.04.2012 14:33:24.600	98	5157	4143	69	492,2	100,5	70,8	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,1		59,2	0	0	294	-1719
1026	18.04.2012 14:33:24.800	98	5157	4143	69	492,2	100,5	70,8	7,1	431	1,8	0,3	29,9	16,1		59,2	0	0	212	1699
1187	18.04.2012 14:33:57.0	93	5157	4140	65	492,3	101,3	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	-1253	196
1188	18.04.2012 14:33:57.200	93	5157	4140	65	492,3	101,3	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	560	3530
1189	18.04.2012 14:33:57.400	93	5157	4140	65	492,3	101,3	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	1193	-682
1190	18.04.2012 14:33:57.600	93	5157	4140	65	492,3	101,3	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	210	2772
1191	18.04.2012 14:33:57.800	93	5157	4140	65	492,3	101,3	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	-866	-327

Продовження додатку В

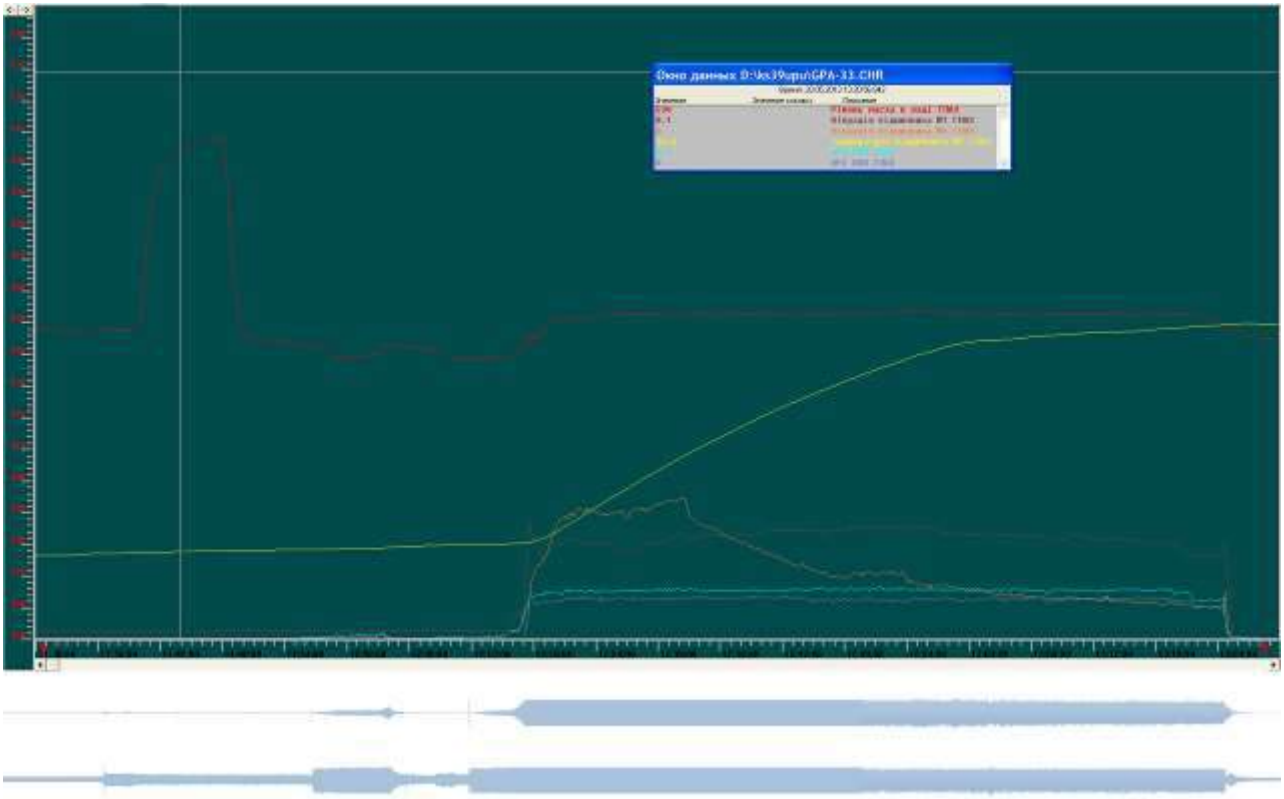
№ з/п	Час заміру	Антипомпажний параметр (%)	Оберти ТВТ (об/хв)	Оберти ТНТ (об/хв)	Перепад на конфузорі (кг/см^2)	Температура на вихлопі (^{0}C)	*P* гідравлічного масла (кг/см^2)	*P* на виході (кг/см^2)	*P* осьового компресора (кг/см^2)	Рівень масла в баці (мм)	Вібрація ПШ №1 (мм/с)	Вібрація ПШ №4 (мм/с)	Температура в приміщенні (^{0}C)	Температура в повітряному коробі (^{0}C)		Температура ПШ №1 (^{0}C)	dP1 ПЗК (мм.в.с)	dP2 ПЗК (мм.в.с)	Шум (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)	Вібрація (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)
1287	18.04.2012 14:34:17.0	96	5157	4141	67	492,3	100,6	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	1177	1350
1288	18.04.2012 14:34:17.200	96	5157	4141	67	492,3	100,6	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	-842	-3028
1289	18.04.2012 14:34:17.400	96	5157	4141	67	492,3	100,6	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	-42	-1700
1290	18.04.2012 14:34:17.600	96	5157	4141	67	492,3	100,6	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	-301	-2386
1291	18.04.2012 14:34:17.800	96	5157	4141	67	492,3	100,6	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	1487	-91
1322	18.04.2012 14:34:24.0	97	5157	4142	68	492,3	101	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	589	946
1323	18.04.2012 14:34:24.200	97	5157	4142	68	492,3	101	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	304	-2162
1324	18.04.2012 14:34:24.400	97	5157	4142	68	492,3	101	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	479	901
1325	18.04.2012 14:34:24.600	97	5157	4142	68	492,3	101	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	-1274	1422
1326	18.04.2012 14:34:24.800	97	5157	4142	68	492,3	101	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	-745	2015
1412	18.04.2012 14:34:42.0	94	5158	4140	65	492,3	101,3	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	9	-2587
1413	18.04.2012 14:34:42.200	94	5158	4140	65	492,3	101,3	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	-1208	-1798
1414	18.04.2012 14:34:42.400	94	5158	4140	65	492,3	101,3	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	-1610	2360
1415	18.04.2012 14:34:42.600	94	5158	4140	65	492,3	101,3	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	-2204	2002
1416	18.04.2012 14:34:42.800	94	5158	4140	65	492,3	101,3	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	-146	-827
1477	18.04.2012 14:34:55.0	91	5160	4138	63	492,2	100,7	70,9	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	-717	989
1478	18.04.2012 14:34:55.200	91	5160	4138	63	492,2	100,7	70,9	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	-1431	413
1479	18.04.2012 14:34:55.400	91	5160	4138	63	492,2	100,7	70,9	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	1286	-50
1480	18.04.2012 14:34:55.600	91	5160	4138	63	492,2	100,7	70,9	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	658	-1436
1481	18.04.2012 14:34:55.800	91	5160	4138	63	492,2	100,7	70,9	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	925	1951
1502	18.04.2012 14:35:00.0	94	5157	4141	65	492,2	100,7	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	-65	765
1503	18.04.2012 14:35:00.200	94	5157	4141	65	492,2	100,7	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	-815	2181
1504	18.04.2012 14:35:00.400	94	5157	4141	65	492,2	100,7	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	306	-2675
1505	18.04.2012 14:35:00.600	94	5157	4141	65	492,2	100,7	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	105	-109
1506	18.04.2012 14:35:00.800	94	5157	4141	65	492,2	100,7	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	-162	-927
1507	18.04.2012 14:35:01.0	95	5156	4141	66	492,2	101	70,8	7,1	431	1,8	0,2	29,9	16,1		59,2	0	0	497	4361

продовження додатку В

Вікно технологічних параметрів, вібраційних та акустичних сигналів (робота ГПА № 3 після ремонту) 05.02.2013 року в 11-30 год.



05.02.2013 року в 13-20 год.



Пуск ГПА №3 05.02.2013 після ремонту

Продовження додатку В

№ з/п	Час заміру	Антипомпажний параметр (%)	Оберти ТВТ (об/хв)	Оберти ТНТ (об/хв)	Перепад на конфузорі (кг/см^2)	Температура на вихлопі (^{0}C)	*P* гідравлічного масла (кг/см^2)	*P* на виході (кг/см^2)	*P* осьового компресора (кг/см^2)	Рівень масла в баці (мм)	Вібрація ПШ №1 (мм/с)	Вібрація ПШ №4 (мм/с)	Температура в приміщенні (^{0}C)	Температура в повітряному коробі (^{0}C)	Температура ПШ №1 (^{0}C)	dP1 ПЗК (мм.в.с)	dP2 ПЗК (мм.в.с)	Шум (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)	Вібрація (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)
2	05.02.2013 11:30:00.0	0	0	0	0	0	87,2	1,3	0	448	0	0	10,1	21,1	0	0	0	300	-3
3	05.02.2013 11:30:00.200	2	0	0	0	0	87,2	1,3	0	448	0	0	10,1	21,1	0	0	0	-14	3
4	05.02.2013 11:30:00.400	2	0	0	0	0	87,2	1,3	0	448	0	0	10,1	21,1	0	0	0	-54	5
5	05.02.2013 11:30:00.600	2	0	0	0	0	87,2	1,3	0	448	0	0	10,1	21,1	0	0	0	391	-1
6	05.02.2013 11:30:00.800	2	0	0	0	0	87,2	1,3	0	448	0	0	10,1	21,1	0	0	0	-96	2
522	05.02.2013 11:31:44.0	6	3	7	1	6,8	70,6	0	0	447	0	0	10,1	21,2	0	0	0	-144	-3
523	05.02.2013 11:31:44.200	6	3	7	1	6,8	70,6	0	0	447	0	0	10,1	21,2	0	0	0	9	-4
524	05.02.2013 11:31:44.400	6	3	7	1	6,8	70,6	0	0	447	0	0	10,1	21,2	0	0	0	146	-6
525	05.02.2013 11:31:44.600	6	3	7	1	6,8	70,6	0	0	447	0	0	10,1	21,2	0	0	0	-289	-1
526	05.02.2013 11:31:44.800	6	3	7	1	6,8	70,6	0	0	447	0	0	10,1	21,2	0	0	0	167	-6
1197	05.02.2013 11:33:59.0	1	3	7	0	6,9	53,2	0	0	448	0	0	10,1	21,2	13,2	0	0	78	-1
1198	05.02.2013 11:33:59.200	1	3	7	0	6,9	53,2	0	0	448	0	0	10,1	21,2	13,2	0	0	-12	-1
1199	05.02.2013 11:33:59.400	1	3	7	0	6,9	53,2	0	0	448	0	0	10,1	21,2	13,2	0	0	-78	-4
1200	05.02.2013 11:33:59.600	1	3	7	0	6,9	53,2	0	0	448	0	0	10,1	21,2	13,2	0	0	-136	-3
1201	05.02.2013 11:33:59.800	1	3	7	0	6,9	53,2	0	0	448	0	0	10,1	21,2	13,2	0	0	-193	-2
1997	05.02.2013 11:36:39.0	1	2	8	0	6,9	43,1	0	0	448	0	0	10,1	21,2	13,2	0	0	-37	-10
1998	05.02.2013 11:36:39.200	1	2	8	0	6,9	43,1	0	0	448	0	0	10,1	21,2	13,2	0	0	168	2
1999	05.02.2013 11:36:39.400	1	2	8	0	6,9	43,1	0	0	448	0	0	10,1	21,2	13,2	0	0	2	-1
2000	05.02.2013 11:36:39.600	1	2	8	0	6,9	43,1	0	0	448	0	0	10,1	21,2	13,2	0	0	-51	-8
2001	05.02.2013 11:36:39.800	1	2	8	0	6,9	43,1	0	0	448	0	0	10,1	21,2	13,2	0	0	-52	-12
3077	05.02.2013 11:40:15.0	1	2	7	0	7	35,5	0	0	448	0	0	10,5	21	13,2	0	0	69	0
3078	05.02.2013 11:40:15.200	1	2	7	0	7	35,5	0	0	448	0	0	10,5	21	13,2	0	0	-20	0
3079	05.02.2013 11:40:15.400	1	2	7	0	7	35,5	0	0	448	0	0	10,5	21	13,2	0	0	51	-2
3080	05.02.2013 11:40:15.600	1	2	7	0	7	35,5	0	0	448	0	0	10,5	21	13,2	0	0	57	-1
3081	05.02.2013 11:40:15.800	1	2	7	0	7	35,5	0	0	448	0	0	10,5	21	13,2	0	0	-103	-5
4442	05.02.2013 11:44:48.0	1	3	7	0	7	29,8	0	0	505	0	0	10,6	21	13,7	0	0	-159	-8
4443	05.02.2013 11:44:48.200	1	3	7	0	7	29,8	0	0	505	0	0	10,6	21	13,7	0	0	-75	-8
4444	05.02.2013 11:44:48.400	1	3	7	0	7	29,8	0	0	505	0	0	10,6	21	13,7	0	0	-177	-9
4445	05.02.2013 11:44:48.600	1	3	7	0	7	29,8	0	0	505	0	0	10,6	21	13,7	0	0	-63	-7
4446	05.02.2013 11:44:48.800	1	3	7	0	7	29,8	0	0	505	0	0	10,6	21	13,7	0	0	-67	-9
5967	05.02.2013 11:49:53.0	2	2	7	0	7	88,5	8,9	0	449	0	0	10,7	21,1	14	0	0,1	-15	-2
5968	05.02.2013 11:49:53.200	2	2	7	0	7	88,5	8,9	0	449	0	0	10,7	21,1	14	0	0,1	-50	-2
5969	05.02.2013 11:49:53.400	2	2	7	0	7	88,5	8,9	0	449	0	0	10,7	21,1	14	0	0,1	-16	0
5970	05.02.2013 11:49:53.600	2	2	7	0	7	88,5	8,9	0	449	0	0	10,7	21,1	14	0	0,1	32	0
5971	05.02.2013 11:49:53.800	2	2	7	0	7	88,5	8,9	0	449	0	0	10,7	21,1	14	0	0,1	-11	0
6797	05.02.2013 11:52:39.0	2	3	8	0	7	87,9	38,1	0	449	0	0	10,7	21,1	14	0	0	354	-26
6798	05.02.2013 11:52:39.200	2	3	8	0	7	87,9	38,1	0	449	0	0	10,7	21,1	14	0	0	-507	-16
6799	05.02.2013 11:52:39.400	2	3	8	0	7	87,9	38,1	0	449	0	0	10,7	21,1	14	0	0	385	-10
6800	05.02.2013 11:52:39.600	2	3	8	0	7	87,9	38,1	0	449	0	0	10,7	21,1	14	0	0	-34	8
6801	05.02.2013 11:52:39.800	2	3	8	0	7	87,9	38,1	0	449	0	0	10,7	21,1	14	0	0	109	5
7762	05.02.2013 11:55:52.0	1	3	7	0	7,1	87,7	47,5	0	449	0	0	10,7	21,2	14	0	0	149	-19
7763	05.02.2013 11:55:52.200	1	3	7	0	7,1	87,7	47,5	0	449	0	0	10,7	21,2	14	0	0	-385	-22
7764	05.02.2013 11:55:52.400	1	3	7	0	7,1	87,7	47,5	0	449	0	0	10,7	21,2	14	0	0	277	-10
7765	05.02.2013 11:55:52.600	1	3	7	0	7,1	87,7	47,5	0	449	0	0	10,7	21,2	14	0	0	-348	-12
7766	05.02.2013 11:55:52.800	1	3	7	0	7,1	87,7	47,5	0	449	0	0	10,7	21,2	14	0	0	-331	-8

Продовження додатку В

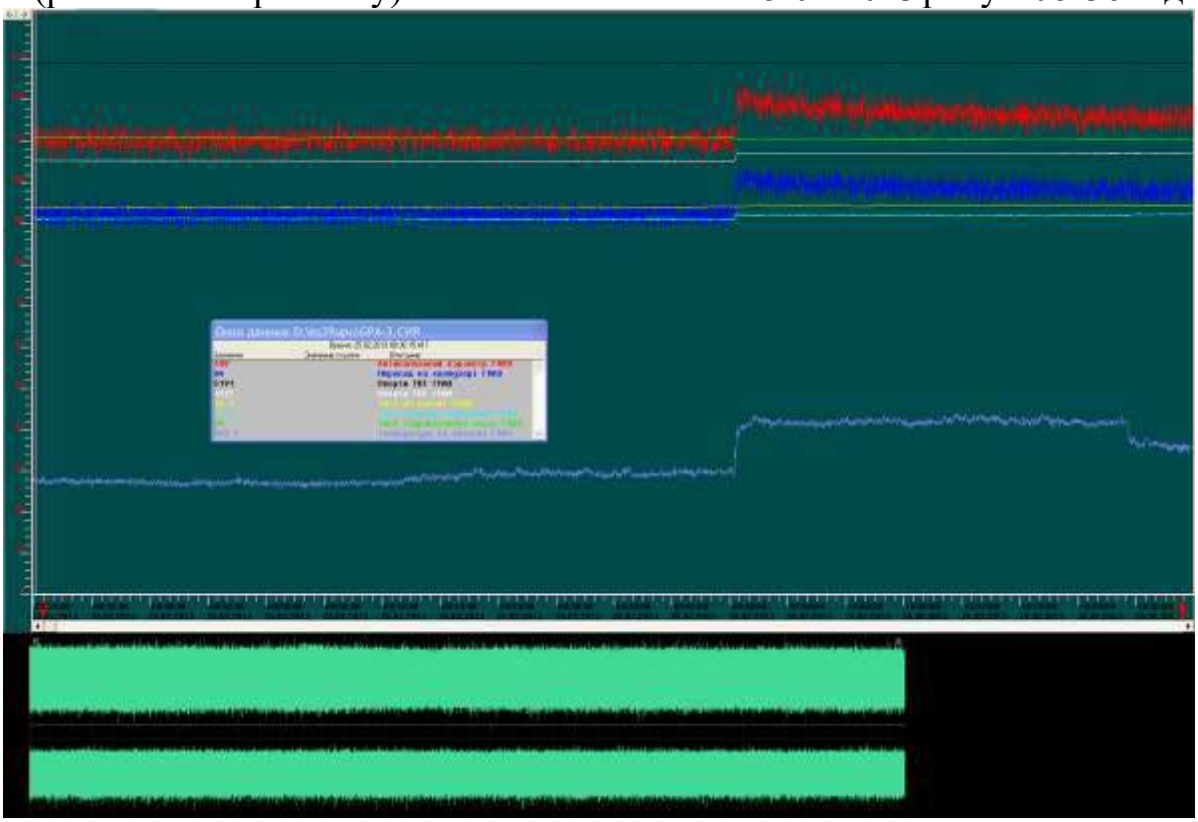
№ з/п	Час заміру	Антипомпажний параметр (%)	Оберти ТВТ (об/хв)	Оберти ТНТ (об/хв)	Перепад на конфузорі (кг/см²)	Температура на вихлопі (⁰С)	*P* гідравлічного масла (кг/см²)	*P* на виході (кг/см²)	*P* осьового компресора (кг/см²)	Рівень масла в баці (мм)	Вібрація ПШ №1 (мм/с)	Вібрація ПШ №4 (мм/с)	Температура в приміщенні (⁰С)	Температура в повітряному коробі (⁰С)	Температура ПШ №1 (⁰С)	dP1 ПЗК (мм.в.с)	dP2 ПЗК (мм.в.с)	Шум (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)	Вібрація (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)
8507	05.02.2013 11:58:21.0	1	677	7	0	6,5	91,5	47,5	0,02	449	0	0	10,7	21,2	14,1	0,1	0,1	535	24
8508	05.02.2013 11:58:21.200	1	677	7	0	6,5	91,5	47,5	0,02	449	0	0	10,7	21,2	14,1	0,1	0,1	-48	22
8509	05.02.2013 11:58:21.400	1	677	7	0	6,5	91,5	47,5	0,02	449	0	0	10,7	21,2	14,1	0,1	0,1	-26	21
8510	05.02.2013 11:58:21.600	1	677	7	0	6,5	91,5	47,5	0,02	449	0	0	10,7	21,2	14,1	0,1	0,1	29	11
8511	05.02.2013 11:58:21.800	1	677	7	0	6,5	91,5	47,5	0,02	449	0	0	10,7	21,2	14,1	0,1	0,1	174	8
9966	05.02.2013 12:03:13.0	1	2016	8	0	136,6	97,2	47,5	0,31	449	0	0	11,1	21,2	14,1	0,2	0,3	-236	21
9967	05.02.2013 12:03:13.200	1	2016	8	0	136,6	97,2	47,5	0,31	449	0	0	11,1	21,2	14,1	0,2	0,3	-321	43
9968	05.02.2013 12:03:13.400	1	2016	8	0	136,6	97,2	47,5	0,31	449	0	0	11,1	21,2	14,1	0,2	0,3	452	128
9969	05.02.2013 12:03:13.600	1	2016	8	0	136,6	97,2	47,5	0,31	449	0	0	11,1	21,2	14,1	0,2	0,3	-45	-26
9970	05.02.2013 12:03:13.800	1	2016	8	0	136,6	97,2	47,5	0,31	449	0	0	11,1	21,2	14,1	0,2	0,3	529	205
10111	05.02.2013 12:03:42.0	5	2073	474	1	109,3	86,3	47,7	0,2	449	0	0	11,1	21,2	14,1	0,4	0,3	672	35
10112	05.02.2013 12:03:42.200	5	2073	474	1	109,3	86,3	47,7	0,2	449	0	0	11,1	21,2	14,1	0,4	0,3	-687	132
10113	05.02.2013 12:03:42.400	5	2073	474	1	109,3	86,3	47,7	0,2	449	0	0	11,1	21,2	14,1	0,4	0,3	558	194
10114	05.02.2013 12:03:42.600	5	2073	474	1	109,3	86,3	47,7	0,2	449	0	0	11,1	21,2	14,1	0,4	0,3	470	7
10115	05.02.2013 12:03:42.800	5	2073	474	1	109,3	86,3	47,7	0,2	449	0	0	11,1	21,2	14,1	0,4	0,3	-977	166
12326	05.02.2013 12:11:05.0	1	3	7	0	41,5	86,5	47,5	0,01	439	0	0	11,3	21,3	14,8	0,1	0,1	115	0
12327	05.02.2013 12:11:05.200	1	3	7	0	41,5	86,5	47,5	0,01	439	0	0	11,3	21,3	14,8	0,1	0,1	-76	-6
12328	05.02.2013 12:11:05.400	1	3	7	0	41,5	86,5	47,5	0,01	439	0	0	11,3	21,3	14,8	0,1	0,1	-30	-13
12329	05.02.2013 12:11:05.600	1	3	7	0	41,5	86,5	47,5	0,01	439	0	0	11,3	21,3	14,8	0,1	0,1	326	-13
12330	05.02.2013 12:11:05.800	1	3	7	0	41,5	86,5	47,5	0,01	439	0	0	11,3	21,3	14,8	0,1	0,1	-32	-14
13966	05.02.2013 12:16:33.0	24	3169	1186	7	360,1	97,3	48,3	1,33	439	0,1	0	11,5	21,3	14,8	0,6	0,6	693	194
13967	05.02.2013 12:16:33.200	24	3169	1186	7	360,1	97,3	48,3	1,33	439	0,1	0	11,5	21,3	14,8	0,6	0,6	-449	-80
13968	05.02.2013 12:16:33.400	24	3169	1186	7	360,1	97,3	48,3	1,33	439	0,1	0	11,5	21,3	14,8	0,6	0,6	-246	-141
13969	05.02.2013 12:16:33.600	24	3169	1186	7	360,1	97,3	48,3	1,33	439	0,1	0	11,5	21,3	14,8	0,6	0,6	-931	-222
13970	05.02.2013 12:16:33.800	24	3169	1186	7	360,1	97,3	48,3	1,33	439	0,1	0	11,5	21,3	14,8	0,6	0,6	-471	54
15996	05.02.2013 12:23:19.0	126	5138	3451	59	364,5	102	55,3	6,6	451	2,4	3,1	11,5	23,3	19,7	4,5	4	3166	-3277
15997	05.02.2013 12:23:19.200	126	5138	3451	59	364,5	102	55,3	6,6	451	2,4	3,1	11,5	23,3	19,7	4,5	4	-160	1561
15998	05.02.2013 12:23:19.400	126	5138	3451	59	364,5	102	55,3	6,6	451	2,4	3,1	11,5	23,3	19,7	4,5	4	391	2087
15999	05.02.2013 12:23:19.600	126	5138	3451	59	364,5	102	55,3	6,6	451	2,4	3,1	11,5	23,3	19,7	4,5	4	1570	2936
16000	05.02.2013 12:23:19.800	126	5138	3451	59	364,5	102	55,3	6,6	451	2,4	3,1	11,5	23,3	19,7	4,5	4	-3243	955
17051	05.02.2013 12:26:50.0	136	5200	3562	64	375,5	103,3	55,4	6,77	453	2,3	3,1	11,7	23,3	23,4	4,4	3,9	-986	-1828
17052	05.02.2013 12:26:50.200	136	5200	3562	64	375,5	103,3	55,4	6,77	453	2,3	3,1	11,7	23,3	23,4	4,4	3,9	-1859	-2948
17053	05.02.2013 12:26:50.400	136	5200	3562	64	375,5	103,3	55,4	6,77	453	2,3	3,1	11,7	23,3	23,4	4,4	3,9	-1768	-3277
17054	05.02.2013 12:26:50.600	136	5200	3562	64	375,5	103,3	55,4	6,77	453	2,3	3,1	11,7	23,3	23,4	4,4	3,9	2341	1678
17055	05.02.2013 12:26:50.800	136	5200	3562	64	375,5	103,3	55,4	6,77	453	2,3	3,1	11,7	23,3	23,4	4,4	3,9	3135	-1123
20351	05.02.2013 12:37:50.0	136	5164	3661	64	379,3	102,8	55,4	6,69	453	2,4	2,3	12,7	24,3	33	4,5	3,9	2881	-3277
20352	05.02.2013 12:37:50.200	136	5164	3661	64	379,3	102,8	55,4	6,69	453	2,4	2,3	12,7	24,3	33	4,5	3,9	-3277	-1287
20353	05.02.2013 12:37:50.400	136	5164	3661	64	379,3	102,8	55,4	6,69	453	2,4	2,3	12,7	24,3	33	4,5	3,9	632	3215
20354	05.02.2013 12:37:50.600	136	5164	3661	64	379,3	102,8	55,4	6,69	453	2,4	2,3	12,7	24,3	33	4,5	3,9	711	142
20355	05.02.2013 12:37:50.800	136	5164	3661	64	379,3	102,8	55,4	6,69	453	2,4	2,3	12,7	24,3	33	4,5	3,9	1586	-102
22211	05.02.2013 12:44:02.0	128	5162	3658	58	376,7	102,2	55,4	6,66	453	2,5	1,7	13,6	24,6	37,9	4,7	4,2	-367	-3277
22212	05.02.2013 12:44:02.200	128	5162	3658	58	376,7	102,2	55,4	6,66	453	2,5	1,7	13,6	24,6	37,9	4,7	4,2	560	0
22213	05.02.2013 12:44:02.400	128	5162	3658	58	376,7	102,2	55,4	6,66	453	2,5	1,7	13,6	24,6	37,9	4,7	4,2	-1288	3215
22214	05.02.2013 12:44:02.600	128	5162	3658	58	376,7	102,2	55,4	6,66	453	2,5	1,7	13,6	24,6	37,9	4,7	4,2	2679	3016
22215	05.02.2013 12:44:02.800	128	5162	3658	58	376,7	102,2	55,4	6,66	453	2,5	1,7	13,6	24,6	37,9	4,7	4,2	3026	-2732

Продовження додатку В

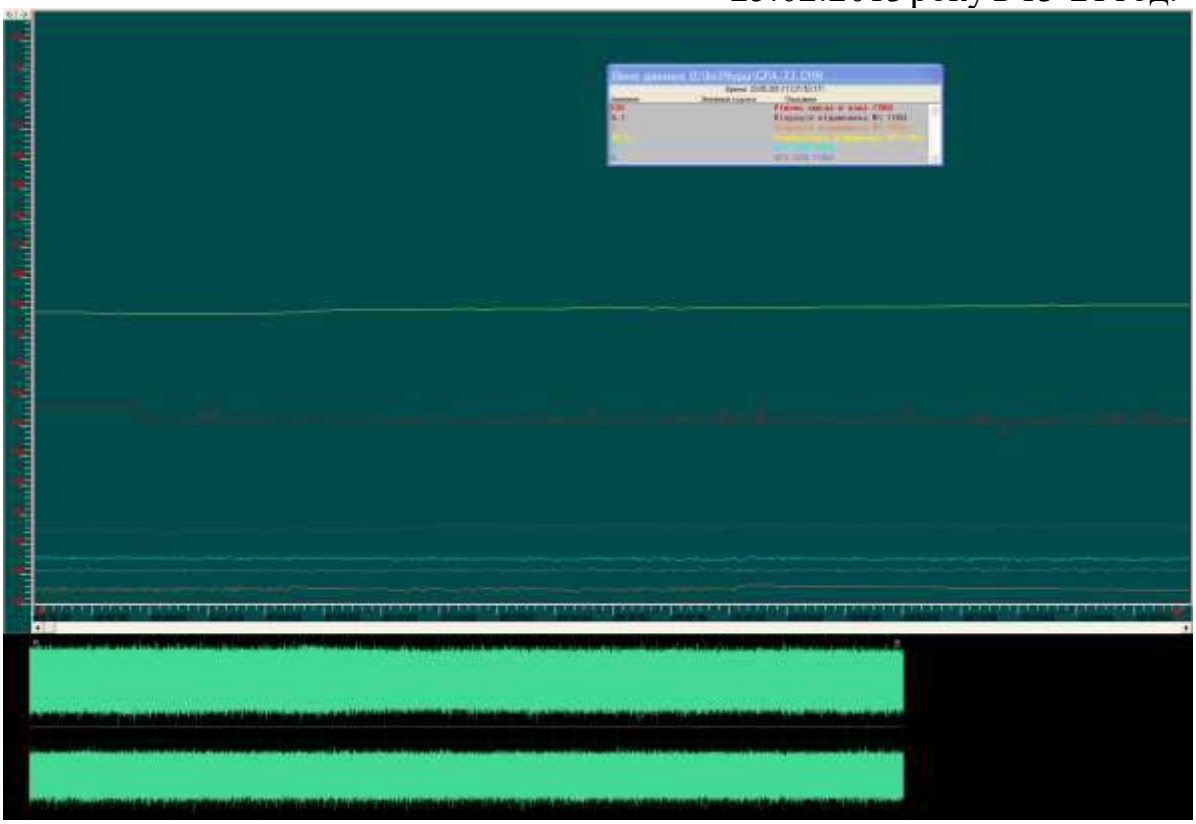
№ з/п	Час заміру	Антипомпажний параметр (%)	Оберти ТВТ (об/хв)	Оберти ТНТ (об/хв)	Перепад на конфузорі (кг/см^2)	Температура на вихлоп (^{0}C)	*P* гідравлічного масла (кг/см^2)	*P* на виході (кг/см^2)	*P* осьового компресора (кг/см^2)	Рівень масла в баці (мм)	Вібрація ПШ №1 (мм/с)	Вібрація ПШ №4 (мм/с)	Температура в приміщенні (^{0}C)	Температура в повітряному коробі (^{0}C)	Температура ПШ №1 (^{0}C)	dP1 ПЗК (мм.в.с)	dP2 ПЗК (мм.в.с)	Шум (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)	Вібрація (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)
26186	05.02.2013 12:57:17.0	123	5159	3636	62	387,2	100,8	56,4	6,79	453	2,7	1,2	15,4	24,1	45,4	4,8	3,7	-3277	-3277
26187	05.02.2013 12:57:17.200	123	5159	3636	62	387,2	100,8	56,4	6,79	453	2,7	1,2	15,4	24,1	45,4	4,8	3,7	-791	-2291
26188	05.02.2013 12:57:17.400	123	5159	3636	62	387,2	100,8	56,4	6,79	453	2,7	1,2	15,4	24,1	45,4	4,8	3,7	950	-1773
26189	05.02.2013 12:57:17.600	123	5159	3636	62	387,2	100,8	56,4	6,79	453	2,7	1,2	15,4	24,1	45,4	4,8	3,7	1961	-1979
26190	05.02.2013 12:57:17.800	123	5159	3636	62	387,2	100,8	56,4	6,79	453	2,7	1,2	15,4	24,1	45,4	4,8	3,7	-371	-23
29815	05.02.2013 13:09:23.0	118	5105	3537	58	379,1	98,1	56	6,63	453	2,4	1	16,6	24,4	47,9	4,6	3,6	496	-211
29816	05.02.2013 13:09:23.200	118	5105	3537	58	379,1	98,1	56	6,63	453	2,4	1	16,6	24,4	47,9	4,6	3,6	-487	198
29817	05.02.2013 13:09:23.400	118	5105	3537	58	379,1	98,1	56	6,63	453	2,4	1	16,6	24,4	47,9	4,6	3,6	-314	-751
29818	05.02.2013 13:09:23.600	118	5105	3537	58	379,1	98,1	56	6,63	453	2,4	1	16,6	24,4	47,9	4,6	3,6	-864	-1116
29820	05.02.2013 13:09:23.800	118	5105	3537	58	379,1	98,1	56	6,63	453	2,4	1	16,6	24,4	47,9	4,6	3,6	722	-2467
31295	05.02.2013 13:14:19.0	121	5157	3550	59	380,6	99,6	55,9	6,71	453	2,3	0,9	16,9	24,6	48,4	4,4	3,7	470	64
31296	05.02.2013 13:14:19.200	121	5157	3550	59	380,6	99,6	55,9	6,71	453	2,3	0,9	16,9	24,6	48,4	4,4	3,7	-124	-574
32297	05.02.2013 13:14:19.400	121	5157	3550	59	380,6	99,6	55,9	6,71	453	2,3	0,9	16,9	24,6	48,4	4,4	3,7	195	-106
31298	05.02.2013 13:14:19.600	121	5157	3550	59	380,6	99,6	55,9	6,71	453	2,3	0,9	16,9	24,6	48,4	4,4	3,7	-813	-2416
31299	05.02.2013 13:14:19.800	121	5157	3550	59	380,6	99,6	55,9	6,71	453	2,3	0,9	16,9	24,6	48,4	4,4	3,7	450	-846
32885	05.02.2013 13:19:37.0	118	5158	3551	57	381,3	99	55,9	6,68	453	2,3	0,9	17	24,8	49	4,5	3,7	617	-907
32886	05.02.2013 13:19:37.200	118	5158	3551	57	381,3	99	55,9	6,68	453	2,3	0,9	17	24,8	49	4,5	3,7	357	-534
32887	05.02.2013 13:19:37.400	118	5158	3551	57	381,3	99	55,9	6,68	453	2,3	0,9	17	24,8	49	4,5	3,7	458	46
32888	05.02.2013 13:19:37.600	118	5158	3551	57	381,3	99	55,9	6,68	453	2,3	0,9	17	24,8	49	4,5	3,7	91	31
32889	05.02.2013 13:19:37.800	118	5158	3551	57	381,3	99	55,9	6,68	453	2,3	0,9	17	24,8	49	4,5	3,7	-629	-1149
33980	05.02.2013 13:23:16.0	124	5157	3552	60	379,5	99	55,8	6,7	453	2,3	0,8	16,3	25	49,3	3,7	2,8	-56	939
33981	05.02.2013 13:23:16.200	124	5157	3552	60	379,5	99	55,8	6,7	453	2,3	0,8	16,3	25	49,3	3,7	2,8	-196	-64
33982	05.02.2013 13:23:16.400	124	5157	3552	60	379,5	99	55,8	6,7	453	2,3	0,8	16,3	25	49,3	3,7	2,8	-497	58
33983	05.02.2013 13:23:16.600	124	5157	3552	60	379,5	99	55,8	6,7	453	2,3	0,8	16,3	25	49,3	3,7	2,8	-522	-888
33984	05.02.2013 13:23:16.800	124	5157	3552	60	379,5	99	55,8	6,7	453	2,3	0,8	16,3	25	49,3	3,7	2,8	217	-168
34510	05.02.2013 13:25:02.0	4	3306	1438	1	202,6	85,1	47,1	0,87	453	1,5	0,5	15,2	25	49,6	0,7	0,6	128	32
34511	05.02.2013 13:25:02.200	4	3306	1438	1	202,6	85,1	47,1	0,87	453	1,5	0,5	15,2	25	49,6	0,7	0,6	86	-10
34512	05.02.2013 13:25:02.400	4	3306	1438	1	202,6	85,1	47,1	0,87	453	1,5	0,5	15,2	25	49,6	0,7	0,6	56	-14
34513	05.02.2013 13:25:02.600	4	3306	1438	1	202,6	85,1	47,1	0,87	453	1,5	0,5	15,2	25	49,6	0,7	0,6	-115	-9
34514	05.02.2013 13:25:02.800	4	3306	1438	1	202,6	85,1	47,1	0,87	453	1,5	0,5	15,2	25	49,6	0,7	0,6	-2	-32
35315	05.02.2013 13:27:43.0	1	556	358	0	256,9	83,2	0	0,01	453	0,7	0	14,8	25	49,7	0,1	0	-39	-11
35316	05.02.2013 13:27:43.200	1	556	358	0	256,9	83,2	0	0,01	453	0,7	0	14,8	25	49,7	0,1	0	86	-1
35317	05.02.2013 13:27:43.400	1	556	358	0	256,9	83,2	0	0,01	453	0,7	0	14,8	25	49,7	0,1	0	-47	-6
35318	05.02.2013 13:27:43.600	1	556	358	0	256,9	83,2	0	0,01	453	0,7	0	14,8	25	49,7	0,1	0	-81	-9
35319	05.02.2013 13:27:43.800	1	556	358	0	256,9	83,2	0	0,01	453	0,7	0	14,8	25	49,7	0,1	0	3	-7
35875	05.02.2013 13:29:35.0	1	248	172	0	273,7	83,4	0	0	453	0,7	0	14,9	24,7	49,7	0,1	0,1	-11	-3
35876	05.02.2013 13:29:35.200	1	248	172	0	273,7	83,4	0	0	453	0,7	0	14,9	24,7	49,7	0,1	0,1	-38	-8
35877	05.02.2013 13:29:35.400	1	248	172	0	273,7	83,4	0	0	453	0,7	0	14,9	24,7	49,7	0,1	0,1	-4	-9
35878	05.02.2013 13:29:35.600	1	248	172	0	273,7	83,4	0	0	453	0,7	0	14,9	24,7	49,7	0,1	0,1	3	-4
35879	05.02.2013 13:29:35.800	1	248	172	0	273,7	83,4	0	0	453	0,7	0	14,9	24,7	49,7	0,1	0,1	7	-7

продовження додатку В

Вікно технологічних параметрів, вібраційних та акустичних сигналів (робота після ремонту) 25.02.2013 року в 08-36 год.



25.02.2013 року в 13-21 год.



Продовження додатку В

Робота після ремонту 25.02.2013

№ з/п	Час заміру	Антипомпажний параметр (%)	Оберти ТВТ (об/хв)	Оберти ТНТ (об/хв)	Перепад на конфузорі (кг/см²)	Температура на вихлопі (⁰С)	*P* гідравлічного масла (кг/см²)	*P* на виході (кг/см²)	*P* осьового компресора (кг/см²)	Рівень масла в баці (мм)	Вібрація ПШ №1 (мм/с)	Вібрація ПШ №4 (мм/с)	Температура в приміщенні (⁰С)	Температура в повітряному коробі (⁰С)	Температура ПШ №1 (⁰С)	dP1 ПЗК (мм.в.с)	dP2 ПЗК (мм.в.с)	Шум (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)	Вібрація (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)
2	25.02.2013 8:36:00.0	113	5193	4121	66	423,2	93,8	56,4	7,17	416	1,9	0,3	21,1	5,4	49,1	4,8	3,1	7776	6258
3	25.02.2013 8:36:00.200	113	5193	4121	66	423,2	93,8	56,4	7,17	416	1,9	0,3	21,1	5,4	49,1	4,8	3,1	-1616	3954
4	25.02.2013 8:36:00.400	113	5193	4121	66	423,2	93,8	56,4	7,17	416	1,9	0,3	21,1	5,4	49,1	4,8	3,1	-7553	4782
5	25.02.2013 8:36:00.600	113	5193	4121	66	423,2	93,8	56,4	7,17	416	1,9	0,3	21,1	5,4	49,1	4,8	3,1	-4511	2498
6	25.02.2013 8:36:00.800	113	5193	4121	66	423,2	93,8	56,4	7,17	416	1,9	0,3	21,1	5,4	49,1	4,8	3,1	5637	790
102	25.02.2013 8:36:20.0	113	5190	4122	66	423,3	93,8	56,4	7,14	416	1,9	0,3	21,1	6,3	49,1	4,9	3,2	2552	-9639
103	25.02.2013 8:36:20.200	113	5190	4122	66	423,3	93,8	56,4	7,14	416	1,9	0,3	21,1	6,3	49,1	4,9	3,2	-3308	3263
104	25.02.2013 8:36:20.400	113	5190	4122	66	423,3	93,8	56,4	7,14	416	1,9	0,3	21,1	6,3	49,1	4,9	3,2	2307	-4633
105	25.02.2013 8:36:20.600	113	5190	4122	66	423,3	93,8	56,4	7,14	416	1,9	0,3	21,1	6,3	49,1	4,9	3,2	342	-1934
807	25.02.2013 8:38:41.0	108	5192	4121	63	423	93,9	56,3	7,17	416	1,9	0,4	21,2	11,5	49	4,7	3,2	-4136	-2299
808	25.02.2013 8:38:41.200	108	5192	4121	63	423	93,9	56,3	7,17	416	1,9	0,4	21,2	11,5	49	4,7	3,2	-171	-190
809	25.02.2013 8:38:41.400	108	5192	4121	63	423	93,9	56,3	7,17	416	1,9	0,4	21,2	11,5	49	4,7	3,2	-1792	-8569
810	25.02.2013 8:38:41.600	108	5192	4121	63	423	93,9	56,3	7,17	416	1,9	0,4	21,2	11,5	49	4,7	3,2	-4494	-5419
811	25.02.2013 8:38:41.800	108	5192	4121	63	423	93,9	56,3	7,17	416	1,9	0,4	21,2	11,5	49	4,7	3,2	7196	-6993
1487	25.02.2013 8:40:57.0	111	5191	4120	65	423	93,9	56,3	7,16	416	1,9	0,3	21,4	6,9	49,1	4,7	3	-712	-4855
1488	25.02.2013 8:40:57.200	111	5191	4120	65	423	93,9	56,3	7,16	416	1,9	0,3	21,4	6,9	49,1	4,7	3	-7930	1844
1489	25.02.2013 8:40:57.400	111	5191	4120	65	423	93,9	56,3	7,16	416	1,9	0,3	21,4	6,9	49,1	4,7	3	-2128	2098
1490	25.02.2013 8:40:57.600	111	5191	4120	65	423	93,9	56,3	7,16	416	1,9	0,3	21,4	6,9	49,1	4,7	3	-2920	-3233
1491	25.02.2013 8:40:57.800	111	5191	4120	65	423	93,9	56,3	7,16	416	1,9	0,3	21,4	6,9	49,1	4,7	3	-423	3479
3797	25.02.2013 8:48:39.0	115	5187	4119	66	423,1	93,9	56,4	7,15	416	1,8	0,4	21,6	10,4	48,9	4,5	3,5	-1510	-2070
3798	25.02.2013 8:48:39.200	115	5187	4119	66	423,1	93,9	56,4	7,15	416	1,8	0,4	21,6	10,4	48,9	4,5	3,5	528	6638
3799	25.02.2013 8:48:39.400	115	5187	4119	66	423,1	93,9	56,4	7,15	416	1,8	0,4	21,6	10,4	48,9	4,5	3,5	4889	-1359
3800	25.02.2013 8:48:39.600	115	5187	4119	66	423,1	93,9	56,4	7,15	416	1,8	0,4	21,6	10,4	48,9	4,5	3,5	-6457	2243
3801	25.02.2013 8:48:39.800	115	5187	4119	66	423,1	93,9	56,4	7,15	416	1,8	0,4	21,6	10,4	48,9	4,5	3,5	2317	5226
4727	25.02.2013 8:51:45.0	110	5190	4120	64	423,2	93,8	56,3	7,16	415	1,8	0,4	21,2	5,5	48,9	4,6	3,3	182	2089
4728	25.02.2013 8:51:45.200	110	5190	4120	64	423,2	93,8	56,3	7,16	415	1,8	0,4	21,2	5,5	48,9	4,6	3,3	-34	-3576
4729	25.02.2013 8:51:45.400	110	5190	4120	64	423,2	93,8	56,3	7,16	415	1,8	0,4	21,2	5,5	48,9	4,6	3,3	-4624	-2401
4730	25.02.2013 8:51:45.600	110	5190	4120	64	423,2	93,8	56,3	7,16	415	1,8	0,4	21,2	5,5	48,9	4,6	3,3	-20	-5688
4731	25.02.2013 8:51:45.800	110	5190	4120	64	423,2	93,8	56,3	7,16	415	1,8	0,4	21,2	5,5	48,9	4,6	3,3	5487	-5804
5927	25.02.2013 8:55:45.0	106	5190	4121	62	423	93,8	56,3	7,16	412	1,8	0,3	20,3	7,5	48,9	4,6	3,6	-722	-2397
5928	25.02.2013 8:55:45.200	106	5190	4121	62	423	93,8	56,3	7,16	412	1,8	0,3	20,3	7,5	48,9	4,6	3,6	-1532	2965
5929	25.02.2013 8:55:45.400	106	5190	4121	62	423	93,8	56,3	7,16	412	1,8	0,3	20,3	7,5	48,9	4,6	3,6	-3214	-8571
5930	25.02.2013 8:55:45.600	106	5190	4121	62	423	93,8	56,3	7,16	412	1,8	0,3	20,3	7,5	48,9	4,6	3,6	5413	4592
5931	25.02.2013 8:55:45.800	106	5190	4121	62	423	93,8	56,3	7,16	412	1,8	0,3	20,3	7,5	48,9	4,6	3,6	513	-5499
7266	25.02.2013 9:00:13.0	108	5190	4121	63	422,9	93,8	56,3	7,16	412	1,8	0,4	20,2	5,9	48,9	4,6	3,2	1463	-6978
7267	25.02.2013 9:00:13.200	108	5190	4121	63	422,9	93,8	56,3	7,16	412	1,8	0,4	20,2	5,9	48,9	4,6	3,2	3472	-3021
7268	25.02.2013 9:00:13.400	108	5190	4121	63	422,9	93,8	56,3	7,16	412	1,8	0,4	20,2	5,9	48,9	4,6	3,2	-5910	7440
7269	25.02.2013 9:00:13.600	108	5190	4121	63	422,9	93,8	56,3	7,16	412	1,8	0,4	20,2	5,9	48,9	4,6	3,2	-3440	14248
7270	25.02.2013 9:00:13.800	108	5190	4121	63	422,9	93,8	56,3	7,16	412	1,8	0,4	20,2	5,9	48,9	4,6	3,2	1460	-7390
9626	25.02.2013 9:08:05.0	109	5188	4120	64	423,2	93,9	56,3	7,16	413	1,8	0,3	20,8	20,7	49,4	4,6	3,5	-689	755
9627	25.02.2013 9:08:05.200	109	5188	4120	64	423,2	93,9	56,3	7,16	413	1,8	0,3	20,8	20,7	49,4	4,6	3,5	6722	2717
9628	25.02.2013 9:08:05.400	109	5188	4120	64	423,2	93,9	56,3	7,16	413	1,8	0,3	20,8	20,7	49,4	4,6	3,5	3915	-6427
9629	25.02.2013 9:08:05.600	109	5188	4120	64	423,2	93,9	56,3	7,16	413	1,8	0,3	20,8	20,7	49,4	4,6	3,5	1276	-2084
9630	25.02.2013 9:08:05.800	109	5188	4120	64	423,2	93,9	56,3	7,16	413	1,8	0,3	20,8	20,7	49,4	4,6	3,5	9897	-5106

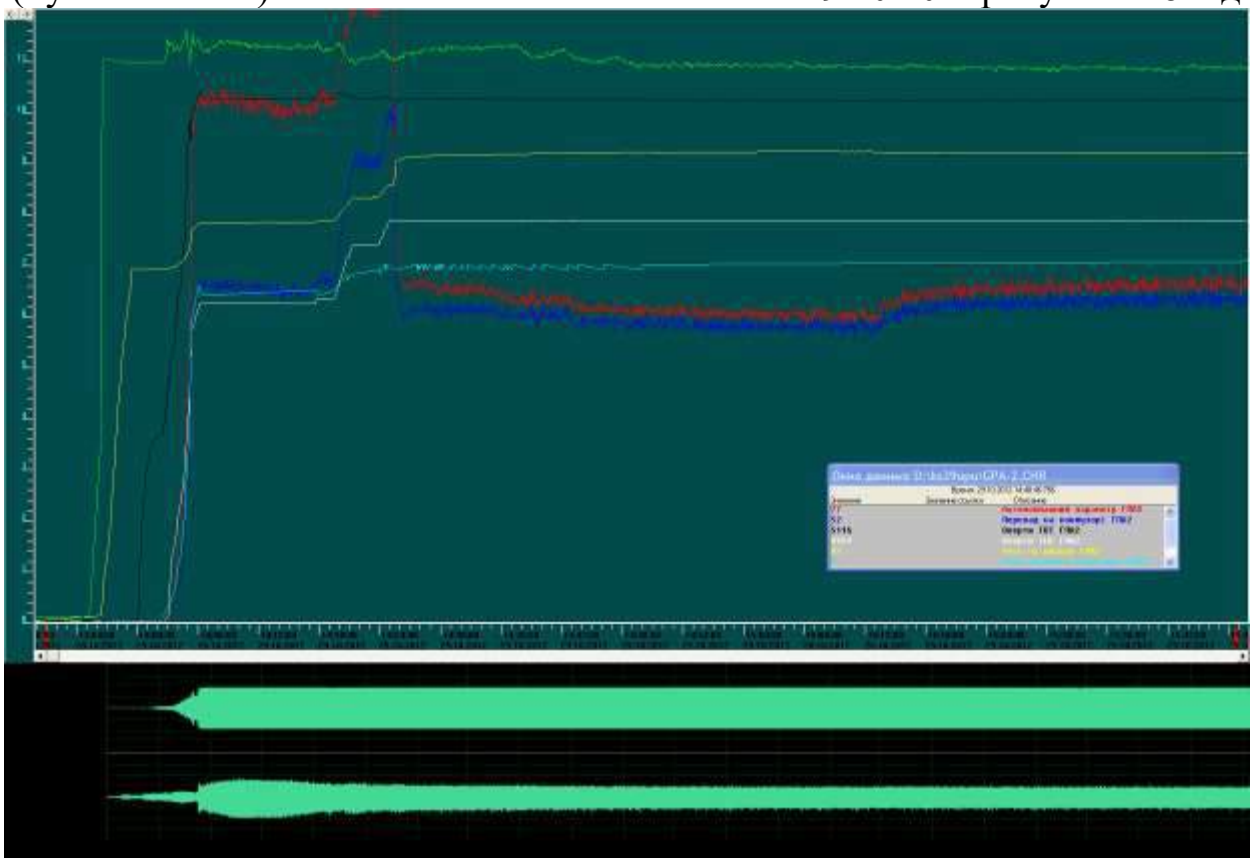
Продовження додатку В

№ з/п	Час заміру	Антипомпажний параметр (%)	Оберти ТВТ (об/хв)	Оберти ТНТ (об/хв)	Перепад на конфузорі (кг/см²)	Температура на вихлопі (⁰С)	*P* гідравлічного масла (кг/см²)	*P* на виході (кг/см²)	*P* осьового компресора (кг/см²)	Рівень масла в баці (мм)	Вібрація ПШ №1 (мм/с)	Вібрація ПШ №4 (мм/с)	Температура в приміщенні (⁰С)	Температура в повітряному короб (⁰С)	Температура ПШ №1 (⁰С)	dP1 ПЗК (мм.в.с)	dP2 ПЗК (мм.в.с)	Шум (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)	Вібрація (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)
10021	25.02.2013 9:09:24.0	112	5187	4119	65	423,2	93,8	56,3	7,15	413	1,8	0,3	21,2	19,8	49,4	4,5	3,2	20	-1887
10022	25.02.2013 9:09:24.200	112	5187	4119	65	423,2	93,8	56,3	7,15	413	1,8	0,3	21,2	19,8	49,4	4,5	3,2	-1348	4602
10023	25.02.2013 9:09:24.400	112	5187	4119	65	423,2	93,8	56,3	7,15	413	1,8	0,3	21,2	19,8	49,4	4,5	3,2	705	-10514
10024	25.02.2013 9:09:24.600	112	5187	4119	65	423,2	93,8	56,3	7,15	413	1,8	0,3	21,2	19,8	49,4	4,5	3,2	-5431	5859
10025	25.02.2013 9:09:24.800	112	5187	4119	65	423,2	93,8	56,3	7,15	413	1,8	0,3	21,2	19,8	49,4	4,5	3,2	2260	3937
10361	25.02.2013 9:10:32.0	111	5188	4119	65	422,8	93,8	56,3	7,15	413	1,9	0,3	21,5	12,8	49,4	4,4	3,4	-2953	2907
10362	25.02.2013 9:10:32.200	111	5188	4119	65	422,8	93,8	56,3	7,15	413	1,9	0,3	21,5	12,8	49,4	4,4	3,4	3642	4854
10363	25.02.2013 9:10:32.400	111	5188	4119	65	422,8	93,8	56,3	7,15	413	1,9	0,3	21,5	12,8	49,4	4,4	3,4	-6750	2105
10364	25.02.2013 9:10:32.600	111	5188	4119	65	422,8	93,8	56,3	7,15	413	1,9	0,3	21,5	12,8	49,4	4,4	3,4	-329	-1313
10365	25.02.2013 9:10:32.800	111	5188	4119	65	422,8	93,8	56,3	7,15	413	1,9	0,3	21,5	12,8	49,4	4,4	3,4	1371	-2256
12586	25.02.2013 9:17:57.0	107	5187	4117	62	424,3	93,8	56,3	7,16	412	1,9	0,3	20,5	5,4	49,5	4,4	3,2	-695	-3085
12587	25.02.2013 9:17:57.200	107	5187	4117	62	424,3	93,8	56,3	7,16	412	1,9	0,3	20,5	5,4	49,5	4,4	3,2	1027	1230
12588	25.02.2013 9:17:57.400	107	5187	4117	62	424,3	93,8	56,3	7,16	412	1,9	0,3	20,5	5,4	49,5	4,4	3,2	2400	7984
12589	25.02.2013 9:17:57.600	107	5187	4117	62	424,3	93,8	56,3	7,16	412	1,9	0,3	20,5	5,4	49,5	4,4	3,2	5093	585
12590	25.02.2013 9:17:57.800	107	5187	4117	62	424,3	93,8	56,3	7,16	412	1,9	0,3	20,5	5,4	49,5	4,4	3,2	265	5908
13436	25.02.2013 9:20:47.0	108	5186	4117	63	424,7	93,7	56,3	7,15	412	1,9	0,4	20,1	12	49,5	4,5	3,5	-1836	1390
13437	25.02.2013 9:20:47.200	108	5186	4117	63	424,7	93,7	56,3	7,15	412	1,9	0,4	20,1	12	49,5	4,5	3,5	763	-1020
13438	25.02.2013 9:20:47.400	108	5186	4117	63	424,7	93,7	56,3	7,15	412	1,9	0,4	20,1	12	49,5	4,5	3,5	4922	-543
13439	25.02.2013 9:20:47.600	108	5186	4117	63	424,7	93,7	56,3	7,15	412	1,9	0,4	20,1	12	49,5	4,5	3,5	-867	959
13440	25.02.2013 9:20:47.800	108	5186	4117	63	424,7	93,7	56,3	7,15	412	1,9	0,4	20,1	12	49,5	4,5	3,5	39	-1751
17601	25.02.2013 9:34:40.0	109	5185	4116	64	424,8	93,9	56,3	7,14	412	2	0,4	20,7	5,7	49,7	4,5	3,3	1753	-1591
17602	25.02.2013 9:34:40.200	109	5185	4116	64	424,8	93,9	56,3	7,14	412	2	0,4	20,7	5,7	49,7	4,5	3,3	-1187	2585
17603	25.02.2013 9:34:40.400	109	5185	4116	64	424,8	93,9	56,3	7,14	412	2	0,4	20,7	5,7	49,7	4,5	3,3	-1668	-3930
17604	25.02.2013 9:34:40.600	109	5185	4116	64	424,8	93,9	56,3	7,14	412	2	0,4	20,7	5,7	49,7	4,5	3,3	-2960	2806
17605	25.02.2013 9:34:40.800	109	5185	4116	64	424,8	93,9	56,3	7,14	412	2	0,4	20,7	5,7	49,7	4,5	3,3	-3504	2420
19206	25.02.2013 9:40:01.0	112	5183	4117	65	424,1	93,9	56,3	7,13	411	2	0,3	19,9	9,2	49,7	4,7	3	2235	-1195
19207	25.02.2013 9:40:01.200	112	5183	4117	65	424,1	93,9	56,3	7,13	411	2	0,3	19,9	9,2	49,7	4,7	3	-2526	1534
19208	25.02.2013 9:40:01.400	112	5183	4117	65	424,1	93,9	56,3	7,13	411	2	0,3	19,9	9,2	49,7	4,7	3	4177	-1937
19209	25.02.2013 9:40:01.600	112	5183	4117	65	424,1	93,9	56,3	7,13	411	2	0,3	19,9	9,2	49,7	4,7	3	4596	-8399
19210	25.02.2013 9:40:01.800	112	5183	4117	65	424,1	93,9	56,3	7,13	411	2	0,3	19,9	9,2	49,7	4,7	3	4813	-7247
20556	25.02.2013 9:44:31.0	107	5186	4116	63	425,1	93,7	56,3	7,15	411	2	0,3	20,7	21,5	49,8	4,4	3	532	-1103
20557	25.02.2013 9:44:31.200	107	5186	4116	63	425,1	93,7	56,3	7,15	411	2	0,3	20,7	21,5	49,8	4,4	3	7373	7420
20558	25.02.2013 9:44:31.400	107	5186	4116	63	425,1	93,7	56,3	7,15	411	2	0,3	20,7	21,5	49,8	4,4	3	9	-9180
20559	25.02.2013 9:44:31.600	107	5186	4116	63	425,1	93,7	56,3	7,15	411	2	0,3	20,7	21,5	49,8	4,4	3	4279	-9789
20560	25.02.2013 9:44:31.800	107	5186	4116	63	425,1	93,7	56,3	7,15	411	2	0,3	20,7	21,5	49,8	4,4	3	-1352	-5831
21706	25.02.2013 9:48:21.0	106	5183	4117	64	424,6	93,9	56,3	7,14	411	2	0,3	21,7	9,5	49,8	4,6	3,1	3912	5825
21707	25.02.2013 9:48:21.200	106	5183	4117	64	424,6	93,9	56,3	7,14	411	2	0,3	21,7	9,5	49,8	4,6	3,1	-1148	-4076
21708	25.02.2013 9:48:21.400	106	5183	4117	64	424,6	93,9	56,3	7,14	411	2	0,3	21,7	9,5	49,8	4,6	3,1	-4213	-1427
21709	25.02.2013 9:48:21.600	106	5183	4117	64	424,6	93,9	56,3	7,14	411	2	0,3	21,7	9,5	49,8	4,6	3,1	181	-58
21710	25.02.2013 9:48:21.800	106	5183	4117	64	424,6	93,9	56,3	7,14	411	2	0,3	21,7	9,5	49,8	4,6	3,1	4865	-3768
22226	25.02.2013 9:50:05.0	120	5185	4195	70	434,7	93,6	56,4	7,21	411	2	0,5	21,6	7,3	49,8	4,4	3,1	1649	4152
22227	25.02.2013 9:50:05.200	120	5185	4195	70	434,7	93,6	56,4	7,21	411	2	0,5	21,6	7,3	49,8	4,4	3,1	-1856	6264
22228	25.02.2013 9:50:05.400	120	5185	4195	70	434,7	93,6	56,4	7,21	411	2	0,5	21,6	7,3	49,8	4,4	3,1	3918	3692
22229	25.02.2013 9:50:05.600	120	5185	4195	70	434,7	93,6	56,4	7,21	411	2	0,5	21,6	7,3	49,8	4,4	3,1	-585	1928
22230	25.02.2013 9:50:05.800	120	5185	4195	70	434,7	93,6	56,4	7,21	411	2	0,5	21,6	7,3	49,8	4,4	3,1	-1140	-1905

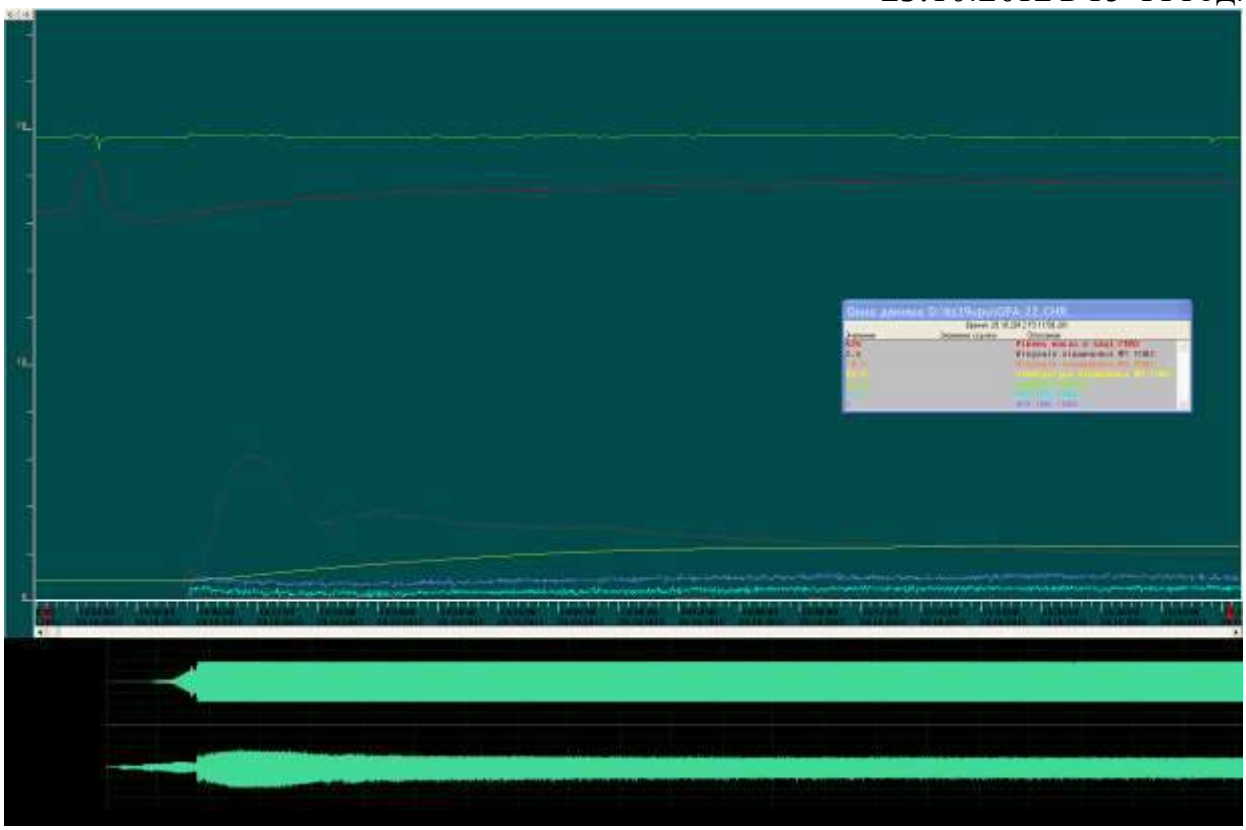
Продовження додатку В

№ з/п	Час заміру	Антипомпажний параметр (%)	Оберти ТВТ (об/хв)	Оберти ТНТ (об/хв)	Перепад на конфузорі (кг/см^2)	Температура на вихлопі (^{0}C)	*P* гідравлічного масла (кг/см^2)	*P* на виході (кг/см^2)	*P* осьового компресора (кг/см^2)	Рівень масла в баці (мм)	Вібрація ПШ №1 (мм/с)	Вібрація ПШ №4 (мм/с)	Температура в приміщенні (^{0}C)	Температура в повітряному короб (^{0}C)	Температура ПШ №1 (^{0}C)	dP1 ПЗК (мм.в.с)	dP2 ПЗК (мм.в.с)	Шум (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)	Вібрація (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)
23081	25.02.2013 9:52:56.0	120	5185	4195	71	435	93,5	56,4	7,22	412	2	0,5	21,2	6	49,9	4,5	3,5	3206	4151
23082	25.02.2013 9:52:56.200	120	5185	4195	71	435	93,5	56,4	7,22	412	2	0,5	21,2	6	49,9	4,5	3,5	-1289	-2017
23083	25.02.2013 9:52:56.400	120	5185	4195	71	435	93,5	56,4	7,22	412	2	0,5	21,2	6	49,9	4,5	3,5	-4996	11070
23084	25.02.2013 9:52:56.600	120	5185	4195	71	435	93,5	56,4	7,22	412	2	0,5	21,2	6	49,9	4,5	3,5	-2393	-3163
23085	25.02.2013 9:52:56.800	120	5185	4195	71	435	93,5	56,4	7,22	412	2	0,5	21,2	6	49,9	4,5	3,5	3793	4800
24896	25.02.2013 9:58:59.0	114	5185	4197	67	435,3	93,5	56,5	7,21	411	1,9	0,5	20	11,6	49,9	4,6	3,2	-1265	4271
24897	25.02.2013 9:58:59.200	114	5185	4197	67	435,3	93,5	56,5	7,21	411	1,9	0,5	20	11,6	49,9	4,6	3,2	405	4123
24898	25.02.2013 9:58:59.400	114	5185	4197	67	435,3	93,5	56,5	7,21	411	1,9	0,5	20	11,6	49,9	4,6	3,2	3089	-495
24899	25.02.2013 9:58:59.600	114	5185	4197	67	435,3	93,5	56,5	7,21	411	1,9	0,5	20	11,6	49,9	4,6	3,2	-5317	3912
24900	25.02.2013 9:58:59.800	114	5185	4197	67	435,3	93,5	56,5	7,21	411	1,9	0,5	20	11,6	49,9	4,6	3,2	170	7699
24991	25.02.2013 9:59:18.0	117	5185	4194	69	435,1	93,5	56,5	7,22	411	1,9	0,5	20	14,6	49,9	4,6	3,6	-400	-762
24992	25.02.2013 9:59:18.200	117	5185	4194	69	435,1	93,5	56,5	7,22	411	1,9	0,5	20	14,6	49,9	4,6	3,6	-7642	-3372
24993	25.02.2013 9:59:18.400	117	5185	4194	69	435,1	93,5	56,5	7,22	411	1,9	0,5	20	14,6	49,9	4,6	3,6	-788	5902
24994	25.02.2013 9:59:18.600	117	5185	4194	69	435,1	93,5	56,5	7,22	411	1,9	0,5	20	14,6	49,9	4,6	3,6	-2408	-294
24995	25.02.2013 9:59:18.800	117	5185	4194	69	435,1	93,5	56,5	7,22	411	1,9	0,5	20	14,6	49,9	4,6	3,6	-5536	-5268
25026	25.02.2013 9:59:25.0	120	5185	4195	71	435,1	93,6	56,5	7,21	411	1,9	0,5	20	15,5	49,9	4,5	3,3	-1113	-471
25027	25.02.2013 9:59:25.200	120	5185	4195	71	435,1	93,6	56,5	7,21	411	1,9	0,5	20	15,5	49,9	4,5	3,3	-8228	-3224
25028	25.02.2013 9:59:25.400	120	5185	4195	71	435,1	93,6	56,5	7,21	411	1,9	0,5	20	15,5	49,9	4,5	3,3	-53	-2345
25029	25.02.2013 9:59:25.600	120	5185	4195	71	435,1	93,6	56,5	7,21	411	1,9	0,5	20	15,5	49,9	4,5	3,3	-11112	450
25030	25.02.2013 9:59:25.800	120	5185	4195	71	435,1	93,6	56,5	7,21	411	1,9	0,5	20	15,5	49,9	4,5	3,3	1640	-1653

Вікно технологічних параметрів, вібраційних та акустичних сигналів (пуск ГПА № 2) 29.10.2012 року в 14-48 год.



29.10.2012 в 15-11 год.



Продовження додатку В

Пуск ГПА №2 29.10.2012

№ з/п	Час заміру	Антипомпажний параметр (%)	Оберти ТВТ (об/хв)	Оберти ТНТ (об/хв)	Перепад на конфузорі (кг/см²)	Температура на вих.лопі (⁰С)	*P* гідравлічного масла (кг/см²)	*P* на виході (кг/см²)	*P* осьового компресора (кг/см²)	Рівень масла в баці (мм)	Вібрація ПШ №1 (мм/с)	Вібрація ПШ №4 (мм/с)	Температура в приміщенні (⁰С)	Температура в повітряному коробі (⁰С)	Температура ПШ №1 (⁰С)	dP1 ПЗК (мм.в.с)	dP2 ПЗК (мм.в.с)	Шум (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)	Вібрація (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)
2	29.10.2012 13:44:02.0	0	2	0	0	1712,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	-1
3	29.10.2012 13:44:02.200	0	2	0	0	1712,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-21	-2
4	29.10.2012 13:44:02.400	0	2	0	0	1712,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-25	0
5	29.10.2012 13:44:02.600	0	2	0	0	1712,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0
6	29.10.2012 13:44:02.800	0	2	0	0	1712,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0
752	29.10.2012 13:46:32.0	0	1	0	0	1712,8	0,9	0	0	0	0	0	0	0	20,1	0	0	-68	0
753	29.10.2012 13:46:32.200	0	1	0	0	1712,8	0,9	0	0	0	0	0	0	0	20,1	0	0	80	-5
754	29.10.2012 13:46:32.400	0	1	0	0	1712,8	0,9	0	0	0	0	0	0	0	20,1	0	0	-18	-4
755	29.10.2012 13:46:32.600	0	1	0	0	1712,8	0,9	0	0	0	0	0	0	0	20,1	0	0	69	-2
1627	29.10.2012 13:49:27.0	0	1	-1	0	1713	0,9	-0,1	0	393	0	0	0	19	20,1	0	0	-126	-70
1628	29.10.2012 13:49:27.200	0	1	-1	0	1713	0,9	-0,1	0	393	0	0	0	19	20,1	0	0	-277	-45
1629	29.10.2012 13:49:27.400	0	1	-1	0	1713	0,9	-0,1	0	393	0	0	0	19	20,1	0	0	31	11
1630	29.10.2012 13:49:27.600	0	1	-1	0	1713	0,9	-0,1	0	393	0	0	0	19	20,1	0	0	-146	-57
1631	29.10.2012 13:49:27.800	0	1	-1	0	1713	0,9	-0,1	0	393	0	0	0	19	20,1	0	0	-127	-16
2602	29.10.2012 13:52:42.0	0	2	-1	0	1712,8	0,9	-0,1	0	393	0	0	0	19	20,2	0	0	26	-128
2603	29.10.2012 13:52:42.200	0	2	-1	0	1712,8	0,9	-0,1	0	393	0	0	0	19	20,2	0	0	-117	-207
2604	29.10.2012 13:52:42.400	0	2	-1	0	1712,8	0,9	-0,1	0	393	0	0	0	19	20,2	0	0	-19	462
2605	29.10.2012 13:52:42.600	0	2	-1	0	1712,8	0,9	-0,1	0	393	0	0	0	19	20,2	0	0	-57	1170
2606	29.10.2012 13:52:42.800	0	2	-1	0	1712,8	0,9	-0,1	0	393	0	0	0	19	20,2	0	0	-60	25
3747	29.10.2012 13:56:31.0	0	2	0	0	1712,8	71,1	2	0	445	0	0	13,5	19	20,2	0	0	1186	-171
3748	29.10.2012 13:56:31.200	0	2	0	0	1712,8	71,1	2	0	445	0	0	13,5	19	20,2	0	0	637	-1942
3749	29.10.2012 13:56:31.400	0	2	0	0	1712,8	71,1	2	0	445	0	0	13,5	19	20,2	0	0	-959	1623
3750	29.10.2012 13:56:31.600	0	2	0	0	1712,8	71,1	2	0	445	0	0	13,5	19	20,2	0	0	328	181
3751	29.10.2012 13:56:31.800	0	2	0	0	1712,8	71,1	2	0	445	0	0	13,5	19	20,2	0	0	853	1274
4027	29.10.2012 13:57:27.0	0	2	-1	0	1712,8	91,9	15,8	0	411	0	0	13,5	19,2	20,2	0	0	-807	-139
4028	29.10.2012 13:57:27.200	0	2	-1	0	1712,8	91,9	15,8	0	411	0	0	13,5	19,2	20,2	0	0	243	-1019
4029	29.10.2012 13:57:27.400	0	2	-1	0	1712,8	91,9	15,8	0	411	0	0	13,5	19,2	20,2	0	0	1591	-215
4030	29.10.2012 13:57:27.600	0	2	-1	0	1712,8	91,9	15,8	0	411	0	0	13,5	19,2	20,2	0	0	56	2702
4031	29.10.2012 13:57:27.800	0	2	-1	0	1712,8	91,9	15,8	0	411	0	0	13,5	19,2	20,2	0	0	-1825	1289
5321	29.10.2012 14:01:46.0	0	1784	0	0	1715	91,5	51,8	0	385	0	0	13,5	19,4	20	0	0	85	118
5322	29.10.2012 14:01:46.200	0	1784	0	0	1715	91,5	51,8	0	385	0	0	13,5	19,4	20	0	0	-963	483
5323	29.10.2012 14:01:46.400	0	1784	0	0	1715	91,5	51,8	0	385	0	0	13,5	19,4	20	0	0	-606	1151
5324	29.10.2012 14:01:46.600	0	1784	0	0	1715	91,5	51,8	0	385	0	0	13,5	19,4	20	0	0	89	-1462
5325	29.10.2012 14:01:46.800	0	1784	0	0	1715	91,5	51,8	0	385	0	0	13,5	19,4	20	0	0	1274	-1059
6106	29.10.2012 14:04:23.0	24	3341	1198	8	1774,2	93,9	52,8	1,4	386	0,3	0	13,6	19,5	19,8	0	0	696	812
6107	29.10.2012 14:04:23.200	24	3341	1198	8	1774,2	93,9	52,8	1,4	386	0,3	0	13,6	19,5	19,8	0	0	108	-738
6108	29.10.2012 14:04:23.400	24	3341	1198	8	1774,2	93,9	52,8	1,4	386	0,3	0	13,6	19,5	19,8	0	0	-930	-1026
6109	29.10.2012 14:04:23.600	24	3341	1198	8	1774,2	93,9	52,8	1,4	386	0,3	0	13,6	19,5	19,8	0	0	91	-1705
6110	29.10.2012 14:04:23.800	24	3341	1198	8	1774,2	93,9	52,8	1,4	386	0,3	0	13,6	19,5	19,8	0	0	97	-1209
7516	29.10.2012 14:09:05.0	128	5122	3122	58	1775,2	94,9	58,6	6,4	397	5,1	0	13,5	20,3	21,9	0,8	1,8	74	-362
7517	29.10.2012 14:09:05.200	128	5122	3122	58	1775,2	94,9	58,6	6,4	397	5,1	0	13,5	20,3	21,9	0,8	1,8	-923	791
7518	29.10.2012 14:09:05.400	128	5122	3122	58	1775,2	94,9	58,6	6,4	397	5,1	0	13,5	20,3	21,9	0,8	1,8	-196	-1101
7519	29.10.2012 14:09:05.600	128	5122	3122	58	1775,2	94,9	58,6	6,4	397	5,1	0	13,5	20,3	21,9	0,8	1,8	731	127
7520	29.10.2012 14:09:05.800	128	5122	3122	58	1775,2	94,9	58,6	6,4	397	5,1	0	13,5	20,3	21,9	0,8	1,8	437	-1719

Продовження додатку В

№ з/п	Час заміру	Антипомпажний параметр (%)	Оберти ТВТ (об/хв)	Оберти ТНТ (об/хв)	Перепад на конфузорі (кг/см²)	Температура на вихлопі (⁰С)	*P* гідравлічного масла (кг/см²)	*P* на виході (кг/см²)	*P* осьового компресора (кг/см²)	Рівень масла в баці (мм)	Вібрація ПШ №1 (мм/с)	Вібрація ПШ №4 (мм/с)	Температура в приміщенні (⁰С)	Температура в повітряному коробі (⁰С)	Температура ПШ №1 (⁰С)	dP1 ПЗК (мм.в.с)	dP2 ПЗК (мм.в.с)	Шум (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)	Вібрація (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)
8601	29.10.2012 14:12:42.0	125	5126	3123	57	1775,7	93,8	58,7	6,4	402	5,8	0	13,5	20,7	25,6	0,3	1,6	-349	1403
8602	29.10.2012 14:12:42.200	125	5126	3123	57	1775,7	93,8	58,7	6,4	402	5,8	0	13,5	20,7	25,6	0,3	1,6	857	769
8603	29.10.2012 14:12:42.400	125	5126	3123	57	1775,7	93,8	58,7	6,4	402	5,8	0	13,5	20,7	25,6	0,3	1,6	-255	718
8604	29.10.2012 14:12:42.600	125	5126	3123	57	1775,7	93,8	58,7	6,4	402	5,8	0	13,5	20,7	25,6	0,3	1,6	-224	463
8605	29.10.2012 14:12:42.800	125	5126	3123	57	1775,7	93,8	58,7	6,4	402	5,8	0	13,5	20,7	25,6	0,3	1,6	379	-613
9561	29.10.2012 14:15:54.0	126	5127	3121	57	1775,9	93,8	58,8	6,4	403	5	0	13,5	20,7	28,9	0,2	1,7	182	-1235
9562	29.10.2012 14:15:54.200	126	5127	3121	57	1775,9	93,8	58,8	6,4	403	5	0	13,5	20,7	28,9	0,2	1,7	313	1191
9563	29.10.2012 14:15:54.400	126	5127	3121	57	1775,9	93,8	58,8	6,4	403	5	0	13,5	20,7	28,9	0,2	1,7	797	247
9564	29.10.2012 14:15:54.600	126	5127	3121	57	1775,9	93,8	58,8	6,4	403	5	0	13,5	20,7	28,9	0,2	1,7	-590	934
9565	29.10.2012 14:15:54.800	126	5127	3121	57	1775,9	93,8	58,8	6,4	403	5	0	13,5	20,7	28,9	0,2	1,7	-422	685
10946	29.10.2012 14:20:31.0	141	5172	3467	70	1776,9	93,2	60,8	6,7	408	3,4	0	13,5	21	33,1	0,7	1,6	716	-1157
10947	29.10.2012 14:20:31.200	141	5172	3467	70	1776,9	93,2	60,8	6,7	408	3,4	0	13,5	21	33,1	0,7	1,6	-703	1208
10948	29.10.2012 14:20:31.400	141	5172	3467	70	1776,9	93,2	60,8	6,7	408	3,4	0	13,5	21	33,1	0,7	1,6	-618	727
10949	29.10.2012 14:20:31.600	141	5172	3467	70	1776,9	93,2	60,8	6,7	408	3,4	0	13,5	21	33,1	0,7	1,6	-248	-1201
10950	29.10.2012 14:20:31.800	141	5172	3467	70	1776,9	93,2	60,8	6,7	408	3,4	0	13,5	21	33,1	0,7	1,6	-711	-554
11821	29.10.2012 14:23:26.0	154	5123	3703	80	1778,7	92,2	62,3	6,8	408	3,4	0	15,1	21,6	35	0,2	1,6	12	1294
11822	29.10.2012 14:23:26.200	154	5123	3703	80	1778,7	92,2	62,3	6,8	408	3,4	0	15,1	21,6	35	0,2	1,6	-197	162
11823	29.10.2012 14:23:26.400	154	5123	3703	80	1778,7	92,2	62,3	6,8	408	3,4	0	15,1	21,6	35	0,2	1,6	-188	-631
11824	29.10.2012 14:23:26.600	154	5123	3703	80	1778,7	92,2	62,3	6,8	408	3,4	0	15,1	21,6	35	0,2	1,6	-757	-1497
11825	29.10.2012 14:23:26.800	154	5123	3703	80	1778,7	92,2	62,3	6,8	408	3,4	0	15,1	21,6	35	0,2	1,6	132	1729
12366	29.10.2012 14:25:15.0	155	5123	3934	87	1779,6	91,7	64,4	7	408	3,4	0	15,1	21,9	36,7	0,6	1,6	548	-33
12367	29.10.2012 14:25:15.200	155	5123	3934	87	1779,6	91,7	64,4	7	408	3,4	0	15,1	21,9	36,7	0,6	1,6	680	1897
12368	29.10.2012 14:25:15.400	155	5123	3934	87	1779,6	91,7	64,4	7	408	3,4	0	15,1	21,9	36,7	0,6	1,6	137	1307
12369	29.10.2012 14:25:15.600	155	5123	3934	87	1779,6	91,7	64,4	7	408	3,4	0	15,1	21,9	36,7	0,6	1,6	46	-402
12370	29.10.2012 14:25:15.800	155	5123	3934	87	1779,6	91,7	64,4	7	408	3,4	0	15,1	21,9	36,7	0,6	1,6	270	-94
13976	29.10.2012 14:30:37.0	81	5125	3933	53	1779,7	93,7	68,6	7	414	3,4	0	16,2	21,9	40,4	0,8	1,7	481	-185
13977	29.10.2012 14:30:37.200	81	5125	3933	53	1779,7	93,7	68,6	7	414	3,4	0	16,2	21,9	40,4	0,8	1,7	822	2463
13978	29.10.2012 14:30:37.400	81	5125	3933	53	1779,7	93,7	68,6	7	414	3,4	0	16,2	21,9	40,4	0,8	1,7	463	-1306
13979	29.10.2012 14:30:37.600	81	5125	3933	53	1779,7	93,7	68,6	7	414	3,4	0	16,2	21,9	40,4	0,8	1,7	49	231
13980	29.10.2012 14:30:37.800	81	5125	3933	53	1779,7	93,7	68,6	7	414	3,4	0	16,2	21,9	40,4	0,8	1,7	-81	-676
18301	29.10.2012 14:45:02.0	76	5117	3929	51	1779,7	91,4	69	7	420	3	0	18,4	22,1	48,5	1	2,2	252	-113
18302	29.10.2012 14:45:02.200	76	5117	3929	51	1779,7	91,4	69	7	420	3	0	18,4	22,1	48,5	1	2,2	82	-268
18303	29.10.2012 14:45:02.400	76	5117	3929	51	1779,7	91,4	69	7	420	3	0	18,4	22,1	48,5	1	2,2	326	2474
18304	29.10.2012 14:45:02.600	76	5117	3929	51	1779,7	91,4	69	7	420	3	0	18,4	22,1	48,5	1	2,2	-226	-156
18305	29.10.2012 14:45:02.800	76	5117	3929	51	1779,7	91,4	69	7	420	3	0	18,4	22,1	48,5	1	2,2	-47	659
20141	29.10.2012 14:51:10.0	77	5115	3928	52	1779,7	91,1	69	7	419	3	0	19,1	22,7	50,2	1	2	396	-1948
20142	29.10.2012 14:51:10.200	77	5115	3928	52	1779,7	91,1	69	7	419	3	0	19,1	22,7	50,2	1	2	457	321
20143	29.10.2012 14:51:10.400	77	5115	3928	52	1779,7	91,1	69	7	419	3	0	19,1	22,7	50,2	1	2	119	409
20144	29.10.2012 14:51:10.600	77	5115	3928	52	1779,7	91,1	69	7	419	3	0	19,1	22,7	50,2	1	2	-364	387
20145	29.10.2012 14:51:10.800	77	5115	3928	52	1779,7	91,1	69	7	419	3	0	19,1	22,7	50,2	1	2	320	-2016
23850	29.10.2012 15:03:32.0	76	5117	3927	51	1779,7	91,4	69,1	7	419	2,5	-0,1	21	17,2	52,2	1,4	2,4	139	1355
23851	29.10.2012 15:03:32.200	76	5117	3927	51	1779,7	91,4	69,1	7	419	2,5	-0,1	21	17,2	52,2	1,4	2,4	382	1115
23852	29.10.2012 15:03:32.400	76	5117	3927	51	1779,7	91,4	69,1	7	419	2,5	-0,1	21	17,2	52,2	1,4	2,4	124	-680
23853	29.10.2012 15:03:32.600	76	5117	3927	51	1779,7	91,4	69,1	7	419	2,5	-0,1	21	17,2	52,2	1,4	2,4	-626	995
23854	29.10.2012 15:03:32.800	76	5117	3927	51	1779,7	91,4	69,1	7	419	2,5	-0,1	21	17,2	52,2	1,4	2,4	386	372
23855	29.10.2012 15:03:32.0	76	5117	3927	51	1779,7	91,4	69,1	7	419	2,5	-0,1	21	17,2	52,2	1,4	2,4	139	1355

Продовження додатку В

№ з/п	Час заміру	Антипомпажний параметр (%)	Оберти ТВТ (об/хв)	Оберти ТНТ (об/хв)	Перепад на конфузорі (кг/см^2)	Температура на вихлопі (^{0}C)	*P* гідравлічного масла (кг/см^2)	*P* на виході (кг/см^2)	*P* осьового компресора (кг/см^2)	Рівень масла в баці (мм)	Вібрація ПШ №1 (мм/с)	Вібрація ПШ №4 (мм/с)	Температура в приміщенні (^{0}C)	Температура в повітряному коробі (^{0}C)	Температура ПШ №1 (^{0}C)	dP1 ПЗК (мм.в.с)	dP2 ПЗК (мм.в.с)	Шум (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)	Вібрація (рівень запису -35 дБ) (16 бит-44,1 КГц) (16 бит-44,1 КГц)
26225	29.10.2012 15:11:27.0	74	5116	3928	50	1779,7	90,9	69,1	7	424	2,3	-0,1	22,2	16,4	52,9	1,2	2,2	-188	555
26226	29.10.2012 15:11:27.200	74	5116	3928	50	1779,7	90,9	69,1	7	424	2,3	-0,1	22,2	16,4	52,9	1,2	2,2	-468	797
26227	29.10.2012 15:11:27.400	74	5116	3928	50	1779,7	90,9	69,1	7	424	2,3	-0,1	22,2	16,4	52,9	1,2	2,2	-465	487
26228	29.10.2012 15:11:27.600	74	5116	3928	50	1779,7	90,9	69,1	7	424	2,3	-0,1	22,2	16,4	52,9	1,2	2,2	170	-1207
26229	29.10.2012 15:11:27.800	74	5116	3928	50	1779,7	90,9	69,1	7	424	2,3	-0,1	22,2	16,4	52,9	1,2	2,2	-19	-46
28040	29.10.2012 15:17:30.0	82	5113	3927	55	1779,7	91,1	69	7	424	2,4	-0,1	22,7	16,3	53,2	1,3	2,1	363	-2403
28041	29.10.2012 15:17:30.200	82	5113	3927	55	1779,7	91,1	69	7	424	2,4	-0,1	22,7	16,3	53,2	1,3	2,1	-494	336
28042	29.10.2012 15:17:30.400	82	5113	3927	55	1779,7	91,1	69	7	424	2,4	-0,1	22,7	16,3	53,2	1,3	2,1	-182	-315
28043	29.10.2012 15:17:30.600	82	5113	3927	55	1779,7	91,1	69	7	424	2,4	-0,1	22,7	16,3	53,2	1,3	2,1	477	2192
28044	29.10.2012 15:17:30.800	82	5113	3927	55	1779,7	91,1	69	7	424	2,4	-0,1	22,7	16,3	53,2	1,3	2,1	773	828
30895	29.10.2012 15:27:01.0	83	5114	3928	55	1779,8	90,5	68,9	7	425	2,1	-0,1	23,3	16,5	53,6	0,9	2,3	-500	115
30896	29.10.2012 15:27:01.200	83	5114	3928	55	1779,8	90,5	68,9	7	425	2,1	-0,1	23,3	16,5	53,6	0,9	2,3	231	-342
30897	29.10.2012 15:27:01.400	83	5114	3928	55	1779,8	90,5	68,9	7	425	2,1	-0,1	23,3	16,5	53,6	0,9	2,3	627	-1428
30898	29.10.2012 15:27:01.600	83	5114	3928	55	1779,8	90,5	68,9	7	425	2,1	-0,1	23,3	16,5	53,6	0,9	2,3	-182	-43
30899	29.10.2012 15:27:01.800	83	5114	3928	55	1779,8	90,5	68,9	7	425	2,1	-0,1	23,3	16,5	53,6	0,9	2,3	-702	2000
31450	29.10.2012 15:28:52.0	82	5114	3927	55	1779,8	90,5	68,9	7	425	2,2	-0,1	23,3	18,3	53,9	1	2,4	-454	1748
31451	29.10.2012 15:28:52.200	82	5114	3927	55	1779,8	90,5	68,9	7	425	2,2	-0,1	23,3	18,3	53,9	1	2,4	412	-1158
31452	29.10.2012 15:28:52.400	82	5114	3927	55	1779,8	90,5	68,9	7	425	2,2	-0,1	23,3	18,3	53,9	1	2,4	163	818
31453	29.10.2012 15:28:52.600	82	5114	3927	55	1779,8	90,5	68,9	7	425	2,2	-0,1	23,3	18,3	53,9	1	2,4	11	987
31454	29.10.2012 15:28:52.800	82	5114	3927	55	1779,8	90,5	68,9	7	425	2,2	-0,1	23,3	18,3	53,9	1	2,4	194	-2480
32480	29.10.2012 15:32:18.0	83	5114	3928	56	1779,8	90,5	68,9	7	424	2,1	0	23,8	17	54	1,5	2,2	399	-2070
32481	29.10.2012 15:32:18.200	83	5114	3928	56	1779,8	90,5	68,9	7	424	2,1	0	23,8	17	54	1,5	2,2	-283	1087
32482	29.10.2012 15:32:18.400	83	5114	3928	56	1779,8	90,5	68,9	7	424	2,1	0	23,8	17	54	1,5	2,2	-219	-406
32483	29.10.2012 15:32:18.600	83	5114	3928	56	1779,8	90,5	68,9	7	424	2,1	0	23,8	17	54	1,5	2,2	34	-422
32484	29.10.2012 15:32:18.800	83	5114	3928	56	1779,8	90,5	68,9	7	424	2,1	0	23,8	17	54	1,5	2,2	508	784
33700	29.10.2012 15:36:22.0	80	5115	3929	54	1779,8	90,6	68,9	7	425	2,1	0	24,1	16,1	54	1,2	2,4	334	640
33701	29.10.2012 15:36:22.200	80	5115	3929	54	1779,8	90,6	68,9	7	425	2,1	0	24,1	16,1	54	1,2	2,4	134	1115
33702	29.10.2012 15:36:22.400	80	5115	3929	54	1779,8	90,6	68,9	7	425	2,1	0	24,1	16,1	54	1,2	2,4	-382	244
33703	29.10.2012 15:36:22.600	80	5115	3929	54	1779,8	90,6	68,9	7	425	2,1	0	24,1	16,1	54	1,2	2,4	-210	-992
33704	29.10.2012 15:36:22.800	80	5115	3929	54	1779,8	90,6	68,9	7	425	2,1	0	24,1	16,1	54	1,2	2,4	-183	407
34920	29.10.2012 15:40:26.0	84	5118	3929	56	1779,8	90,2	68,9	7	424	2,1	0	24,3	17	54,3	1,1	2,5	-989	-97
31921	29.10.2012 15:40:26.200	84	5118	3929	56	1779,8	90,2	68,9	7	424	2,1	0	24,3	17	54,3	1,1	2,5	-157	-552
34922	29.10.2012 15:40:26.400	84	5118	3929	56	1779,8	90,2	68,9	7	424	2,1	0	24,3	17	54,3	1,1	2,5	-203	359
34923	29.10.2012 15:40:26.600	84	5118	3929	56	1779,8	90,2	68,9	7	424	2,1	0	24,3	17	54,3	1,1	2,5	766	-706
34924	29.10.2012 15:40:26.800	84	5118	3929	56	1779,8	90,2	68,9	7	424	2,1	0	24,3	17	54,3	1,1	2,5	-504	955
35980	29.10.2012 15:43:58.0	81	5114	3929	54	1779,8	90,8	68,9	7	424	1,9	-0,1	24,3	15	54,5	1,1	2,4	-456	1693
35981	29.10.2012 15:43:58.200	81	5114	3929	54	1779,8	90,8	68,9	7	424	1,9	-0,1	24,3	15	54,5	1,1	2,4	631	1611
35982	29.10.2012 15:43:58.400	81	5114	3929	54	1779,8	90,8	68,9	7	424	1,9	-0,1	24,3	15	54,5	1,1	2,4	-448	-97
35983	29.10.2012 15:43:58.600	81	5114	3929	54	1779,8	90,8	68,9	7	424	1,9	-0,1	24,3	15	54,5	1,1	2,4	-404	-949
35984	29.10.2012 15:43:58.800	81	5114	3929	54	1779,8	90,8	68,9	7	424	1,9	-0,1	24,3	15	54,5	1,1	2,4	-40	-518

Додаток Г

Основні технічні характеристики додаткових первинних вимірювальних перетворювачів

Таблиця Г.1

Технічні характеристики віброперетворювача Metrix SA6200A

Параметр	Значення
Діапазон частот	1,5 .. 7500 Гц (±10%) 0,7 .. 10000 Гц (±3дБ) 2 .. 5000Гц (±5%)
Резонансна частота	13000 Гц
Чутливість	100 mV/g±5%
Роздільна здатність	0,002 g
Поперечна чутливість	< 5%
Діапазон вимірювання	±50g
Корпус	Нержавіюча сталь 303SS, габарити 22,1*47,6мм, маса 91г
Температурний діапазон	-54°C .. +121°C
Живлення	18-28В постійного струму
Повний розмах вихідного сигналу	±5В
Захист від електромагнітних перешкод	RFI & ESD
Вибухобезпечне виконання	OExiaIICT3X

Продовження додатку Г

Таблиця Г.2

Технічні характеристики термоперетворювача опору ТСП-1388

Параметр	Значення
Діапазон вимірюваних температур	Від -50°С до +120°С
Клас допуску	В,С
Градуювання	50П
Умовний тиск вимірюваного середовища	0,4МПа
Приєднання	3-х провідне
Корпус	Латунь Л62, габарити (без провідників) 5*26мм

Таблиця Г .3

Технічні характеристики мікрофона з підсилювачем

Параметр	Значення
Тип мікрофона	Електретний
Чутливість	25 мВ/Па (-32 дБВ)
Частотна характеристика	20 Гц … 20 кГц
Полярна діаграма	Кардіоїда
Спад на НЧ	-10 дБ
Імпеданс	< 200 Ом
Рекомендоване навантаження	> 1000 Ом
Максимальний рівень звукового сигналу	150 дБ
Живлення	15-28В постійного струму
Корпус	Нержавіюча сталь 303SS, силумін АК12, габарити 105*124мм, маса 960г
Діапазон робочих температур °С	Від -10 до +80°С
Вибухозахищене виконання	1ExibIIBT4

ДОДАТОК Д

1.1Вхідний буфер

Для надійної роботи електретного мікрофона в якості вхідного буфера підсилення було використано спеціалізовану мікросхему для підсилення сигналу мікрофона CD4007 типова схема [1], включення якої зображено на рис. 1

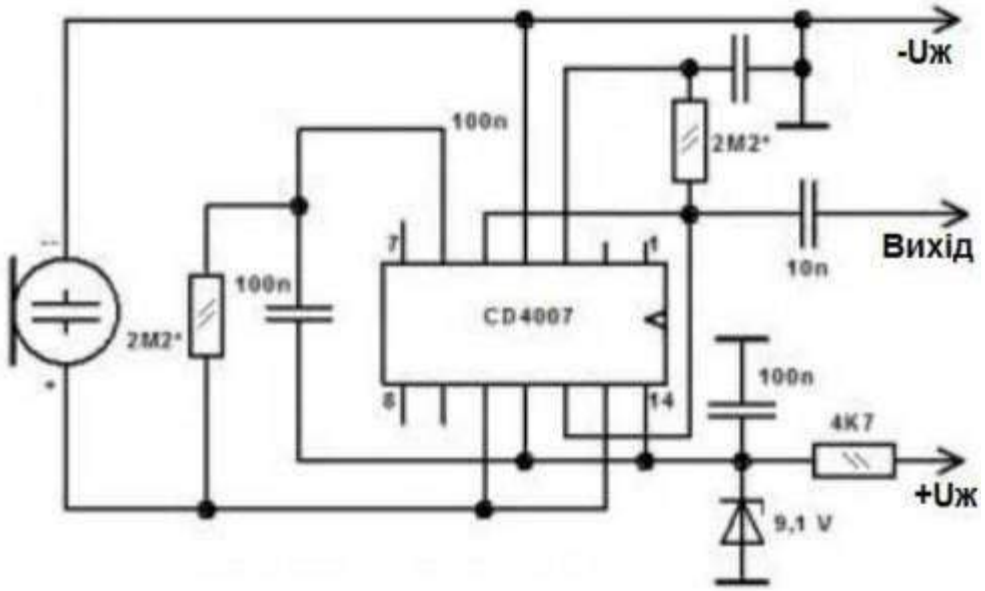


Рис. 1 - Схема включення мікрофона і підсилювача CD4007

Вхідний опір каскаду приймемо :

$$Rin := 200000 \quad [Ом]$$

Опір навантаження підсилювача для забезпечення потужності сигналу приймемо:

$$Rn := 100$$

Враховуючи, що стандартна напруга живлення для основних систем управління автоматики ГПА складає 24В, оберемо її в якості живлення:

Напруга живлення [В]: $Ucc := 24$

Як результат амплітуда вихідного сигналу [В]:

$$Um := \frac{(Ucc - 3)}{2} \qquad Um = 10.5$$

Враховуючи, що вихідна амплітуда вхідного попереднього підсилювача CD4007 становить 200мВ, розрахуємо коефіцієнт передачі за напругою для підсилювача, на основі заданого вихідного амплітудного значення, одержимо:

Коефіцієнт передачі за напругою підсилювача $Ku := \frac{Um}{0.2}$ $\quad Ku = 52.5$

Коефіцієнт передачі в дБ $Ku_ := 20*\log(Ku)$ $\quad Ku_ = 34.403$ [дБ]

1.2Розрахунок вихідного каскаду

Проведемо розрахунок вихідного емітерного повторювача, на основі заданого вихідного навантаження [2]. Амплітудне значення вихідного струму, одержимо як:

$$Im := \frac{Um}{Rn} \qquad Im = 0.105 \quad [A]$$

Амплітудне значення корисної вихідної потужності [Вт]:

$$Pm := Um \cdot Im \qquad Pm = 1.103$$

Задамо значення постійної складової струму колектра вихідного транзистора емітерного повторювача в 10 разів більшим, ніж амплітудне значення вихідного струму, для того, щоб навантаження не впливало на режим роботи емітерного повторювача:

$$Ik06 := 10 \cdot Im \qquad Ik06 = 1.05 \quad [A]$$

Виберемо в якості транзистора вихідного емітерного повторювача транзистор з максимальним струмом колектра Ikmax>1,5А. Таким транзистором є n-p-n транзистор КТ829Б.Мінімальне значення коефіцієнта підсилення по струму для такого транзистора складає [3]:

$$h21e6 := 750$$

Максимальне значення напруги колектор-емітер [В]:

$$Ukemax6 := 100 \ [В]$$

Максимальне значення струму колектора :

$$Ikmax6 := 8.0 \ [A]$$

Максимальне значення розсіюваної потужності :

$$Pmax6 := 60 \quad [Вт]$$

Зробимо перевірку можливості використання такого транзистора в каскаді емітерного повторювача, з забезпеченням 30-50% запасу по надійності. Для напруги колектор-емітер, 60% від максимально допустимого значення складає

$$Ukdop := 0.6 \cdot Ukemax6 \qquad Ukdop = 60 \quad [В]$$

Максимальне значення напруги, що може бути прикладене до такого транзистора, визначається, як подвійне значення напруги живлення :

$$Ucc = 24$$ Видно, що $Ucc < Ukdop$

Тобто за напругою транзистор працює в допустимому режимі.

Для струму колектора, 60% від максимально допустимого значення складає

$Ikdop := 0.6 \cdot Ikmax6$ $\quad Ikdop = 4.8$ [A]

Максимальне значення струму, що може бути прикладене до такого транзистора, визначається, як :

$Ik06 + Im = 1.155$ [A]: Видно, що $Ik04+Im<Ikdop$

Тобто за струмом транзистор теж працює в допустимому режимі.

Для розсіюваної потужності, 60% від максимально допустимого значення складає

$Pdop := 0.6 \cdot Pmax6$ $\quad Pdop = 36$ [Вт]

Максимальне значення потужності що може бути прикладене до такого транзистора, внаслідок дії розраховуваних струмів і напруг визначається так :

$(Ucc - Um) \cdot (Im + Ik06) = 15.593$ [Вт]

Видно, що $(Ucc - Um) \cdot (Im + Ik04) < Pdop$

Тобто за потужністю транзистор теж працює в допустимому режимі.

Для того, щоб емітерний повторювач можна було включити замість навантаження підсилювального каскаду на польовому транзисторі, у якого для досягнення великого підсилення робочі струми є в межах 0,1мА, треба, щоб вхід емітерного повторювача споживав струму по мінімуму. Тому зменшимо вхідний струм емітерного повторювача, шляхом використання складеного транзистора [4].

Тоді струм бази транзистора VT6 [A]:

$$Ib06 := \frac{Ik06}{h21e6} \qquad Ib06 = 1.4 \times 10^{-3}$$

Струм колектора транзистора VT5 [A]:

$$Ik05 := Ib06 \qquad Ik05 = 1.4 \times 10^{-3}$$

Виберемо в якості транзистора VT5 виберемо p-n-p транзистор КТ626А.Основні технічні характеристики транзистора наведені в додатку А. Середнє значення коефіцієнта підсилення по струму для такого транзистора складає:

$$h21e5 := 100$$

Максимальне значення напруги колектор-емітер [В]:

$$Ukemax5 := 45 \text{ [В]}$$

Максимальне значення струму колектора :

$$Ikmax5 := 0.5 \text{ [A]}$$

Оскільки живлення є однооополярним, виберемо :

$$Ue06 := \frac{Ucc}{2} \quad [В] \qquad Ue06 = 12$$

Звідси: $Ub05 := Ue06 + 1.2 \qquad Ub05 = 13.2$

Опір резистора R3:

$$R3 := \frac{|Ucc| - |Ub05|}{Is04} \qquad R3 = 7.714 \times 10^{4} \quad [Ом]$$

Виберемо опір R3 із стандартного ряду 75 кОм

$$R3 := 75 \cdot 10^{3} \qquad [Ом]$$

Потужність, що розіюється на резисторі :

$$Pr3 := (Ucc - Ub05) \cdot Is04$$

$$Pr3 = 1.512 \times 10^{-3} \quad [Вт]$$

Вибираємо резистор МЛТ-0,25Вт-75kОм-10%

Внутрішній опір емітерного переходу транзисторів VT5,6 визначиться як:

$$re5 := \frac{25}{(Ik06 \cdot 1000)} \qquad re5 = 0.024 \quad [Ом]$$

Опір резистора R6:

$$R6 := \frac{|Ue06|}{Ik06} \qquad R6 = 11.429 \quad [Ом]$$

Виберемо опір R6 із стандартного ряду: $R6 := 11 \quad [Ом]$

Потужність, що розіюється на резисторі : $Pr6 := (Ue06) \cdot Ik06$

$$Pr6 = 12.6 \quad [Вт]$$

Вибираємо резистор R6 20Вт, 11Ом

1.3 Розрахунок проміжного підсилювального каскаду

Виберемо в якості активного елемента транзистор КП303А. Зробимо перевірку допустимості використання такого транзистора [6].

Максимальне значення напруги витік-стік [В]:

$Uvsmax4 := 25$ [В]

Максимальне значення струму колектора :

$Ismax4 := 0.1$ [А]

Максимальне значення розсіюваної потужності :

$Pmax4 := 0.3$ [Вт]

Крутизна ПТ : $s := 2.9 \cdot 10^{-3}$ [А/В]

Порогове значення напруги відсічки : $U0 := 2.3$ [В]

Початковий струм : $Is4poch := 4 \cdot 10^{-3}$ [А]

Зробимо перевірку можливості використання такого транзистора в каскаді підсилювача, з забезпеченням 30% запасу по надійності. Для напруги колектор-емітер, 70% від максимально допустимого значення складає

$Ucdop := 0.7 \cdot Uvsmax4$ $Ucdop = 17.5$ [В]

Максимальне значення напруги, що може бути прикладене до такого транзистора, визначається, як значення напруги живлення :

$Ucc = 24$ Видно, що $Ucc < Ucdop$

Тобто за напругою транзистор працює в допустимому режимі.

Для струму стоку 70% від максимально допустимого значення складає

$Isdop := 0.7 \cdot Ismax4$ $Isdop = 0.07$ [А]

Максимальне значення струму, що може бути прикладене до такого транзистора, визначається, як :

$Is04 = 1.4 \times 10^{-4}$ [А] Видно, що $Is04 < Isdop$

Тобто за струмом транзистор теж працює в допустимому режимі.

Для розсіюваної потужності, 70% від максимально допустимого значення складає

$Pdop := 0.7 \cdot Pmax4$ $Pdop = 0.21$ [Вт]

Максимальне значення потужності що може бути прикладене до такого транзистора, внаслідок дії розраховуваних струмів і напруг визначається так :

Виберемо в якості активного елемента транзистор КП303А. Зробимо перевірку допустимості використання такого транзистора [6].

Максимальне значення напруги витік-стік [В]:

$Uvsmax4 := 25$ [В]

Максимальне значення струму колектора :

$Ismax4 := 0.1$ [А]

Максимальне значення розсіюваної потужності :

$Pmax4 := 0.3$ [Вт]

Крутизна ПТ : $s := 2.9 \cdot 10^{-3}$ [А/В]

Порогове значення напруги відсічки : $U0 := 2.3$ [В]

Початковий струм : $Is4poch := 4 \cdot 10^{-3}$ [А]

Зробимо перевірку можливості використання такого транзистора в каскаді підсилювача, з забезпеченням 30% запасу по надійності. Для напруги колектор-емітер, 70% від максимально допустимого значення складає

$Ucdop := 0.7 \cdot Uvsmax4$ $Ucdop = 17.5$ [В]

Максимальне значення напруги, що може бути прикладене до такого транзистора, визначається, як значення напруги живлення :

$Ucc = 24$ Видно, що $Ucc < Ucdop$

Тобто за напругою транзистор працює в допустимому режимі.

Для струму стоку 70% від максимально допустимого значення складає

$Isdop := 0.7 \cdot Ismax4$ $Isdop = 0.07$ [А]

Максимальне значення струму, що може бути прикладене до такого транзистора, визначається, як :

$Is04 = 1.4 \times 10^{-4}$ [А] Видно, що $Is04 < Isdop$

Тобто за струмом транзистор теж працює в допустимому режимі.

Для розсіюваної потужності, 70% від максимально допустимого значення складає

$Pdop := 0.7 \cdot Pmax4$ $Pdop = 0.21$ [Вт]

Максимальне значення потужності що може бути прикладене до такого транзистора, внаслідок дії розраховуваних струмів і напруг визначається так :

$$(Ucc)\cdot(Is04) = 3.36\times 10^{-3}$$

Тобто за потужністю транзистор працює в допустимому режимі.

Витоковий резистор R9 розраховується з умови забезпечення автоматичного зміщення ПТ VT4. При цьому через цей ПТ повинен протікати вибраний струм стоку. Напруга автозміщення Uv4:

$$Uv4 := U0\cdot\left(1-\sqrt{\frac{Is04}{Is4poch}}\right) \qquad Uv4 = 1.87$$

Витоковий резистор R9 розраховується:

$$R9 := \frac{Uv4}{Is04} \qquad R9 = 1.336\times 10^{4}$$

Виберемо опір R9 із стандартного ряду:

$$R9 := 13\cdot 10^{3} \qquad [Ом]$$

Потужність, що розіюється на резисторі :

$$Pr9 := (Uv4)\cdot Is04$$

$$Pr9 = 2.618\times 10^{-4} \quad [Вт]$$

Вибираємо резистор МЛТ-0,25Вт-13kОм-10%

Коефіцієнт передачі за напругою для каскаду із спільним витоком :

$$K := \frac{s\cdot R3}{1+s\cdot R9} \qquad K = 5.62$$

Збільшимо цей коефіцієнт, зашунтувавши резистор R9 конденсатором 100мкФ.

На нижній робочій частоті опір конденсатора буде складати:

$$Zc := \frac{1}{2\cdot\pi\cdot 20\cdot 100\cdot 10^{-6}} \qquad Zc = 79.577 \qquad [Ом]$$

Паралельно з R9 опір шунтуючого конденсатора буде складати :

$$Zcr9 := \frac{Zc\cdot R9}{Zc+R9} \qquad Zcr9 = 79.093 \qquad [Ом]$$

Тоді коефіцієнт передачі за напругою для каскаду із спільним витоком :

$$K2 := \frac{s\cdot R3}{2} \qquad K2 = 108.75$$

Для фіксації потенціалу затвору використано резистор R8 з опором 1МОм, який і визначає вхідний опір розраховуваного каскаду.

1.4 Розрахунок вхідного диференційного каскаду

Застосування польових транзисторів в якості підсилювальних елементів дає можливість розраховувати каскади окремо один від одного. Так зробимо, оскільки вхідний опір каскаду на ПТ становить > 1МОм, і узгодження по опорам можна одержати автоматично. Розрахунок схеми диференційного каскаду на польових транзисторах здійснити просто. Виберемо струм стоків транзисторів VT1,VT2 по

$$Is0 := 0.15 \cdot 10^{-3} \quad [A]$$

Для формування такого струму, який буде рівномірно розподілятись між транзисторами, застосуємо генератор струму на ПТ VT3 типу КП303А.

Витоковий резистор R10 розраховується з умови забезпечення автоматичного зміщення ПТ VT3. При цьому через цей ПТ повинен протікати вибраний струм стоку. Напруга автозміщення Uv3:

$$Uv3 := U0 \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{2Is0}{Is4poch}}\right) \qquad Uv3 = 1.67$$

Витоковий резистор R10 розраховується:

$$R10 := \frac{Uv3}{2Is0} \qquad R10 = 5.567 \times 10^{3}$$

Виберемо опір R10 із стандартного ряду:

$$R10 := 5.6 \cdot 10^{3} \quad [Ом]$$

Потужність, що розіюється на резисторі :

$$Pr10 := (Uv3) \cdot 2Is0$$

$$Pr10 = 5.01 \times 10^{-4} \quad [Вт]$$

Вибираємо резистор МЛТ-0,125Вт-5,6kОм-10%

Стокові резистори R1,R2 розраховуються з умови одержання максимального коефіцієнта підсилення за напругою. Оскільки цей каскад є першим, то амплітуда його вихідного сигналу буде ще маленькою, а тому напругу Us0 для польових транзисторів можна взяти нижчою до "землі". Таким чином для одержання такої напруги Us0 треба забезпечити великий спад напруги на резисторах R1,R2, що призводить до збільшення їх опорів. Нехай

$$Us0 := 2.9 \quad [B]$$

$$R1 := \frac{Ucc - Us0}{Is0} \qquad R1 = 1.407 \times 10^{5}$$

Виберемо опори R1 і R2 із стандартного ряду:

$$R1 := 130 \cdot 10^{3} \quad [Ом]$$

Потужність, що розіюється на резисторі :

$$Pr1 := (Ucc - Us0) \cdot Is0$$

$$Pr1 = 3.165 \times 10^{-3} \quad [Вт]$$

Вибираємо резистор МЛТ-0,125Вт-130kОм-10%

Тоді коефіцієнт передачі за напругою для диф.каскаду на ПТ :

$$K1 := s \cdot R1$$

1.5 Розрахунок кола від'ємного зворотного зв'язку

Коефіцієнт передачі за напругою для всього підсилювача

$$Kz := K1 \cdot K2 \cdot 0.9 \qquad Kz = 3.69 \times 10^{4} \qquad Ku = 52.5$$

Зробимо перевірку моделі розрахованого підсилювача в MicroCap-i. Таке значне неспівпадіння можна пояснити низькою напругою живлення та використанням при цьому складених транзисторів.

Для досягнення коефіцієнта передачі за напругою коефіцієнт передачі кола ВЗЗ повинен складати:

$$\beta := \frac{Kz - Ku}{Kz \cdot Ku} \qquad \beta = 0.019$$

Нехай опір R5 буде складати

$$R5 := 1000 \qquad [Ом]$$

Тоді опір R11 $\qquad R11 := \frac{R5 \cdot (1 - \beta)}{\beta} \qquad R11 = 5.157 \times 10^{4}$

Виберемо R11 $\qquad R11 := 51 \cdot 10^{3}$

Вибираємо резистор R11 МЛТ-0,125Вт-51kОм-10%

Вибираємо резистор R5 МЛТ-0,125Вт-1kОм-10%

1.6 Моделювання розрахунку в середовищі Micro-CAP 7

Проведмо перевірку роботи схеми в цілому при вхідному сигналі амплітудою 1мВ. За допомогою програми Micro-Cap 7. Результати моделювання, наведені на рисунках нижче.

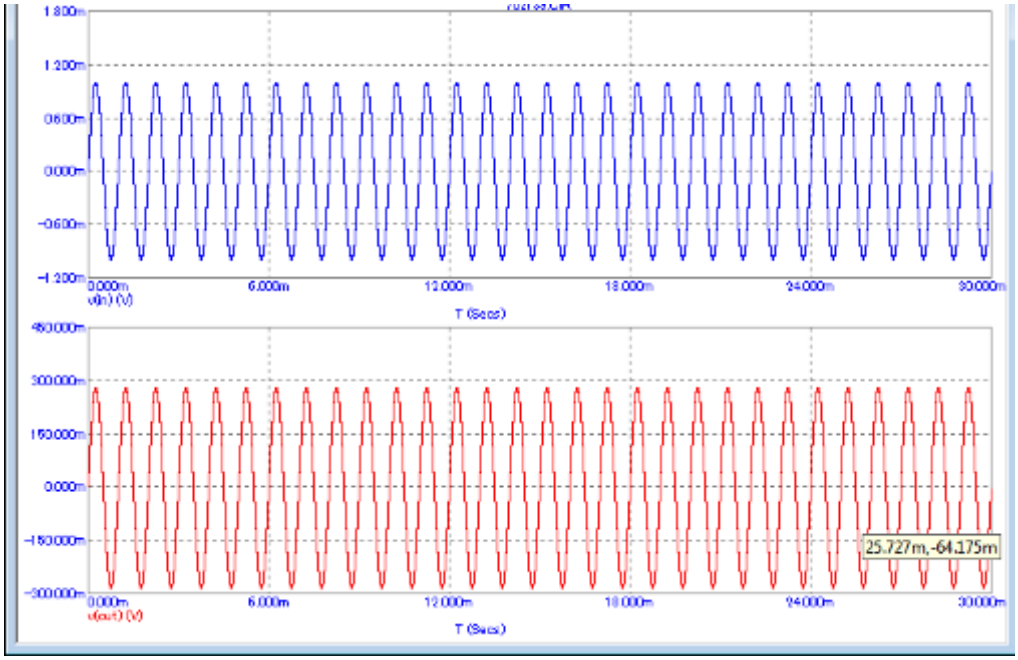


Рисунок 1.2 - Перевірка працездатності схеми. Посилення гармонічного сигналу

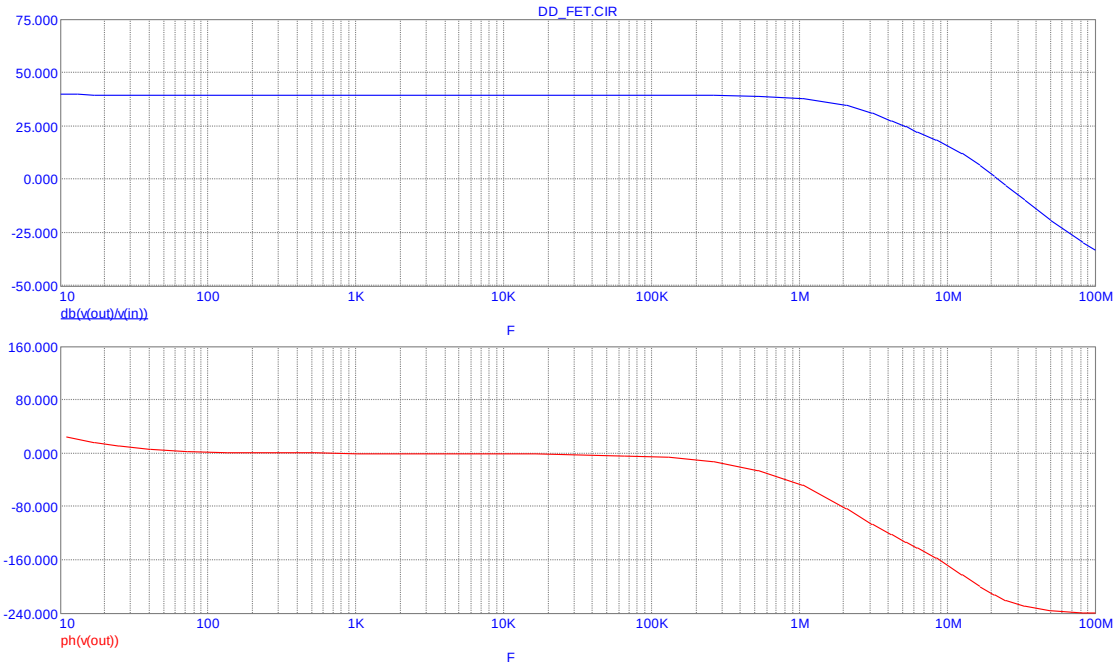


Рисунок 1.3 - АЧХ і ФЧХ підсилювача, охопленого від’ємним зворотнім зв’язком

Графіки підтверджують стійкість підсилювача до збурень а також підтверджують розрахований коефіцієнт підсилення (52.5). Графік коефіцієнту гармонік зображено нижче.

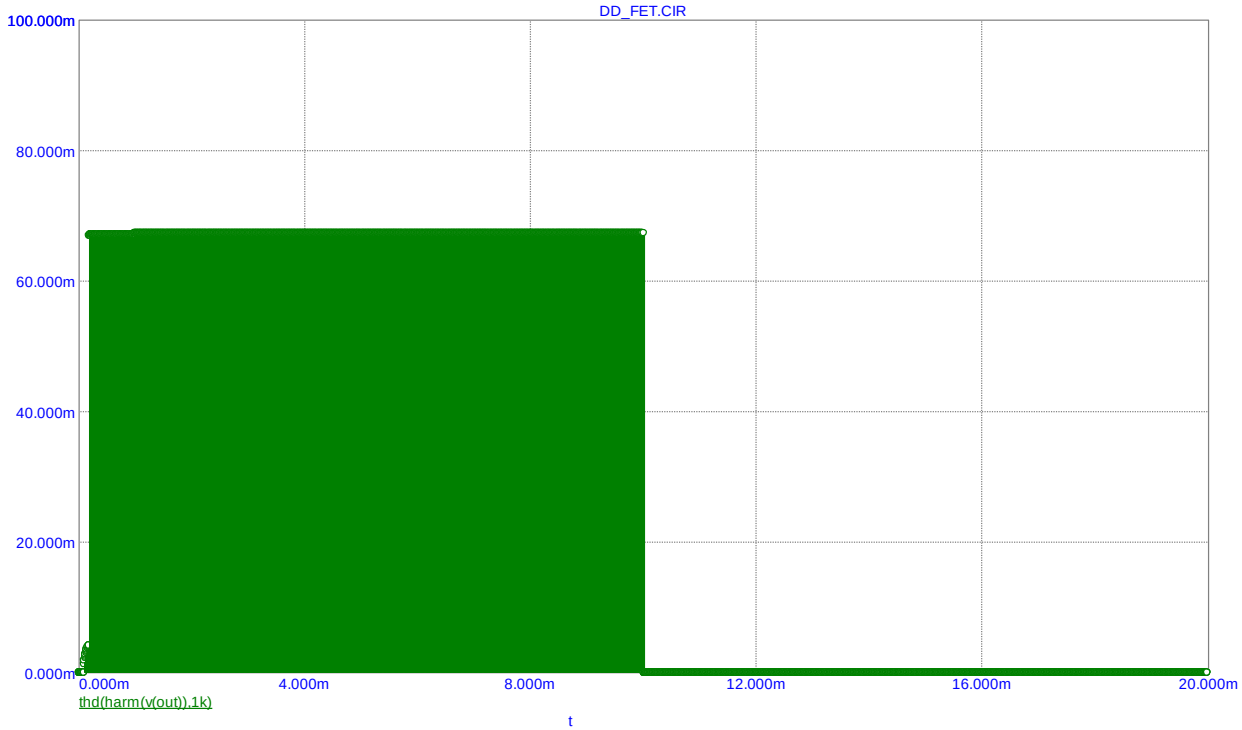


Рисунок 1.4 - Коефіцієнт гармонік проектованого підсилювача, %

Нижче представлено схему електричну схему підсилювача сигналу мікрофона.

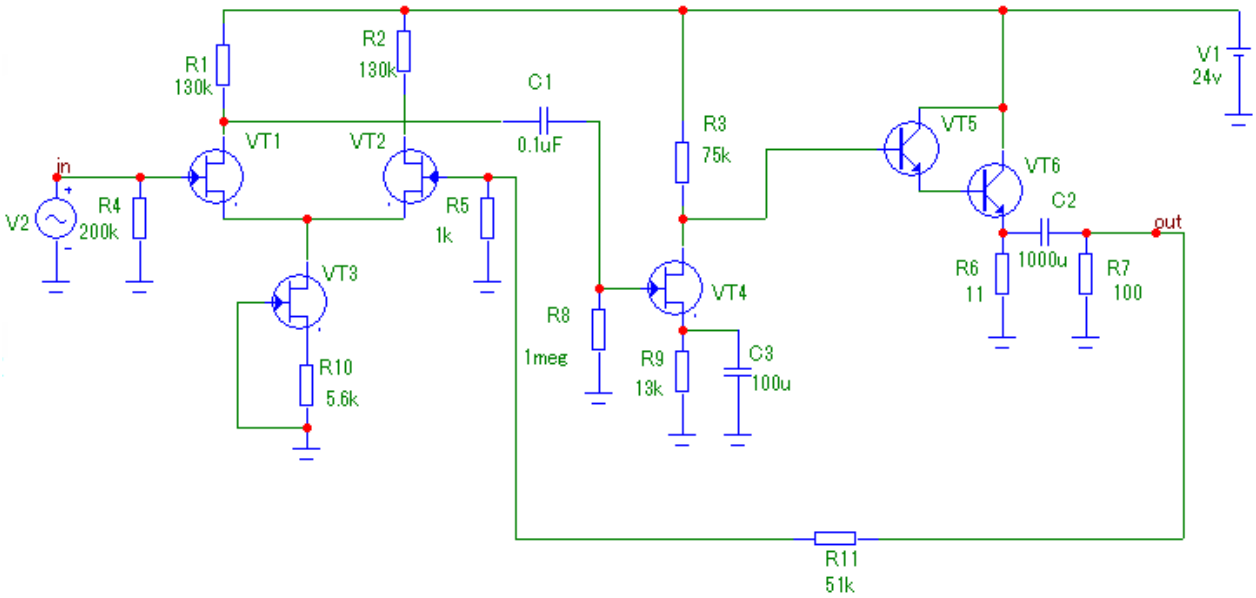


Рисунок 1.5 – Схема електрична принципова

Продовження додатку Д

ЛІТЕРАТУРА

1. Шило В.Л. Линейные интегральные схемы в радиоэлектронной аппаратуре. В.Л. Шило. М. 1979. 368с.

2. Гальперин М.В. Практическая схемотехника в промышленной автоматике. М.В. Гальперин. М. 1987. 320с.

3. Гринфилд Дж. Транзисторы и линейные ИС: Руководство по анализу и расчету. Дж. Гринфилд. Пер. с англ. М. 1992. 560 с.

4. Хоровиц П. Искусство схемотехники. П. Хоровиц, У. Хилл. Т1-Т2. М. 1983.

5. Войшвилло Г.В. Усилительные устройства: Учебник для вузов. Г.В. Войшвилло. М. 1983. 264с.

6. Титце У. Полупроводниковая схемотехника. У. Титце, К. Шенк. Пер. с англ. М. 1982. 512с.

Додаток Е

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник головного інженера ТОВ «Оператор газотранспортної системи України» з експлуатації (Західний регіон)

_____ **Костів В.В.**

«12» серпня 2020 р.

АКТ

Ми, що нижче підписались, представники Богородчанського ЛВУМГ: начальник КС-39 «У-П-У» Матієшин М.М., інженер 1-ї категорії з ремонту Ковалів А.В., інженер 1-ої категорії з пожежної безпеки Мельницький І.О. та представники кафедри Інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем (ІТТС) Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ): д.т.н., професор Заміховський Л.М., асистент Іванюк Н.І. та здобувач Павлик В.В. склали цей акт в тому, що за участі фахівців кафедри ІТТС та здобувача кафедри Павлика В.В. на КС -39 "У-П-У" було виконано:

- на основі проведеної часткової модернізації системи автоматичного управління ГПА через інтеграцію в щитах керування сучасних мікропроцесорних регуляторів-реєстраторів, встановлення додаткових первинних вимірювальних перетворювачів, здійсненої інсталяції та конфігурації програмно-технічних засобів (з розробкою мнемосхем, графічних додатків візуалізації, архівації технологічних параметрів), було розроблено та впроваджено систему моніторингу і контролю стану ГПА ГТК-25і. Експлуатація розробленої системи протягом 2012-2020 років підтвердила свою ефективність і може бути рекомендована до застосування на ГПА з газотурбінним приводом в ТОВ «ОГТСУ»;
- розроблено метод діагностування САУ ГТК-25і та методи діагностування ГТК-25і на основі дискримінантного аналізу, вейвлет-перетворення та штучних нейронних мереж, які базуються на результатах обробки акустичних процесів, що супроводжують роботу ГТК-25і. Апробація вказаних методів протягом 2017 – 2020 років показала їх ефективність. Подальше використання вказаних методів можливе на основі їх інтеграції в існуючу систему моніторингу і контролю стану ГПА ГТК-25і;
- розроблено систему діагностування лопатевого апарату ГПА, основу якої складає вібраційний модуль для вимірювання параметрів вібрації SM1281 Condition Monitoring SM1281 (розробка концерну Siemens) з комплектом акселерометрів (промисловий стандарт для акселерометрів IEPE – Integrated Electronics Piezo-Electric) та програмований логічний контролер PLC Simatic S7-1200 (CPU 1212C AC/DC/Rly), яка може використовуватися також для попередження протипомпажних явищ. Система пройшла промислову апробацію на КС-39 «У-П-У» протягом 2019 року, показала свою ефективність і може бути рекомендована до застосування на ГПА з газотурбінним приводом в ТОВ «ОГТСУ».

Від Богородчанського ЛВУМГ:

_____ Матієшин М.М.
_____ Ковалів А.В.
_____ Мельницький І.О.

Від ІФНТУНГ:

_____ Заміховський Л.М.
_____ Іванюк Н.І
_____ Павлик В.В.

Додаток Є

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник Долинського ЛВУМГ

_____ Бойко В.Т.

«18» липня 2019 року

АКТ

Ми, що нижче підписалися, представники від Долинського ЛВУМГ начальник компресорної станції КС-3 Гуріненко Володимир Михайлович та інженер газокомпресорної станції 1-ої категорії Кульчицький Андрій Васильович з одного боку, і представники кафедри Інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем (ІТТС) Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) завідувач кафедри д.т.н., професор Заміховський Леонід Михайлович та здобувач кафедри Павлик Володимир Васильович, з другого боку, склали цей акт в тому, що розроблені на кафедрі ІТТС методи діагностування технічного стану ГПА ГТК-25і на базі дискримінантного аналізу та wavelet-перетворення пройшла промислову апробацію при проведенні досліджень вібраційного стану ГПА-Ц-16С на КС-3 відповідно до програми проведення експериментальних досліджень (затверджена начальником Долинського ЛВУМГ від 24.07.2017 року) в період з липня 2017 року по вересень 2019 року, результати якої показали, що розроблені методи діагностування для ГПА ГТК-25і можуть бути використані при діагностуванні технічного стану ГПА-Ц-16С.

Від Долинського ЛВУМГ

Начальник КС-3

_____ Гуріненко В.М.

Інженер ГКС 1-ої категорії

_____ Кульчицький А.В.

Від ІФНТУНГ

Завідувач кафедри ІТТС, д.т.н., проф.

_____ Заміховський Л.М.

здобувач кафедри ІТТС

_____ Павлик В.В.

Додаток Ж

ЗАТВЕРДЖУЮ
перший проректор ІФНТУНГ,
д.т.н., професор
Мандрик О.М.
19 05 2020 р.

АКТ

впровадження матеріалів дисертації «Комплексний метод контролю технічного стану відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів» здобувача кафедри інформаційно-телекомунікаційних технологій і систем Павлика В. В. в навчальний процес

Ми, що нижче підписалися, директор інституту інформаційних технологій, д.т.н., проф. І.З. Лютак, завідувач кафедри Інформаційно-телекомунікаційних технологій і систем, д.т.н., проф. Заміховський Л.М. та здобувач кафедри Інформаційно-телекомунікаційних технологій і систем Павлик В.В., склали цей акт в тому, що матеріали дисертаційної роботи «Комплексний метод контролю технічного стану відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів» впроваджені в навчальний процес при вивченні дисциплін «Обєкти і процеси управління в нафтогазовому комплексі», «Основи теорії надійності і технічної діагностики систем», «Проектування систем діагностування» та «Діагностування компютеризованих систем управління» освітньо-професійних програм «Комп'ютеризовані системи управління та автоматика» першого та другого рівнів вищої освіти за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.

Директор Інституту інформаційних технологій, д.т.н., проф. І.З. Лютак
Завідувач кафедри ІТТС, д.т.н., проф. Л.М. Заміховський
Здобувач В.В. Павлик