

## **ВІДЗИВ**

**офіційного опонента на дисертаційну роботу Іванюк Наталії Іванівни "Вібраційний контроль технічного стану лопатевого апарату газоперекачувальних агрегатів", поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин.**

**1. Актуальність теми.** Довготривала експлуатація газотранспортної системи (ГТС) України (понад 40 років) призвела до того, що більше ніж 70% газоперекачувальних агрегатів (ГПА) з газотурбінним приводом вичерпали свій ресурс (в межах 100 тис. год.). При цьому ГПА є основними агрегатами компресорних станцій (КС) і від їх надійної роботи залежить ефективність експлуатації всієї ГТС України. В той же час, ресурс окремих деталей і вузлів значно менший. Так, для лопатей агрегатних вузлів ГПА назначений ресурс варіює в діапазоні від 18 до 80 тис. год. Таким чином, лопатевий апарат (ЛА) агрегатних вузлів ГПА є основним елементом, надійність роботи якого визначає як надійність і ефективність роботи ГПА, так і КС в цілому.

Як свідчить статистика, на відмови ЛА припадає близько половини усіх дефектів і відмов по механічній частині ГПА викликаних значними статичними, динамічними (вібраційними) і температурними навантаженнями, що зумовлює зміну його експлуатаційних характеристик і вібраційного стану та призводять до значних матеріальних витрат. В свою чергу, зміна вібраційного стану ГПА призводить до виникнення явища помпажу і прискореного руйнування ЛА. При цьому для попередження виникнення дефектів і відмов ЛА ГПА розроблена значна кількість методів їх контролю і діагностики. Однак, вони мають обмежене застосування і функції їх є недостатніми для забезпечення надійності лопатевого апарату ГПА в процесі його експлуатації.

У зв'язку з цим, вдосконалення уже існуючих методів та розробка нових методів контролю вібраційного стану ЛА, що базуються, зокрема, на методах прямого аеродинамічного розрахунку профілів крила стосовно лопатей ГПА, а також розробка на базі сучасних апаратно-програмних засобів систем для реалізації запропонованих методів та попередження помпажних явищ є актуальною науково-практичною задачею.

**2. 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, у яких здобувач брала безпосередню участь, як відповідальний виконавець.

**3. Наукова новизна результатів досліджень.** До наукової новизни результатів, отриманих в процесі проведення теоретико-експериментальних досліджень, можна віднести такі положення:

- вперше створено математичну модель процесу обтікання лопатей ГПА з використанням інтегрального рівняння Фредгольма II роду та розроблено чисельний метод її реалізації, що дозволяє, на відміну від існуючих методів контролю ЛА ГПА, визначати аеродинамічні характеристики лопаті та контролювати їх зміну при зміні геометрії (технічного стану) лопатей;

- вперше запропоновано новий метод математичної параметризації зміни геометрії лопаті (технічного стану) з використанням інтерполяційних многочленів Ерміта, що дозволяє одержати точнішу, в порівнянні з існуючими, методику відтворення геометрії лопаті та контролювати технічний стан лопаті шляхом розрахунку параметрів процесу її обтікання;

- отримала подальший розвиток екстраполяційна модель прогнозування явища помпажу ГПА, реалізація якої з використанням розробленої системи контролю вібраційного стану ЛА ГПА дозволяє, на відміну від існуючих систем антипомпажного захисту ГПА, попередити виникнення помпажу при послідовній роботі двох КС;

- удосконалено метод оцінки впливу геометрії лопаті (її технічного стану) на характер вібраційних процесів, що відбуваються в ГПА при різних математичних описах цих процесів, шляхом урахування зміни площі поперечного перерізу та моментів інерції лопаті.

**4. Практична цінність одержаних результатів.** Розробка чисельного алгоритму методу контролю стану ЛА, алгоритму прогнозування явища помпажу на основі зміни технологічних параметрів роботи ГПА, системи контролю вібраційного стану ГПА і її програмного забезпечення в середовищі TIA Portal та методики контролю технічного стану ЛА ГПА в процесі експлуатації, яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір №52020, і визначають практичну корисність дисертаційної роботи. Розроблений метод та система вібраційного стану ЛА ГПА пройшли промислову апробацію і рекомендовані до впровадження. Крім того, результати теоретичних та

експериментальних досліджень впроваджено у навчальному процесі ІФНТУНГ, зокрема, для студентів, які навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» за освітньою програмою «Комп'ютеризовані системи управління та автоматика». На усі впровадження є відповідні акти.

### **5. Обґрунтованість і достовірність наукових результатів.**

Основні наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані у дисертації, є добре обґрунтованими, базуються на використанні основних положень віброакустичної діагностики машин, чисельних методів розв'язку інтегральних рівнянь, методів: інтерполяції з використанням многочленів Ерміта; апроксимації кривих за відомою структурою; мематематичної фізики для опису різних режимів коливальних процесів; математичного аналізу для оцінки геометричних характеристик та моментів інерції; спектрального аналізу та обробки сигналів. Крім того, під час розробці системи діагностування використовувались методи системо- і схемотехніки.

Достовірність викладених в дисертаційній роботі наукових результатів підтверджується: наведеними результатами моделювання процесу зміни геометрії лопаті (її технічного стану) на базі запропонованого методу математичної параметризації з використанням інтерполяційних многочленів Ерміта та реальних геометричних параметрів лопатей агрегатних вузлів ГПА; результатами поставлених експериментів при роботі ГПА-Ц-16С в режимі «Кільце», які підтверджують обґрунтованість та ефективність розроблених методів контролю стану ГПА та прогнозування явища помпажу. При цьому об'єктом наукових досліджень в дисертаційній роботі є процес зміни вібраційного стану ГПА, який викликаний розвитком дефектів його ЛА, що призводить до зниження ефективності роботи ГПА та виникнення аварійних ситуацій і явища помпажу. Тому в роботі основна увага приділена розробці методу і системи вібраційного контролю технічного стану ГПА, використання яких дозволить забезпечити надійність і ефективність експлуатації ГПА та попередити виникнення явища помпажу за рахунок оперативної і достовірної інформації про фактичний технічний стан його ЛА.

### **6. Загальна характеристика структури і змісту дисертаційної роботи та автореферату**

Дисертаційна робота Іванюк Н.І. включає вступ, п'ять розділів та висновки, основний зміст яких викладено на 210 сторінках тексту. Робота містить 80 рисунків, 18 таблиць, список використаних джерел з 133 найменувань та додатки, які викладені на 110 сторінках.

**У вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційних досліджень, сформульовано мету та задачі, викладено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів досліджень, надано інформацію про їх впровадження, апробацію, публікацію та структуру дисертації.

**У першому розділі** проаналізовані дослідження сучасних тенденцій та досягнень вітчизняних і зарубіжних вчених, науково-дослідних організацій, фірм та компаній у галузі контролю та діагностування технічного стану ЛА ГПА.

Наводиться аналіз ГПА з точки зору об'єкту контролю. Аналізуються причини і фактори, що зумовлюють виникнення дефектів і відмов ЛА ГПА, основні з яких викликані значними статичними, динамічними (вібраційними) і температурними навантаженнями. Представлена класифікація методів контролю і діагностування ЛА ГПА і їх аналіз, який показав, що методи прямого аеродинамічного розрахунку профілів стосовно лопатей ГПА, є перспективними і вимагають подальшого теоретичного обґрунтування. Проведений аналіз технічних засобів контролю стану ЛА ГПА визначив перспективність використання сучасних апаратно-програмних засобів при розробці систем контролю стану ЛА ГПА та їх роботи в режимі антипомпажного захисту.

На основі проведеного аналізу сформульовано основні завдання та напрямки дисертаційних досліджень.

**У другому розділі** розглядаються теоретичні передумови методу контролю технічного стану ЛА на основі методу прямого аеродинамічного розрахунку профілів лопатей ГПА. Створено математичну модель процесу обтікання лопаті агрегатного вузла ГПА з використанням інтегрального рівняння Фредгольма II роду та розроблено чисельний метод її реалізації, що дозволяє визначати аеродинамічні характеристики лопаті та оцінювати їх зміну при зміні її конфігурації. Розглядається спосіб математичної параметризації змінного профілю лопаті з використанням інтерполяційних многочленів Ерміта, використання якого дозволяє одержати методику розрахунку параметрів обтікання лопатей різних конфігурацій.

**В третьому розділі** розробляється програмне забезпечення методу контролю ЛА ГПА. Наводиться програмний продукт, який дозволяє заносити технічні показники лопаті у базу, обробляти їх згідно розробленого математичного апарату, виводити змодельований профіль лопаті, обчислювати площу та момент інерції лопаті та виводити процес вільних і вимушених коливань лопаті. Це дозволяє відображати геометричні параметри лопаті до експлуатації та під час неї, що надає змогу оцінити ступінь її зносу та вжити відповідні заходи.

**В четвертому розділі** наводяться експериментальні дослідження вібраційного стану ЛА на прикладі ГПА Ц-16-С, які проведені на базі розробленого їх методичного, технічного і програмного забезпечення.

Розглядається методика проведення дослідження вібраційного стану лопатей вхідного напрямного апарату (ВНА), технічне забезпечення досліджень на базі апаратно-програмних засобів концерну Siemens та використання програмного забезпечення SIPLUS Condition Monitoring System (CMS) X-Tools для аналізу записаних вібраційних процесів ГПА. Наводиться процедура обробки віброграм з подальшою побудовою частотного спектру. Аналізуються частотні спектри ГПА-16С, отримані для різних його агрегатних вузлів та при різних режимах роботи, а також статистичні характеристики вібраційного процесу ГПА-Ц-16С. Основна увага приділяється дослідженню вібраційного стану ВНА, зокрема, дослідженню залежності кута повороту ВНА від частоти його обертання, а також залежності тиску на виході компресора високого тиску (КВТ) від кута повороту ВНА та частоти обертання КВТ, компресора низького тиску (КНТ) та турбіни нагнітача (ТН). Також обґрунтовується вибір діагностичних ознак вібраційного стану ЛА ВНА.

**В п'ятому розділі** наводиться розробка системи антипомпажного захисту ГПА-Ц-16С шляхом вдосконалення системи вібраційного контролю, а також процедура прогнозування процесу виникнення явища помпажу при послідовній роботі двох КС з використанням екстраполяційної моделі на основі поліному Лагранжа. Розглядаються розроблені функціональний блок FB1 «Program» для виконання прогнозування передпомпажного стану ГПА та функціональний блок FB1 «Program» для виконання прогнозування передпомпажного стану ГПА і підсистема керування станційним антипомпажним клапаном. Аналізуються отримані вирази для показника готовності роботи, виходячи з періодичного та неперервного контролю вібраційного стану ГПА-Ц-16С, а також залежність показника готовності від періоду контролю. Наводяться результати промислової апробації розробленого методу та системи контролю вібраційного стану ЛА ГПА.

Таким чином, виконаний обсяг робіт забезпечив вирішення поставленої мети – забезпечення надійності і ефективності експлуатації ГПА та попередження помпажних явищ за рахунок оперативної і вірогідної інформації про фактичний технічний стан його ЛА, який визначається розробленим методом і системою вібраційного контролю, тобто дисертація є завершеною науковою працею.

## **7. Повнота викладу в опублікованих працях та апробація роботи.**

Результати дисертаційної роботи з достатньою повнотою викладені у 31 науковій праці, серед них: 4 статті у наукових фахових виданнях України та 3 статті у періодичних виданнях інших держав (із них 3 у виданнях, що входять до наукометричної бази даних Index Copernicus); 19 у збірниках праць і тезах вітчизняних та міжнародних конференцій; 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Одноосібно опубліковано 1 стаття та 2 тези доповідей.

Основні положення дисертації пройшли апробацію на 17 міжнародних наукових та науково-технічних форумах різних рівнів. Робота обговорювалась на наукових семінарах кафедри інформаційно-телекомунікаційних технологій і систем ІФНТУНГ, на розширеному науковому семінарі кафедри метрології та інформаційно-виміррювальної техніки. Розроблені метод та система вібраційного контролю пройшли промислову апробацію на КС-3 Долинського ЛВУМГ (акт від 18.07.2019 р.) і КС-39 «У-П-У» Богородчанського ЛВУМГ (акт від 12.08.2020 р.) та підтвердили їх ефективність.

**8. Відповідність паспорту спеціальності 05.11.13.** Подані матеріали роботи та результати досліджень повністю відповідають паспорту спеціальності 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин, зокрема, в частині: I – формули спеціальності та II – п.п. 2-6.

### **9. Недоліки та зауваження щодо змісту і оформлення дисертації.**

В дисертаційній роботі не виявлено принципових недоліків, які могли б вплинути на оцінку роботи в цілому, проте після опрацювання рукопису можна відзначити такі зауваження щодо змісту дисертації:

1. На початку розд. 1.1 варто було дати визначення поняттю «лопатовий апарат».
2. В роботі на стор. 75 і 79 (рис.2.1-2.3) наводяться тестові розрахунки з використанням розроблених методів розрахунку параметрів обтікання профілю лопаті, в той час, як дані про моделювання деформування лопатей в розд. 2.2 (стор. 81-88) проведено лише модельно, без деталізації значень і розмірів лопатей.
3. Чому застосування розроблених методів та засобів обмежується тільки газоперекачувальними агрегатами чи станціями, а для перекачування рідин невже їх не можна використовувати?
4. На стор.119 роботи відзначено, що при проведенні експериментів в режимі «кільце» було отримано десять значень частот обертання вузлів ГПА-Ц-16С, а також вказано, що проводилися дослідження вібраційного стану ГПА-Ц-16С, який знаходився в експлуатації, тобто працював в режимі «магістраль». В той же час, в роботі відсутня інформація щодо порівняння отриманих результатів контролю вібростану ГПА-Ц-16С при двох режимах його роботи.
5. На стор. 130 вказано, що для більш детального аналізу зміни потужності (амплітуди) гармонічних, субгармонічних та спектральних складових спектру вібрації була проведена його фільтрація, проте не зазначається, які використовувалися фільтри, чи методи фільтрації і програмні продукти для їх реалізації.
6. В роботі бажано було б навести окремо результати контролю вібростану таких агрегатних вузлів, як ТНТ і ТВТ.

7. В роз.5.3 при розгляді питання використання системи контролю вібраційного стану лопатевого апарату ГПА-Ц-16С в режимі антипомпажного захисту, зокрема функціонування блоку Program [FB1] (стор. 165-167) вказується, що вимірювання параметрів прогнозування повинно здійснюватися дискретно в моменти часу  $t_0, t_1, \dots, t_n$ , однак не наводиться методика вибору часу вимірювання і як цей час співвідноситься з часом прояву помпажних явищ.

8. З матеріалів дисертації не зовсім зрозуміло, яким чином Ви здійснювали запис вібрації у трьох площинах відповідно осі валів агрегатних вузлів ГПА?

9. В роботі присутні окремі граматичні та стилістичні неточності, наприклад: не слід, а варто; не трьохвимірний чи трьохвальний, а тривимірний і т.п.; не виміру, а вимірювання тощо. На деяких рисунках відсутня розмірність координат (наприклад, рис.4.16 а,в,д, та рис. 4.18).

Проте вказані зауваження не зменшують позитивне враження від роботи та не знижують наукової новизни і практичної цінності роботи. В цілому, матеріали дисертації викладені чітко, логічно, послідовно на достатньо високому професійному і науковому рівні. Основні результати і положення є змістовними, добре обґрунтованими, що вносять значний вклад у галузь контролю та технічної діагностики об'єктів нафтогазової промисловості. Рукопис дисертації та автореферат оформлені чітко, згідно чинним вимогам ДАК України. Автореферат дисертації достатньо повно розкриває суть дисертаційної роботи, її основні наукові положення, результати та висновки.

## **10. Загальні висновки по дисертаційній роботі.**

1. Дисертаційна робота Іванюк Н.І. є завершеною самостійною науково-дослідною працею, актуальною за тематикою, виконаною на достатньо високому науковому рівні, що базується на результатах теоретико-експериментальних досліджень, проведених з використанням відповідних методик, апаратно-програмних засобів і новітніх пакетів прикладних програмних продуктів.

2. Здобувачем отримані нові науково-обґрунтовані результати, що дають змогу підвищити оперативність і вірогідність контролю технічного стану лопатевого апарату ГПА в процесі експлуатації.

3. Результати досліджень, висновки та рекомендації представляють цінність для науки і практики, оскільки дозволяють контролювати вібраційний стан його лопатевого апарату і, тим самим, забезпечити надійність і ефективність експлуатації ГПА та попередити виникнення явища помпажу.

4. Наведена в дисертації та авторефераті інформація підтверджує повноту публікації матеріалів досліджень, висновків і результатів, які подаються пошукачем.

5. Дисертаційна робота «Вібраційний контроль технічного стану лопатевого апарату газоперекачувальних агрегатів» за актуальністю, новизною, практичною значимістю, обсягом, змістом та викладом інформації відповідає вимогам п.п. 9,



11-14 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» Постанови КМ України за № 567 від 24 липня 2013 р. зі змінами, а її автор Іванюк Наталія Іванівна заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин.

Офіційний опонент,  
директор Інституту екологічної  
безпеки та моніторингу довкілля Вінницького  
національного технічного університету,  
доктор технічних наук (05.11.13) – професор

*[Handwritten signature]* В.Г.Петрук

Вчений секретар ВНТУ



*[Handwritten signature]*

А.В.Поплавський

Підпис *Генура В.Р., Поплавського А.В.*  
**ПОСВІДЧУЮ**  
Зав. канцелярією *[Signature]*

*Відгук надійшов до спеціалізованої вченої ради.  
Д.20. 052. 03  
Звений секретар 08.09.2019р.  
[Signature]*

