ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію 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

Основними агрегатами компресорних станцій (КС), що становлять основу газотранспортної системи (ГТС) України, є газоперекачувальні агрегати (ГПА). Від надійної їх роботи залежить ефективність процесу транспортування газу. На сьогодні більше 70% ГПА з газотурбінним приводом уже майже вичерпали свій ресурс (100 тис. год.), що обумовлено значним терміном їх експлуатації (близько 40 років). Назначений ресурс лопатей агрегатних вузлів ГПА, його лопатевий апарат (ЛА), є значно менший і варіює в діапазоні від 18 до 80 тис. год. В той же час ЛА є основним елементом агрегатних вузлів ГПА надійність роботи якого визначає як надійність і ефективність роботи ГПА, так і КС в цілому.

Статистика відмов ГПА по механічній частині показує, що на ЛА припадає близько половини усіх дефектів і відмов ГПА викликаних значними статичними, динамічними (вібраційними) і температурними навантаженнями, які призводять до пошкодження і поломки ЛА ГПА та виникнення передпомпажних явищ.

Для попередження виникнення дефектів і відмов ЛА ГПА розроблена значна кількість методів їх контролю і діагностики однак, як показує практика, вони є недостатніми для забезпечення надійності ЛА ГПА в процесі його експлуатації. Виходячи з цього 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 задачею.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

Об’єктом наукових досліджень в дисертації 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 питанню підвищенню

оперативності і вірогідності інформації про фактичний технічний стан його ЛА та попередження помпажних явищ, шляхом розроблення методу і системи його вібраційного контролю.

При цьому до наукової новизни отриманих Іванюк Н.І. в процесі проведення теоретико-експериментальних досліджень результатів можна віднести:

- вперше побудовану математичну модель процесу обтікання лопатей ГПА з використанням інтегрального рівняння Фредгольма ІІ роду та розроблений 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 запропонований новий метод математичної параметризації зміни геометрії лопаті 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;

- отриманий подальший розвиток екстраполяційної моделі стосовно 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;

- удосконалений метод оцінювання 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.

До практичного значення отриманих результатів слід віднести:

– чисельний алгоритм методу контролю стану ЛА, реалізація якого з використанням розробленого програмного забезпечення дає змогу контролювати зміну технічного стану ЛА в процесі експлуатації ГПА;

– алгоритм прогнозування технологічних параметрів роботи ГПА-Ц-16С в середовищі *TIA Portal*, який дозволяє оперативно виявити їх зміни при розвитку помпажних явищ;

– методику контролю технічного стану ЛА ГПА в процесі експлуатації, яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір №52020;

– систему контролю вібраційного стану ГПА на базі сучасних апаратно-програмних засобів фірми *Siemens*, яка може бути використана для попередження явища помпажу ГПА при послідовній роботі двох КС;

– програмне забезпечення в середовищі *TIA Portal* для обробки віброакустичних процесів, що супроводжують роботу ГПА, та визначення його вібраційного стану обумовленого зміною технічного стану ЛА.

3. Обґрунтованість і вірогідність наукових результатів

Для вирішення поставлених в роботі задач використані основні положення віброакустичної діагностики машин, чисельні методи розв'язку інтегральних рівнянь, методи: інтерполяційні з використанням многочленів Ерміта; апроксимації кривих за відомою структурою; математичної фізики для опису різних режимів коливальних процесів; математичного аналізу для оцінки геометричних характеристик та моментів інерції; спектрального аналізу та обробки сигналів. При розробці системи вібраційного контролю використовувались методи системо- і схемотехніки. Результати моделювання і поставлених експериментів підтверджують обґрунтованість та ефективність розроблених моделей і методу контролю вібраційного стану ЛА ГПА.

Основні висновки, сформульовані за результатами роботи, задовольняють загальноприйнятим критеріям вірогідності. Система припущень є коректною, справедливість висновків підтверджується результатами експериментів.

Дисертація викладена в зрозумілій, доступній формі. Стиль викладення матеріалу дисертації логічний, основні положення достатньо аргументовані, в тому числі, посилання на літературні джерела.

4. Загальна характеристика структури і змісту дисертаційної роботи та автореферату

Дисертаційна робота Іванюк Н.І. містить 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 проведений аналіз ГПА з точки зору об'єкту контролю, який показав, що ЛА є неконтролепридатним об'єктом, тобто він немає штатних давачів, які дозволяють контролювати його технічний стан, і характеризується складними умовами експлуатації. Розглянуті причини і фактори, які зумовлюють виникнення дефектів ГПА, та зроблено висновок, що при розробці методів контролю і діагностування технічного стану ЛА

необхідно орієнтуватися, в першу чергу на методи, які дозволять попередити виникнення втомних руйнувань лопатей.

В роботі проаналізовані методи контролю і діагностування ЛА ГПА, які класифіковані за трьома групами, та зроблено висновок щодо необхідності розробки теоретичних передумов методу контролю технічного стану ЛА з використанням методу прямого аеродинамічного розрахунку профілів стосовно лопатей ГПА. Проаналізовані технічні засоби контролю стану лопатевого апарату ГПА та запропоновано використання вібраційного модуля SM 1281 фірми *Siemens*, як основної складової при розробці системи контролю вібраційного стану ЛА ГПА.

У другому розділі розробляються теоретичні передумови методу контролю технічного стану ЛА на основі методу прямого аеродинамічного розрахунку профілів лопатей ГПА. Запропонована математична модель процесу обтікання лопаті агрегатного вузла ГПА і чисельний розв'язок задачі обтікання лопатей агрегатних вузлів ГПА та наводяться тестові розрахунки. Розроблена математична модель процесу деформування лопатевого апарату ГПА. Розглядається методика наближення конфігурації реальних профілів лопатей із використанням многочленів Ерміта, що дало можливість одержати аналітичне подання форми профілю лопаті. Наводиться вираз для визначення площі поперечного перерізу профілю лопаті та розрахунок моментів інерції поперечного перерізу лопаті, з використанням яких проводиться оцінювання геометричних параметрів лопатей на процес їх коливань та аеродинамічні характеристики.

В третьому розділі наводиться розробка програмного забезпечення методу контролю ЛА ГПА та методика визначення геометричних параметрів лопаті і її початкового технічного стану. Розглядається структура головного вікна програми, що складається з семи блоків, які дають можливість 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. Всього вікон у даному програмному продукті є три. Наводяться вікна програмного продукту з результатами розрахунку параметрів реальних лопатей агрегатних вузлів ГПА.

В четвертому розділі розглядається методичне, технічне і програмне забезпечення експериментальних досліджень та наводяться результати дослідження вібраційного стану ЛА на прикладі ГПА-Ц-16С. Наводиться опис методики проведення експериментальних досліджень на КС-3 «Долина» Долинського ЛВУМГ при роботі ГПА-Ц-16С в режимі «кільце» та опис конструкції його вхідного направляючого апарату (ВНА), якому в роботі

приділяється основна увага. Розглядається розроблена на базі апаратно-програмних засобів концерну *Siemens* система контролю вібраційного стану ГПА та обгрунтовується вибір місця встановлення вібродавачів. Пропонується і обгрунтовується використання програмного забезпечення *SIPLUS Condition Monitoring System (CMS) X-Tools* для моніторингу та аналізу вібраційних процесів ГПА-Ц-16С. Наводится розрахунок амплітуд гармонік роторних та лопатевих частот для ВНА при різних частотах його обертання та аналізуються отримані емпіричні залежності зміни гармонічних і субгармонійних складових роторних і лопатевих частот від частоти обертання валу ВНА. Аналізуються отримані в процесі проведення експериментальних досліджень віброграми і спектрограми ВНА та агрегатних вузлів ГПА при різних частотах їх обертання. Наводяться спектрограми ВНА, отримані до і після фільтрації, а також отримані при вимірювання вібрації в трьох площинах до осі валів агрегатних вузлів та проводиться результати їх аналізу. Розглядаються результати дослідження: статистичних характеристик вібраційного процесу, що супроводжує роботу ГПА-Ц-16С, впливу частоти обертання агрегатних вузлів ГПА-Ц-16С на зміну кута повороту лопатей ВНА та залежності зміни тиску на виході компресора високого тиску (КВТ) від частоти його обертання та кута повороту лопатей ВНА.

В пятому розділі розглядаються передумови використання системи контролю вібраційного стану лопатевого апарату ГПА в режимі його антпомпажного захисту. Наводиться розроблена на базі апаратно-програмних засобів концерну *Siemens* функціональна схема системи антипомпажного захисту та процедура прогнозування виникнення явища помпажу при послідовній роботі двох КС. Розглядається використання системи контролю вібраційного стану ЛА ГПА-Ц-16С в режимі антипомпажного захисту. Наводяться результати параметрування модуля SM 1281, функціонального блоку «*SM1281_Channel*» та опис роботи блоку *Program* [FB1] при реалізації алгоритму для обчислення прогнозованих значень показників роботи ГПА. Розглядаються результати розробки верхнього рівня системи антипомпажного захисту ГПА, підсистеми керування станційним антипомпажним клапаном та наводиться опис її роботи. Пропонується методика отримання виразу для показника готовності Пг виходячи з двох випадків організації процесу контролю вібраційного стану ГПА-Ц-16С - періодичного і неперервного та аналізується отримана залежність показника готовності від періоду контролю. Наводяться результати промислової апробації розробленого методу та системи контролю вібраційного стану ЛА ГПА.

У **висновках** здобувач наводить одержані в роботі нові наукові та практичні результати, визначає їх новизну та практичну значущість.

У **додатках** містяться основні параметри ГПА-Ц-16 та ДГ90Л2, вихідні дані для розрахунку геометричних параметрів лопатей ГПА, свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 52020, програма проведення експериментальних досліджень вібраційного стану ГПА-Ц-16С, таблиці розрахунку амплітуд гармонік роторних і лопатевих частот ВНА, графіки зміни амплітуд гармонічних складових роторних і лопатевих частот від частоти обертання ВНА, віброграми та спектрограми ВНА до та після фільтрації, отримані при різних частотах обертання ВНА при вимірюванні вібрації в трьох площинах, порівняльні спектрограми ЛА ВНА при різних частотах його обертання і вимірюванні вібрації в трьох площинах, копії актів впровадження результатів наукових досліджень.

Представлений обсяг робіт забезпечив досягнення 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. Виходячи з цього можна констатувати, що дисертація є завершеною науковою працею.

Зміст дисертації в повній мірі відображено у 31 науковій праці, зокрема: 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.

Автореферат достатньо повно відображає основні положення, результати та висновки дисертаційної роботи.

Оформлення дисертації та автореферату відповідає чинним вимогам ДАК України.

5. Зауваження по дисертаційній роботі

5.1 При аналізі актуальності роботи у вступі автор згадує зарубіжних вчених, які займались проблемою вібродіагностики ЛА ГПА, а їх роботи аналізуються у п. 1.3. Проте, вважаю недостатнім аналіз лише чотирьох робіт закордонних вчених.

5.2 Оскільки розв’язання рівняння Фредгольму ІІ роду через систему лінійних алгебраїчних рівнянь з великим числом обумовленості і вихідними виміряними даними є оберненою задачею, бажано було б провести аналіз її

некоректності, оцінити похибки розв’язання, і якщо в цьому є потреба, застосувати спеціальні засоби приведення некоректної задачі до умовно-коректної.

5.3 На рис. 3.1 і 3.2 (ст. 99-100) представлені вікна програмного продукту, які демонструють результати обробки геометричних параметрів лопаті, наведених в Додатку Б1 згідно розробленого математичного апарату. Однак в Додатку Б1, не вказано, які це лопаті (робочі, направляючі) та до якого агрегатного вузла ГПА вони відносяться.

5.4 В роз. 4.2.1 обґрунтовуються місця монтажу вібродавачів (акселерометрів) на ГПА-Ц-16С, які входять в склад вібраційного модуля SM1281, але а ні по тексту роботи, а ні в додатках не наводиться їх характеристика.

5.5 При описі фірмового програмного забезпечення *SIPLUS Condition Monitoring System (CMS) X-Tools* (ст. 113-116) не уточнюється, для розв’язання яких конкретних задач в роботі воно використовується.

5.6 На ст. 132 (третій абзац зверху) сказано, що дійсні частоти обертання ротора КНТ, ТНТ і ротора КВТ, ТВТ та ротора ТН різняться від номінальної (розрахованої) на величину порядку 20...70 об/хв., однак спектрів вібрацій для окремих вказаних агрегатних вузлів по тексту не наводиться.

5.7 Дослідження статистичних характеристик вібраційного процесу супроводжуючого роботу ГПА-Ц-16С, а саме ВНА, підтвердили нормальний закон його розподілу (ст.138-142). Однак роботі не вказується, чи аналогічний результат можна отримати по інших агрегатних вузлах ГПА.

5.8 При розробці підсистеми керування станційним антипомпажним клапаном (роз. 5.5) і її описі по тексту чітко не вказано пріоритет автоматичного або диспетчерського керування антипомпажною запірною арматурою.

5.9 По тексту роботи мають місце граматичні, стилістичні і ін. помилки. Так, в табл. 1.1 (ст. 28) помилка в назві другого стовпця «найменування несправності», напевно «назва вузла (елемента) ГПА», на ст. 97 в першому абзаці «….про аналіз методів», замість «..при аналізі методів». Погана якість рисунків, а також окремі рисунки варто збільшити.

Вказані зауваження ніяк не зменшують позитивне враження від роботи та не знижують наукової цінності і практичної корисності отриманих результатів. В цілому матеріал дисертаційної роботи викладений на високому науковому і професійному рівні, достатньо чітко, логічно та послідовно.

6. Загальні висновки по дисертаційній роботі

6.1 Дисертаційна робота Іванюк Н.І. є завершеною науково-дослідницькою працею, актуальною за тематикою, в якій отримано нові науково-обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують науково-прикладну задачу підвищення оперативності і вірогідності вібраційного контролю технічного стану лопатевого апарату ГПА в процесі експлуатації.

6.2 Результати досліджень, висновки та рекомендації є цінними для науки і практики, оскільки дають можливість контролювати вібраційний стан лопатевого апарату ГПА і, тим самим, забезпечити надійність і ефективність експлуатації ГПА та попередити виникнення явища помпажу.

6.3 Дисертація «Вібраційний контроль технічного стану лопатевого апарату газоперекачувальних агрегатів» за актуальністю, обсягом, змістом і науковим рівнем проведених досліджень відповідає вимогам п.п. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» Постанови КМ України за № 567 від 24 липня 2013 р., а її автор Іванюк Н.І. заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин.

Офіційний опонент,
професор кафедри фізики і електротехніки
Хмельницького національного університету,
д-р техн. наук, доцент Горошко А.В.

Підпис проф. Горошка А.В.
«ЗАСВІДЧУЮ»
проректор з наукової роботи
Хмельницького національного університету,
д-р техн. наук, професор Синюк О.М.

Відгук надійшов до спеціалізованої вченої ради Д20.052.03 07.09.2021 р.
Учений секретар /В. Точок/