

Розроблення методу контролю працездатності систем автоматичного управління газоперекачувальними агрегатами за їх розгінними характеристиками

М. І. Горбійчук, О. Л. Заміховська, Л. М. Заміховський, В. В. Павлик

Аналіз відмов газоперекачувальних агрегатів (ГПА), встановлених на трансконтинентальному газопроводі «Уренгой-Помари-Ужгород» показав, що відмови систем автоматичного управління (САУ) ГПА займають друге місце (до 40 %) від загальної кількості відмов. Показано, що відомі методи контролю технічного стану механічної частини ГПА не можуть бути використані для контролю працездатності САУ і елементів автоматики ГПА. Серед відомих методів контролю працездатності САУ ГПА, як динамічної системи, найбільш перспективними є методи, що базуються на аналізі її перехідного процесу (розгінної характеристики) при деякому типовому вхідному впливі.

Приведене теоретичне обґрунтування розробленого методу контролю працездатності САУ ГПА, діагностичною ознакою якого є значення площ розгінних характеристик. Структура передавальної функції та її параметри визначалися методом площ (метод Симою). Для реалізації методу у середовищі MatLab розроблено програмне забезпечення, яке дає змогу визначити параметри функції передачі за експериментальною кривою пуску ГПА та величину площі, яка обмежена його перехідною функцією.

Наводиться методика проведення експериментальних досліджень запропонованого методу контролю працездатності САУ ГПА на прикладі ГТК-25і, яка дозволила отримати дев'ять розгінних характеристик ГПА в координатах «час – частота обертання ротора ТВТ» та результати їх обробки.

Подальша реалізація запропонованого методу вимагає визначення умов його працездатності та паралельного контролю технічного стану механічних вузлів ГПА з метою виключення їх впливу на результат контролю стану САУ ГПА

Ключеві слова: газоперекачувальний агрегат, система автоматичного управління, розгінна характеристика, технічний стан

1. Вступ

Газотранспортна система України (ГТС) є однією з найбільших у світі як за протяжністю, так і за об'ємом транзиту газу. У її складі є 78 компресорних станцій (КС) (121 компресорний цех) загальною потужністю 5492 МВт з працюючими 779 газоперекачувальними агрегатами (ГПА) двадцяти типів, як вітчизняного, так і зарубіжного виробництва [1]. Серед них трансконтинентальний газопровід «Уренгой – Помари – Ужгород», який є одним із основних магістральних газопроводів ГТС. Його діаметр 1400 мм, а пропускна здатність 30 млрд. м³. В експлуатації знаходяться близько 130 ГПА ГТК 25і виробництва компанії Nuovo Pignone (Італія), з яких 30 – в АТ «Укртрансгаз».

Тривалий період експлуатації ГПА (більше 30 років) призвів до того, що значний відсоток ГПА по АТ «Укртрансгаз» 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. На рис. 1 наведена статистика відмов ГПА по АТ «Укртрансгаз» за 2009 рік за типами обладнання. Аналіз дефектів основних вузлів ГПА в процесі експлуатації показав, що основна частина аварійних зупинок і 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.

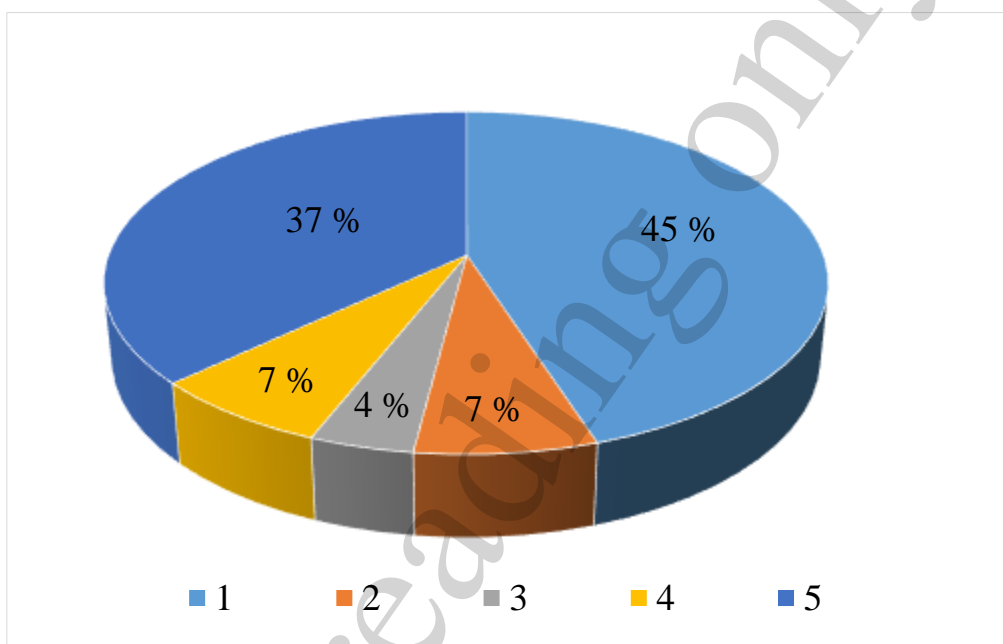


Рис. 1. Статистика відмов ГПА по АТ «Укртрансгаз» за типами обладнання за 2009 рік: 1 – механічне обладнання, 6 один.; 2 – тип обладнання, яке відмовило, не встановлений 9 один. 3 – відмова обладнання, що обумовлена помилковими діями персоналу 6 один.; 4 – електрообладнання 10 один.; 5 – контрольно вимірювальні прилади і автоматика 50 один

Друге місце за кількістю відмов (рис. 1) займають системи автоматичного управління (САУ) та автоматики – до 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). 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 [2], що вони фізично і морально застаріли, двічі відпрацювали паспортний ресурс і потребують негайної заміни. Така заміна САУ ГПА вимагає значних як фінансових витрат (наприклад, в цінах 2004 р. вартість однієї САУ становила 4 млн. гривень), так і часових – триває не менше року на зупиненому технологічному обладнанні. Тому фахівцями служби контрольно-вимірювальних приладів і автоматики (КВП і А) КС розробляються і впроваджуються інженерно-технічні рішення, які дозволяють продовжити термін експлуатації САУ ГПА. Зокрема, в [2] наводиться перелік впроваджених фахівцями КС «Богородчани» інженерно-технічних рішень по САУ ГТК-25і і САУ ГПА-10і, які дозволили продовжити їх термін експлуатації. А також адаптувати сучасні мікропроцесорні засоби автоматизації до існуючих транзисторно-релейних систем управління та зменшити кількість хибних аварійних зупинок технологічного обладнання.

Впровадження таких заходів, а також заміна застарілих САУ на сучасні, побудовані на новітній елементній базі, не гарантує значного підвищення їх надійності в процесі експлуатації. Як приклад, в табл. 1 наведена статистика відмов САУ по АТ «Укртрансгаз» протягом 2012–2019 років. Були проаналізовані відмови 21 агрегату типу ГТК-25і, які оснащені штатною системою «Спідтронік» та новою САУ типу Compressor Controls Corporation (ССС). Як видно з табл. 1 в 2014–2015 роках кількість відмов нових САУ типу ССС перевищувала кількість відмов штатних САУ типу «Спідтронік». САУ Спідтронік оснащені ГТК-25і та ГТК 10-і. Окремої статистики напрацювань на відмову по ГТК-25і немає, проте з досвіду експлуатації, враховуючи типові дефекти, напрацювання на відмову практично ідентичне в САУ ГТК-25і та ГТК-10і. Стосовно відмов засобів автоматики (табл. 1), то не спостерігається загальної тенденції до зменшення кількості відмов по роках, виключення становить 2019 рік (перша половина). Щодо інших типів САУ – АТГІЗ (Інек), Зоря-1, Укргазтех, Укргазгеоавтоматика, ТзОВ Газпроміновації, якими оснащені різні тип ГПА, то з 240 працюючих САУ 41 відмовила.

Таблиця 1

Статистика відмов САУ ГТК-25і по АТ «Укртрансгаз»

Роки	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Тип САУ	Кількість відмов по роках							
Спідтронік	5	7	1	1	4	12	5	3
ССС	–	1	3	2	3	5	2	–
Загальна кількість відмов засобів автоматики по АТ «Укр трансгаз»	39	46	44	35	44	53	41	25

Таким чином, ані впровадження інженерно-технічних рішень, які дозволяють продовжити термін експлуатації САУ ГПА, ані заміна САУ застарілого типу на нові не призводить для значного підвищення надійності ГПА.

У роботі [3] проведений ґрунтовний аналіз сучасного стану оцінки надійності САУ ГПА. Він показав, що 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 методу 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.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

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 [4].

– 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.

Методам віброакустичної діагностики ГПА присвячена значна кількість наукових праць [5–12]. Так в [5] розглядаються моделі коливних процесів, в основному лопатєвого 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 [6] 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 [7]. Метою аналізу є вияв-

лення 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 осьового компресора, 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 [8]. 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 [9] 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 Кона, S-перетворення і різні вейвлет-перетворення. В той же час, питання інформативності вказаних перетворень для трьох розглянутих станів повітряного компресора та реакції на них САУ ГПА не розглядалося. Алгоритм діагностики несправностей повітряного компресора, заснований на використанні вейвлет-перетворення та штучних нейромереж, розглядається в [10]. При цьому посилення в роботі на результати практичної реалізації розробленого алгоритму за допомогою технічних засобів чи в складі САУ ГПА відсутні. В [11] 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 [12] пропонується поєднання дискретного вейвлет-перетворення і аналізу огибаючої 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 лопатєвого 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.

Не менша кількість наукових праць [13–18] присвячена методам параметричної діагностики. Так, в [13] 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 (ГТЭС), заснований на ідентифікації стану її компонентів (компресора, камери згорання, турбіни) з використанням математичної моделі робочих процесів, представлених у вигляді моделі штучної нейронної мережі розглянуто в [14]. 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 ГТЭС, без якої вона не може функціонувати, не розглядається. На основі основних принципів газових турбін і дискримінантного аналізу Фішера (FDA) в [15] 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 [16] розглядається метод параметричної діагностики стану двухпоточного турбореактивного двигуна, заснований на ідентифікації стану компонентів (компресора, камери згорання, турбіни) із застосуванням математичної моделі робочого процесу, представленої у вигляді моделі штучної нейронної мережі, подібної до [14]. 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 [14]. Методам діагностування дефектів газового тракту газотурбінних установок (ГТУ) присвячені роботи [17, 18]. Нова методика моделі класифікації діагностики несправностей газового тракту газової турбіни у вигляді ймовірнісної нейронної мережі (PNN) розглядається в [17]. Проводиться її порівняння з раніше запропонованими методиками, результати якого показують, що PNN не поступається іншим методам. В [18] запропоновано новий комбінований метод на базі штучної нейронної мережі і машини опорних векторів для діагностики газового тракту двухвального газотурбінного двигуна. Проведені результати випробувань показали, що пропонується 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 [17, 18] 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.

Одними з перспективних методів діагностики, які можна віднести до двох розглянутих вище груп, залишаються методи ідентифікації короткий аналіз яких наведений в [19]. 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 диференціальних рівнянь. Різноманітністю діагностичних моделей на основі диференціальних рівнянь є передавальна функція.

Передавальна функція визначає як якісну, так і кількісну сторону 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 $A(\omega)$ (АЧХ) і фазові частотні $\varphi(\omega)$ (ФЧХ) характеристики, так і дійсна $Re(\omega)$ і уявна $Im(\omega)$ складові передавальних функцій. Найчастіше використовують частотні характеристиками $A(\omega)$ і $\varphi(\omega)$, 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 диференціальними 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 [19] 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 [20] 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 діагностувати технічного стану САУ ГПА.

Комбінаційний метод контролю і діагностики САК ГПА заснований на використанні загального алгоритму ідентифікації в просторі змінних, якими є коефіцієнти передавальної функції [21]. 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 ву-

злів 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 [22] послідовний метод контролю і діагностики відмов САК 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 функціональних вузлів системи [23]. 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 малоімовірну 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.

Проведений аналіз 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 перетворення віброакустичних сигналів і технологічних параметрів з метою їх подальшої обробки проводиться з використанням швидкого перетворення Фур'є, дискретного косинусного перетворення, автокореляційної функції, розподілу класів Коена, S-перетворення і різних вейвлет-перетворень і 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 механічні вузли і деталі, так САУ та автоматики. Тому при розробці методу діагностування конкретної складової цієї системи потрібно враховувати вплив її інших складових на результат діагностування;

– значно меншої уваги приділялось розробленню методів контролю працездатності і діагностування САУ ГПА. Це можна пояснити складним і мало вивченим характером взаємодії САУ ГПА з окремими складовими ГПА при виникненні як їх відмов, так і САУ та автоматики.

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.

3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є розробка методу контролю працездатності САУ ГПА в процесі експлуатації за його розгінними характеристиками шляхом знаходження параметрів функції передачі основних контурів керування ГПА і на цій основі обчислення площ, що утворенні нормованою перехідною характеристикою і віссю абсцис.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- на базі експериментальних досліджень роботи ГПА у перехідних режимах розробити метод контролю працездатності САУ ГПА;
- розробити методику оброблення результатів експерименту у вигляді розгінних характеристик для отримання нормованих передаточних функцій;
- апробувати методи контролю працездатності САУ ГПА та сформулювати рекомендації щодо подальшого їх використання.

4. Метод контролю працездатності САУ ГПА за їх розгінними характеристиками.

Експериментальні дослідження показали, що динамічні характеристики газоперекачувального агрегату (ГПА) природного газу мають аперіодичний характер за різними каналами передачі вхідних впливів і в загальному випадку їх функції передачі є такими [20]:

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

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

У виразі (1) завжди має місце нерівність $m < n$.

Замість функції передачі (1) будемо розглядати її нормовану функцію передачі

$$w(s) = \frac{1 + \sum_{j=1}^m b_j s^j}{1 + \sum_{i=1}^n a_i s^i}, \quad (2)$$

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

$$y(t_k) = \frac{Y(t_k)}{Y_{\max}}, \quad k = \overline{1, N}, \quad (3)$$

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'єкта за своїм характером є аперіодичними, то полюси s_i $i = \overline{1, n}$ нормованої функції передачі (2) 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) за умови, що вхідна величина $x(t)=1(t)$ У такому випадку $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = 1$.

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

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

У відповідності з теоремою лишків [25], за відомою функцією передачі (2), коли $X(s) = \frac{1}{s}$, можна знайти нормовану перехідну характеристику за такою формулою:

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

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

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

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

$$Y(s) = \frac{1 + \sum_{j=1}^m b_j s^j}{s \left(1 + \sum_{i=1}^n a_i s^i \right)}, \quad (4)$$

Вираз $1 + \sum_{i=1}^n a_i s^i$ 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 (4) набуде такого вигляду:

$$y(t) = 1 + \frac{1}{a_n} \sum_{k=1}^n B_k \frac{e^{s_k t}}{s_k} \prod_{\substack{i=1, \\ i \neq k}}^n \frac{1}{s_k - s_i}, \quad (5)$$

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 (5). Очевидно, що при $t \rightarrow \infty$ 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 (5)

$$\sum_{k=1}^n B_k \frac{e^{s_k t_f}}{s_k} \prod_{\substack{i=1, \\ i \neq k}}^n \frac{1}{s_k - s_i} = a_n (y_f - 1), \quad (6)$$

Рівняння (6) є нелінійним відносно величини t_f і для знаходження його розв'язку використаний метод половинного ділення відрізка (метод дихотомії), який вміщує локальний корінь [25].

Обчислимо площу S_f , взявши інтеграл від правої частини рівняння (6), 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

$$S_f = t_f + \frac{1}{a_n} \sum_{k=1}^n \frac{B_k}{s_k^2} (e^{s_k t_f} - 1) \prod_{\substack{i=1, \\ i \neq k}}^n \frac{1}{s_k - s_i}. \quad (7)$$

При вибраному значенню t_f , формула (7) дає змогу за значеннями полюсів передавальної функції визначити площу S_f , що утворена перехідною характеристикою і віссю абсцис.

5. Результати експериментальних досліджень методу контролю працездатності газоперекачувальних агрегатів за розгінними характеристиками

Експериментальні дослідження з метою перевірки можливості оцінки технічного стану САУ ГПА за їх розгінними характеристиками, проводились на вузловій компресорній станції «Богородчани» КС-39 (Україна) протягом дев'яти місяців.

Програмою експериментальних досліджень передбачався запис таких технологічних параметрів: частоти обертання ротора турбіни низького ТНТ і високого ТВТ тисків, тиску гідравлічного масла, тиску осьового компресора і температури на вихлопі ГПА.

Зміна поточних значень вказаних параметрів, під час технологічного запуску ГПА, контролювалося за допомогою монітору САУ ГПА САТ-01 Д та записувалися в архів штатними засобами САУ 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.

Спостереження за технологічними параметрами здійснювалось 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. 2 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 (1).

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 (3).

Структуру функції передачі та її параметри будемо визначати методом площ (метод Сімою) [20, 26].

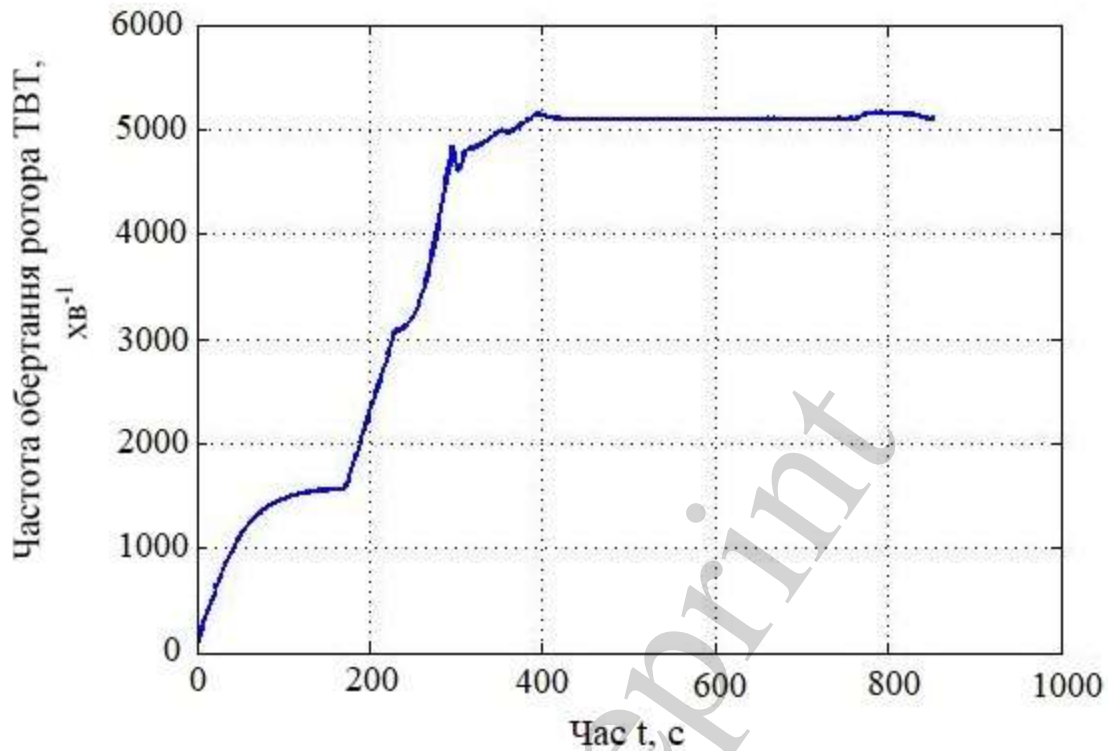


Рис. 2. Розгінна характеристика ГПА в координатах «час – частота обертання ТВТ»

Ідея методу площ полягає у тому, що інверсна функція передачі $\tilde{w}(s) = \frac{1}{w(s)}$

розкладається в ряд Тейлора в околі точки $s=0$. При цьому в функції $w(p)$ штучно вирівнюють степені поліномів чисельника і знаменника, допускаючи, що $b_n = b_{n-1} = \dots = b_{m+1} = 0$. Тоді

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

Коефіцієнти розкладу S_k мають зміст площ k -го порядку [23]. Доказано [16], що між значеннями S_k і параметрами нормованої функції передачі (22) існує функціональний зв'язок, який має вигляд матричного рівняння

$$A\bar{\alpha} = \bar{S}, \tag{8}$$

де

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

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

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

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

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

$$\Phi(p) = \mu_1 + \mu_2 s + \dots + \mu_i s^{i-1} + \dots = \sum_{i=1}^{\infty} \mu_i s^{i-1}, \quad (9)$$

де

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

У роботі [16] показано, що при відомих значеннях μ_i значення величин S_k можна визначити із матричного рівняння

$$\Lambda \bar{S} = \bar{\mu}, \quad (10)$$

де

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

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

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

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

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

$$\mu_i = S_i = \frac{1}{(i-1)!} \int_0^{t_N} (-t)^{i-1} \varphi(t) dt, \quad i = \overline{2, N}. \quad (11)$$

Методика обчислення площ S_i викладена в роботі [16].

Знаючи моменти допоміжної функції, із рівняння (10) визначимо площі

$$\bar{S} = \Lambda^{-1} \bar{\mu}. \quad (12)$$

Після того як визначені площі S_i , $i = \overline{1, N}$, із рівняння (8) визначимо параметри a_i , $i = \overline{1, n}$ та b_j , $j = \overline{1, m}$ функції передачі (2)

$$\bar{\alpha} = A^{-1}\bar{S}. \quad (13)$$

Для реалізації методу контролю працездатності САУ ГПА за значеннями площ розгінних характеристик у середовищі MatLab розроблено програмне забезпечення. 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.

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 , $i = \overline{1, N}$.
2. Обчислення моментів функцій за формулою (10), де $i = \overline{1, N}$.
3. Формування матриці A .
4. Візуалізація результатів роботи програмного забезпечення.
5. Обчислення часу t_f . Оскільки рівняння (6) є нелінійним відносно шуканої величини t_f , то для його розв'язування використаний метод дихотомії [22].
6. Обчислення площі S_f за формулою (7).

Другий програмний продукт 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 $\bar{\alpha}$, перших n компонентів якого є параметрами a_i , а останні $N-n$ компонентів це параметри b_j .

Як приклад, на рис. 3 показана нормована перехідна характеристика ГПА в координатах «час-частота обертання ТВТ» (рис. 3).

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

За допомогою розробленого програмного забезпечення для дев'яти розгінних характеристик були визначені нормовані передавальні функції та їх параметри. Результати розрахунків відображає табл. 2.

Аналіз табл. 2 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 Π

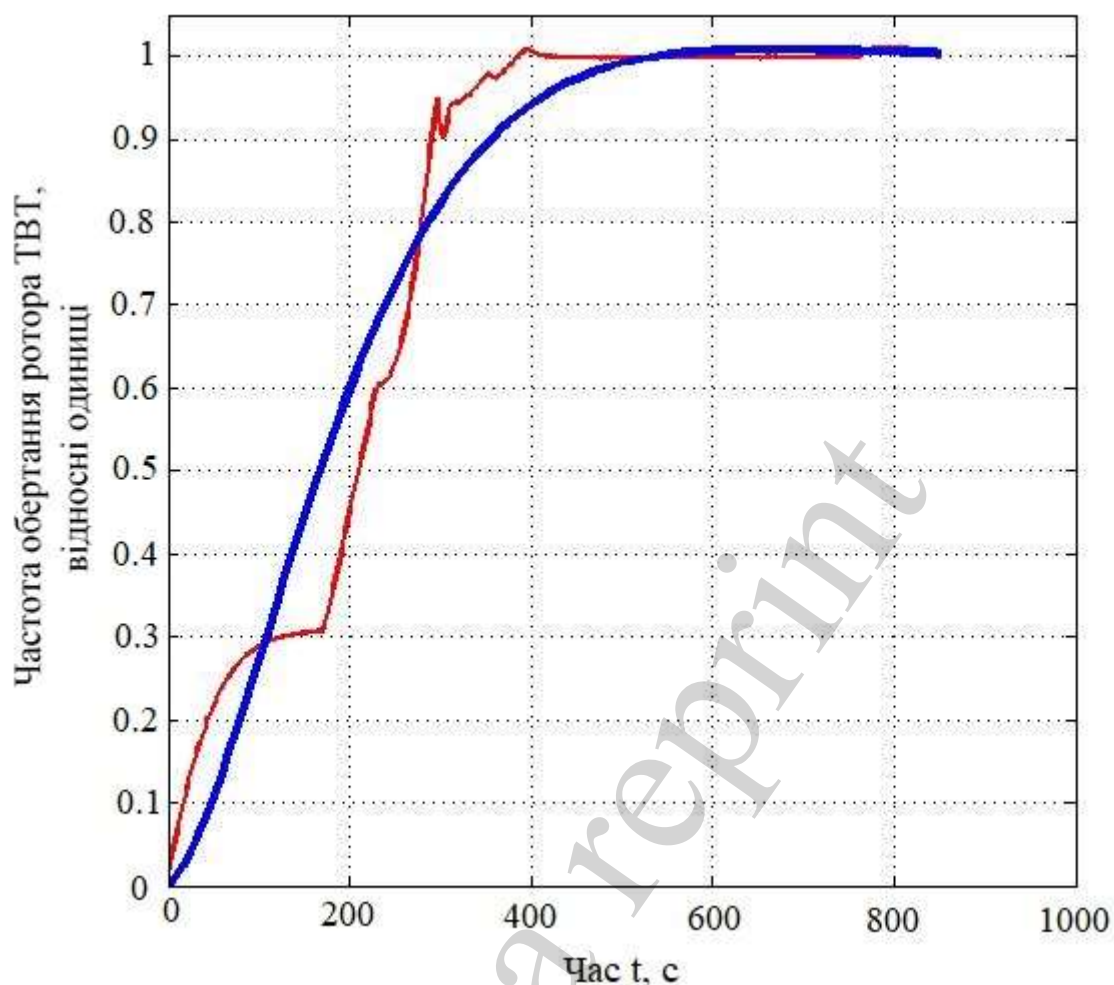


Рис. 3. Розгінна характеристика ГПА в координатах «час – частота обертання ротора ТВТ» та її апроксимація

лощ S_f , які обчислювались за формулою (6). 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 (6) з використанням розробленого програмного забезпечення для передавальних функцій, структура і параметри яких відображає табл. 1, були обчислені значення S_f , які занесені в табл. 3.

Для виявлення тенденції зміни S_f у часі побудований графік у координатах S_f-t (рис. 4), із якого видно, що з плином часу відбулося зростання значень площ S_f .

Таблиця 2

Структура і параметри нормованої передавальної функції ГПА в координатах «час – частота обертання ТВТ»

№ 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	$a_1 = 182,5458c$

Таблиця 3

Значення площ S_f у функції часу t

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

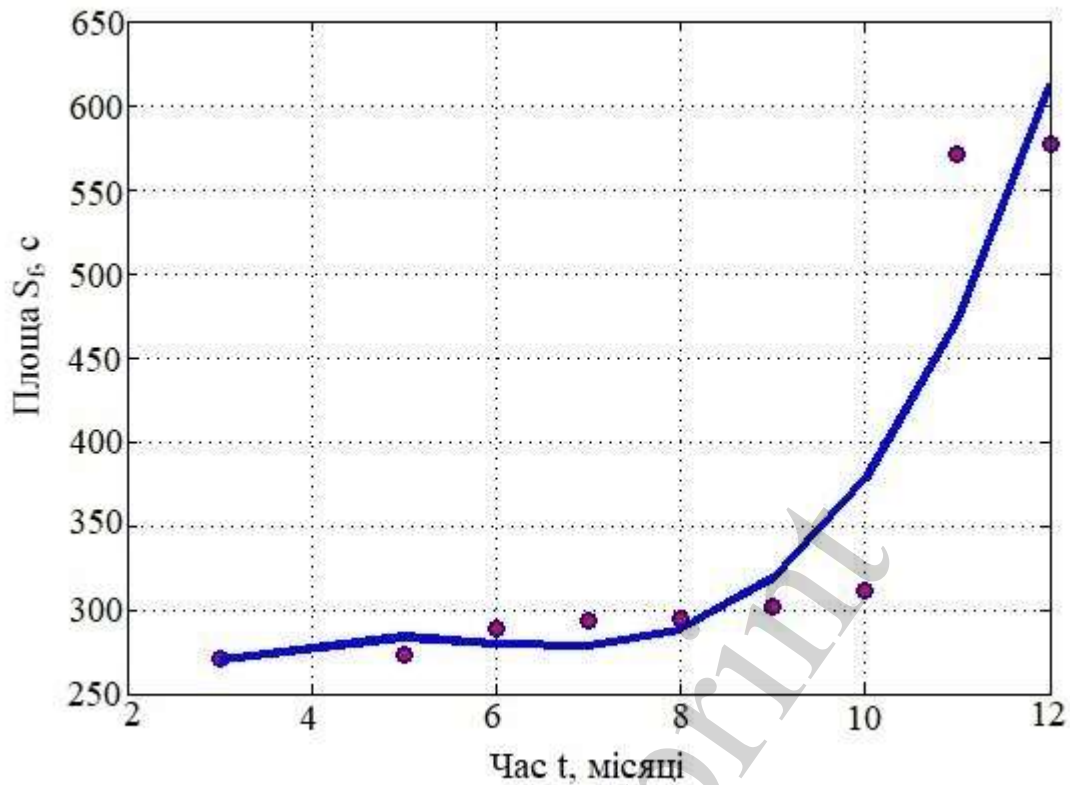


Рис. 4. Зміна значень S_f у часі

Експериментальні дані (рис. 4) опишемо емпіричною моделлю, яку виберемо у вигляді полінома третьої степені

$$S_f(t) = \pi_0 + \pi_1 t + \pi_2 t^2 + \pi_3 t^3. \quad (14)$$

Для визначення параметрів емпіричної моделі (14) скористаємося методом найменших квадратів. Отже, маємо

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

де

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

– вектор параметрів моделі (14);

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

– вектор значень $S_f^{(i)}$, $i = \overline{1,9}$ (табл. 2).

Були отримані такі значення параметрів емпіричної моделі (14): $\pi_0=68,08$, $\pi_1=124,17$, $\pi_2=23,09$, $\pi_3=-1,38$.

Графік залежності (14) нанесений на рис. 4, 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.

6. Обговорення результатів дослідження щодо можливостей методу контролю працездатності САУ ГПА

У процесі експлуатації САУ ГПА відбувається їх старіння, що в свою чергу проявляється в погіршенні якості процесу керування газоперекачувальними агрегатами. Таке погіршення процесу керування негативно впливає на технічний стан ГПА, що проявляється через розгінні характеристики за відповідними каналами передачі сигналів (табл. 2).

У порівнянні з відомими методами, в яких контроль працездатності САУ з ГПА дійснюється за зміною параметрів передавальних функцій, у даній роботі вперше запропонований інтегральний критерій (7) оцінки працездатності САУ ГПА, що в значній мірі усуває суб'єктивний фактор в обчисленні параметрів передавальної функції.

Крім того, інтегральний критерій (7) менш чутливий до перешкод, які накладаються на розгінні характеристики САУ ГПА, що отримані в процесі його експлуатації, за відповідними каналами передачі вхідних впливів.

Використання запропонованого методу можливе лише у тому випадку, коли є можливість отримати розгінні характеристики САУ ГПА в процесі її експлуатації впродовж тривалого часу.

Оскільки САУ ГПА і об'єкт керування (ГПА) є єдиною системою і елементи цієї системи знаходяться у постійній взаємодії, то постає проблема ідентифікації відмов як самого об'єкта, так і системи автоматичного керування. На вирішення цієї наукової задачі будуть спрямовані подальші дослідження авторів.

7. Висновки

1. Розроблена методика отримання розгінних характеристик САУ ГПА за вхідними впливами у режимі пуску ГПА, що дало змогу отримати експериментальні дані для побудови нормованих передавальних функцій ГПА.

2. На основі аналізу отриманих нормованих передавальних функцій ГПА обґрунтований метод оцінки працездатності САУ ГПА, який, на відміну від відомих параметричних методів, ґрунтується на визначенні площ перехідних характеристик як діагностичних ознак стану САУ ГПА.

3. Проведена апробація розробленого методу на експериментальних даних, отриманих при проведенні дев'яти технологічних пусків ГПА ГТК-25і згідно розробленої методики, яка підтвердила його працездатність. Подальша реалізація розробленого методу вимагає визначення умов його працездатності та паралельного контролю технічного стану механічних вузлів ГПА з метою виключення їх впливу на результат контролю стану САУ ГПА.

Література

1. Ковалко, М. П., Грудз, В. Я., Михалків, Б. В. та ін.; Ковалко, М. П. (Ред.) (2002). Трубопровідний транспорт газу. Київ: Агенство з раціонального використання енергії та екології, 600.
2. Павлик, В. В. (2012). Напрямки підвищення ефективності експлуатації газоперекачувальних агрегатів в умовах Богородчанського ЛВУМГ. Наукові вісті Галицької Академії, 2 (22), 44–49.
3. Заміховський, Л. М., Зікратий, С. В., Штаєр, Л. О. (2017). Сучасний стан оцінки надійності систем автоматики газоперекачувальних агрегатів. Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, 2, 79–88.
4. Заміховський, Л. М., Саприкін, С. О. (2009). Концепція моніторингу технічного стану газоперекачувального обладнання. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях, 8, 64–68.
5. Васильєв, Ю. Н., Бесклетний, М. Е., Игуменцев, Е. А., Хризестен, В. Е. (1987). Вибрационный контроль технического состояния газотурбинных и газоперекачивающих агрегатов. М.: Недра, 197.
6. Сапрыкин, С. А. (2009). Методы и технические средства вибрационной диагностики газоперекачивающего оборудования. Харків, 368.
7. Заміховський, Л. М., Павлик, В. В. (2014). Дослідження вібраційного стану осьового компресора ГПА ГТК-251 фірми "Нуово Піньюне". Методи та прилади контролю якості, 1 (32), 28–38.
8. Kochergin, A. V., Pavlova, N. V., Valeeva, K. A. (2016). Vibroacoustic Control of Technical Conditions of GTE. Procedia Engineering, 150, 363–369. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.723>
9. Verma, N. K., Gupta, R., Sevakula, R. K., Salour, A. (2014). Signal transforms for feature extraction from vibration signal for air compressor monitoring. TENCON 2014 - 2014 IEEE Region 10 Conference. doi: <https://doi.org/10.1109/tencon.2014.7022275>
10. Yang, W. S., Su, Y. X., Chen, Y. P. (2019). Air compressor fault diagnosis based on lifting wavelet transform and probabilistic neural network. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 657, 012053. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/657/1/012053>

11. Krivosheev, I. A., Akimov, V. I., Kozhinov, D. G. (2017). Detection of Vibrodiagnostic Signs of Working Body Acoustic Vibrations in GPA-16R “Ufa” Gas Channel. *Procedia Engineering*, 176, 184–193. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.287>
12. Sun, W., An Yang, G., Chen, Q., Palazoglu, A., Feng, K. (2012). Fault diagnosis of rolling bearing based on wavelet transform and envelope spectrum correlation. *Journal of Vibration and Control*, 19 (6), 924–941. doi: <https://doi.org/10.1177/1077546311435348>
13. Zaccaria, V., Rahman, M., Aslanidou, I., Kyprianidis, K. (2019). A Review of Information Fusion Methods for Gas Turbine Diagnostics. *Sustainability*, 11 (22), 6202. doi: <https://doi.org/10.3390/su11226202>
14. Gishvarov, A. S., Raherinjatovo, J. C. (2017). Parametric Diagnostic State of Gas Turbine Power Plant. *Procedia Engineering*, 206, 1819–1824. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.719>
15. Jinfu, L., Jiao, L., Jie, W., Zhongqi, W., Daren, Y. (2016). Early Fault Detection of Hot Components in Gas Turbines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 139 (2). doi: <https://doi.org/10.1115/1.4034153>
16. Gishvarov, A. S., Raherinjatovo, J. C. (2018). Parametric diagnostics of the condition of a dual-flow turbojet engine using neural network simulation of the operating process. *MATEC Web of Conferences*, 224, 02057. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822402057>
17. Loboda, I., Olivares Robles, M. A. (2015). Gas Turbine Fault Diagnosis Using Probabilistic Neural Networks. *International Journal of Turbo & Jet-Engines*, 32 (2). doi: <https://doi.org/10.1515/tjj-2014-0019>
18. Fentaye, A. D., Ul-Haq Gilani, S. I., Baheta, A. T., Li, Y.-G. (2018). Performance-based fault diagnosis of a gas turbine engine using an integrated support vector machine and artificial neural network method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 233 (6), 786–802. doi: <https://doi.org/10.1177/0957650918812510>
19. Gorbiychuk, M., Zamikhovska, O., Zamikhovskyi, L., Zikratyi, S., Shtaiier, L. (2019). Evaluation of dynamic properties of gas pumping units according to the results of experimental researches. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (2 (98)), 73–81. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.163113>
20. Андрианова, Л. П., Гарипов, Ф. Г., Шаймарданов, Ф. А. (1997). Концепция автоконтроля и диагностики отказов электронных систем управления динамическими объектами на основе идентификации коэффициентов их передаточных функций. *Проблемы машиноведения, конструктивных материалов и технологий*, 161–168.
21. Андрианова, Л. П. (1997). Контроль и диагностика отказов САУ ГТД. Уфа: УГАТУ, 182.
22. Андрианова, Л. П., Шаймарданов, Ф. А., Гарипов, Ф. Г. (1997). Пат. № 2125287 РФ. Способ определения коэффициентов передаточных функций линейных динамических объектов. № 97107306/09; заявл. 06.05.1997; опубл. 27.03.1999, Бюл. № 2.

23. Андрианова, Л. П., Шаймарданов, Ф. А. (1997). Идентификация коэффициентов передаточных функций динамических объектов. Уфа: УГАТУ, 195.

24. Горбійчук, М. І., Пістун, Є. П. (2010). Числові методи і моделювання на ЕОМ. Івано-Франківськ: Факел, 408.

25. Симою, М. П. (1957). Определение коэффициентов передаточных функций линеаризованных звеньев и систем авторегулирования. Автоматика и телемеханика, 18 (6), 514–528.

Not a reprint