

Фізико-технічні проблеми транспорту та зберігання енергоносіїв

УДК 681.518.2

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПОМПАЖНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВІДЦЕНТРОВОГО НАГНІТАЧА ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ

Г.Н.Семенцов, Ю.Є.Бляут

¹ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,
тел. (03422) 46067, e-mail: public@nung.edu.ua

Рассматривается метод идентификации помпажной характеристики центробежного нагнетателя газоперекачивающего агрегата дожимной компрессорной станции подземного хранения газа. Результаты теоретических исследований подтверждены результатами внедрения разработанного метода в систему автоматического управления газоперекачивающим агрегатом.

In the article the method of authentication of pompage description of compressor is examined with a parallel model. A method allows in the automatic mode to define descriptions of object and utilize him for coordination of work of the system

Головними функціями системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом (САК ГПА) є функції керування, контролю, регулювання, а також деякі інформаційні функції [1]. До функцій керування відносяться: керування режимом роботи ГПА, автоматичне керування виконавчими механізмами і кранами газової обв'язки ГПА за заданими алгоритмами, дистанційне керування виконавчими механізмами і допоміжним обладнанням, автоматична перевірка пускової готовності, аварійна зупинка ГПА при відмові САК, або за командою оператора. Крім цього, САК реалізує декілька додаткових функцій, які розширюють можливість керування процесом транспортування газу на агрегатному рівні [2,3].

Автоматичне керування головними параметрами ГПА надзвичайно важливе, оскільки оптимальні режими роботи ГПА майже завжди є граничними, тобто знаходяться біля аварійних режимів, але допустимі відхилення таких параметрів як температура газу, частота обертання турбіни не повинні перевищувати $1\pm 2\%$ від їх номінальних значень [1, 2].

За умов модернізації та технічного переоснащення газотранспортної системи України з використанням найбільш сучасних і ефективних технологій однією з важливих функцій

САК ГПА є автоматичне визначення експлуатаційних характеристик нагнітача і агрегату в цілому. Тому розроблення методу ідентифікації помпажної характеристики відцентрового нагнітача ГПА є актуальним науково-практичним завданням. На базі таких характеристик формується висновок про необхідність проведення профілактичних робіт на двигуні та нагнітачі, або оновлення помпажних характеристик. Таке завдання вирішується за допомогою САК ГПА, яка забезпечує антипомпажне регулювання і захист від помпажу, та може забезпечити надійну роботу відцентрового нагнітача (ВН) поблизу границі помпажної зони, тому що чим більший запас за помпажем, тим менш ефективно працює ГПА і не завжди можливо технологічно забезпечити роботу агрегатів компресорної станції з значним (більше 20%) запасом за помпажем.

Тому метою роботи є розроблення методу ідентифікації помпажної характеристики відцентрового нагнітача ГПА і випробування його за умов експлуатації.

На базі досліджень різних підходів науковців встановлено, що методи ідентифікації об'єктів класифікують [4] за різними ознаками. Найбільш важливими є такі чотири групи: аналітичні і компенсаційні; статистичні і нестатистичні

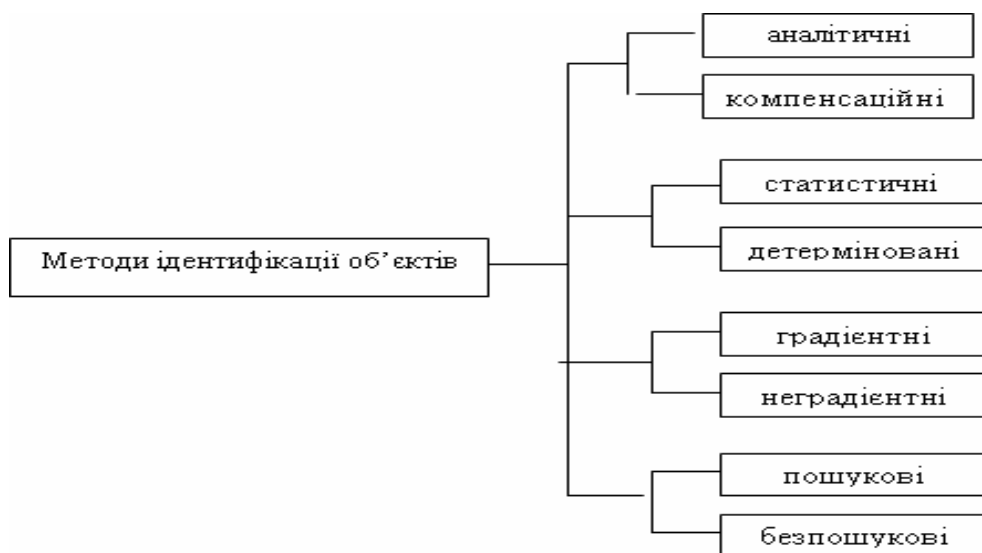


Рисунок 1 - Класифікація найбільш важливих методів ідентифікації об'єктів керування

тичні (детерміновані); градієнтні і неградієнтні; пошукові і безпошукові. Класифікацію найбільш важливих методів ідентифікації об'єктів керування наведено на рис. 1

Аналітичні методи ідентифікації об'єктів проводяться на базі аналізу перехідних функцій, частотних і статистичних характеристик вхідних і вихідних сигналів. Оцінки параметрів об'єкта визначають за співвідношеннями, що зв'язують характеристики вихідного сигналу з параметрами об'єкта і характеристиками вхідного сигналу.

Процеси, що протікають в об'єктах і системах, можуть бути математично описані деяким оператором

$$A_0(a, x, t), \quad (1)$$

де: $a(a_1, \dots, a_b, \dots, a_n)$. – вектор параметрів об'єкта;

a_i – i -й параметр;
 x – вхідний сигнал;
 t – час.

Наприклад, процес $y(t)$ на виході об'єкта (рис. 2) може бути описаний диференціальним, інтегральним або різницеvim рівняннями, функцією передачі, ваговою або перехідною функціями, частотними характеристиками та ін.

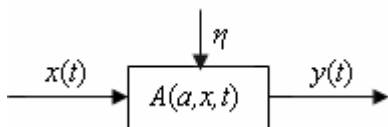


Рисунок 2 – Структурна схема об'єкта ідентифікації (η - завади)

У конкретних випадках формальний вигляд оператора A вибирається з відповідної математичної мови з урахуванням адекватності останньої, а також конструктивності і зручності.

Якщо об'єкт лінійний, то оператор A не залежить від вхідного сигналу $x(t)$ і має вигляд $A(a, t)$. Якщо структура і параметри об'єкта ста-

ціонарні, то оператор не залежить від часу, тобто $A(a, x)$. Якщо об'єкт є лінійним і стаціонарним, то оператор A визначається тільки вектором параметрів $a(a_1, \dots, a_b, \dots, a_n)$.

Математична модель, що описує процеси на виході об'єкта при відомих x і t і отримана в результаті розв'язання задачі ідентифікації, є оцінкою оператора A ; аналогічно a_i є оцінкою i -го параметра об'єкта.

У ході технічного розв'язання задачі ідентифікації необхідно врахувати наявні обмеження, обумовлені умовами роботи об'єкту, загальною метою ідентифікації і якістю розв'язку задачі. Так, наприклад, якщо відомо, що на об'єкт поступають дії $x(t)$, що належать деякій

множині дій, то модель $\hat{A}(a, x, t)$ повинна з необхідною точністю описувати процеси на виході об'єкта, коли на його вхід поступають дії, які належать множині Ω_x .

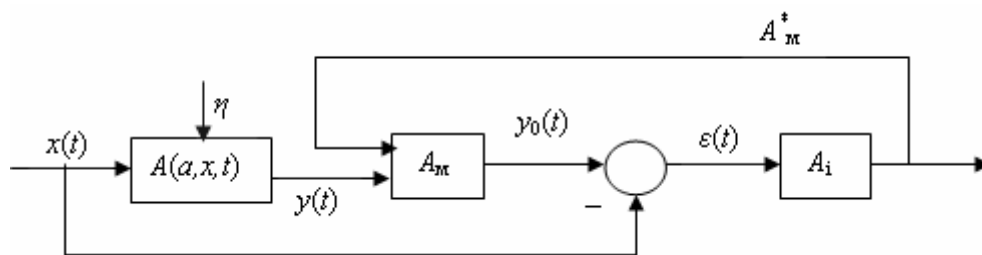
Якщо об'єкт ідентифікують з метою побудови системи оптимального керування, то важливо отримувати більш точні оцінки тих параметрів, від яких найістотніше залежить величина міри оптимальності керування, і, очевидно, немає необхідності в точному визначенні оцінки тих параметрів, від яких міра оптимальності керування мало, або не залежить взагалі. Таким чином, ідентифікація в завданнях вимірювання і оптимального керування дещо відрізняється.

Точні математичні моделі об'єкта, зазвичай, достатньо складні. На практиці немає необхідності у визначенні точних моделей. Тому

оцінку \hat{A} шукають, як правило, у певному класі операторів.

Таким чином, завдання ідентифікації помпажної характеристики відцентрового нагнітача полягає в наступному.

Існує деякий об'єкт, що описується оператором $A(a, x, t)$ і належить деякому класу операторів Ω_A . На його вхід поступають сигнали x , що належали деякій множині сигналів Ω_A . Не-



A_m – оператор моделі; $x(t)$ – вхідний сигнал; $y(t)$ – вихідний сигнал об’єкта, A_m^* – деяке значення оператора A_m , яке є оцінкою оператора об’єкта A ; A_i – алгоритм ідентифікації; η – завади

Рисунок 3 – Схема компенсаційної системи ідентифікації помпажних характеристик ГПА з послідовною моделлю

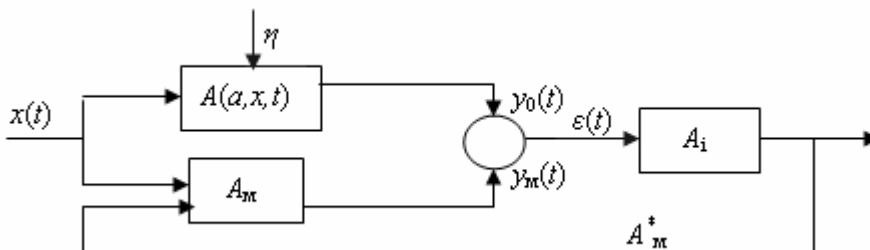


Рисунок 4 – Схема компенсаційної системи ідентифікації помпажних характеристик ГПА з паралельною моделлю

обхідно вибрати деякий оператор $\hat{A}(a, x, t)$ з множини операторів Ω_A , який для того ж класу вхідних сигналів Ω_x буде досить близьким до оператора $A(a, x, t)$, тобто описуватиме процеси на виході об’єкта з необхідною точністю.

Клас операторів \hat{A} , зазвичай, задається і, як правило, є вужчим, ніж Ω_A . Для дослідження, наприклад, деяких властивостей нелінійних систем іноді застосовують лінійні моделі або під час дослідження складних систем високого порядку застосовують моделі нижчого порядку.

Таким чином, задача ідентифікації помпажних характеристик є не що інше, як задача апроксимації невідомого оператора $A \in \Omega_A$

оператором \hat{A} , вибраним, зазвичай, з відомого класу операторів Ω_A для певного класу вхідних дій $x \in \Omega$. Міра близькості операторів A і \hat{A} формується з урахуванням вимог до оцінки \hat{A} . Оператор $\hat{A}(a, x, t)$ є розв’язком задачі ідентифікації помпажних характеристик відцентрового нагнітача ГПА.

Аналітичні методи мають відносно велику швидкодію, якщо для аналізу відповідних характеристик і розв’язку рівнянь зв’язку або систем рівнянь застосовують ЕОМ. При використанні аналітичних методів немає необхідності в спостереженні або вимірюванні функціоналу якості. Отже, аналітичні методи ідентифікації є розімкненими.

Недоліком аналітичних методів є те, що вони, зазвичай, вимагають математичного опису вхідних і вихідних сигналів або їх статистичних характеристик. Неточність ідентифікації під час цього підходу безпосередньо пов’язана з похибкою обчислень, неточністю математичного опису сигналів, обумовленою неврахуванням нестационарності і наявністю зовнішніх завад.

У випадку використання компенсаційних методів ідентифікації застосовують моделі об’єкта, структури яких вибираються евристично на основі деяких даних про об’єкт і вимог до точності та складності його опису.

Світовою практикою прийнято періодично визначати границі помпажу за витратно-напірними характеристиками кожного нагнітача ГПА, оскільки точка входу в помпаж є змінною величиною.

Більш ефективним для вирішення такої задачі є використання компенсаційних методів, що базуються на моделі об’єкта, яка з’єднується з реальним об’єктом послідовно або паралельно (рис. 3, рис. 4).

Деяке значення A_m^* оператора моделі A_m приймають згідно з критерієм оптимальності як оцінку оператора об’єкта A , тобто $A_m^* = A$. За відсутності завад функціонал якості ідентифікації може бути сформульований на основі різниці ϵ вихідних сигналів об’єкта y_0 і моделі y_m [4].

Оскільки помпажні характеристики ГПА нелінійні, то оператор A залежить також від вхідного сигналу x .

Математична модель A , яка описує процеси на виході об’єкта при відомих x та t і отримана як результат розв’язання задачі ідентифікації помпажної характеристики, є оцінкою

оператора A , аналогічно a_i – оцінкою i -го параметра об'єкта.

Структура моделі вибирається евристично на базі деяких архівних даних про помпажні характеристики конкретного відцентрового нагнітача ГПА і вимоги до точності і складності опису.

Структура послідовної моделі вибирається як обернена по відношенню до структури гіпотетичної моделі об'єкта, а структура паралельної моделі ідентична структурі гіпотетичної моделі об'єкта.

Значення параметрів моделі A_m , при яких показник якості ідентифікації має оптимальне значення, вибрані як оцінки параметрів помпажних характеристик відцентрового нагнітача газу.

Можлива система ідентифікації з послідовно-паралельною моделлю.

Компенсаційні методи відносяться до замкнених методів, оскільки за допомогою цих методів проводять ідентифікацію на основі стеження за мірою якості. При цьому зменшуються похибки, обумовлені не стаціонарністю, і виключаються похибки, пов'язані з математичним описом вхідних і вихідних сигналів. Компенсаційні методи не вимагають математичного опису сигналів. Їх швидкодія, яка залежить в основному від початкового стану моделі і швидкості збіжності алгоритму оптимізації, зазвичай, менша від швидкодії аналітичних методів. Застосування компенсаційних методів вимагає наявності моделі об'єкта, а також оптимізуючого пристрою, в чому полягає їх складність.

Статистичні методи ідентифікації ґрунтуються на використанні статистичних характеристик (функцій розподілу, кореляційних функцій, спектральної густини, моментів та ін.) сигналів, які використовують для ідентифікації. При цьому міра якості формується у вигляді деякого середнього ризику. Статистичний підхід необхідний за наявності випадкових завад, оскільки він дає змогу зменшити невизначеність результату ідентифікації. Недолік статистичних методів полягає в тому, що вони вимагають або знання згаданих статистичних характеристик, або часу для їх визначення (часу усереднювання). Похибка статистичних методів, в основному, обумовлюється неточністю знання або визначення статистичних характеристик.

Детерміновані методи засновані на ідентифікації детермінованих функціональних залежностей, що пов'язують параметри вихідного сигналу з параметрами об'єкта і вхідного сигналу. Ці методи застосовуються за відсутності завад. Основний їх недолік – низька завадостійкість.

Гradientні методи ідентифікації містять gradientні алгоритми оптимізації міри якості. Рух до оптимального значення міри якості проводиться за gradientом у бік його оптимального значення з швидкістю, пропорційною gradientа міри якості. Чисто gradientний метод застосовується, коли міра якості строго унімодальна. Недолік gradientних методів обумовлений, в

основному, недосконалістю міри якості, за якою, зазвичай, параметри об'єкта взаємопов'язані. В результаті цього отримані оцінки останніх можуть бути змішеними. Складність реалізації gradientних систем ідентифікації полягає в необхідності наявності пристроїв для визначення компонент gradientа функціоналу міри якості.

У разі використання неgradientних методів здійснюють рух до оптимального значення функціоналу якості неgradientним способом, і немає необхідності в безперервному визначенні компонент gradientа. Визначають тільки напрям зменшення функціоналу якості, уздовж якого відбувається рух, а також крок руху, що забезпечує певні якості процесу ідентифікації (наприклад, його збіжність). Швидкодія неgradientних методів, як правило, нижча за швидкодію gradientних, а їх похибка обумовлена кінцівкою кроків руху до оптимального значення міри якості, що, зазвичай, призводить або до коливального циклу навколо оптимальної точки, або до зсуву оцінок.

При пошукових методах ідентифікації для організації руху до оптимального стану застосовують спеціальні пробні параметричні коливання, з чим пов'язаний їх основний недолік. Швидкодія пошукових систем ідентифікації невелика. Для таких систем характерний коливальний режим навколо оптимальної точки. Завадостійкість їх низька, оскільки міра якості змінюється не тільки під впливом пробних сигналів, але й залежить від завад.

Безпошукові методи ідентифікації об'єктів не вимагають застосування спеціальних пошукових параметричних сигналів, і тому вони позбавлені недоліків, пов'язаних з останніми. Для цілей ідентифікації, зазвичай, використовують вхідні сигнали об'єкта. Це означає, що перешкоди, які складаються з корисним сигналом на вході об'єкта і моделі, є корисними сигналами для ідентифікації. При інформативних вхідних сигналах безпошукові методи мають швидкодію вищу за швидкодію пошукових методів.

Застосування компенсаційних методів ідентифікації помпажних характеристик відцентрового нагнітача ГПА обумовлюється конкретною ситуацією, а саме неможливістю організації пошуку на об'єкті, його перевагами і зручністю реалізації [4].

Для вирішення задачі ідентифікації помпажної характеристики відцентрового нагнітача ГПА скористаємося його функцією передачі

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{k}{Tp + 1},$$

де: $Y(p)$, $X(p)$ – зображення за Лапласом вихідного $y(p)$ і вхідного $x(p)$ елементів;

k – коефіцієнт передачі;

T – стала часу.

Для знаходження коефіцієнта передачі k скористаємося еталонною характеристикою $E=f(Q_{np})$ відцентрового нагнітача типу 370 при $n_{np}=1$, де E – ступінь стиснення газу, Q_{np} – приведена витрата, n_{np} – приведена частота обертання.

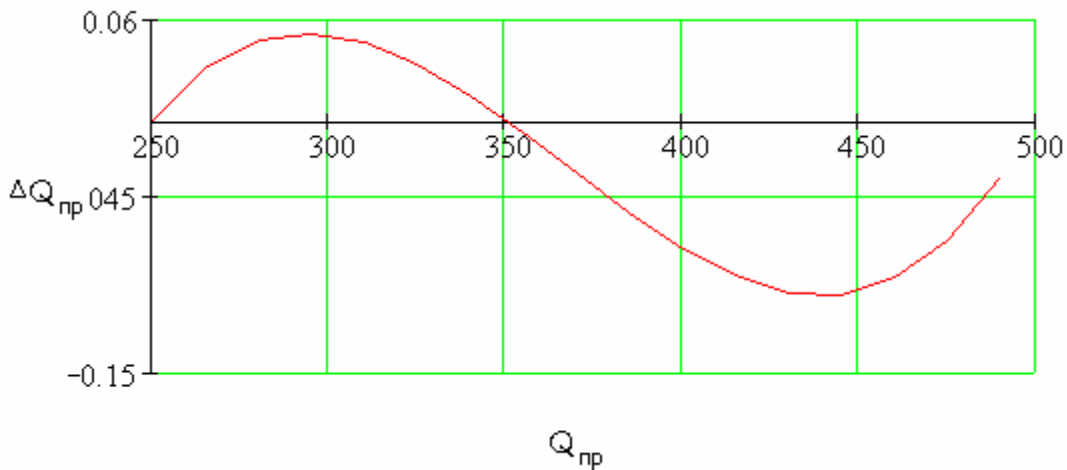


Рисунок 5 – Графік залежності похибки апроксимації $\Delta Q_{пр}$ еталонної характеристики $E=f(Q_{пр})$ відцентрового нагнітача від приведенної витрати $Q_{пр}$

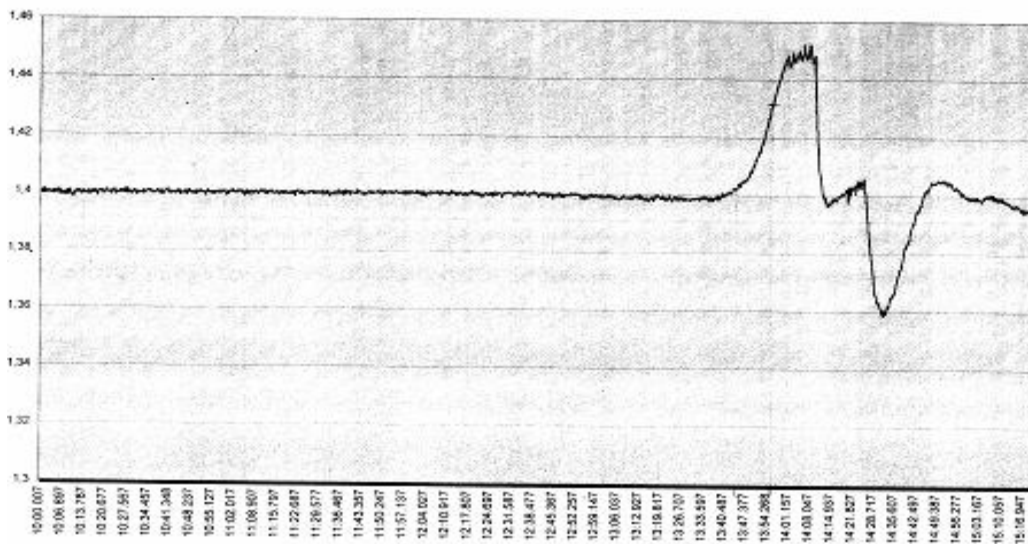


Рисунок 6 – Графік зміни в часі ступеня стиснення газу E , отриманий на ГПА №9 ДКС ПСГ «Більче-Волиця» ($T=6,9$ сек.)

Для отримання рівняння статичної характеристики апроксимацію кривої $E=f(Q_{пр})$ було здійснено за допомогою інтерполяційного многочлена Лагранжа. Розрахунки наведено в програмному середовищі Mathcad. В результаті отримано:

$E = f(Q_{пр}) = -2,2 \cdot 10^{-6} Q_{пр}^2 + 1,05 \cdot 10^{-3} Q_{пр} + 1,15$
 Похибка апроксимації не перевищує 0,104% і залежить від приведенної витрати $Q_{пр}$ (рис. 5).

Із результатів аналізу графіка (рис. 5) бачимо, що при $Q_{пр}=350$ похибка апроксимації прямує до нуля.

Коефіцієнт передачі визначили як значення похідної в робочій точці $Q_{пр} = 300$:

$$k = \left. \frac{\partial E}{\partial Q_{пр}} \right|_{Q_{пр}=300} = -2,7 \cdot 10^4$$

Отже функція передачі об'єкта буде мати вигляд:

$$W(p) = \frac{-2,7 \cdot 10^4 \cdot e^{-p\tau}}{Tp + 1},$$

де $T=10$ – визначена за допомогою графіка $E(t)$, отриманого експериментальним шляхом безпосередньо на об'єкті (рис.6).

Тоді

$$W(p) = \frac{-2,7 \cdot 10^4 \cdot e^{-p\tau}}{10p + 1}.$$

Систему ідентифікації з паралельною моделлю змодельовано в програмному пакеті Matlab Simulink (рис. 7).

Для апроксимації еталонної характеристики та виведення відхилення реальної характеристики $E=f(Q_{пр})$ необхідно ввести три точки графіка характеристики та функцію передачі.

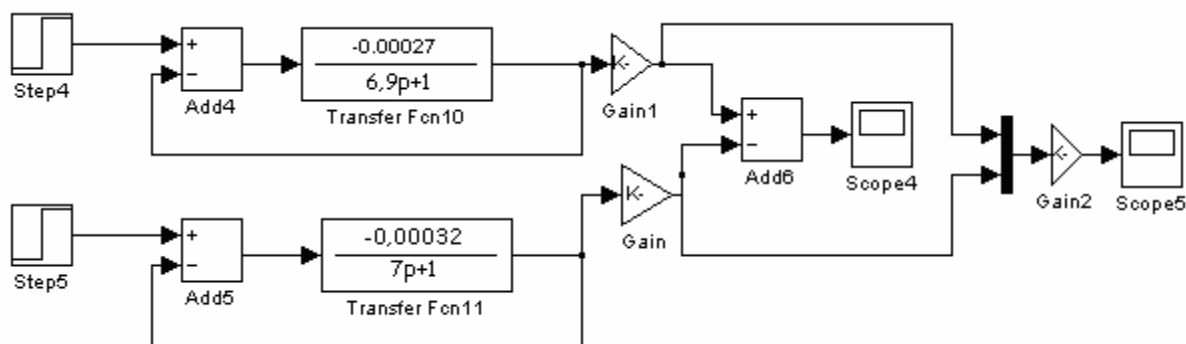
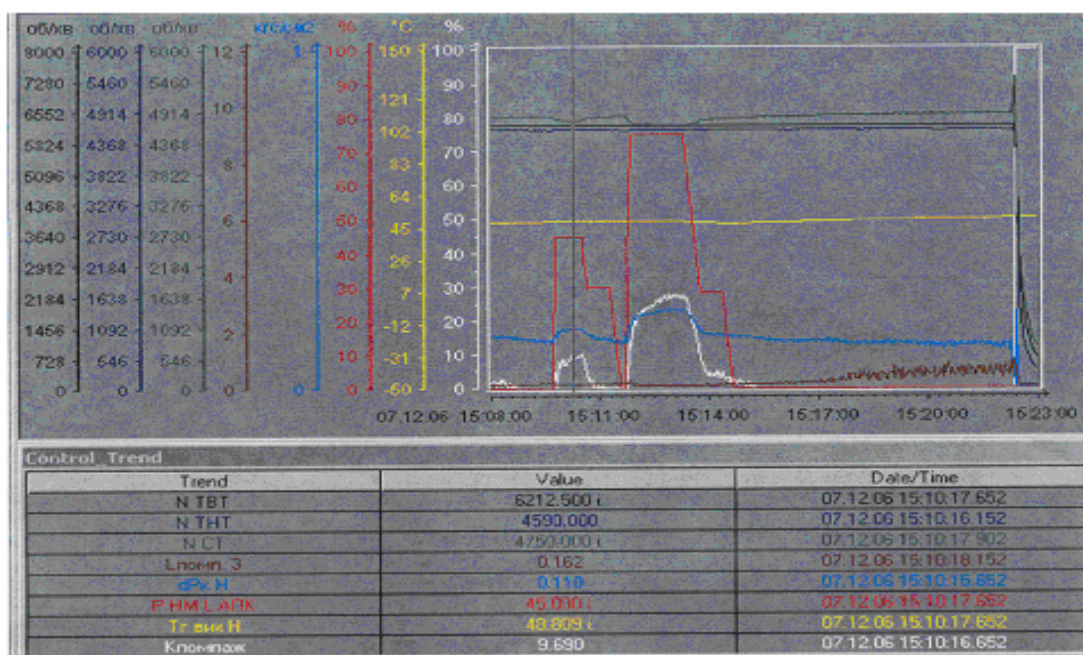


Рисунок 7 — Simulink – система ідентифікації помпажної характеристики з паралельною моделлю



N_{TBT} – частота обертання турбіни високого тиску ГТУ, N_{THT} – частота обертання турбіни низького тиску ГТУ, N_{CT} – частота обертання силової турбіни ГТУ, яка відповідає частоті обертання нагнітача, $L_{помп.3}$ – сигнал з датчика звуку на вихідному патрубку нагнітача, dP_{vH} – перепад на конфузори, $P_{НМЛАПК}$ – положення антипомпажного клапана, $T_{вихH}$ – тиск на виході нагнітача, $K_{помпаж}$ – розрахунковий запас за помпажем

Рисунок 8 – Графіки зміни в часі параметрів ГПА №9 під час проведення активного експерименту з метою випробування системи антипомпажного захисту

Тоді натискаємо на кнопку «Побудова графіка» і на екрані виводяться дві приведені характеристики – еталонна та реальна. Натискаємо на кнопку «Побудова графіка» ще раз і одержуємо величину відхилення ε .

Розроблена адаптивна система ідентифікації помпажних характеристик відцентрових нагнітачів виготовлена і впроваджена у 2006 р. на ГПА №9 ДКС ПСГ «Більче-Волиця». Безпосередньо на об'єкті були досліджені властивості адаптивної системи ідентифікації.

Об'єктом досліджень є підсистема антипомпажного регулювання (АПР) системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом Ц-16 (САК ГПА Ц-16), що функціонує у взаємодії з центральною частиною САК ГПА, системою керування подачею палива, швидко-

діючим антипомпажним клапаном (АПК) «Моквелд», який встановлений на вихідному колекторі об'язки нагнітача, та призначений для антипомпажного регулювання та захисту цього нагнітача при наближенні до помпажних явищ.

Метою випробування є уточнення помпажної характеристики на приведеній напірво-витратній характеристиці нагнітача. Ця характеристика формується по трьох точках на різних частотах обертання (4300 об/хв, 4600 об/хв і 4900 об/хв) силової турбіни (СТ) при роботі ГПА в режимі «магістраль» з створенням помпажу нагнітача шляхом перекриття вихідного станційного крану або шляхом зниження обертів ГПА, що працює послідовно з ГПА №9. На

час цих випробувань відключаються системи антипомпажного захисту та регулювання.

Нагнітач ГПА №9 доводиться до помпажного стану при швидкості обертання СТ $n=4300$ об/хв., а помпаж ідентифікується шляхом візуального спостереження за станом параметрів та виникненням характерних звукових коливань. Переривання виниклого помпажу проводиться шляхом форсованого відкриття АПК в ручному режимі. Спосіб ідентифікації помпажу полягає в наступному: по сигналу фіксується помпаж з наступним аналізом архівних даних, наприклад: швидкість обертання СТ, перепаду тиску на конфузори нагнітача, вібрації опор нагнітача і т.д.

Початком розвитку помпажних явищ в нагнітачі вважається комплексна зміна параметрів, наприклад: зміна швидкості обертання СТ з подальшим коливальним процесом, падіння значення параметру перепаду тиску на конфузори нагнітача, зміна значення параметрів вібрації опор нагнітача, зміна значення осьового зсуву.

Потім аналізуються архівні дані вказаних параметрів по цьому випробуванню, встановлюється помпажна точка при швидкості обертання СТ $n=4300$ об/хв і лише при позитивних результатах випробувань при цих обертах переходимо до наступних випробувань при обертах $n=4600$ об/хв і $n=4900$ об/хв.

Після завершення випробувань підключаються системи антипомпажного захисту та регулювання.

Отже, на основі результатів випробувань визначається помпажна характеристика, яка є підставою для внесення змін у програмне забезпечення САК ГПА агрегатом Ц-16.

На графіках (рис. 8) наведено приклад роботи системи в режимі антипомпажного захисту (без регулювання). Система ідентифікує виникнення помпажу і усуває його форсованим та (розрахованим в залежності від інтенсивності виникнення процесу) відкриттям антипомпажного клапану. Після стабілізації технологічних показників агрегату система здійснює автоматичне завантаження агрегату «в магістраль».

Найбільш інформативним і цікавим є фрагмент 15:08:00 – 15:15:00. Система антипомпажного захисту спрацювала в режимі реальної експлуатації. З дозволу інженерного персоналу в момент 15:16:00 систему АПЗ було вимкнено. В результаті вимкнення системи антипомпажного захисту ГПА зупинився аварійно (АЗ від сигналізатора критичного перепаду тиску СПД-1) з визначенням «Помпаж». Це підтвердило безпомилковість відпрацювання системи антипомпажного захисту. Момент аварійної зупинки о 15:22:00 з визначенням “Помпаж” дає матеріал для обчислення ще однієї точки на помпажній характеристиці.

Висновок

Розроблено і експериментально досліджено метод адаптивної ідентифікації наведених характеристик відцентрових нагнітачів ГПА з паралельною моделлю, що дозволяє реалізувати систему автоматичної ідентифікації приведених характеристик відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів в режимі on-line та отримати відхилення, за допомогою якого відбувається корекція роботи антипомпажної системи.

Література

- 1 Аранович Б.И. Автоматическое управление газотурбинными установками / Б.И.Аранович, Ю.Т.Лячек, В.А.Олейников, А.А.Файнштейн. – Л.: Недра, 1974. – 216 с.
- 2 Ревзин Б.С. Газотурбинные газоперекачивающие агрегаты / Ревзин Б.С.. – М.: Недра, 1986.– 215 с.
- 3 Продовиков С., Макаров А., Бунин В., Черников А. Опыт автоматизации сложных промышленных объектов на примере газомопрессорных станций. Системная интеграция // Нефтегазовая промышленность. – 1999. – №2. – С. 16-25.
- 4 Адаптивна ідентифікація / А.Г.Кику, В.И.Костюк, В.Е.Краскевич, А.Н.Сильвестров, С.В.Шпит. – К.: Техніка, 1975. – 268 с.