

На правах рукопису

БЛЯУТ Юрій Євстахович



УДК: 681.513.52:622.691.4

**АВТОМАТИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПОМПАЖНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ З
ГАЗОТУРБІННИМ ПРИВОДОМ
ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО АНТИПОМПАЖНОГО РЕГУЛЮВАННЯ**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Перший промірник дисертації ідейними за змістом з іншими промірниками дисертації, поданими до списку вченої ради №052.03
Науковий керівник:
Семенцов Георгій Никифорович
доктор технічних наук,
професор



Івано-Франківськ – 2013

0471

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПОМПАЖНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДЦЕНТРОВИХ НАГНІТАЧІВ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТИВ ДОТИСКУВАЛЬНИХ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ ПІДЗЕМНИХ СХОВИЩ ГАЗУ.....	13
1.1. Характеристика об'єкта керування.....	13
1.2. Характеристика відмов обладнання на ДКС «Більче-Волиця».....	22
1.3. Нагнітач ГПА як об'єкт дослідження.....	27
1.4. Аналіз методів визначення моментів входу робочої точки нагнітача в зону помпажу.....	33
1.5. Обґрунтування і вибір напряму досліджень.....	40
РОЗДІЛ 2	
ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ АВТОМАТИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПОМПАЖНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВІДЦЕНТРОВОГО НАГНІТАЧА.....	43
2.1. Аналіз явища помпажу і помпажних характеристик відцентрових нагнітачів з газотурбінним приводом.....	43
2.2. Модель відцентрового нагнітача як об'єкта антипомпажного регулювання.....	57

2.3. Аналіз впливу кроку дискретизації інформативних параметрів на час регулювання системи автоматичної ідентифікації помпажних характеристик газоперекачувального агрегату.....	60
2.4. Ідентифікація помпажної характеристики відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату.....	65
Висновки до другого розділу.....	79

РОЗДІЛ 3

ОЦІНЮВАННЯ СТАТИСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТУПЕНЯ ПІДВИЩЕННЯ ТИСКУ ГАЗУ І МАСОВОЇ ВИТРАТИ ГАЗУ У ПРОМИСЛОВІЙ СИСТЕМІ АВТОМАТИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ РЕАЛЬНИХ ПРИВЕДЕНИХ ВИТРАТНО- НАПІРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДЦЕНТРОВИХ НАГНІТАЧІВ ГПА З ГАЗОТУРБІННИМ ПРИВОДОМ.....

3.1. Визначення кореляційного зв'язку ступеня підвищення тиску газу в газоперекачувальному агрегаті з масовою витратою газу.....	81
3.2. Аналіз характеристик коефіцієнту помпажу газоперекачувального агрегату дотискувальної компресорної станції.....	87
3.3. Аналіз динамічних властивостей відцентрового нагнітача ГПА з газотурбінним приводом як об'єкта керування.....	100
3.3.1. Теоретичне обґрунтування методу визначення динамічних властивостей ВН ГПА з газотурбінним приводом.....	100
3.3.2. Аналіз статистичних характеристик продуктивності відцентрового нагнітача.....	105
3.3.3. Аналіз статистичних оцінок ступеня підвищення тиску газу....	114
3.3.4. Визначення функції передачі відцентрового нагнітача ГПА як об'єкта керування.....	119
3.4. Автоматична ідентифікація реальних приведених витратно-	

напірних характеристик відцентрових нагнітачів.....	126
Висновки до третього розділу	135

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ АПРОБАЦІЇ ПІДСИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПОМПАЖНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

ВІДЦЕНТРОВОГО НАГНІТАЧА У СКЛАДІ САК ГПА ДКС ПСГ «БІЛЬЧЕ-ВОЛИЦЯ».....	137
4.1. Методика автоматичної ідентифікації помпажної характеристики відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату Ц-16 ДКС “Більче-Волиця” УМГ “Львівтрансгаз”.....	137
4.2. Метрологічне забезпечення вимірювальних каналів системи автоматичного керування агрегатом Ц-6,3 та підсистеми ідентифікації помпажних характеристик.....	141
4.3. Програма проведення помпажних тестів на ГПА ст. №4 типу Ц-6,3ВА ЗПЧ/46-1,7 з газотурбінним приводом Д-336-2 для ДКС «Дашава» УМГ «Львівтрансгаз».....	147
4.4. Результати попередніх випробувань підсистеми антипомпажного регулювання та захисту на газоперекачувальному агрегаті (ГПА) №9 дотискувальної компресорної станції (ДКС) “Більче-Волиця”.....	156
4.5. Калібрування помпажної характеристики відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату в режимі on-line.....	162
Висновки до четвертого розділу.....	168
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	170
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	173
ДОДАТКИ.....	188

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

АПЗ	– антипомпажний захист;
АПР	– антипомпажне регулювання;
АПК	– антипомпажний клапан;
БУК	– блок управління краном;
ВН	– відцентровий нагнітач;
ГПА	– газоперекачувальний агрегат;
ГТУ	– газотурбінна установка;
ГЩУ	– головний щит управління;
ДКС	– дотискувальна компресорна станція;
КВТ	– компресор високого тиску;
КНТ	– компресор низького тиску;
КС	– компресорна станція;
КПТЗ	– комплекс програмно-технічних засобів;
КЦ	– компресорний цех;
ПЗ	– програмне забезпечення;
ППЗ	– прикладне програмне забезпечення;
ПЛК	– програмований логічний контролер;
ПО	– пульт оператора;
ПТК	– програмно-технічний комплекс;
САК ГПА	– система автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом;
САК КЦ	– система автоматичного керування компресорним цехом;
САК КС	– система автоматичного керування компресорною станцією;
СТ	– силова турбіна;
ТВТ	– турбіна високого тиску;
ТНТ	– турбіна низького тиску;
QNX	– операційна система реального часу (UNIX-подібна)
Win NT	– операційна система Windows NT v.4

ВСТУП

Актуальність теми. Автоматична ідентифікація помпажних характеристик газоперекачувальних агрегатів (ГПА) є підзадачею загальної проблеми оптимального керування компресорними станціями (КС), зокрема дотискувальними компресорними станціями (ДКС) підземних сховищ газу (ПСГ), які повинні забезпечувати високу надійність функціонування єдиної системи газопостачання України.

Аналіз статистики відмов за останні вісім років довів, що значну частину відмов обладнання ДКС ПСГ складають аварійні зупинки, спричинені безпосередньо явищами помпажу. Тому на ДКС ПСГ ДК «Укртрансгаз» гостро стоїть проблема захисту ГПА від помпажу. Традиційно ідентифікація помпажних характеристик ГПА, як задача отримання оптимальних в сенсі вибраного критерію оцінок векторів стану ГПА, здійснюється на основі обробки паспортних даних або фактичних характеристик відцентрових нагнітачів (ВН) ГПА. Проте, під час вирішення цієї задачі має місце невизначеність в апріорній інформації, яка може погіршити оцінки або вони можуть, навіть, втратити сенс.

Існуючі алгоритми ідентифікації, що мають доведену збіжність, вимагають або розширення вектора стану ГПА за рахунок включення в нього невідомих значень елементів матриці завад, або застосування алгоритмів стохастичної апроксимації, які суттєво залежать від розмірності схеми, або взагалі стають непридатними в реальних умовах внаслідок великої розмірності коваріаційної матриці завад, недостатньої кількості інформації та ін.. Застосування розширеного вектору стану в алгоритмах першого типу веде практично до подвоєння розмірності вектора стану ГПА. Алгоритми стохастичної апроксимації мають недостатню збіжність, при цьому із збільшенням розмірності матриці завад швидкість їх збіжності значно зменшується. Отже на даний час актуальною науково-прикладною задачею є розроблення і застосування нового методу та алгоритму автоматичної

ідентифікації помпажних характеристик ГПА, який був би вільним від вказаних вище недоліків.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Вибраний напрямок досліджень, виконаних у дисертаційній роботі, є складовою частиною тематичного плану Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ). Дисертаційна робота виконувалася автором відповідно до основного наукового напрямку діяльності кафедри автоматизації технологічних процесів і моніторингу в екології ІФНТУНГ. Тематика роботи є також частиною планової державної «Програми впровадження в експлуатацію САК ГПА та САК КЦ по ДК «Укртрансгаз» в 2007р.» (затв. ДК «Укртрансгаз» 28.12.2006р.). Науковою базою дисертації стали результати, отримані в процесі виконання науково-дослідних робіт, що здійснювалися за планами наукових досліджень ІФНТУНГ в рамках держбюджетних тем «Автоматизоване управління технологічними процесами буріння, видобування, транспортування, зберігання і переробки нафти і газу» (затв. Науковою радою ІФНТУНГ 04.10.04р., пр. № 8), «Розробка теоретичних основ і математичного забезпечення систем автоматизованого управління технологічними процесами галузі» (затв. Науковою радою ІФНТУНГ 07.10.2010 р., пр. № 8) та «Синтез комп'ютерних систем та розробка програмного забезпечення для об'єктів нафтогазового комплексу» (ДР № 0111U005890). В межах зазначених тем здобувач був безпосередньо виконавцем розділів робіт щодо розробки нового методу автоматичної ідентифікації помпажних характеристик ГПА з газотурбінним приводом.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності автоматичного керування газоперекачувальними агрегатами дотискувальних компресорних станцій підземних сховищ газу шляхом застосування методу та засобів автоматичної ідентифікації помпажних характеристик однотипних відцентрових нагнітачів при дотриманні встановлених обмежень незалежно від типу авіаційного газотурбінного приводу, який встановлюється для приведення їх у дію.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення наступних задач:

- комплексний аналіз сучасного стану досліджень ідентифікації помпажних характеристик відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів;
- встановлення зв'язків ступеня підвищення тиску газу з масовою витратою газу та розроблення методу ідентифікації помпажних характеристик відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів дотискувальної компресорної станції;
- встановлення зв'язку кроку дискретизації інформативних параметрів з часом перехідного процесу підсистеми автоматичної ідентифікації помпажних характеристик в складі САК ГПА;
- ідентифікація функції передачі відцентрового нагнітача експериментально-аналітичним методом;
- експериментальні дослідження в експлуатаційних умовах розробленого методу і системи автоматичної ідентифікації помпажних характеристик газоперекачувальних агрегатів, аналіз і узагальнення результатів досліджень;
- розробка промислового зразку програмно-апаратного комплексу підсистеми автоматичної ідентифікації помпажних характеристик ВН ГПА і промислова апробація результатів досліджень.

Об'єктом дослідження є явище помпажу у відцентрових нагнітачах газоперекачувальних агрегатів з газотурбінним приводом, що функціонують на дотискувальних компресорних станціях підземних сховищ газу, яке приводить до істотних економічних втрат.

Предметом дослідження є моделі і методи ідентифікації помпажних характеристик відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів з газотурбінним приводом.

Методи дослідження. В основу досліджень покладено методи теорії автоматичного керування (для визначення функції передачі відцентрового нагнітача); теорії спектрально-кореляційного аналізу і обробки сигналів (для встановлення закономірностей і залежностей між масовою витратою газу і

ступенем підвищення тиску газу); активного експерименту і фізичного моделювання (для отримання експериментальних даних і підтвердження вірогідності отриманих теоретичних результатів); схемотехніки (для розробки структури автоматичної системи ідентифікації помпажних характеристик); об'єктно-орієнтованого програмування (при розробці програмного забезпечення).

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

вперше:

- на основі встановленого зв'язку ступеня підвищення тиску газу з масовою витратою газу розроблено метод автоматичної ідентифікації реальних помпажних характеристик відцентрового нагнітача ГПА, як об'єкта керування, який реалізовано на базі удосконаленої методики визначення його витратно-напірних характеристик. Він дозволяє підвищити точність регулювання нагнітача антипомпажним клапаном, веде до зниження аварійності при роботі в перехідних і передпомпажних режимах та забезпечує економію пускового та паливного газу;

- досліджено зв'язок кроку дискретизації інформативних параметрів з часом перехідного процесу САК ГПА, що дало змогу вибрати оптимальний крок дискретизації та зменшити час перехідного процесу системи;

- отримано кореляційні функції масової витрати газу і ступеня підвищення тиску газу відцентрового нагнітача ГПА, що дало змогу визначити функцію передачі відцентрового нагнітача, його диференціальне рівняння та використати їх для розв'язання задачі автоматичної ідентифікації помпажних характеристик;

удосконалено:

- загальну структуру САК ГПА і підсистему автоматичної ідентифікації помпажних характеристик відцентрових нагнітачів, яка реалізує розроблений метод ідентифікації і побудови помпажних характеристик в реальному часі шляхом контролю масової витрати і ступеня підвищення тиску газу. Це дало змогу забезпечити підвищення надійності експлуатації ГПА компресорної станції вцілому, розширення можливої зони роботи відцентрових нагнітачів, а

також прогнозувати реальну продуктивність кожного ГПА та зменшити кількість помпажів на ДКС.

Практичне значення одержаних результатів визначається тим, що на основі теоретичних досліджень реалізовано підсистему автоматичної ідентифікації помпажних характеристик відцентрових нагнітачів ГПА з газотурбінним приводом у складі САК ГПА, яка дозволяє підвищити надійність експлуатації ГПА, розширити можливу зону роботи відцентрових нагнітачів, зменшити об'єми рециркуляції транспортованого газу в передпомпажних режимах роботи компресорного цеху та відповідно скоротити об'єм споживання паливного газу за рахунок розширення використовуваного робочого діапазону нагнітачів.

Розроблені в дисертації моделі, метод, а також алгоритмічне і програмне забезпечення дають змогу вирішувати задачу автоматичної ідентифікації помпажних характеристик ГПА з газотурбінним приводом. Вони пройшли промислові випробування та впроваджені на об'єктах: ДКС «Дашава» філії УМГ «Львівтрансгаз» (акт впровадження від 25.10.2011 р.), очікуваний економічний ефект складає понад 0,8 млн. грн. на рік за рахунок економії паливного і пускового газу, а також скорочення об'ємів рециркуляції по КС орієнтовано на 80%; ДКС «Більче-Волиця» Стрийського ВУПЗГ (акт впровадження від 19.10.2011 р.), очікуваний економічний ефект складає понад 1,2 млн. грн. на рік із врахуванням скорочення об'ємів рециркуляції по КС орієнтовано на 70%.

Окремі розділи дисертаційної роботи використані у навчальному процесі ІФНТУНГ на кафедрі автоматизації технологічних процесів і моніторингу і екології при підготовці й читання курсу «Автоматизація технологічних процесів і виробництв у нафтовій і газовій промисловості» студентам спеціальності 7.050202 – автоматизоване управління технологічними процесами (акт впровадження від 26.12.2011 р.).

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати та положення дисертаційної роботи одержані автором особисто. У роботах, написаних із співавторами, здобувачеві належить такі результати у роботах: [74] – визначено

кореляційний зв'язок ступеня підвищення тиску газу в газоперекачувальному агрегаті з масовою витратою газу; [98] – розроблено автоматичну систему антипомпажного регулювання відцентрових нагнітачів дотискувальної компресорної станції; [104] – запропоновано параметричну ідентифікацію помпажної характеристики відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату в режимі on-line; [105] – розроблено структуру системи автоматичної ідентифікації та антипомпажного регулювання відцентрового нагнітача ДКС; [107] – запропоновано метод ідентифікації помпажної характеристики відцентрового нагнітача; [109] – запропоновано метод автоматичної ідентифікації реальних приведених витратно-напірних характеристик відцентрового нагнітача з газотурбінним приводом; [112] – запропоновано спосіб калібрування помпажної характеристики відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату (ГПА) в режимі on-line; ; [114] – запропоновано технологію визначення реальних приведених витратно-напірних характеристик відцентрового нагнітача; ; [119] – розроблено спосіб визначення помпажної характеристики відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату; [120] – розглянуто особливості автоматизованого управління газотранспортною системою; [121] – розроблено методику автоматизованого калібрування помпажної характеристики відцентрового нагнітача із задіянням вимірювального комплексу «SUPER FLOO-II» типу «FLOU WIN» або «FLOU HOST»; [122] – отримано статистичні характеристики коефіцієнту помпажу нагнітачів азоперекачувального агрегату дотискувальної компресорної станції.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались, обговорювались і одержали позитивну оцінку на: Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективні інновації в науці, освіті, виробництві та транспорті-2012» (Одеса, 2012); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми та шляхи їх вирішення в науці, транспорті, виробництві та освіті-2011» (Одеса, 2011); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні прилади, матеріали і технології для безперервного контролю і технічної діагностики

машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання» (Івано-Франківськ, 2011); Международной научно-практической конференции «Перспективные инновации в науке, образовании, производства и транспорте-2010» (Одеса, 2010); Міжнародній конференції «Автоматика 2010» (Харків, 2010); Міжнародній конференції «Автоматика 2008» (Одеса, 2008); Международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований» (Одеса, 2008); 7^{-ій} науково-технічній конференції «Приладобудування 2008: стан і перспективи» (Київ, 2008); 5^{-ій} Всеукраїнській науково-технічній конференції «Вимірювання витрати та кількості газу» (Івано-Франківськ, 2007); 2^{-ій} Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Perspektywiczne opracowania nauki i techniki – 2007» (Przemysl, 2007); Międzynarodowej konferencji «Dynamika naukowych badan – 2007» (Przemysl, 2007); Международной научно-практической конференции «Современное состояние и пути развития–2007» (Одеса, 2007).

Публікації. Матеріали дисертації опубліковано 26 наукових працях, у тому числі у 10 статях у наукових фахових виданнях України з технічних наук, у тому числі одноособових 5, 2 патентах України та в 14 збірниках доповідей Міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 219 сторінок (з них 172 – основного тексту), що включає 75 рисунків, з яких 28 рисунків на 18 окремих сторінках, 16 додатків на 30 сторінках, список використаних джерел складає 124 найменування на 15 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПОМПАЖНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДЦЕНТРОВИХ НАГНІТАЧІВ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ ДОТИСКУВАЛЬНИХ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ ПІДЗЕМНИХ СХОВИЩ ГАЗУ

1.1. Характеристика об'єкта керування

Газотранспортна система України налічує в своєму складі 38,5 тис.км. газопроводів, зокрема магістральних газопроводів - 22,1 тис. км, газопроводів-відгалужень - 16,4 тис. км, 12 підземних сховищ газу (ПСГ) загальною ємністю понад 30 млрд.м³. Кількість газорозподільних станцій – 1425. Облік обсягів газу, що поступив в газотранспортну систему фіксують 12 газовимірювальних станцій, а об'єми вихідних потоків, транспортованих споживачам газу ведеться 10-ма газовимірювальними станціями. До складу магістральних газопроводів входить 71 компресорна станція (КС). Парк газоперекачувальних агрегатів Компанії налічує 702 одиниці загальною потужністю 5443 МВт, у тому числі з газотурбінним приводом - 438, електропривідних - 158, газомотокомпресорних - 96. Ці потужності розміщені на 72-ох компресорних станціях, до складу яких входить 110 компресорних цехів, які обладнані газоперекачувальними агрегатами (ГПА) вітчизняного та закордонного виробництва [1,2,6,123].

ДК "Укртрансгаз" експлуатує одну з найбільших у Європі мережу ПСГ. Вони призначені для зняття сезонних пікових навантажень у використанні природного газу і є важливим та невід'ємним технологічним підрозділом газотранспортної системи України. На сьогодні Компанія експлуатує 12 ПСГ,

два з яких створені на базі водоносних структур, а решта - на базі виснажених газових родовищ. Загальна активна місткість підземних газових сховищ становить понад 31 млрд.м³. Підземні газосховища Компанії мають багатопільове призначення. Крім основного завдання - безперебійного і раціонального забезпечення споживачів природним газом, вони виконують і такі функції, як:

- додаткове подавання газу споживачам у випадку екстремального зниження температури, як в окремі дні, так і у випадку аномально холодних зим, за рахунок створених у ПСГ додаткових резервів газу;

- створення довгострокових резервів газу на випадок виникнення екстремальних ситуацій;

- забезпечення надійного транзиту російського газу до країн Європи через територію України.

Контроль та вимірювання якісних показників газу в процесі транспортування і зберігання, при забезпеченні експорту до країн Європи та Балканського регіону виконує 71 вимірювальна хіміко-аналітична лабораторія, які атестовані на відповідність найновішим метрологічним стандартам.

Газорозподільні станції ДК «Укртрансгаз» обладнані електронними автоматичними приладами вимірювання обсягів газу, що транспортуються споживачам. На компресорних станціях облаштовано пункти вимірювання витрат газу на технологічні потреби – визначення загального обсягу технологічних витрат по компресорній станції, а також застосовуються електронні обчислювачі, для визначення витрат паливного газу по кожному газоперекачувальному агрегату.

Враховуючи те, що газотранспортна система України найбільш активно створювалася і розбудовувалася протягом 60...80-х років, значна кількість технологічного обладнання компресорних цехів та засобів автоматизації [4,7],

що не зазнали реконструкцій та заходів з модернізації і залишені в експлуатації від вказаного періоду - застаріли, а тому не відповідають сучасним технічним вимогам, не можуть забезпечити високих показників надійності та безпеки експлуатації, а також є занадто енерговитратними і мають низький коефіцієнт корисної дії.

А тому, враховуючи сучасний рівень розвитку технологій в напрямку впровадження нових автоматичних і автоматизованих систем, для керування технологічними процесами транспортування газу, їх вдосконалення та розширення функціональних можливостей, зокрема автоматизація процесу ідентифікації помпажних характеристик, є важливим науково-практичним завданням.

Протягом останніх років, завдяки реалізації «Програми реконструкції компресорних станцій ДК «Укртрансгаз», частка сучасних газоперекачувальних агрегатів вітчизняного виробництва неухильно збільшується. ГПА, що відпрацювали свій моторесурс, замінюються високоефективними двигунами вітчизняного виробництва різних типів: Д-336-2, Д-336-8-2, АІ-336-10, ДТ-71, ДН-80, ДГ-90, ДН-70 з ККД, рівним 31-37%., які виготовлені на ДП НВКГ "Зоря-Машпроект" (м. Миколаїв), ВАТ "Мотор Січ" (м. Запоріжжя), ВАТ "Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання імені Фрунзе".

Одним з найважливіших завдань при реновації потужностей ДК «Укртрансгаз» є створення сучасних систем автоматизації виробництва та інформаційних комплексів для обробки технологічної і управлінської інформації. Підприємства, що займаються транспортуванням і підземним зберіганням газу, не можуть безпечно, якісно і надійно виконувати свої функції через недостатність, або несвоєчасність обробки та отримання інформації. На даний час темпи розвитку суспільства є надзвичайно високими, а кількість

сучасних засобів обчислювальної техніки і зв'язку, що застосовуються на виробництві, постійно зростає. При раціональному використанні та об'єднанні в потужні інформаційно-обчислювальні комплекси, сучасні засоби інформатизації та автоматизації можуть не тільки суттєво підвищити рівень технологічної продуктивності підприємства, а й полегшити умови праці і оптимізувати виробничі витрати.

Протягом останніх десяти років шляхом впровадження інноваційної політики та програм НАК «Нафтогаз України» підприємствами ДК «Укртрансгаз» ведеться методична розробка і здійснюється впровадження сучасних комп'ютеризованих систем автоматизованого управління технологічними процесами підприємства [2,6]. Загалом системи, які впроваджуються на підприємстві та забезпечують його конкурентну спроможність на світовому ринку газопостачання, можна структурувати на 5 основних складових:

1. Управлінські системи забезпечення господарської діяльності підприємства: автоматизовані управлінські і бухгалтерські комплекси, довідково-інформаційні системи, диспетчерські комплекси керування режимами роботи газотранспортної мережі та програми паспортизації обладнання.

2. Комплекси (бази даних) систем обліку газу і замірних діляниць, вимірювання якісних і кількісних показників транспортованого газу та метрологічного забезпечення.

3. Автоматизовані системи керування технологічним процесом (АСК ТП) різного рівня: від рівня компресорного цеху до компресорної станції, установок осушування газу і аж до систем телемеханіки окремого газопроводу, об'єднаних від східного до західного кордону держави.

4. Інформаційно-розрахункові комплекси для оптимізації та розрахунку технологічних режимів, накопичення статистики про роботу обладнання і проведення діагностики.

5. Засоби автоматизації технологічних одиниць газотранспортного господарства низового рівня – системи автоматичного керування (САК) газоперекачувальних агрегатів (САК ГПА), газорозподільних станцій (САК ГРС), установок одоризації газу та ін., які безпосередньо забезпечують утримання технологічного режиму роботи обладнання, дотримання порядку роботи виконавчих механізмів та виконання захисних алгоритмів і функцій регулювання.

Враховуючи те, що дана робота стосується забезпечення якісних показників, які необхідні для ефективного функціонування газоперекачувального агрегату, як однієї з основних ланок складного технологічного процесу транспортування газу, зупинімося детальніше на розгляді функцій та властивостей системи автоматичного керування ГПА, як засобу який забезпечує керування режимами роботи цієї ланки.

Метою створення нових поколінь САК ГПА є заміна існуючих, фізично зношених та морально застарілих систем, сучасними технічними засобами контролю і керування, які забезпечують зниження витрат при транспортуванні газу шляхом запобігання зупинкам технологічного процесу, підвищують безпеку експлуатації обладнання, дають змогу оптимізувати процеси пуску, зупинки, керування ГПА, і відповідно, підвищити технічний ресурс ГПА. На відміну від засобів автоматизації розроблених у 70-их роках попереднього століття, сучасні комплекси надають персоналу вчасний, достатній та достовірний об'єм інформації про хід технологічного процесу, а також дозволяють зменшити часові витрати на технічне обслуговування і ремонт обладнання.

Сучасна САК ГПА, згідно вимог галузевих нормативних документів ДК «Укртрансгаз» повинна бути розроблена згідно вимог ГОСТ 34.602-89 “Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизированной системы” та забезпечувати наступні технічні характеристики:

Перелік основних керуючих функцій:

1. Автоматичне і ручне (за командами оператора) керування та захист технологічного обладнання агрегату у всіх режимах його роботи і в процесі переходу з режиму на режим, а також автоматичне регулювання основних параметрів у відповідності з технологічними алгоритмами.

2. Забезпечення режимів роботи, що передбачені технологічним процесом компримування газу, а саме:

- автоматичний, поетапний пуск агрегату з ручною (по команді оператора) загрузкою в «Магістраль» і підтримання заданого режиму роботи;
- автоматичне розвантаження на холостий хід;
- підтримка агрегату в стані готовності до запуску з контролем умов готовності;
- автоматичний пуск агрегату;
- поетапний пуск;
- повернення на початок етапу у разі невиконання умов алгоритму, та на вимогу оператора;
- нормальну зупинку агрегату;
- нормальну зупинку агрегату, без стравлювання газу з контуру нагнітача;
- аварійну зупинку агрегату із стравлюванням газу з контуру нагнітача за командою оператора, або в разі спрацювання захисту;

- екстренну аварійну зупинку агрегату, при відмові основних функціональних вузлів САК, шляхом впливу на виконавчі механізми по фізичних каналах керування.

Перелік основних інформаційних функцій:

- безперервний, (або за викликом) контроль і вимірювання значень технологічних параметрів агрегату;

- контроль стану позиційних сигналів та представлення їх на екрані монітора пульта оператора та місцевій панелі;

- порівняння значень вимірюваних та розрахункових параметрів з заданими, формування технологічних, попереджувальних та аварійних сигналів і оперативне їх відображення. Звукова попереджувальна сигналізація та подання інформації оператору;

- сигналізація та оперативне відображення спрацювання блокувань і захистів на екрані монітора ПО;

- індикація стану виконавчих механізмів та пристроїв агрегату на мнемосхемі та пульті керування;

- формування масивів ретроспективної інформації про стан агрегату з можливістю їх перегляду та передачі для документування;

- формування обліково-звітної документації (добова відомість);

- контроль достовірності інформації від вимірювальних перетворювачів за результатами вимірювань;

- автоматичне переключення на резервний канал у випадку недостовірної інформації від вимірювальних перетворювачів;

- контроль цілісності кіл давачів та виконавчих механізмів;

- самоконтроль стану технічних засобів САК;

- автоматичний облік технічного ресурсу ГПА;

- розрахунок значень таких параметрів:

- а) ступінь стиснення;
- б) запас за помпажем нагнітача;
- в) витрати паливного газу;
- г) об'ємна продуктивність нагнітача;
- д) політропний ККД нагнітача;
- ж) потужність на валу приводної турбіни (ротора нагнітача).

Перелік основних функцій регулювання:

- автоматичне граничне регулювання (обмеження) швидкості наростання температури перед турбіною високого тиску (ТВТ);
- автоматичне граничне регулювання (обмеження за максимумом) температури перед ТВТ;
- автоматичний захист за максимальною частотою обертання роторів турбіни низького тиску (надалі – ТНТ) і ТВТ;
- антипомпажний захист і антипомпажне регулювання [5,10].

Швидкодія каналів дискретного керування та захисту ГПА - не більше 100мс. Швидкодія каналів керування та захисту ГПА за температурними параметрами - не більше 3сек.

Одним з найбільших в світі та найбільшим в системі ДК «Укртрансгаз» є Більче-Волицько-Угерське підземне сховище газу, яке експлуатується УМГ «Львівтрансгаз». Більче-Волицько-Угерське ПСГ облаштоване на базі виснаженого газового родовища, освоєння якого розпочалося в 60-ті роки минулого століття.

Технологія підземного зберігання природного газу полягає в тому, що "резервуаром" для збереження газу використовують просторові пористі підземні шари, які знаходяться на значній глибині. Глибина залягання накопичувальних шарів Більче-Волицько-Угерського родовища складає від 800 до 1600м. Природний газ закачують у такий шар протягом весняно-літнього

періоду, і якийсь час зберігають в ньому до виникнення потреби відбору газу. За необхідності в осінньо-зимовий період, накопичений запас газу відбирають із пласта, для транспортування споживачам. Необхідність у сховищах газу великої місткості зумовлена сезонною нерівномірністю споживання газу як протягом доби, так і впродовж часу. Узимку потреба в газі зростає, улітку - знижується. Враховуючи те, що магістральні газопроводи працюють з відносно постійною продуктивністю, в системах газопостачання необхідні сховища значних об'ємів, які б забезпечили компенсацію надлишків та недостачі газу при споживанні, а також для оперативної стабілізації об'ємів при подаванні в газорозподільні мережі. Газосховища необхідні також для створення довгострокових (резервних) запасів газу. Технологічні показники роботи Більче-Волицько-Угерського ПСГ наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Технологічні показники Більче-Волицько-Угерського ПСГ

Показники	Одиниці виміру	Більче-Волицький поклад	Угерський поклад	ПСГ загалом
Загальний об'єм	млн.м ³	25620	7830	33450
Активний об'єм	млн. м ³	14350	2700	17050
Буферний об'єм	млн. м ³	11050	5350	16400
в т. ч. залишкові запаси		1300	2200	3500
Пластовий тиск:	МПа/кгс/см ²			
максимальний	МПа/кгс/см ²			
- в робочій зоні		7,65/78,0	4,27/43,5	
- середньозважений		6,63/67,6	4,01/40,9	
-				

Продовження табл. 1.1

мінімальний - в робочій зоні - середньозважений	МПа/кгс/ см ²	2,4/24,5 2,98/30,4	2,55/26,0 3,15/32,1	
Кількість експлуатаційних свердловин	одиниць	291	50	341
Продуктивність - середня за 100 днів	млн.м ³ /добу	111,4	18,1	129,5
Тривалість періоду відбору	доба	165	165	165

Газопроводом-перемичкою Ду-1200 ПСГ підключене до магістральних газопроводів Івацевичі-Долина-III Ду-1200, Ру-55 та КЗУ-II Ду-1200, Ру-55, а газопроводом Більче-Волиця-Долина-Богородчани Ду-1400, Ру-75 через компресорні станції Долина та Богородчани – до МГ «ДУД», «Союз», «Уренгой-Помари-Ужгород», «Прогрес». Початкова стадія закачування здійснюється самоплином. В подальшому газ на закачування в сховище дотискається компресорною станцією. Звідси і класифікація компресорних станцій, що розміщені на ПСГ, як дотискувальних.

1.2. Характеристика відмов обладнання на ДКС «Більче-Волиця»

Більче-Волицько-Угерське ПСГ обслуговується ДКС «Більче-Волиця», технологічні показники якої наведені в табл. 1.2.

На ДКС «Більче-Волиця» перебувають в експлуатації п'ять компресорних цехів з кількістю ГПА – 28 шт., загальною потужністю 321 900 кВт.

Таблиця 1.2

Інформація про стан ГПА ДКС «Більче-Волиця»

№ п/п	Цех	Рік введення в експл.	Тип ГПА	Привід	Загальна потужність, кВт
1	КЦ №1	1985р.	ГПА-Ц-6.3 - 8 шт.	НК-12СТ	50 400
2	КЦ №2	1987р.	ГПА-Ц-16 - 6 шт.	НК-16СТ	96 000
3	КЦ №3	1989р.	ГПА-Ц-16 - 5 шт.	НК-16СТ	80 000
4	КЦ №1А	1992р.	ГПА-Ц-16 - 4 шт.	НК-16СТ	64 000
5	КЦ №4	1993р.	ГПА-Ц-6.3В - 5 шт.	НК-12СТ	31 500

В початковий період відбору газ із сховища в магістральний газопровід подається також самоплином. Після вирівнювання тисків у сховищі і магістральному газопроводі газ транспортується компресорною станцією. З наростанням різниці тисків між ПСГ та МГ доводиться нарощувати величину потужностей, які забезпечать подавання необхідних об'ємів природного газу в магістраль. Для забезпечення значного ступеню стиснення доводиться реалізовувати технологічні схеми кількоступеневої подачі газу в МГ. ДКС «Більче-Волиця» має технологічну можливість працювати в одно-, дво- і триступеневому режимі. Стиснення газу на закачування чи відбір може виконуватись компресорними цехами в один, два і три ступеня з організацією роботи агрегатів по послідовній, паралельній та послідовно-паралельній схемі. Для забезпечення «гнучкості» технологічних режимів ДКС «Більче-Волиця» свого часу, була обладнана двома типами газотурбінних перекачувальних агрегатів ГПА-Ц-6,3; ГПА-Ц-16 на базі адаптованих авіаційних приводів та 5-ма типами нагнітачів. Адаптація авіаційних приводів НК-12СТ та НК-16СТ

полягає у використанні ними транспортованого природного газу, як палива, та деяких незначних конструктивних змін зумовлених пристосуванням до «наземної» експлуатації. Характеристики ГПА, що експлуатуються на ДКС «Більче-Волиця», наведені у додатку А. До складу ДКС «Більче-Волиця» також входять: установки апаратів повітряного охолодження газу (в кожному КЦ); дві установки очищення і осушування газу; два вузли обліку газу (ВЗГ 7,5 МПа; ВЗГ 5,5 МПа); крановий вузол підключення ДКС; дві установки підготовки пускового, паливного і імпульсного газу; очисні споруди; склад ПММ з насосною. Основний об'єм транспортованого ДКС газу, а це від 72 до 85% при роботі ГПА в одному циклі «відбір – закачування», підземне сховище газу припадає на роботу агрегатів типу Ц-16 (16МВт), а саме на цехи №1А та №2, що показано на діаграмі рис.1.1.

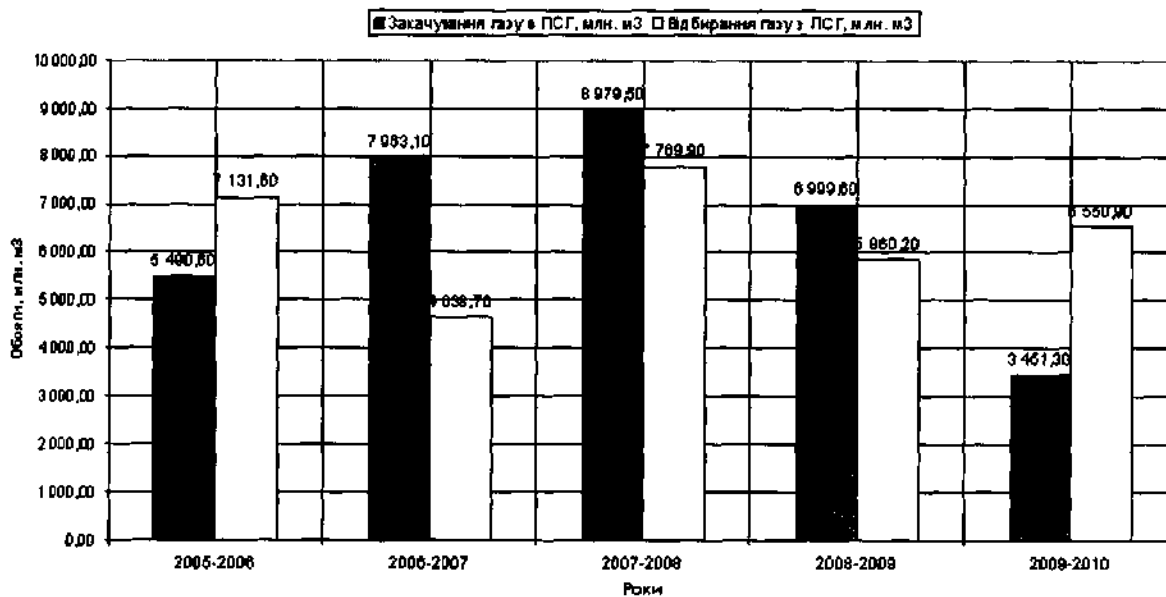


Рис.1.1. Динаміка обсягів відбирання-закачування газу в Більче-Волицьке-Угерське ПСГ за період 2005-2010 р.р.

Цех №3 (складається з 5-ти ГПА Ц-16) з нагнітачами на 10 МПа і практично не експлуатується через використання ПСГ до 50% від можливої проектної потужності (агрегати мають напрацювання 5-7 тис. мото/годин від

початку експлуатації з 1989р. порівняно з агрегатами цехів №1А і №2 з напрацюванням в середньому близько 20 тис. мото/годин). Недосягнення проектних показників з закачування та відбирання газу по ПСГ пояснюється неготовністю обладнання і персоналу забезпечити необхідний режим, а з причин відсутності необхідних об'ємів газу, якими б можна було «дозаповнити» Більче-Волицько-Угерське ПСГ (на діаграмі вимір в млрд. м³).

Зараз на рівні ДК «Укртрансгаз» та УМГ «Львівтрансгаз» розробляються техніко-економічні обґрунтування з метою реконструкції цеху №3 і залучення його в роботу ДКС при існуючих технологічних режимах. Недозаповнення ПСГ до проектних показників та наявність компресорних цехів, які проектувалися під більш продуктивні (за об'ємами) режими роботи ДКС призводить до того, що ГПА доводиться часто експлуатувати в граничних режимах роботи, наприклад, для забезпечення транспортування газу заданого об'єму - трьох ГПА забагато і утримувати їх в роботі недоцільно, з погляду економії паливного газу та напрацювання ресурсу обладнання, а два ГПА з заданим об'ємом – не справляються.

У ході аналізу завантаженості та відмов технологічного обладнання ДКС «Більче-Волиця» визначено перелік основних причин, які призводять до аварійних зупинок (АЗ) ДКС та позапланових ремонтів обладнання і є характерними для всіх ДКС ПСГ, що експлуатуються в УМГ «Львівтрансгаз» та ДК «Укртрансгаз» (табл.1.3), та діаграмами (рис. 1.2).

Значну частку відмов (25%) складають аварійні зупинки, безпосередньо спричинені явищами помпажу. Крім цього в 37% відмов механічного обладнання ймовірно входять також і зупинки, спричинені прихованим наслідками та пошкодженнями, які були викликані попередніми граничними перевантаженнями обладнання під час помпажу

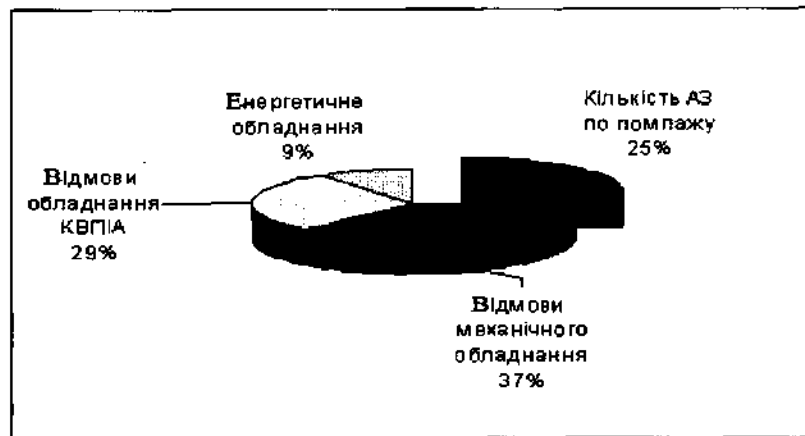


Рис. 1.2. Розподіл відмов обладнання по ДКС "Більче-Волиця"
2001-2010 р.р.

Таблиця 1.3

Статистика відмов обладнання по ДКС "Більче-Волиця" 2001-2010рр.

Рік	К-сть АЗ всього	К-сть АЗ за помпажем	К-сть АЗ відмови механічного обладнання	К-сть АЗ відмови обладнання КВПІА	К-сть АЗ енергетичне обладнання	Наробка ГПА мотогод
2001	4	1		2	1	
2002	13	6	3	4		
2003	19	10	6	3		
2004	13	1	7	4	1	
2005	11	1	5	3	2	24346
2006	21	3	4	8	6	23189
2007	10	2	5	3		16656
2008	14	2	8	4		13781
2009	1		1			12781
2010	0					16786
Всього:	106	26	39	31	10	107539

Ще однією проблемою, яка викликана неточністю паспортних газодинамічних характеристик відцентрових нагнітачів є перевитрата паливного газу, що пояснюється наступними чинниками:

- завод виготовлювач, при серійному виробництві компресорів, проводить вибіркові випробування одиничних зразків продукції, а в документації на виріб подає найкращі (зручні для виробника) показники;
- в процесі експлуатації відбувається фізичне та ерозійне зношування проточної частини нагнітача, що веде до зниження його газодинамічних характеристик;

Як наслідок, для транспортування рівнозначної об'ємної кількості газу новий і якісно виготовлений нагнітач, в складі ГПА-Ц-16, споживає до 6,6% (на 350м³/год) менше паливного газу, аніж нагнітач, який не досягає найкращих паспортних характеристик і знаходився в експлуатації значний час, а якраз такими нагнітачами виготовленими у 70-их 80-их роках минулого століття, із значними показниками напрацювань укомплектовано компресорні станції ДК «Укртрансгаз» [3].

Отже, на дотискувальних компресорних станціях ДК «Укртрансгаз», особливо тих, що працюють на підземних сховищах газу (ПСГ), гостро стоїть проблема захисту газоперекачувальних агрегатів (ГПА) від помпажу і економії паливного газу, а це в свою чергу викликає потребу у визначенні індивідуальних помпажних характеристик кожного, окремо взятого нагнітача з надзвичайно високою точністю.

1.3. Нагнітач ГПА як об'єкт дослідження

Нагнітачами природного газу (надалі відцентровий нагнітач ВН) прийнято називати лопаткові компресорні машини із можливим

співвідношенням ступеню компримування вище 1,1 які не мають спеціальних пристроїв для охолодження газу в процесі стискування. Усі нагнітачі умовно можна розділити на два класи: неповнонапірні (одноступінчаті) (рис. 1.3) і повнонапірні (рис. 1.4). Перші, що забезпечують ступінь підвищення тиску газу в межах $E=1,25\dots 1,27$, використовуються при послідовній схемі компримування газу на ДКС.

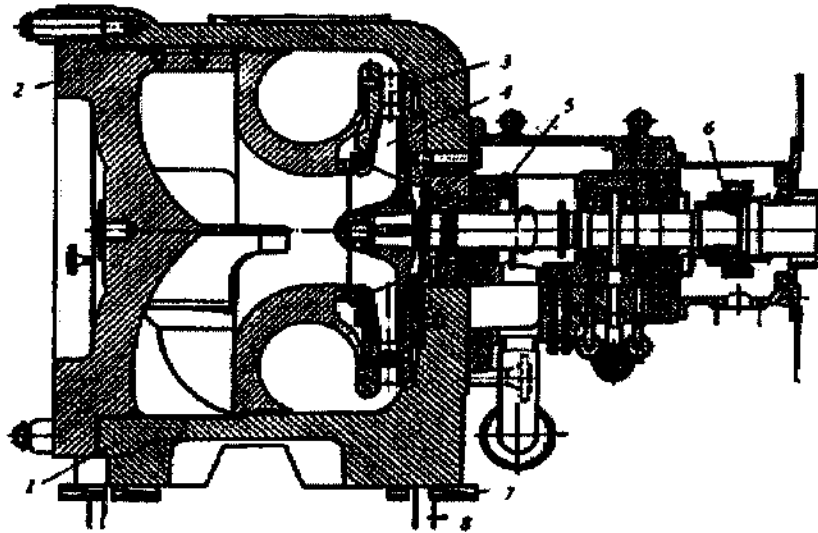


Рис. 1.3. Неповнонапірний одноступінчатий нагнітач НЗЛ типу 370-18:

- 1 – корпус;
- 2 – кришка;
- 3 – лопатковий дифузор;
- 4 – робоче колесо;
- 5 – гільза;
- 6 – зубчата муфта;
- 7 – клинові прокладки;
- 8 – анкерні болти

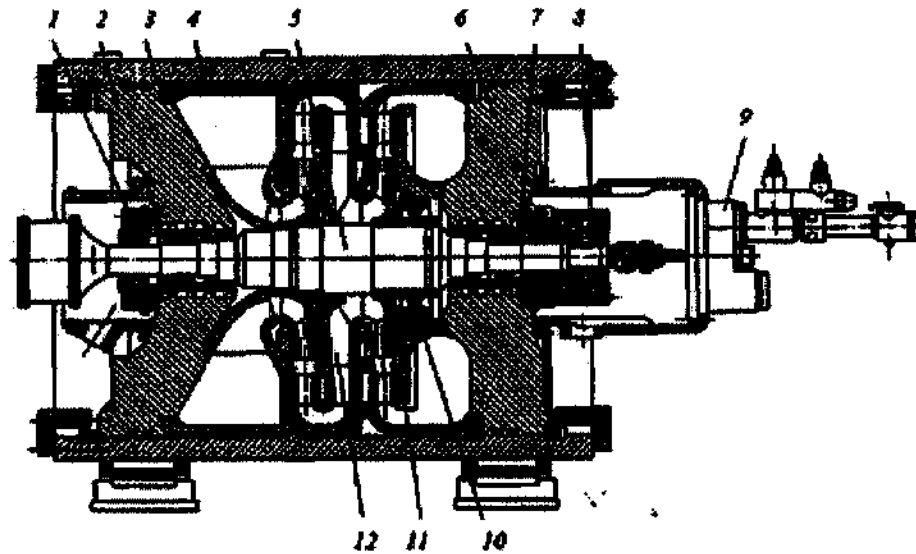


Рис. 1.4. Повнонапірний двоступінчатий нагнітач НЦ-16/76:

- 1 – опорний підшипник;
- 2 – кришка;
- 3 – корпус;
- 4 – внутрішній корпус;
- 5 – ротор;
- 6 – кришка;
- 7 – ущільнення;
- 8 – опорно-упорний підшипник;
- 9 – блок масляних насосів;
- 10 – думіс;
- 11 – улітка;
- 12 – зворотний направляючий апарат.

Другі повнонапірні, забезпечують ступінь підвищення тиску газу в межах $E=1,45\dots 1,51$ і використовуються при багатоступеневій роботі компресорного цеху та станції. Характеристика кожного типу нагнітача будується при його натурних випробуваннях в умовах заводу-виробника. Під характеристикою

нагнітачів прийнято розуміти залежність ступеня підвищення тиску газу, тобто відношення вихідного тиску, який створений нагнітачем до вхідного тиску, що був поданий в нього $E=P_{\text{вих}}/P_{\text{вх}}$, питомої приведенної потужності, яка забезпечує привід компресора до приведенної об'ємної витрати газу через нагнітач. Будуються такі характеристики для заданих значень газової постійної - $R_{\text{пр}}$, сталого коефіцієнта стискуваності газу $Z_{\text{пр}}$, прийнятої розрахункової температури газу на вході в нагнітач $T_{\text{вх}}$ і при заданому діапазоні зміни приведенної відносної частоти обертання $(N/N_{\text{ном}})_{\text{пр}}$. Типова характеристика одноступінчатого неповнонапірного нагнітача приведена на рис.1.5.

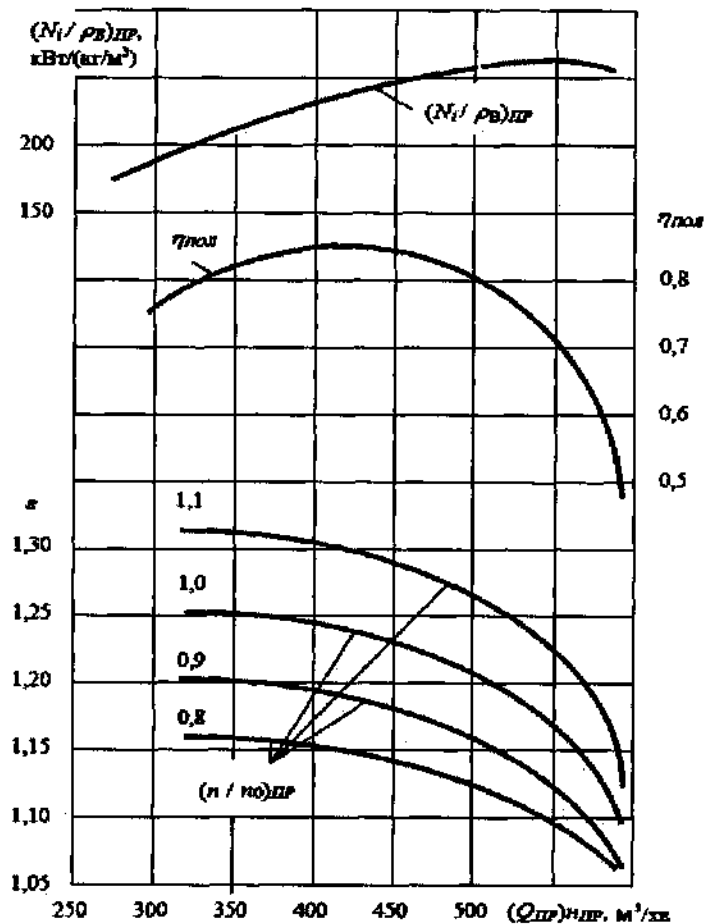


Рис. 1.5. Типова характеристика одноступінчатого неповнонапірного нагнітача

Характеристики відцентрових нагнітачів мають один схематичний вигляд, як для неповнонапірних, так і для повнонапірних типів. Використовують характеристики в наступний спосіб: знаючи фактичні значення величин R , z , $TВ$, n для даних умов, визначають приведену відносну частоту обертання нагнітача. По відомому ступені стискування знаходять приведену об'ємну витрату транспортованого через нагнітач газу.

Повнонапірний нагнітач типу НЦ-16/56 (рис.1.6) з номінальною частотою обертання 4900 об/хв. для ГПА потужністю 16 МВт має кований циліндричний корпус із двома жорсткими вертикальними і також кованими кришками, на яких змонтовані вузли підшипників і ущільнень. Кришки зафіксовані в корпусі за допомогою опірних розрізних кілець. Всмоктувальний і нагнітальний патрубкі - ковані, приварені до корпусу ззовні, лапи опор корпусу також приварені. Для герметизації з'єднань "кришки - корпус" і внутрішніх порожнин проточної частини використовують кільцеві гумові шнури різних діаметрів. Необхідні порожнини отримані за допомогою тонкостінного литого внутрішнього корпусу, що також не має горизонтального розрізу. Внутрішній корпус при збиранні нагнітача вкочується в зовнішній на спеціальних роликах. На внутрішньому корпусі закріплені вхідний направляючий апарат, що представляє собою систему радіальних ребер, лопаткові дифузори обох ступенів і зовнішня частина зворотного направляючого апарата. Внутрішня рознімна частина викочується разом з ротором. Ротор має східчастий вал з максимальним діаметром (посередині) близько 300 мм, на який насаджені робочі колеса, думіс (розвантажувальний поршень), втулки ущільнень, півмуфта для передачі обертового моменту, і опірний виступ. Лопатки робочого колеса вифрезеровані в тілі основного диска, з'єднані з покриваючим (покривним) диском за допомогою пайки. Ротор пристосований для багатоплощинного балансування. Для викочування ротора немає необхідності

діставати внутрішній корпус і дифузори. Сприймаючий осьові зусилля опорний підшипник має пакети колодок по обидва боки. Кожен опорний підшипник сегментного типу складається з п'яти самоустановлювальних сегментів. Ущільнення мають лабіринтову будову і масляну кінцеву частину у виді щільного ущільнення з плаваючими кільцями.

Вихідна збірна камера утворена за допомогою кільцевого поглиблення на торцевій кришці і спеціально приєднаного до неї равлика. Загальне конструктивне рішення нагнітача дозволяє, при необхідності, порівняно легко замінити деталі проточної частини й одержувати різні модифікації нагнітального компресора.

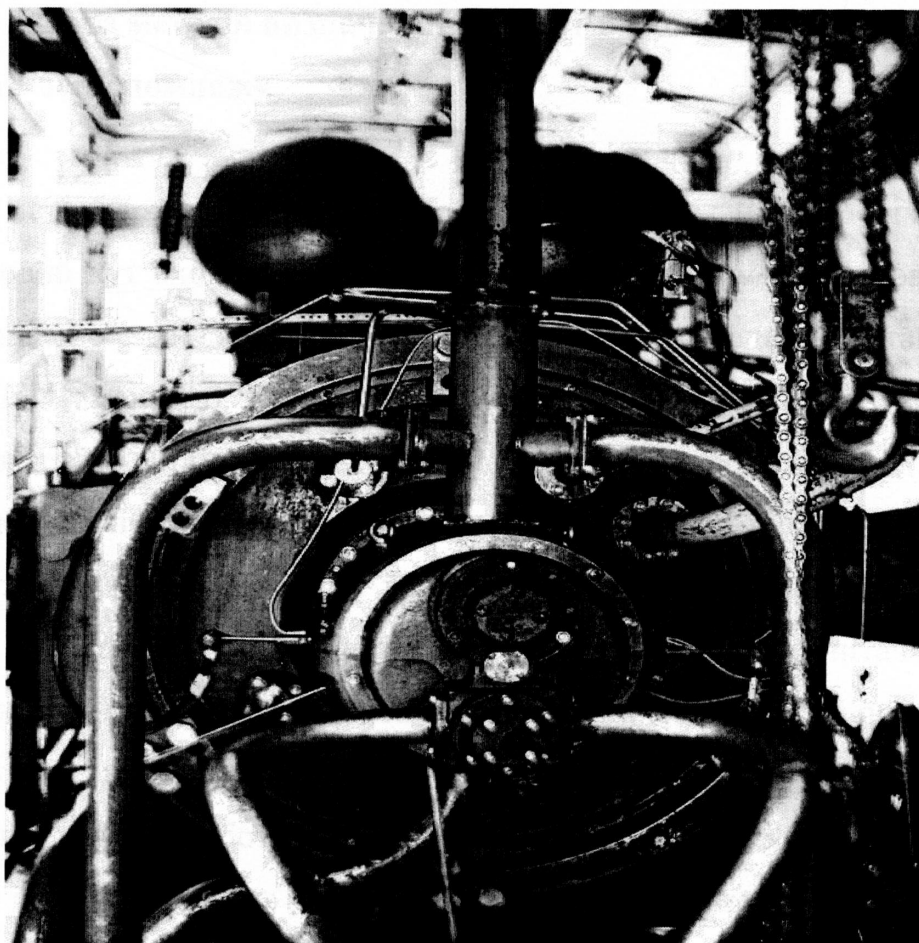


Рис. 1.6. Повнонапірний нагнітача НЦ-16/56

Розрахункова робоча точка витрати газу для нагнітачів повинна знаходитися приблизно на 10-12 % далі вправо від крайніх лівих значень витрати на його характеристиці, що відповідає умовам початку зриву потоку газу в нагнітачі (зона помпажу). На рис. 1.5 цьому відповідає подача газу ~ 360 м³/хв. Наявність достовірних приведених характеристик, при експлуатації нагнітача в комплексі з газотурбінним приводом, дозволяє обслуговуючому персоналу чітко визначати допустимі навантаження і режими роботи, і вибрати найкращий режим роботи компресорного агрегату, в залежності від конкретного завдання із забезпеченням необхідного об'єму транспортування.

1.4. Аналіз методів визначення моментів входу робочої точки нагнітача в зону помпажу

При стандартному режимі роботи нагнітача ГПА потік газу має розрахунковий кут входу на робочі лопатки. При такому куті газового потоку останній плавно оминає перо лопатки і нагнітач працює в стаціонарному режимі. При зменшенні витрат через нагнітач кут входу газового потоку змінюється, тобто збільшується і, внаслідок цього, на робочій лопатці виникає зрив потоку. Це призводить до того, що тиск на виході нагнітача різко падає. Тиск у вихлопному колекторі за краном 2 (рис. 1.8) є високий, а тому існує зворотній рух газу через цей кран в проточній частині нагнітача. Однак, в технологічній обв'язці нагнітача існує запобіжний клапан, який перекриває цей рух. Тиск на виході нагнітача падає і нагнітач знову повертається у стаціонарний режим роботи. Зрозуміло, що таке явище, як помпаж викликає коливання і «розхитування» режиму роботи ГПА, що є небезпечним. Помпажні коливання мають частоту від 1 до 20 Гц, велику амплітуду, що в подальшому може призвести до руйнування нагнітача, або приводу в цілому.

Помпаж ГПА призводить до виходу з ладу нагнітачів та зниження моторесурсу двигунів. З метою уникнення помпажних явищ в роботі компресорної станції, експлуатаційний персонал змушений використовувати режими, при яких здійснюється рециркуляція газу, як в контурі нагнітача, так і в станційних мережах. В більшості випадків режим рециркуляції вибирається експериментально-практичним шляхом - «інтуїтивно» і «з запасом», що призводить до підвищених об'ємів рециркуляції та перевитрат паливного газу.

Проблема полягає у відсутності відомої (точної, вивіреної) помпажної характеристики для кожного окремо взятого ГПА (рис.1.7). Паспортні характеристики, що змінилися в процесі експлуатації нагнітача та за результатами напрацювання ним кількості 5-10 тис. мотогодин, не відповідають дійсності, окрім цього характеристики нагнітачів, що надаються заводом виготовлювачем є «усередненими» і не відображають індивідуальних витрато-напірних властивостей кожного нагнітача.

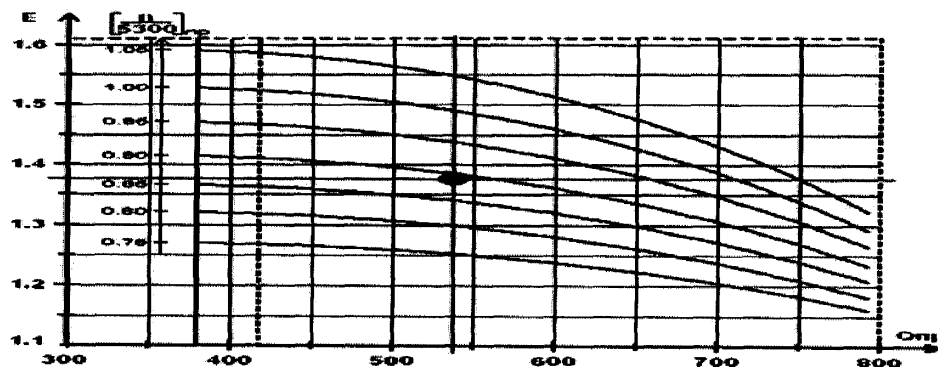


Рис. 1.7. Витратно-напірна помпажна характеристика ВН-16/56-1,4Ц

Окрім того заводи (інститути) при побудові характеристик з метою забезпечення гарантованого помпажного захисту і регулювання зміщують помпажну лінію вправо (по графіку), щоби застрахуватися від роботи нагнітачів в критичних передпомпажних навантажувальних режимах і вберегти своє обладнання від можливих гарантійних ремонтів. Це все призводить до

«звуження» реального робочого діапазону нагнітача, антипомпажний захист та регулювання виконується з значним випередженням, що не дозволяє експлуатаційному персоналу максимально використовувати наявні на КС потужності. В реальних умовах експлуатації, коли в граничних режимах роботи компресорного цеху на відбір, або закачування доводиться експлуатувати ГПА в передпомпажних областях – в експлуатаційного персоналу виникає необхідність включати в роботу додаткові потужності (ГПА), або/і розвантажувати компресорну станцію режимними кранами, створюючи байпасування (рециркуляцію) транспортованого газу. Переведення ступені КС, агрегату, або цілого компресорного цеху в режим байпасування приводить до: перевитрат паливного газу; неоптимального витрачання моторесурсу обладнання; використання задіяних потужностей з надзвичайно низьким коефіцієнтом завантаження.

Ще одним фактором, який робить роботу компресорного цеху в режимі рециркуляції низькоефективною є відсутність на основній кількості КС газотранспортної системи України регулюючих режимних клапанів, які відповідають за байпасування транспортованого газу в межах компресорного цеху. Як приклад, розглянемо технологічну схему ДКС Дашава в режимі транспортування з рециркуляцією (рис. 1.8.) та без неї (рис. 1.9.), враховуючи, що встановлені на КС режимні крани є саме кранами, а не регулюючими клапанами і не призначені для плавного (точного) регулювання потоку газу, який проходить через них. Типовими діаметрами режимних кранів, що використовуються на КС ДК «Укртрансгаз» є Ду-150, Ду-300 та Ду-700, такі ж крани використовуються на об'єкті дослідження ДКС Дашава. Пропускна здатність режимних кранів і необхідні діаметри розраховуються при проектуванні компресорної станції в залежності від її продуктивності та транспортної здатності встановлених потужностей.

Отже, регулювати об'єм рециркуляції по групі ГПА, ступені компресорного цеху, або КС в цілому можна тільки ступінчасто, з значною дискретністю, а саме підбираючи діаметр (або комбінацію діаметрів) перепускнуго крану, яким буде здійснюватися байпасування газу. Значною проблемою, яка виникає при такому «інтуїтивному» підборі експлуатаційним персоналом необхідного для забезпечення рециркуляції діаметру режимного крану є висока ймовірність помилки і, як наслідок: або значне недовантаження працюючих потужностей КС, або навпаки потрапляння в помпаж внаслідок чого - виникнення аварійної зупинки, з не прогнозованими для обладнання наслідками. Тому розробка універсальних підходів та методики проведення помпажних тестів, а також інструментарію для зняття і побудови реальних помпажних характеристик нагнітачів є важливою науково практичною задачею, яка й поставлена в основу даних досліджень. Згідно загальноприйнятої практики [5,6,7] зняття помпажної характеристики здійснюється методом кількаразового (3-5) введення ГПА в помпаж, при різних обертах, аж до аварійної зупинки (АЗ) по спрацюванню захистів «помпаж». Положення (місцезнаходження) робочої точки в момент АЗ фіксується і використовуються для побудови відкоректованої помпажної характеристики. В умовах виробництва вказаний метод є недосконалим і складним до реалізації з наступних причин:

- необхідно вивести агрегат з технологічної схеми роботи компресорної станції на 24-48 год. та підготувати механізм створення на ньому помпажних явищ;

- провести 3-5 пусків ГПА з виходом в режим «Магістраль» та наступними аварійними зупинками в режимі роботи «помпаж»;

- відсутність систем автоматики, здатних з необхідною дискретністю (хоча б 100 мс) зафіксувати результати випробувань;

- зниження надійності та моторесурсу обладнання, пов'язане з роботою в помпажних режимах.

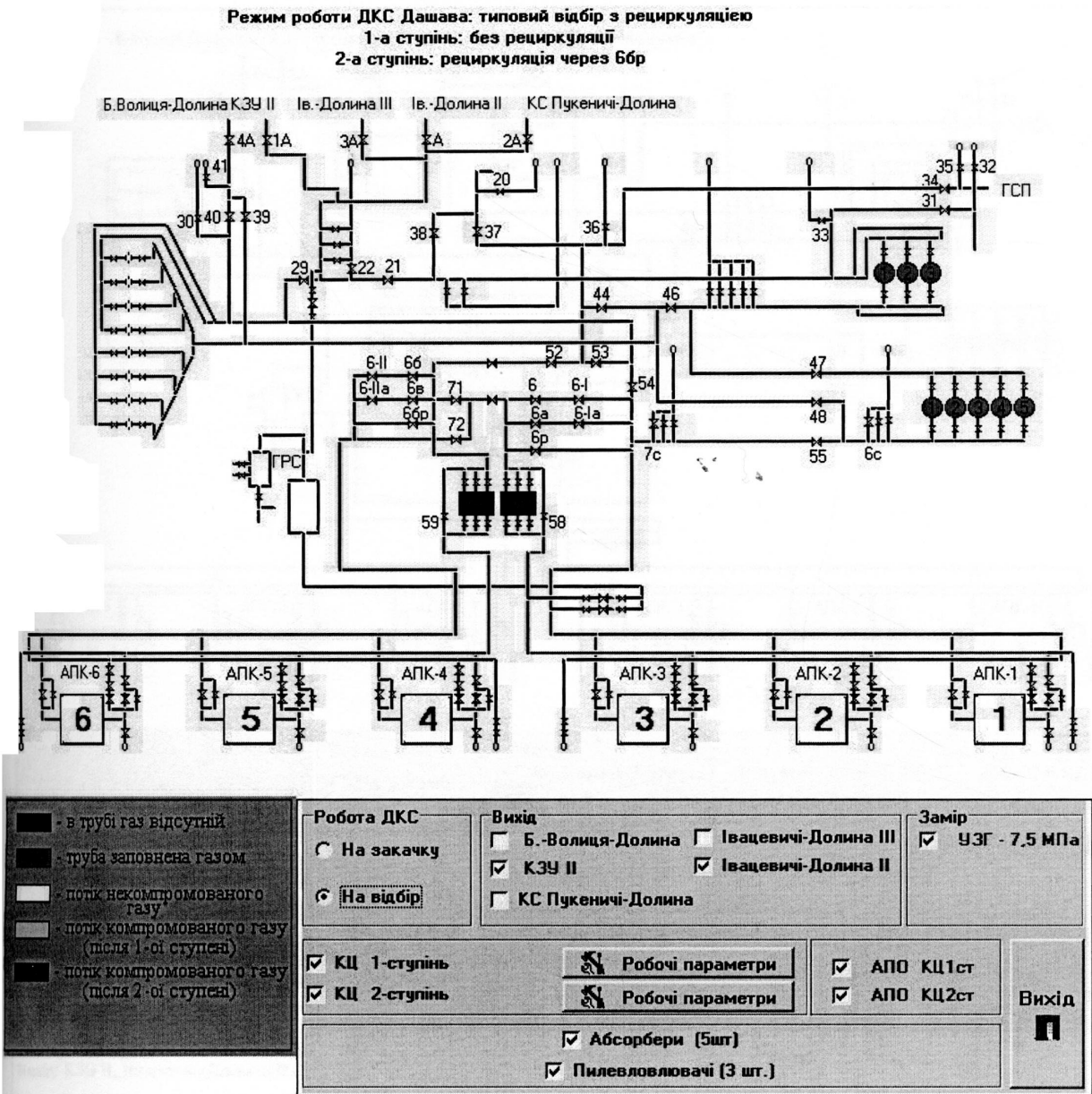


Рис. 1.8. Режимы работы ДКС Дашава: типовий відбір з рециркуляцією:
1-а ступінь – без рециркуляції;
2-а ступінь – рециркуляція через кран ббр.

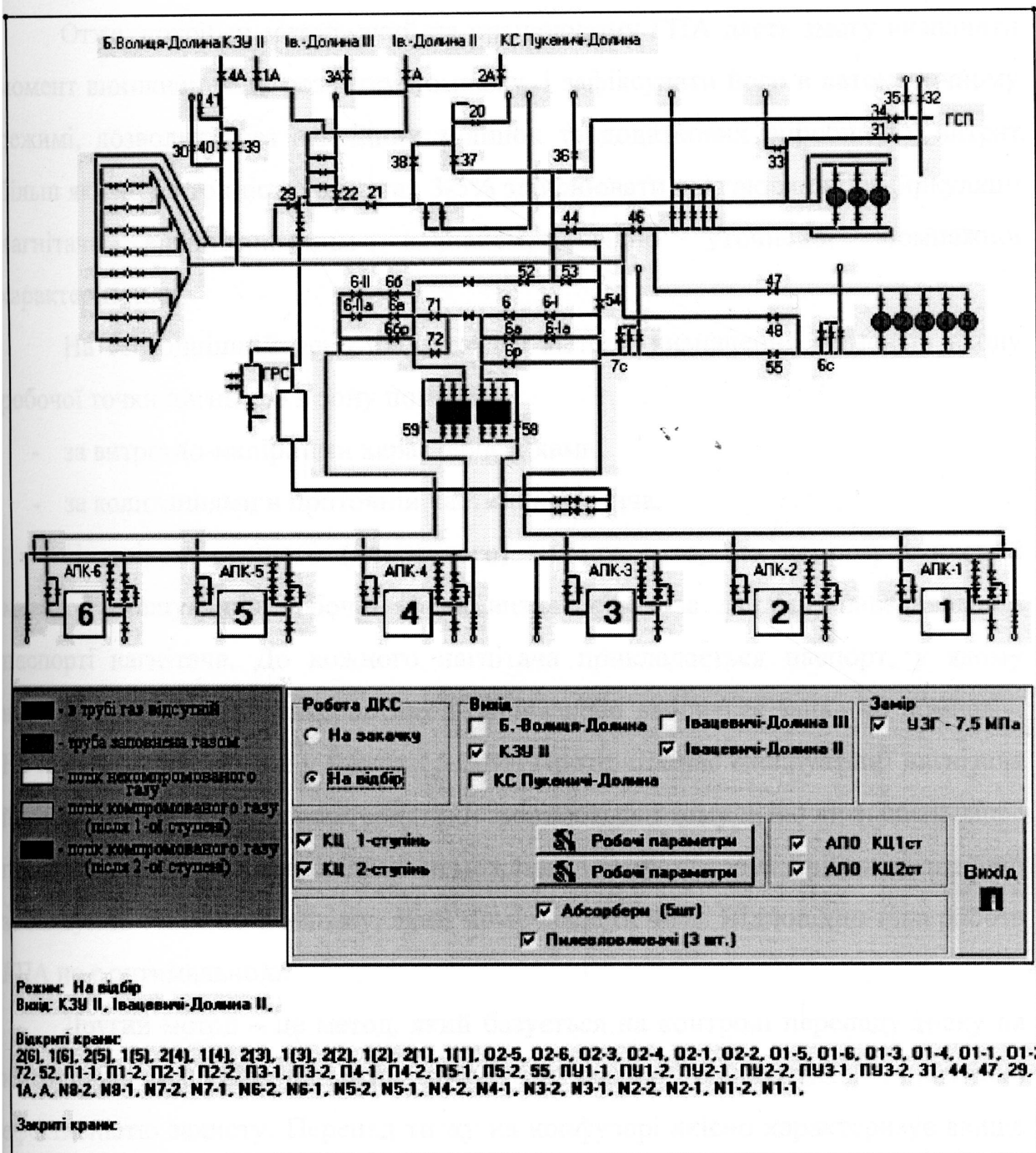


Рис. 1.9. Режими роботи ДКС Дашава: типовий відбір без рециркуляції:

1-а ступінь – без рециркуляції;

2-а ступінь – без рециркуляції.

Отже, потрібен метод, який на працюючому ГПА дасть змогу визначити момент виникнення та розвитку помпажу, і зафіксувати його в автоматичному режимі, дозволить без аварійних зупинок та додаткових виробничих витрат більш якісно і з точністю в межах 3-5% здійснювати регулювання рециркуляції нагнітача антипомпажним клапаном, згідно уточненої помпажної характеристики.

На сьогоднішній день існують два методи визначення моментів входу робочої точки нагнітача в зону помпажу:

- за витратно-напірними характеристиками;
- за коливаннями в проточній частині нагнітача.

Недоліком першого (класичного) методу є те, що це розрахунковий метод. Розташування робочої точки визначається за даними, наведеними в паспорті нагнітача. До кожного нагнітача прикладається паспорт, у якому вказано помпажну характеристику і обов'язково вводиться запас по помпажу. На практиці цей запас є у межах 15-20%. Проте, під час експлуатації нагнітача його витратно-напірні характеристики змінюються і тому чітко визначити запас по помпажу у таких випадках неможливо, тому експлуатаційники штучно збільшують запас по помпажу, який може досягти 40%. Відповідно така робота ГПА не є оптимальною.

Другий метод – це метод, який базується на контролі перепаду тиску на конфузорі. Цей метод характеризується малою швидкістю і низькою ефективністю захисту. Перепад тиску на конфузорі якісно характеризує явище помпажу, яке уже виникло, але не інформує про наближення до помпажного стану.

Із вказаного вище, зрозуміло, що необхідне удосконалення існуючих методів та розроблення нових підходів і методів автоматичної ідентифікації помпажних характеристик газоперекачувальних агрегатів, з метою

забезпечення надійного захисту ГПА від помпажу та покращення економічних показників експлуатації.

Дослідження, проведені авторами робіт [5,8], засвідчили, що реальні помпажні характеристики, в тому числі і приведені характеристики нагнітачів $E = f(Q)$, де E – ступінь підвищення тиску газу, Q – об'ємна продуктивність, $\text{м}^3/\text{хв}$, для кожного агрегату різні і нелінійні. Це ускладнює їх ідентифікацію.

1.5. Обґрунтування і вибір напрямку досліджень

За умов модернізації та технічного переоснащення газотранспортної системи з використанням найбільш сучасних і ефективних технологій однією з важливих функцій є визначення експлуатаційних характеристик нагнітача і агрегату в цілому. На базі таких характеристик формується висновок про необхідність проведення профілактичних робіт на двигуні, або нагнітачі, а також про потребу оновлення помпажних характеристик. Таке завдання вирішується за допомогою системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом, яка забезпечує антипомпажне регулювання і захист від помпажу, та може забезпечити надійну роботу відцентрового нагнітача поблизу границі помпажної зони.

Розроблення технологій визначення реальних приведених витратно-напірних характеристик відцентрових нагнітачів з метою забезпечення якісного протипомпажного керування відцентровими нагнітачами газоперекачувальних агрегатів дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу є важливою задачею для газотранспортної промисловості України у зв'язку з тим, що одним з найбільш використовуваних в умовах експлуатації режимів роботи ГПА є такий режим, коли робоча точка характеристики ВН знаходиться поблизу межі помпажної зони. При цьому забезпечуються

максимальні ККД та коефіцієнт завантаження ГПА, проте, за такого режиму роботи ВН ГПА необхідно забезпечити стабільну роботу агрегату і не дати робочій точці витратно-напірної характеристики переміститися в зону помпажу. Це завдання повинна вирішувати автоматична система протипомпажного керування і захисту, яка повинна забезпечити стабільну і надійну роботу ВН поблизу границі помпажної зони, на підставі інформації про дійсну помпажну характеристику конкретного нагнітача.

Перші дослідження нестационарних процесів у відцентрових компресорах були розпочаті у 1958 р. у проблемній лабораторії компресоробудування в Санкт-Петербурзі. Проте, в останні роки актуальною стала проблема розроблення методів діагностування і запобігання помпажу, які базуються на нових принципах. Відомо кілька принципів визначення моментів входу робочої точки ВН в зону помпажу, головними з яких є: за витратно-напірними характеристиками ВН та за рівнем коливань потоку газу у проточній частині ВН.

Ця проблема розв'язується багатьма авторами, але через свою складність та багатоплановість вона не втрачає актуальності.

Проте, аналіз літературних джерел [1÷7, 2÷9, 35÷42 та ін.] свідчить про недостатній об'єм проведених досліджень у цьому напрямку, хоча автоматизоване визначення помпажних характеристик і визначення експлуатаційних характеристик ВН і агрегату в цілому є головними функціями керування ГПА. Це викликано тим, що саме на базі цих характеристик виробляється рішення про необхідність оновлення помпажних характеристик або проведення профілактичних робіт на двигуні та нагнітачі.

Тому напрямом даної роботи є розроблення енергоощадної технології автоматизованого визначення приведених витратно-напірних характеристик відцентрового нагнітача ГПА ДКС ПСГ. Розроблення методу

автоматизованого визначення наведених витратно-напірних характеристик ВН газу базується на застосуванні програмно-технологічного комплексу оперативного контролю та передачі даних про стан технологічного обладнання, який експлуатується на ДКС СПГ «Більче-Волиця».

Для реалізації цієї важливої науково-практичної проблеми необхідно вирішити наступні завдання:

- провести комплексний аналіз сучасного стану ідентифікації помпажних характеристик відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів;
- розробити метод ідентифікації помпажних характеристик відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів дотискувальної компресорної станції у реальному часі;
- провести аналіз впливу кроку дискретизації, інформативних параметрів та часу регулювання системи автоматичної ідентифікації помпажних характеристик;
- провести аналіз витратно-напірних характеристик і визначення функції передачі відцентрового нагнітача експериментально-аналітичним методом;
- забезпечити в експлуатаційних умовах, експериментальні дослідження розробленого методу автоматичної ідентифікації помпажних характеристик газоперекачувальних агрегатів, аналіз і узагальнення результатів досліджень;
- розробити зразок промислового програмно-апаратного комплексу системи автоматичної ідентифікації помпажних характеристик ВН ГПА і виконати промислову апробація результатів досліджень.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ АВТОМАТИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПОМПАЖНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВІДЦЕНТРОВОГО НАГНІТАЧА

2.1. Аналіз явища помпажу і помпажних характеристик відцентрових нагнітачів з газотурбінним приводом

Таке шкідливе явище, як помпаж, спостерігається під час роботи на трубопровідну систему відцентрових нагнітачів, насосів і вентиляторів та супроводжується появою пульсації [5]. Проте, коли робочі точки відцентрових нагнітачів знаходяться поблизу межі помпажної зони, забезпечується максимальне завантаження ГПА і високий ККД [2,5,6]. Тому однією з найважливіших задач САК ГПА дотискувальної компресорної станції (ДКС) підземного сховища газу (ПСГ) вважається задача автоматичної ідентифікації помпажних характеристик, запобігання помпажу в відцентровому нагнітачі і безпечного виходу із нього компресорної установки. Модель відцентрового нагнітача як досліджуваного об'єкту, наведено на рис. 2.1.

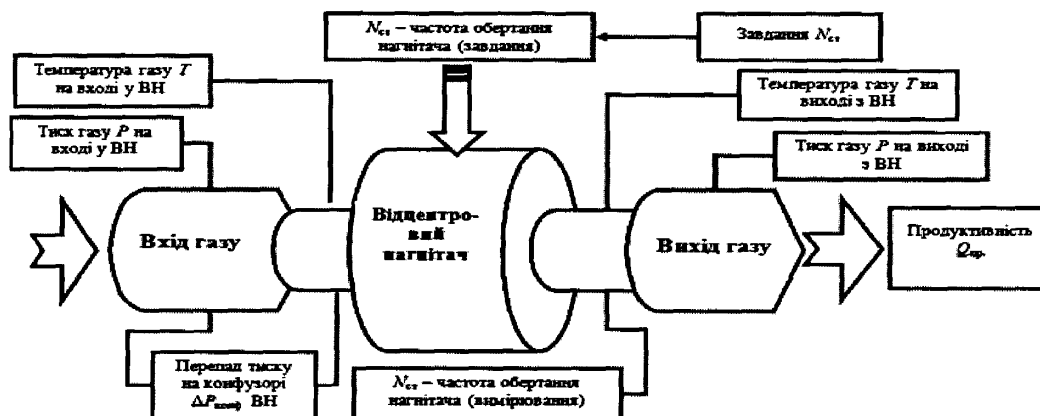


Рис. 2.1. Модель досліджуваного об'єкту – відцентрового нагнітача

Оскільки процес компримування природного газу залежить від великої кількості взаємозв'язаних вхідних величини – керувальних дій та зовнішніх впливів, структурну схему ГПА ДКС ПСГ, як об'єкта автоматичного антипомпажного регулювання можна відобразити так, як це наведено на рис.2.2.

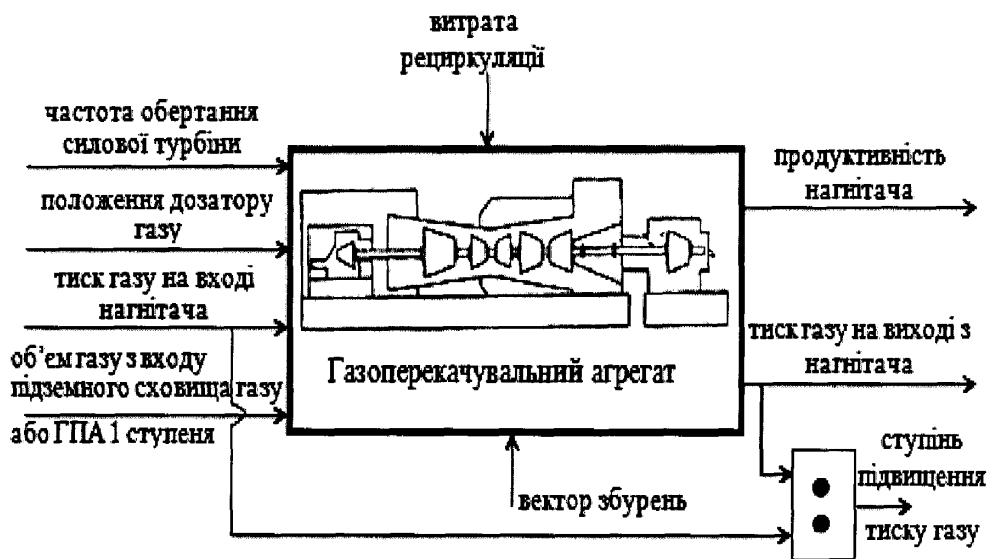


Рис. 2.2. Структурна схема ГПА як об'єкта керування

Структурна схема процесу компримування газу в ГПА, як об'єкта автоматичного регулювання визначена відповідно з технологічними вимогами до систем антипомпажного регулювання відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів [10] і програми впровадженнь антипомпажного регулювання, які розроблені ДК «Укртрансгаз» [6].

При постійній частоті обертання ротора (рис.2.3) характеристика відцентрового нагнітача (1), яка на графіку поширена на область від'ємних витрат Q , є характеристикою певного режиму мережі на виході нагнітача. Кількість газу, що перекачується в усталеному режимі, визначається точкою перетину характеристики відцентрового нагнітача 1 з характеристикою мережі 2 [5,8,9].

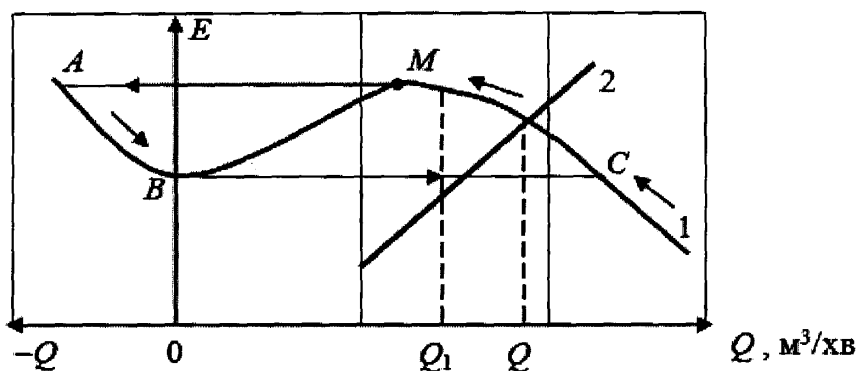


Рис. 2.3. Графік залежності ступеня підвищення тиску газу E від об'ємної продуктивності Q відцентрового нагнітача з газотурбінним приводом при постійній частоті обертання:

- 1 – характеристика відцентрового нагнітача;
- 2 – характеристика мережі.

Зменшення подачі газу до величини Q_1 супроводжується тим, що тиск в мережі малого об'єму знизиться до величини P_1 у той же час, коли відцентровий нагнітач може стабільно працювати з продуктивністю Q_1 тільки при тиску на виході $P_2 > P_1$. Отже, продуктивність компресора почне зростати і досягне своєї початкової величини Q . Якщо мережа має велику ємність, що характерно для нагнітача природного газу в магістральний газопровід, або в ПСГ - тиск на виході нагнітача не зміниться миттєво при коливаннях його продуктивності. Проте, у цьому випадку під час зменшення подачі нагнітач не може стабільно працювати у новому режимі, оскільки тиск нагнітача не відповідає його продуктивності Q_1 і подача зростає, досягаючи початкового значення Q . Аналогічна картина спостерігається при випадковому збільшенні продуктивності нагнітача. Бачимо, що стабільність режиму роботи нагнітача забезпечується при роботі на падаючій ділянці характеристики $E=f(Q)$. Для мережі з великою продуктивністю Q нестабільність з'являється в точці M

характеристики $E=f(Q)$ нагнітача, де дотична паралельна осі абсцис, яка б не була характеристика мережі, що проходить через цю точку. Під час випадкового невеликого зменшення витрати Q тиск в системі через великий об'єм спочатку не змінюється, в той час як нагнітач більше не в змозі створювати цей тиск. Тому продуктивність відцентрового нагнітача далі зменшується і режим його роботи стрибком переходить у точку A , де газ тече у протилежному напрямку. Тому тиск в системі поступово падає, завдяки чому режим роботи нагнітача переміщується вздовж характеристики $E=f(Q)$ від точки A до точки B . Подальше зменшення тиску сприяє стрибку режиму роботи із точки B у точку C . У зв'язку із збільшенням подачі газу Q , тиск в мережі знову зростає, поки не досягне точки M , і процес повторюється. Описаний періодичний процес називається помпажем, частота якого коливається в межах від 0,5 до 10-20 Гц та залежить від акумулюючих характеристик мережі [8,9,16]. Помпаж супроводжується швидким зростанням температури газу та появою значних вібраційних навантажень, що може привести до руйнування нагнітача.

Досвід експлуатації показує [6,10], що найбільш точно режим роботи відцентрового нагнітача контролюється за приведеною об'ємною продуктивністю, яка визначається через перепад тиску на конфузори, а найбільш економічно вигідний режим роботи ГПА – це режим, який знаходиться практично в передпомпажній зоні, тобто в зоні нестабільної роботи, яка відповідає знаходженню віддаленості точки відцентрового нагнітача від лінії помпажу в межах від 1% до 5,0% [6]. Разом з тим, при такому режимі необхідно забезпечити стабільну роботу відцентрового нагнітача і не дати робочій точці переміститись в зону помпажу. На думку багатьох дослідників [2,4,5,6,8,9,10] таке завдання повинне вирішуватися за допомогою автоматичної ідентифікації помпажних характеристик, як одної із задач автоматичних систем антипомпажного регулювання, або захисту, що повинні забезпечити стабільну і

надійну роботу відцентрових нагнітачів поблизу межі помпажної зони. Якщо не можливо відновити необхідну витрату через відцентровий нагнітач за рахунок керування рециркуляцією протягом 2,5 с., то виникає неусувний помпаж.

Щодо авіаційних газотурбінних приводів (рис. 2.4) існує технічний термін помпаж двигуна – це самостійне явище, подібне за суттю і причинами виникнення до помпажу в нагнітачах, але виникає воно в компресорах газотурбінних двигунів, в силу тих чи інших технологічних та режимних обставин, і ніяк не пов'язано з помпажем нагнітача газоперекачувального агрегату. Помпаж двигуна контролюється засобами захисту і давчачами газотурбінного приводу, але при виникненні помпажу на газотурбінному приводі (ГТП), в основному, виконується алгоритм аварійної зупинки цілого ГПА.

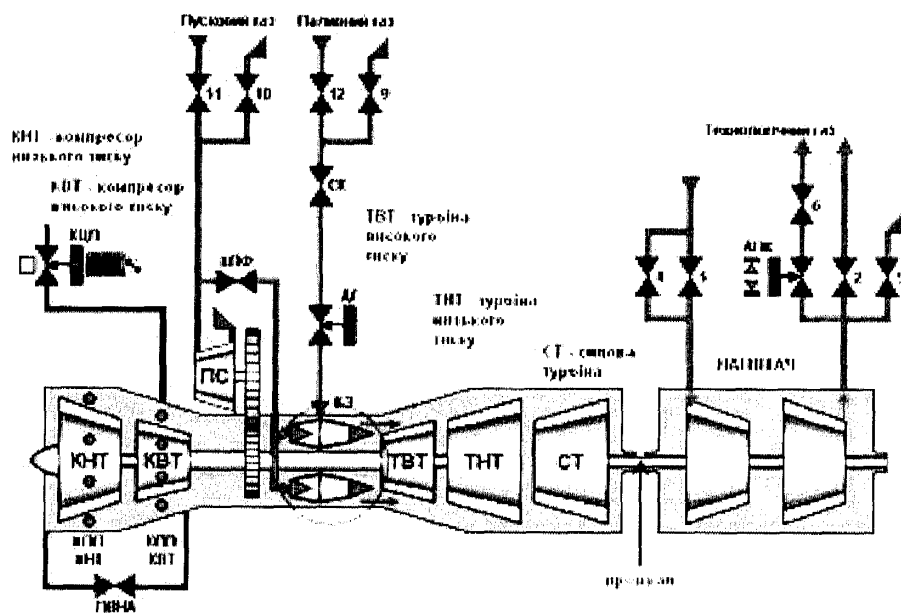


Рис. 2.4. Схема двигуна типу Д-336-2. КЗ – камера згоряння

Запал і горіння палива підтримується 2-ома пусковими форсунками, що інтегровані з агрегатами запалювання в корпусі камери згоряння.

З метою визначення впливів та розподілення взаємозв'язків, що виникають при розузгодженні системи «двигун-нагнітач», в результаті виникнення помпажних явищ, на ГПА підземних сховищ газу різних типів – необхідно формалізувати складові даної системи та описати алгоритм роботи кожного елементу. Для виконання газотранспортної роботи нагнітачем його привід, тобто авіаційний двигун газотурбінного типу потрібно привести в дію й вивести в такий режим роботи, який дозволить приводити в дію навантаження у вигляді нагнітача ГПА.

Для введення в дію двигуна, система автоматичного керування ГПА повинна бути готовою до пуску і дозволяти запуск в автоматичному режимі, за результатами контролю всіх параметрів та механізмів, що будуть задіяні в процесі транспортування газу агрегатом, і повинні бути перевірені персоналом на стадії підготовки агрегату до роботи. В холодні періоди року важливим завданням обслуговуючого експлуатаційного персоналу є забезпечення підігріву обладнання і мастил для забезпечення передпускових умов та гарантованого пуску ГПА, з метою недопущення невдалих запусків та аварійних зупинок, які призводять до перевитрат паливно-енергетичних ресурсів.

Алгоритм пуску і роботи газотурбінних двигунів авіаційного типу, що застосовуються на газоперекачувальних агрегатах наступний:

- вали компресорів і турбін високого та низького тиску під дією повітряного (ПС), або електричного стартера розкручуються до пускових обертів в межах 1000-2000 об/хв.;

- після досягнення пускових обертів в камеру згоряння на дубльовані пускові форсунки подається паливний газ з одночасним підведенням високої напруги до агрегатів запалювання і формуванням іскрового розряду, з метою підпалу газоповітряної суміші;

- процес проходження запалу контролюється системами автоматики по наростанню температури в камері згоряння, і якщо пускові форсунки забезпечили горіння пускової суміші – подається команда на відкриття робочих форсунок і подавання в камеру робочих об'ємів газу. За результатами згоряння наростаючих обсягів паливного газу, що подається робочими форсунками, відбувається ріст температури в камері згоряння і, як наслідок, пришвидшення обертання валів ТВТ і ТНТ. З огляду на те, що двигуни побудовані по так званій «двохвальної схемі», тобто КНТ-ТНТ і КВТ-ТВТ конструктивно жорстко зв'язані між собою валами – відбувається взаємне наростання швидкості обертання за результатами горіння в камері і вивільнення гарячих мас повітря на турбіни ТВТ і ТНТ. Турбіни, в свою чергу пришвидшують обертання компресорів КНТ і КВТ, чим забезпечується притік в камеру згоряння додаткових масових об'ємів повітря під вищим тиском, а далі відбувається прогрівання повітряної маси – вивільнення її - розкручування валів ТВТ і ТНТ, тобто процес розгортається із значним прогресуючим пришвидшенням;

- при збільшенні обертів та стійкому наростанні температури в камері згоряння, що контролюється засобами автоматики – подається команда на поступове відкриття паливного регулятора (дозатора газу – ДГ) для виведення двигуна в режим «малий газ» і забезпечення його прогрівання;

- при досягненні обертів ТВТ вище 3700-4000 об/хв. наростає газодинамічний зв'язок між вивільненими гарячими масами прогрітої повітряної суміші після КВТ і перед силовою турбіною (СТ), за результатами якого силова турбіна теж починає рухатися та набирати обертів. Нагнітач газоперекачувального агрегату в момент запуску і прогрівання двигуна, аж до виводу його в режим «Магістраль» залишається не завантаженим, що дає можливість силовій турбіні легко досягнути робочих обертів для забезпечення режиму «малого газу»;

- при досягненні обертів КВТ вище 5000 об/хв., наявності росту температури в камері згоряння і збереженні всіх контрольних ознак, що підтверджують успішний запуск двигуна повітряний, або електричний стартер від'єднується, а двигун самостійно продовжує набирати оберти (рис. 2.5);

- після завершення часу прогрівання ГПА на режимі «малий газ» і при низьких обертах турбін та СТ, які для кожного типу приводу регламентовані, можна виконувати переведення ГПА в режим «Магістраль». При відсутності в складі САК ГПА підсистеми, що виконує функцію автоматичного завантаження за допомогою антипомпажного клапану і паливного регулятора, експлуатаційному персоналу слід виконати узгодження обертів СТ - нагнітача з сусідніми працюючими ГПА і забезпечити процедуру переведення агрегату на роботу в режимі «Магістраль» - тобто перекачування газу.

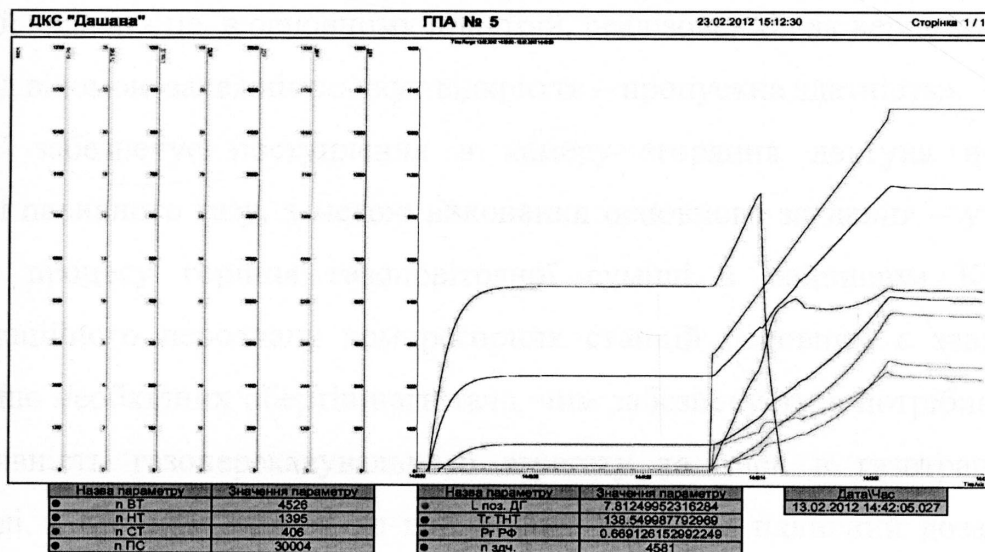


Рис. 2.5. Діаграма типового запуску ГПА типу Ц-6,3МВт ДКС «Дашава» з газотурбінним приводом Д-336-2 розробки вітчизняного АТ «Мотор-Січ»

Під час проведення експериментальних досліджень на ГПА з однаковими нагнітачами, але різними типами застосовуваних приводів було встановлено, що

на процеси розвитку помпажних явищ в нагнітачах, а також при виведенні агрегату з помпажу засобами регулювання - тип двигуна впливає на характер розвитку процесів, в залежності від реалізованого алгоритму керування самим газотурбінним приводом (ГТП), що і підштовхнуло до більш досконалого вивчення складових, які змінюють характер поведінки нагнітача в умовах виникнення помпажу.

Під терміном «керування двигуном ГПА» - розуміють утримання обертів ГТП в призначеному (дозволеному) для нього діапазоні, що забезпечує відповідну зміну обертів нагнітача і здійснюється шляхом впливу, через засоби системи автоматики на дозатор газу. Назви, що застосовуються спеціалістами галузі для опису пристрою, який забезпечує регулювання кількості паливного газу, що подається в двигун - дозатор газу (ДГ), паливний регулятор та паливний клапан - це, в основному пристрій, реалізований, як керований клапан з наперед відомою залежністю «кут відкриття – пропускна здатність».

ДГ забезпечує поступлення в камеру згоряння двигуна необхідної кількості паливного газу, з метою виконання основного завдання – утримання якісного процесу горіння газоповітряної суміші з найвищим ККД. Для експлуатаційного персоналу компресорних станцій основним є завдання по утриманню необхідних обертів нагнітача, чим забезпечується потрібна об'ємна продуктивність газоперекачувального агрегату та тиск в газотранспортній магістралі, а органом впливу на цей процес виступає паливний дозатор газу. Дозатор газу підпорядковується командам, які формуються від системи автоматичного керування в автоматичному, або ручному (від персоналу) режимах і виконує функцію основного керуючого органу для двигуна ГПА.

Системою автоматичного керування формуються керуючі впливи для дозатора газу на підставі чітко формалізованих алгоритмів, що розроблені заводами виготовлювачами двигунів і фактично не змінюються в процесі

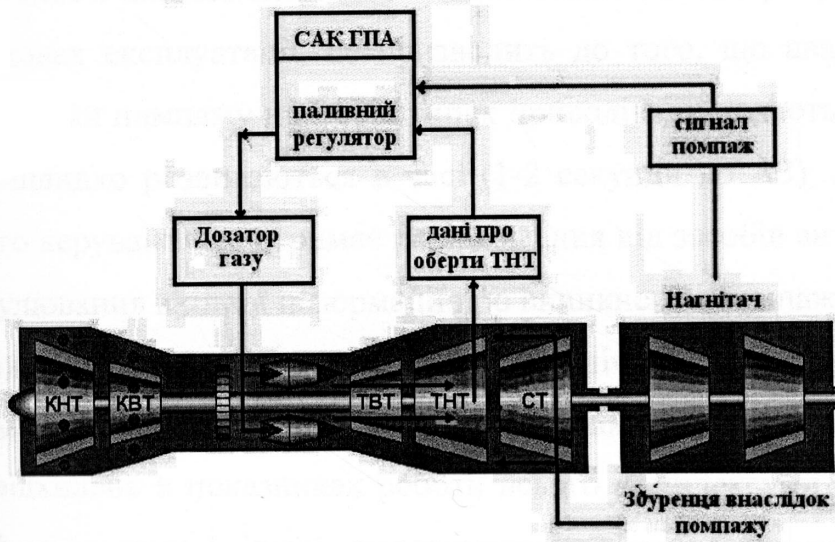
експлуатації, з погляду безпеки, значного досвіду їх довготривалого використання в авіації і транспортуванні нафти та газу. Для керування агрегатами з авіаційними газотурбінними двигунами, в газотранспортній системі, використовуються два принципово різні підходи: а – стабілізація обертів турбіни низького тиску (ТНТ) двигуна; б – стабілізація обертів силової турбіни (СТ) двигуна.

На досліджуваних об'єктах – дотискувальних станціях підземних сховищ газу в системах автоматики ГПА застосовані наступні закони регулювання:

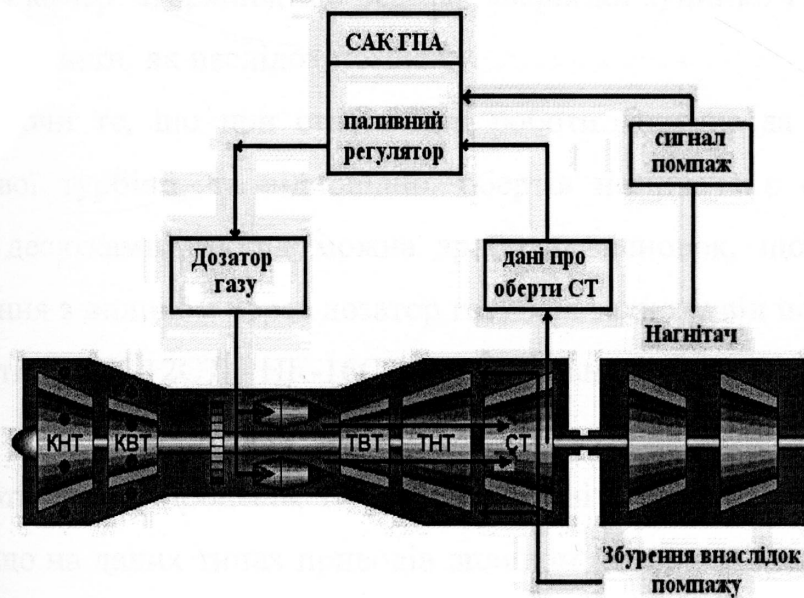
- ДКС «Більче-Волиця», для авіаційних двигунів типу НК-12СТ і НК-16СТ система автоматичного керування виконує стабілізацію комплексу двигун-нагнітач за принципом «утримання заданих обертів ТНТ».

- ДКС «Дашава», для авіаційних двигунів типу Д-336-2 використовується принцип «утримання заданих обертів СТ».

Функціональні відмінності принципів регулювання наведено на схемах (рис. 2.5, а, б). Кожен з застосовуваних алгоритмів має свої принципові відмінності в реакції ГТП на виникнення помпажу нагнітача, і як наслідок, кожен тип приводу по різному реагує на помпажні коливання, що виникають в нагнітачах з погляду роботи його систем захисту і регулювання. В приводах НК-12СТ і НК-16СТ за рахунок того, що безпосереднього зворотного зв'язку між виникненням помпажних коливань в нагнітачі і збуренням в камері згоряння, які ними створені немає – коливання силової турбіни, внаслідок розвитку помпажу в нагнітачі відбуваються без відповідного реагування на це системи автоматики, тобто того, як газодинамічний опір, створений сповільненням і пришвидшенням обертання СТ, не викличе відповідні значні відхилення в швидкості обертання ТНТ – двигун продовжує працювати в стабільному режимі.



а)



б)

Рис. 2.5. Принципи керування агрегатами з авіаційними газотурбінними двигунами в газотранспортній системі:

- а) по турбіні низького тиску двигуна;
- б) по силевій турбіні двигуна.

За відсутності якісної системи антипомпажного захисту і регулювання, в звичайних умовах експлуатації, це призводить до того, що аварійні зупинки викликані явищами помпажу на таких типах приводів, виникають несподівано і надзвичайно швидко розвиваються в часі (1-2 секунди до АЗ). Якщо система автоматичного керування не отримає повідомлення від засобів антипомпажного захисту і регулювання вхідної інформації про виникнення помпажу в нагнітачі – вона продовжує керувати двигуном так ніби нічого не відбувається, і як наслідок, помпажні коливання розвиваються надзвичайно швидко і призводять до значних відхилень в показниках роботи всього комплексу обладнання, а це ріст вібрацій та осьових зміщень, перевищення гранично допустимих обертів, ріст температури газу на виході нагнітача, пониження/перевищення температури в камері згоряння, що веде до аварійної зупинки ГПА, яку інколи важко ідентифікувати, як наслідок помпажу.

Враховуючи те, що при стабілізації роботи двигуна за обертами ТНТ реакція силової турбіни, та відповідно, обертів нагнітача є сповільненою і вимірюється десятками секунд можна зробити висновок, що застосовувати схеми керування з впливом через дозатор газу для захисту від помпажу на ГПА з приводами типу НК-12СТ і НК-16СТ є недоцільним та малоефективним. Але зважаючи на значну масову вагу складових елементів двигунів таких типів і, як наслідок інертність до процесів, що виникають зі сторони нагнітача – можна припустити, що на даних типах приводів впливом камери згоряння, і двигуна в цілому, на процеси стабілізації помпажних явищ в нагнітачах – можна знехтувати.

При стабілізації обертів СТ, яка жорстко зв'язана проміжним валом з нагнітальним колесом, що використовується на двигунах типу Д-336-2 – в перший момент росту обертів, внаслідок виникнення помпажу нагнітача – виникає реакція системи керування дозатором газу «на зменшення подачі

паливного газу». З погляду системи автоматичного контролю оберти силової турбіни «безпідставно» ростуть, при інших незмінних параметрах двигуна, отже регулятор пробує погасити ріст обертів прикриттям паливного дозатора. При цьому темп закриття дозатора газу, в силу затримки обчислень і часу необхідного на дію виконавчих механізмів, відбувається з часовим зсувом. В той період часу коли дозатор ще виконує команду САК ГПА на зменшення подачі паливного газу з метою пониження обертів СТ, нагнітач після різкого збільшення швидкості обертання починає сповільнення в тому ж темпі і досягає нижнього піку помпажної синусоїди. Система автоматично визначає такий же темп, але двократний за амплітудою «провал» швидкості обертання СТ – і різко нарощує подавання паливного газу в камеру згорання. Таким чином процес набуває характеру запізненого перерегулювання, і в результаті негативні явища викликані помпажем нагнітача передаються на двигун і викликають в ньому відхилення технологічних параметрів такого характеру, що призводять до виникнення аварійної зупинки, без діагностування системою першопричини її виникнення. В основному такі зупинки визначаються кількома характерними відхиленнями параметрів двигуна, які опосередковано вказують на виникнення помпажних явищ в нагнітачі як :

- перевищення температури перед СТ;
- перевищення гранично допустимих обертів СТ;
- розузгодження обертів ТВТ та СТ, що в результаті призводить до аварійної зупинки газоперекачувального агрегату.

Так, як даною роботою було поставлено за мету розробити універсальний спосіб визначення помпажної характеристики для однотипних нагнітачів, незалежно від типу авіаційного газотурбінного приводу, який застосовується для приведення їх в дію – виникла необхідність враховувати ці додаткові збурення, що взаємодіють з процесами виникнення помпажних коливань в

нагнітачі та мають вплив при виведенні нагнітача з помпажу, шляхом застосування рециркуляції.

При виникненні помпажу в нагнітачі, процес згоряння палива і перетворення енергії в камері згоряння починає зазнавати зовнішніх впливів саме зі сторони нагнітача, через силову турбіну, а так як камера згоряння є самостійним діючим елементом в складі системи ГПА «двигун-нагнітач» вона створює відповідний зворотній вплив на нагнітач та опір помпажним процесам, які відбуваються в нагнітачі. В ході проведення експериментальних досліджень та помпажних тестів і випробовувань роботи систем антипомпажного регулювання було зроблено припущення про те, що на початкових стадіях виникнення помпажу в нагнітачі, камера згоряння виступає стабілізуючим елементом системи «двигун-нагнітач», а потім внаслідок втручання в роботу ГПА антипомпажної системи і впливу САК через дозатор газу на двигун – створює дестабілізуючі впливи, які ведуть до розвитку автоколивань. При застосуванні схеми керування двигуном за принципом «стабілізація обертів СТ» – необхідно провести розрахунки та визначити якісні характеристики закону регулювання, який буде стабілізувати роботу двигуна на час втручання системи антипомпажного захисту, щоби не допустити перерегулювання та виникнення «похідних» аварійних зупинок, в результаті активних дій паливного регулятора.

У ході експериментальних досліджень та розробки математичної моделі нагнітача було виявлено залежності і взаємозв'язки, які дали підстави вважати, що вплив газотурбінного приводу, а саме його камери згоряння на помпажні процеси в нагнітачі є значним – в зв'язку з чим виникла необхідність розробки математичної моделі камери згоряння.

2.2. Модель відцентрового нагнітача як об'єкта антипомпажного регулювання

При побудові моделі відцентрового нагнітача враховуватимемо, що загальною функцією автоматичного контролю є визначення станів об'єкта контролю і виявлення подій, що вимагають керувальних дій [60].

Стан ГПА в кожний момент часу t з певною точністю можна охарактеризувати компонентами вектора вихідних змінних:

$$\bar{x}^T(t) = (Q_{\text{пр}}(t), E(t), P_{\text{вих}}(t)), \quad (2.1)$$

де $Q_{\text{пр}}(t)$ – продуктивність нагнітача;

$E(t)$ – ступінь підвищення тиску газу;

$P_{\text{вих}}(t)$ – тиск газу на виході нагнітача.

Процес функціонування ГПА можна розглядати як послідовну зміну його станів. При переході від одного миттєвого стану до іншого значення $Q_{\text{пр}}(t)$, $E(t)$, $P_{\text{вих}}(t)$ змінюються, тобто є функціями стану та часу і їх можна назвати характеристиками стану об'єкта.

На ГПА впливає велика кількість зовнішніх впливів, але далеко не всі вони суттєві. З множини зовнішніх впливів можна відібрати лише ті, які для розв'язуваної задачі ідентифікації і контролю є найбільш суттєвими. Це в першу чергу керувальні дії

$$\bar{u}^T(t) = (Q_{\text{вх}}(t), N_{\text{ст}}(t), P_{\text{вх}}(t)), \quad (2.2)$$

де $Q_{\text{вх}}(t)$ – об'єм газу на вході нагнітача;

$N_{\text{ст}}(t)$ – частота обертання силової турбіни;

$P_{\text{вх}}(t)$ – тиск газу на вході нагнітача.

Об'єкт характеризується також деякою кількістю постійних величин $\bar{z}(t)$:

$$\bar{z}^T(t) = (z_{\text{завд}}(t), \text{полож. ДГ}),$$

де $z_{\text{завд}}(t)$ – задана оператором частота обертання ротора нагнітача;

полож. ДГ – положення дозатора газу

та вектором збурень $\bar{f}(t)$, від яких залежать характеристики стану ГПА (рис. 2.7). Внаслідок дії таких збурень, як технічний стан нагнітача, хімічний склад реального транспортованого газу, температура навколишнього середовища, атмосферний тиск та ін., вхідні і вихідні параметри ГПА змінюються в часі. Отже, кожна із вхідних величин є функцією керувальних дій $\bar{u}^T(t)$ і зовнішніх впливів $\bar{z}(t)$ та $\bar{f}(t)$:

$$x_i(t) = F_i(\bar{u}(t), \bar{z}(t), \bar{f}(t)), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2.3)$$

де n – кількість вихідних величин.

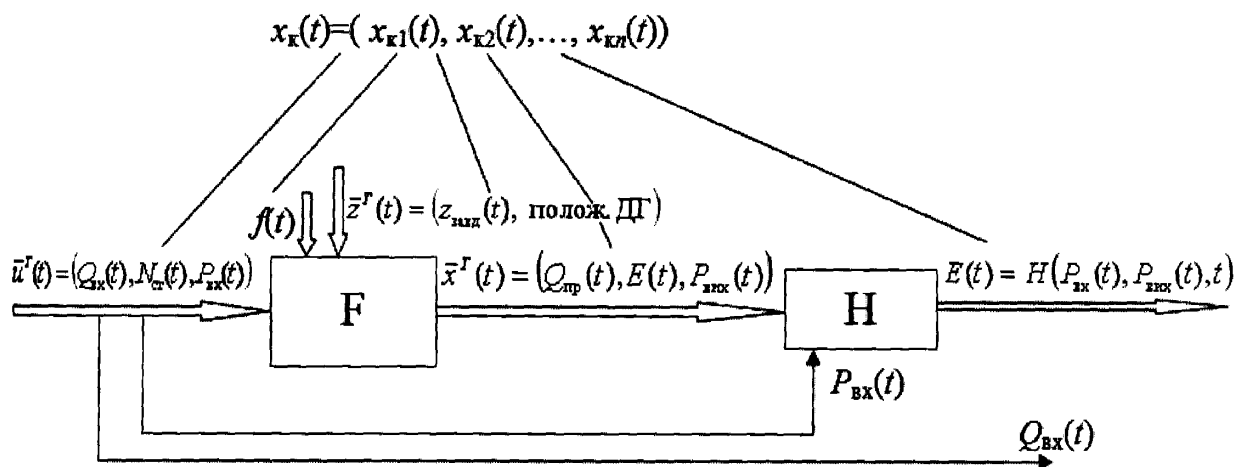


Рис. 2.7. Функціональна схема ГПА як об'єкта ідентифікації

Вплив ГПА на антипомпажний клапан характеризується змінами вихідної величини E , яка є ступенем підвищення тиску газу. Вона визначається через параметри стану $P_{\text{вих}}(t)$ та вхідний вплив $P_{\text{вх}}(t)$:

$$E(t) = H(P_{\text{вх}}(t), P_{\text{вих}}(t), t). \quad (2.4)$$

Необхідність введення до розгляду цього параметру виникає у зв'язку з визначенням помпажних характеристик ГПА, які функціонально зв'язані зі станом ГПА.

Отже, параметри стану ГПА $\bar{x}^T(t)$ і керувальні дії $\bar{u}^T(t)$ є найбільш універсальними характеристиками ГПА. У зв'язку з цим до складу контрольованих параметрів $x_k(t) = (x_{k1}(t), x_{k2}(t), \dots, x_{kn}(t))$ входять вхідні і вихідні величини, як це показано на інформаційній моделі досліджуваного об'єкта, яка наведена на рис.2.8.

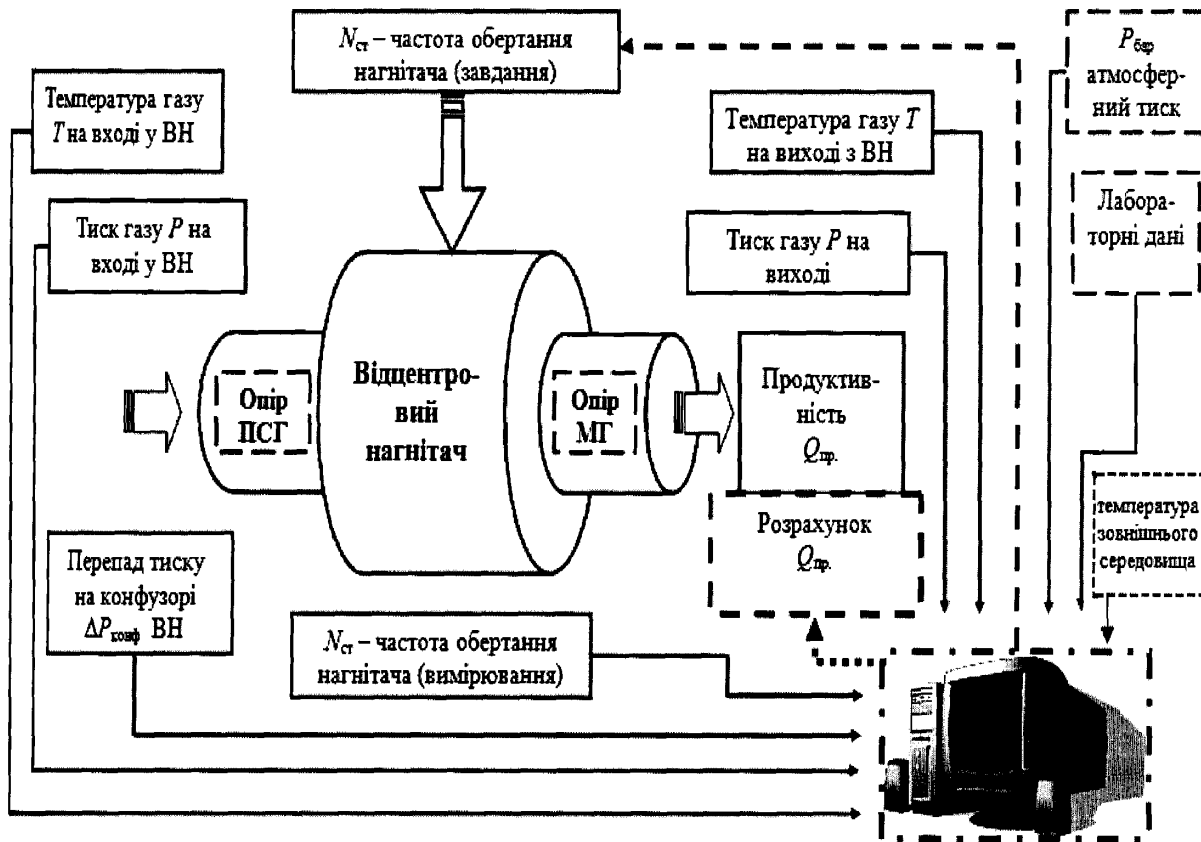


Рис. 2.8. Інформаційна модель досліджуваного об'єкту – відцентрового нагнітача

2.3. Аналіз впливу кроку дискретизації інформативних параметрів на час регулювання системи автоматичної ідентифікації помпажних характеристик газоперекачувального агрегату

У ході неперервного контролю технологічного процесу перекачування газу, на дотискувальній компресорній станції підземного сховища газу, запізнення у виявленні початку помпажних явищ визначає час, протягом якого збільшується ймовірність аварійної зупинки газоперекачувального агрегату. Для запобігання аварій, що пов'язані з помпажем, експлуатаційний персонал вимушений проводити переналагоджування попереджувальної лінії запасу по помпажу.

Потреба в переналагодженні виникає після тривалої експлуатації агрегату протягом одного сезону «відбору-закачування» газу, враховуючи зміни характеристик нагнітача і ГПА в цілому, що пояснюється фізичним зношуванням їх робочих частин.

Автоматична ідентифікація помпажних характеристик ГПА ДКС ПСГ є актуальною науково-практичною задачею у зв'язку з впровадженням в галузі сучасних систем автоматичного керування, зокрема, газоперекачувальним агрегатом ГПА-Ц-16 потужністю 16МВт для ДКС «Більче-Волиця» Стрийського ВУПЗГ УМГ «Львівтрансгаз», ГПА-Ц-6,3 потужністю 6,3МВт на ДКС «Дашава» Дашавського ВУПЗГ та ГПА-Ц-6,3 на ДКС «Опари-2» Опарського ВУПЗГ філії УМГ «Львівтрансгаз».

Проте, аналіз літературних джерел (наприклад, [18÷53] та ін.) показує недостатній об'єм проведених досліджень в напрямку автоматичної ідентифікації помпажних характеристик ГПА ДКС ПСГ, зокрема, визначення кроку дискретизації інформативних сигналів.

Визначення інтервалу часу між двома послідовними відліками T_0 під час багатократних спостережень на одній контрольованій точці діапазону вимірювань опирається на кореляційний, або спектральний аналіз випадкових похибок вимірювального каналу і визначається у відповідності з [56] $T_0 = 0,01$ сек. Це не протирічить результату, отриманого виходячи з теореми В.Котельникова, згідно якої будь-яку функцію часу зі спектром, обмеженим частотою f можна визначити на інтервалі T_0 дискретними значеннями в $2 T_0$ точках, або значенням величин хоча б в двох точках за період вищої гармоніки досліджуваної функції часу. Якщо, як частоту f вибрати значення промислової частоти $f = 50$ Гц, то тоді $T_0 = \frac{1}{2f} = 0,02$ с, що в два рази перебільшує інтервал T_0 , вибраний на базі кореляційного аналізу випадкових складових похибки вимірювального каналу. При цьому не досліджуваним залишається вплив кроку дискретизації на час регулювання системи автоматичної ідентифікації помпажних характеристик ГПА.

Тому важливим є виявлення впливу кроку дискретизації інформативних параметрів на час регулювання системи автоматичної ідентифікації помпажних характеристик ГПА ДКС ПСГ.

Будемо виходити з того, що система автоматичної ідентифікації помпажних характеристик ГПА ДКС ПСГ входить до складу системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом, узагальнену функціональну структуру якої наведено на рис.2.12.

Цифровий контур ідентифікації керованого об'єкта ПОП забезпечує ідентифікацію помпажних характеристик ГПА. Для вибору оптимального кроку дискретизації інформативних параметрів розглянемо залежності часу регулювання від значень полюсів цифрового фільтру низьких частот і від кроку дискретизації..

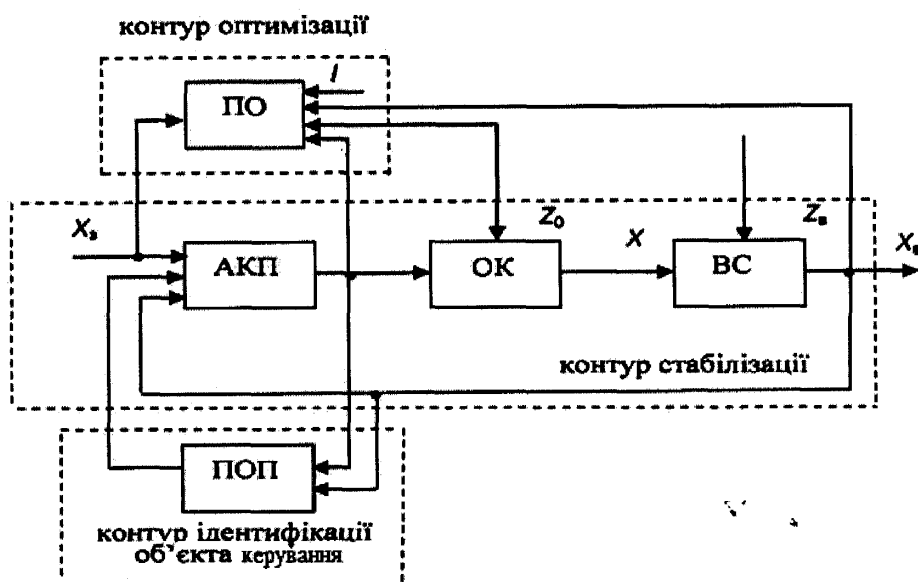


Рис.2.12. Узагальнена функціональна структура системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом Ц16 (САК ГПА Ц-16) з контуром ідентифікації:

ОК – об'єкт керування;

ВС – вимірювальна система;

АКП – автоматичний керуючий пристрій;

ПО – пристрій оптимізації;

ПОП – пристрій оцінювання параметрів об'єкту;

I – критерій оптимізації.

Для підвищення ефективності керування в системі САК ГПА застосовано цифрову обробку сигналів. Важливу роль при цьому грають адаптивні цифрові фільтри (АЦФ), які здійснюють фільтрацію сигналів давачів тиску, температури та ін. АЦФ є сукупністю основного каналу – цифрового фільтру і каналу адаптації, який забезпечує налаштування коефіцієнтів АЦФ за заданим критерієм якості. Ефективність роботи АЦФ залежить від тривалості перехідного процесу при налаштуванні його коефіцієнтів. У випадку

застосування методу найменших квадратів для побудови алгоритму адаптації і використанні рекурентних фільтрів в основному каналі виникає задача по вибору не тільки кроку налаштування, але й вибору кроку дискретизації вхідного сигналу, оскільки, при цьому змінюються частотні і динамічні властивості основного каналу (фільтру) [57].

Розглянемо цифровий фільтр нижніх частот (ЦФНЧ) першого порядку з функцією передачі

$$W(z) = k \frac{1 + z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1}}, \quad (2.5)$$

де k – коефіцієнт передачі;

$z = e^{pT}$ – комплексна змінна;

a_1 – коефіцієнт цифрового фільтру;

p – оператор Лапласа;

T – крок дискретизації.

Для визначення коефіцієнтів ЦФНЧ скористаємося функцією передачі аналогових фільтрів-прототипів

$$W_i(p) = \frac{K_i}{T_i p + 1}; \forall i \in (1 \div n) \quad (2.6)$$

або нормованою функцією передачі

$$W(p) = \frac{1}{p + 1}, \quad (2.7)$$

де $p = d/dt$ – комплексна змінна (оператор Лапласа);

K_i – коефіцієнт передачі i -го фільтру;

T_i – стала часу i -го фільтру.

Функцію передачі (2.7) отримано за допомогою білінійного з-перетворення при частоті зрізу $f_3 = 30$ Гц [52,57].

Значення коефіцієнтів цифрового фільтру нижніх частот були досліджені на діючому об'єкті при різних значення кроку дискретизації. Головною задачею було дослідження впливу кроку дискретизації на значення полюсів фільтру, що суттєво впливає на стійкість фільтру і його динамічні властивості. Це дозволило побудувати графік залежності значень полюсів a_1 фільтру від кроку дискретизації Δt , який наведено на рис. 2.13.

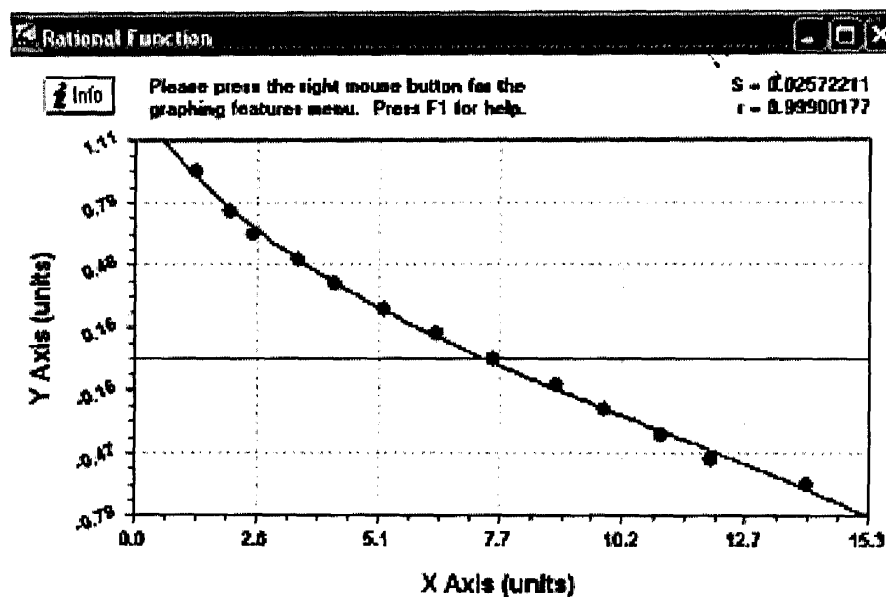


Рис. 2.13. Графік залежності значень полюсів a_1 від кроку дискретизації Δt

Рівняння, яким описується ця залежність наступне:

$$a_1 = \frac{1,36 - 0,18\Delta t}{1 + 0,169\Delta t - 0,007\Delta t^2} \quad (2.8)$$

Встановлено також залежність часу перехідного процесу t_p від кроку дискретизації й рівняння, яке описує цю залежність (рис. 2.14).

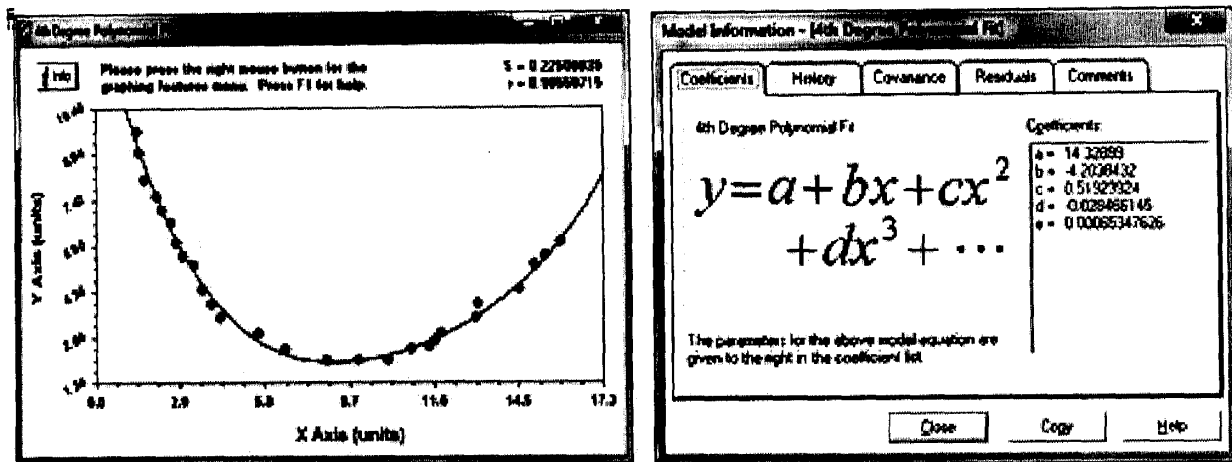


Рис. 2.14. Графік залежності часу перехідного процесу t_p від кроку дискретизації Δt

Рівняння, що описує цю залежність наступне:

$$t_p = 14.3289 - 4.2038\Delta t + 0.5192 \Delta t^2 - 0.0284 \Delta t^3 + 0.00065\Delta t^4. \quad (2.9)$$

Математична модель залежності $t_p = f(\Delta t)$ отримана за допомогою програмного продукту Curve Expert-2.

Як бачимо з рис.2.14, час перехідного процесу має мінімум при періоді дискретизації $\Delta t \approx 7$ мс. Відхилення від нього приводить до збільшення часу перехідного процесу.

Отже вибір оптимального кроку дискретизації дозволяє зменшити час регулювання системи автоматичної ідентифікації помпажних характеристик газоперекачувального агрегату ДКС ПСГ.

2.4. Ідентифікація помпажної характеристики відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату

Виходитимемо з того, що основними 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, технологічного обладнання, або по команді оператора. Крім цього, САК реалізує декілька додаткових функцій, які розширюють можливості керування процесом транспортування газу на агрегатному рівні [45,59].

Автоматичне керування головними параметрами ГПА надзвичайно важливе, оскільки оптимальні режими роботи ГПА практично завжди є граничними, тобто знаходяться біля аварійних режимів, але допустимі відхилення таких параметрів як температура газу, частота обертання турбіни не повинні перебільшувати $1\div 2\%$ від їх номінальних значень [45,58].

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. 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 повинна гарантувати надійну роботу відцентрового нагнітача (ВН) поблизу границі помпажної зони. Відомо, що збільшення запасу по помпажу, призводить до менш ефективного використання ГПА, а в умовах роботи ДКС ПСГ не завжди можливо технологічно забезпечити роботу агрегатів компресорної станції із значним, (більше 20%) запасом до помпажу.

Тому важливим є розроблення методу ідентифікації помпажної характеристики відцентрового нагнітача ГПА і випробування його за умов експлуатації нагнітачів з максимальним наближенням 1-5% до помпажної межі.

На базі досліджень різних підходів науковців встановлено, що методи ідентифікації об'єктів класифікують [23] за різними ознаками. Найбільш важливими є такі чотири групи: аналітичні і компенсаційні; статистичні і нестатистичні (детерміновані); градієнтні і не градієнтні; пошукові і безпошукові. Класифікацію найбільш важливих методів ідентифікації об'єктів керування наведено на рис. 2.16.

Аналітичні методи ідентифікації об'єктів виконуються 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.

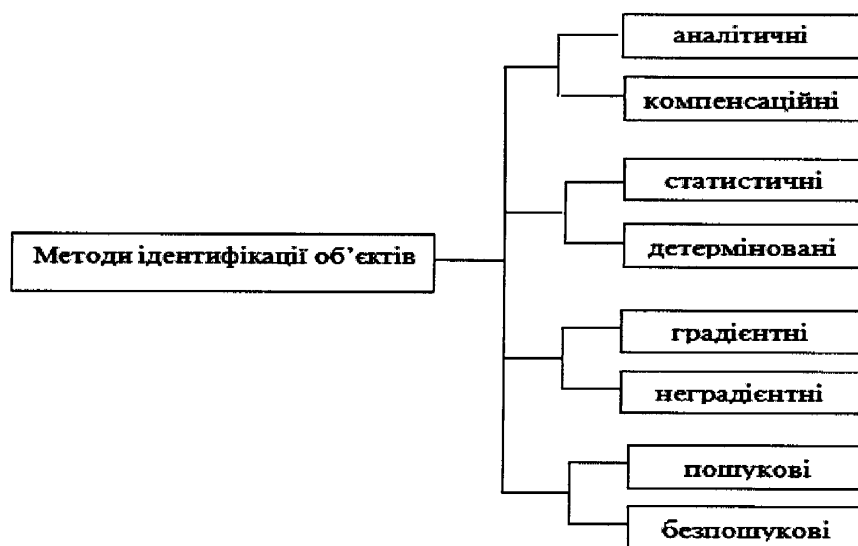


Рис. 2.16. Класифікація найбільш важливих методів ідентифікації об'єктів керування

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

$$y(t) = A_0(a, x, t), \quad (2.10)$$

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

a_i – i -й параметр;

x – вхідний сигнал;

t – час.

Наприклад, процес $y(t)$ на виході об'єкту (рис. 2.15) може бути описаний диференціальним, інтегральним, або різницеvim рівняннями, функцією передачі, ваговою або перехідною функціями, частотними характеристиками та ін.

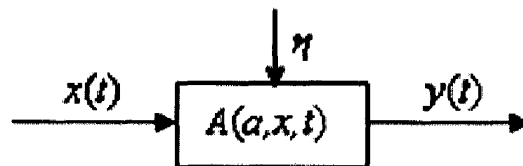


Рис. 2.15. Структурна схема об'єкту ідентифікації (η - завади)

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 $x(t)$ її має вигляд $A(a, t)$. Якщо структура і параметри об'єкта стаціонарні, то оператор не залежить від часу, тобто $A(a, x)$. Якщо об'єкт лінійний і стаціонарний, то оператор A визначається тільки вектором параметрів $a(a_1, \dots, a_i, \dots, a_n)$.

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

При технічному вирішенні задачі ідентифікації необхідно врахувати наявні обмеження, зумовлені режимом 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 $y = \hat{A}(\hat{a}, x, t)$ 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 точніші 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 слабо, або зовсім не залежить. Таким чином, ідентифікація в завданнях вимірювання і оптимального керування трохи відрізняється. Точні математичні моделі об'єкта зазвичай достатньо складні. На практиці немає необхідності у визначенні точних моделей. Тому зазвичай оцінку \hat{A} шукають у певному класі операторів.

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

Є деякий об'єкт, що описується оператором $A(a, x, t)$, що належить деякому класу операторів Ω_A . На його вхід поступають сигнали x , що належали деякій множині сигналів Ω_A . Необхідно вибрати деякий оператор $\hat{A}(\hat{a}, x, t)$ 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 при дослідженні 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 $\hat{A}(\hat{a}, x, t)$ 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 при цьому підході безпосередньо пов'язана з похибкою обчислень, неточністю математичного опису сигналів, зумовленою неврахуванням нестационарності і наявністю зовнішніх завад.

При використанні 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.2.16, рис.2.17).

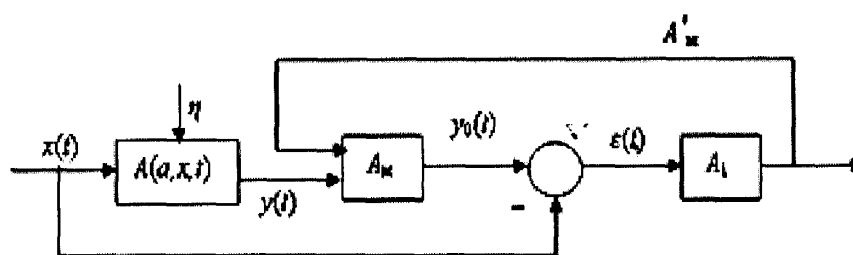


Рис. 2.16. Схема компенсаційної системи ідентифікації помпажних характеристик ГПА з послідовною моделлю:

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_1 – алгоритм ідентифікації; η – завади.

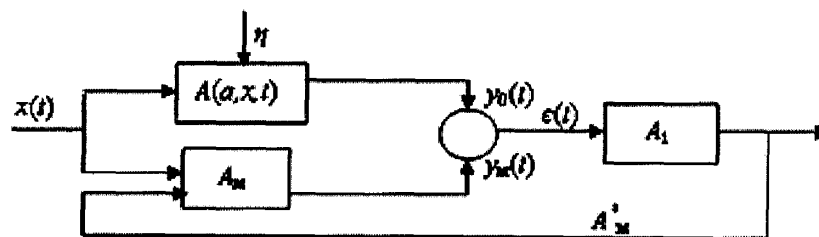


Рис. 2.17. Схема компенсаційної системи ідентифікації помпажних характеристик ГПА з паралельною моделлю

Деяке значення A_m^* оператора моделі A_m приймають згідно критерію 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 [23]. 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, яка отримана як результат розв'язку 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, зумовлені нестационарністю 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, звичайно, 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 дозволяє зменшити невизначеність результату ідентифікації. Недолік статистичних методів полягає в тому, що вони вимагають або знання вищезгаданих статистичних характеристик, або часу для їх визначення (часу усереднювання). Похибка статистичних методів, в основному, зумовлена 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 – слабка завадостійкість.

Гradientні методи ідентифікації містять gradientні алгоритми оптимізації міри якості. Рух до оптимального значення міри якості проводиться по gradientу у бік його оптимального значення з швидкістю, пропорційною gradientу міри якості. Чисто gradientний метод застосовується, коли міра якості строго унімодальна. Недолік gradientних методів обумовлений, в основному, недосконалістю міри якості, в якій зазвичай параметри об'єкта взаємозв'язані. В результаті цього отримані оцінки останніх можуть бути зміщеними. Складність реалізації gradientних систем ідентифікації полягає в необхідності наявності пристроїв для визначення компонент gradientу функціоналу міри якості.

При використанні неgradientних методів здійснюють рух до оптимального значення функціоналу якості неgradientним способом і немає

необхідності в безперервному визначенні компонент градієнту. Визначають тільки напрям зменшення функціоналу якості, уздовж якого відбувається рух, а також крок руху, що забезпечує певні якості процесу ідентифікації (наприклад, його збіжність). Швидкодія неградієнтних методів, як правило, нижча за швидкодію градієнтних, а їх похибка обумовлена кінцівкою кроків руху до оптимального значення міри якості, що зазвичай приводить 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 також залежить і 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 [23].

Ідентифікація помпажних характеристик ВН ГПА містить три основні компоненти [63]: поточні дані, множину моделей-претендентів та правило оцінки ступеня відповідності досліджуваної моделі даним спостережень.

Оскільки можливість впливати на хід експерименту на ГПА відсутня, то процедура ідентифікації помпажних характеристик повинна ґрунтуватись на поточних даних нормальної експлуатації, тобто на результатах пасивного експерименту. Найбільш важливим і складним етапом процедури ідентифікації помпажних характеристик ВН ГПА є вибір множини моделей, в межах якої шукатимемо найбільш підходящу. Саме на цьому етапі значення формальних властивостей моделей необхідно поєднати з апіорними знаннями, досвідом експлуатації й інтуїцією. Оцінка якості моделі ґрунтується на вивченні її поведінки в процесі використання. У результаті здійснення усіх трьох етапів процедури ідентифікації отримаємо одну конкретну модель із множини, яка у відповідності з вибраним критерієм найкраще відповідає досліджуваній моделі помпажних характеристик ВН ГПА.

Для аналізу технічного стану газотурбінних двигунів використовуються [61,62] наступні типові критерії S виявлення факту і моменту часу зміни властивостей випадкових процесів:

1. Критерій Хальда-Аббе:

$$r = \frac{1}{2(N-1)\hat{D}_y} \sum_{k=1}^N \Delta y_k^2 >< r_{кр}(N, \alpha), \quad (2.11)$$

де $\Delta y_k = (y_{k+1} - y_k)$ – перша послідовна різниця елементів часового ряду;

\hat{D}_y – вибіркова дисперсія;

α – рівень значущості (0,10; 0,05; 0,02; 0,01; 0,002; 0,001);

$r_{кр}$ – критичне значення критерію Хальда-Аббе;

N – об'єм вибірки.

2. Модифікований r^* -критерій Хальда-Аббе:

$$r^* = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{2-r}{r} \right]. \quad (2.12)$$

Перетворення (2.11) за умови $N > 10$ нормалізує розподіл критерію (2.28) з дисперсією $\sigma_{r^*} = (N-3)^{-0,5}$, що спрощує визначення критичного значення критерію $r_{кр}$, оскільки не вимагає спеціальних таблиць розподілу (2.11).

3. Інтегральний S_N – критерій

$$S_N = \sum_{k=1}^N \left(y_k - \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k y_n \right) \gg S_{кр}(N, \alpha), \quad (2.13)$$

де $S_{кр}$ – критичне значення критерію.

Інтегральний критерій $S_{кр}$ є кумулятивною сумою, яка центрована відносно вибіркового середнього. Граничне значення критерію визначається за рівнем значущості.

4. Модифікований S^* -критерій враховує зміну параметрів по напрацюванню. Вибіркове середнє в (2.13) замінюється на оцінку лінійної регресії

$$\hat{m}_y = a(\tau - \bar{\tau}) + b, \quad (2.14)$$

де коефіцієнти регресії уточнюються для кожного нового значення часу

$$b_k = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k y_j,$$

$$a_k = \frac{\sum_{j=1}^k y_j (\tau_j - \bar{\tau}_j)}{\sum_{\xi=1}^k (\tau_j - \bar{\tau}_j)}.$$

3. Інтегральний критерій приростів

$$I_k = \sum_{k=1}^N (y_k - y_{k-1}). \quad (2.15)$$

Для автоматичної ідентифікації помпажних характеристик ВН ГПА і інтерполяції заданої функції скористалися методом комп'ютерного моделювання і програмним пакетом Curve Expert, в якому похибка інтерполяції оцінюється стандартною абсолютною середньо-квадратичною похибкою

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K \Delta_i^2}{k}}, \quad (2.16)$$

та відносною похибкою

$$d = \frac{\sigma}{M_{\text{ном}}} 100\%, \quad (2.17)$$

де $\Delta_i = M(S_i) - \emptyset(S_i)$;

$M(S_i)$ – функція, яка задана у вигляді таблиці;

$\emptyset(S_i)$ – функція інтерполяції;

k – кількість вузлів вихідної функції, що задана таблично;

$M_{\text{ном}}$ – номінальне значення функції.

У результаті здійснення усіх трьох етапів процедури ідентифікації помпажних характеристик ВН ГПА отримаємо конкретну модель, яка у відповідності з вибраним критерієм найкраще відтворює дані спостережень. Контур ідентифікації помпажних характеристик ВН в структурі САК ГПА наведено на рис. 2.18.

Бачимо, що процедура ідентифікації передбачає збір апріорних даних, вибір множини математичних моделей і вибір найкращої моделі із множини. Якщо модель не витримує перевірки на етапі підтвердження, необхідно повернутися і переглянути різні кроки процедури ідентифікації.

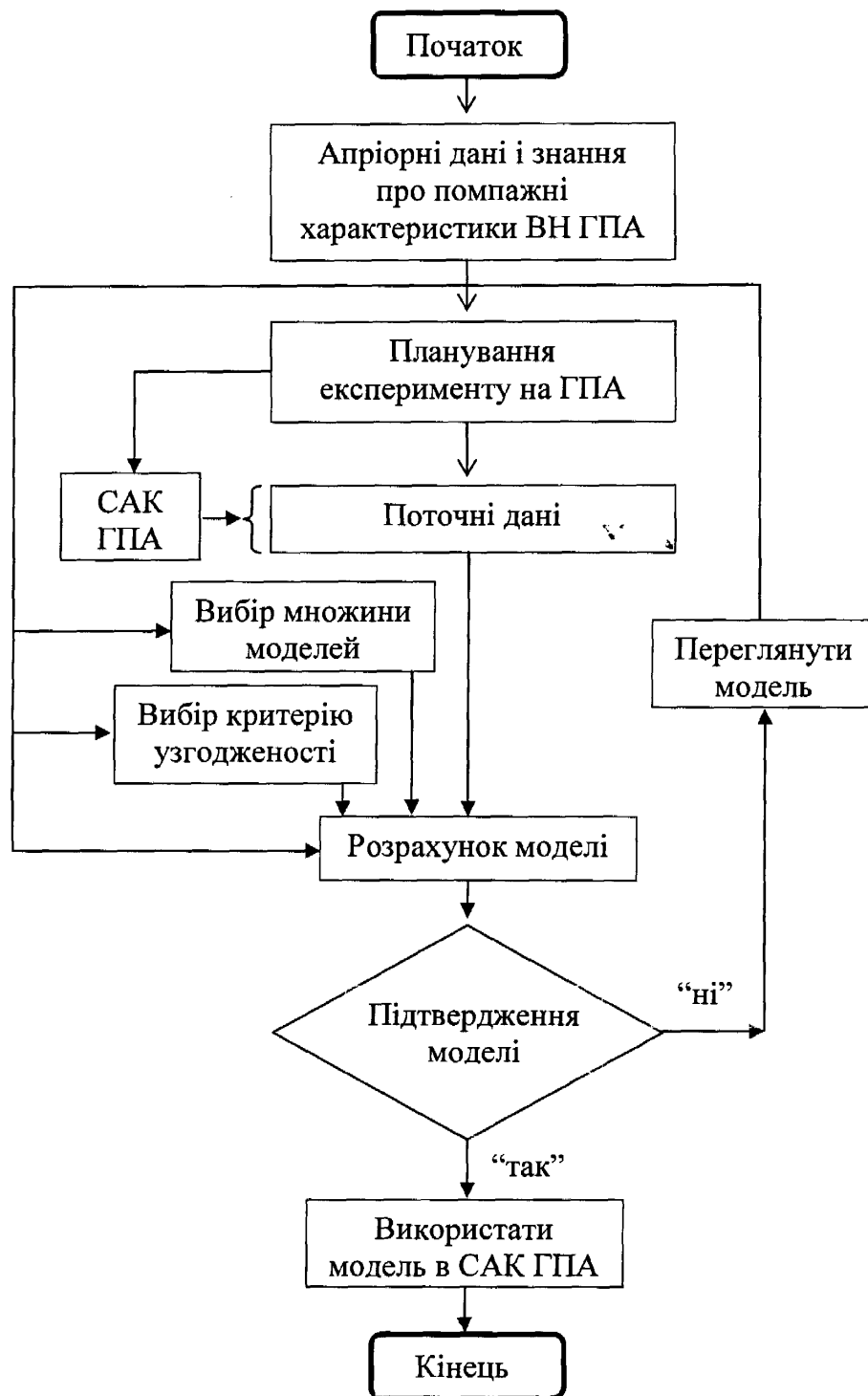


Рис. 2.18. Контур ідентифікації помпажних характеристик ВН у структурі САК ГПА

Очевидно, що важливим інструментальним засобом рішення цієї ітеративної задачі є діалогове програмне забезпечення. Проте, спочатку треба встановити кореляційний зв'язок ступеня підвищення тиску газу з масовою витратою.

Висновки до другого розділу

1. У результаті проведених теоретичних досліджень явища помпажу у нагнітачах й авіаційних двигунах, а також помпажних характеристик відцентрових нагнітачів з газотурбінним приводом розроблено функціональну й інформаційну модель досліджуваного об'єкта – відцентрового нагнітача, як об'єкта ідентифікації.

2. На основі аналізу властивостей газотурбінного приводу і принципів керування газоперекачувальними агрегатами з авіаційними газотурбінними двигунами в газотранспортній системі виявлено взаємозв'язки, які дали підстави вважати, що вплив камери згоряння газотурбінного приводу на помпажні процеси в нагнітачі є значним, що обумовило необхідність розробки алгоритмічної структури камери згоряння.

3. Удосконалено функціональну структуру системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом шляхом введення в САК ГПА додаткового контуру автоматичної ідентифікації помпажних характеристик, що дозволило поставити і вирішити задачу вибору оптимального кроку дискретизації інформативних параметрів.

4. За допомогою методів імітаційного моделювання досліджено вплив кроку дискретизації на значення полюсів фільтру, що суттєво впливає на стійкість фільтру і його динамічні властивості, а також залежність часу регулювання в САК ГПА від значень полюсів фільтру. Встановлено, що

остання залежність має мінімум, що дозволяє шляхом вибору полюсів фільтру забезпечити максимальну швидкодію САК ГПА.

5. Встановлено, що час регулювання САК ГПА залежить від значення кроку дискретизації і ця залежність має мінімум. За результатами досліджень встановлено, що час регулювання має мінімум, коли період дискретизації дорівнює 7 мс.

6. На основі проведеної класифікації найбільш важливих методів ідентифікації об'єктів керування, обґрунтовали вибір системи ідентифікації помпажних характеристик ГПА з паралельною моделлю і розроблено процедуру автоматичної ідентифікації помпажних характеристик відцентрових нагнітачів ГПА з газотурбінним приводом, яка дозволила, користуючись апіорними і поточними даними, множиною моделей претендентів та критерієм узгодженості, визначити конкретну модель, яка у відповідності з вибраним критерієм найкраще відповідає досліджуваній помпажній характеристиці.

РОЗДІЛ 3

ОЦІНЮВАННЯ СТАТИСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТУПЕНЯ ПІДВИЩЕННЯ ТИСКУ ГАЗУ І МАСОВОЇ ВИТРАТИ ГАЗУ У ПРОМИСЛОВІЙ СИСТЕМІ АВТОМАТИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ РЕАЛЬНИХ ПРИВЕДЕНИХ ВИТРАТНО-НАПІРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДЦЕНТРОВИХ НАГНІТАЧІВ ГПА З ГАЗОТУРБІННИМ ПРИВОДОМ

3.1. Визначення кореляційного зв'язку ступеня підвищення тиску газу в газоперекачувальному агрегаті з масовою витратою газу

Встановлення зв'язку ступеня підвищення тиску газу E в газоперекачувальному агрегаті (ГПА) з масовою витратою газу Q є актуальною науково-прикладною задачею у зв'язку з необхідністю розроблення ефективних систем автоматичного керування ГПА і захисту його від помпажу [64,65,66]. Проте аналіз літературних джерел (наприклад [64÷66 та ін.]) показує недостатній об'єм проведених досліджень в контексті встановлення зв'язків між цими показниками роботи ГПА за результатами експериментальних досліджень безпосередньо в умовах компресорної станції (КС). Тому доцільним є визначення кореляційного зв'язку ступеня підвищення тиску газу E з масовою витратою газу Q на основі аналізу результатів пасивного експерименту.

Для того, щоб повністю виключити елемент суб'єктивності в розрахунках, обчислення кореляційних залежностей проводили в повній відповідності з правилами математичної статистики [68,69]. Враховували, що графічні методи знаходження аналітичних залежностей за точністю та об'єктивності менш надійні, чим математичні розрахунки і з цієї причини є

не доцільними. При фізичному тлумаченні отриманих кореляційних зв'язків враховували також, що кореляція виникає не тільки при наявності прямої причинно-наслідкової залежності, але і в тому випадку, якщо дві (декілька) величин є наслідками однієї причини, не виявленої при спостереженні.

Розрахунок кореляційних рівнянь починали з аналізу графіків (рис.3.1, рис.3.2), побудованих за результатами експериментальних спостережень за процесом перекачування газу на ГПА №9 ДКС ПСГ "Більче-Волиця".

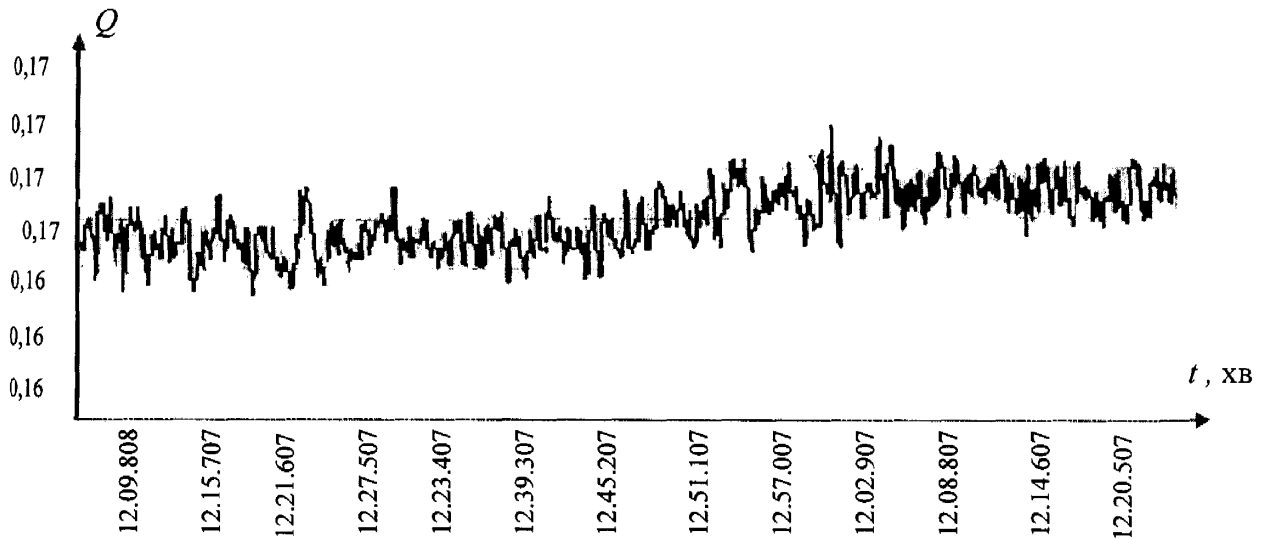


Рис.3.1. Графік зміни масової витрата газу $Q(t)$

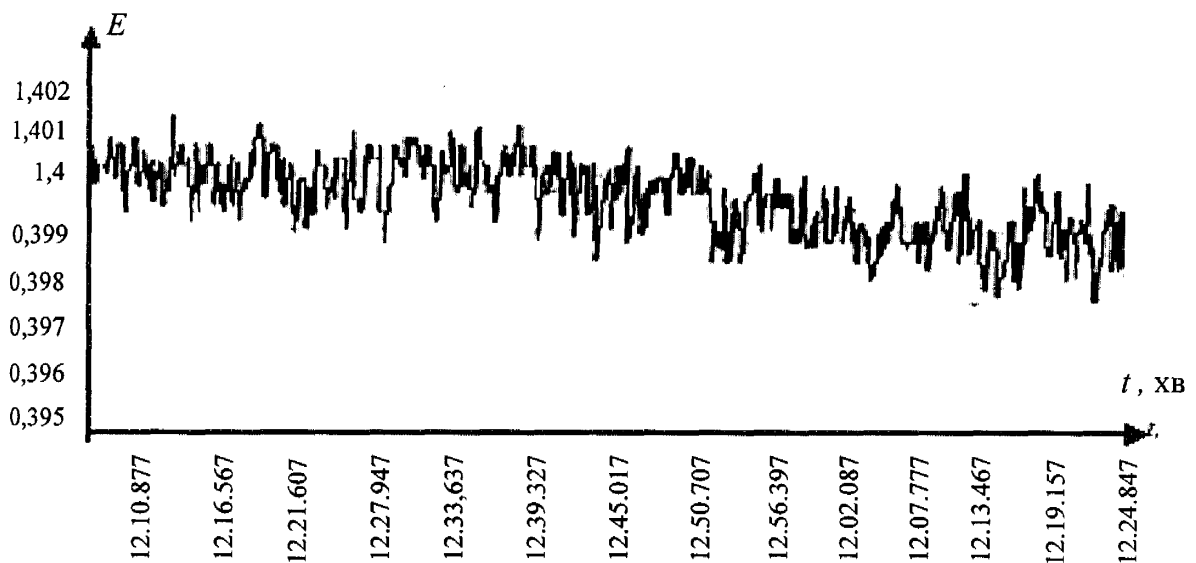


Рис. 3.2 Графік зміни ступеня підвищення тиску газу $E(t)$

Як бачимо із наведених графіків, під час збільшення масової витрати газу Q ступінь підвищення тиску газу E зменшується. Відомо, що ця залежність є нелінійною. Проте враховуючи, що в номінальному стаціонарному режимі роботи ГПА робоча точка відхиляється не суттєво, скористаємося методом лінеаризації за Тейлором і вважатимемо що залежність $E=f(Q)$ в досліджуваному діапазоні зміни витрати Q лінійна:

$$E=b-aQ, \quad (3.1)$$

де a і b - параметри моделі, що підлягають ідентифікації.

У цьому випадку константи a і b визначатимемо за даними експериментальної вибірки об'ємом $m=20$ парних вимірювань, визначеної на основі графіків (рис.3.1 і рис. 3.2), користуючись формулами [67,68]:

$$a = \eta_n \frac{S_E}{S_Q} = -0,334, \quad (3.2)$$

$$b = \bar{E} - \eta_n \frac{S_E}{S_Q} \bar{Q} = 1,457, \quad (3.3)$$

де η_n - вибірковий коефіцієнт кореляції

$$\eta_n = \frac{\sum_i^m (Q_i - \bar{Q})(E_i - \bar{E})}{(m-1)S_Q S_E} = -0,525 \quad (3.4)$$

$i = 1, 2, \dots, m$;

\bar{Q}, \bar{E} - середні значення параметрів Q та E

$$\bar{Q} = \frac{\sum_i^m (Q_i)}{m} = -0,170, \quad (3.5)$$

$$\bar{E} = \frac{\sum_i^m (E_i)}{m} = -1,3994, \quad (3.6)$$

S_Q та S_E вибіркові середньоквадратичні похибки середніх значень параметрів Q та E :

$$S_Q = \sqrt{\frac{\sum_i^m (Q_i - \bar{Q})^2}{(m-1)}} = -9,995 \cdot 10^{-4}, \quad (3.7)$$

$$S_E = \sqrt{\frac{\sum_i^m (E_i - \bar{E})^2}{(m-1)}} = -6,358 \cdot 10^{-4} . \quad (3.8)$$

Для розрахунку рівняння регресії використали всю сукупність результатів спостережень. Якщо серед результатів спостережень виявлялася одна (декілька) “вистрибуюча” точка, то питання про її виключення з розрахунків вирішували наступним чином.

Підраховували значення S_Q , S_E , η_n для всіх точок, включаючи “вистрибуючу”, і значення $\bar{S}_Q, \bar{S}_E, \bar{\eta}_n$ для всіх точок, крім “вистрибуючої”, і експериментальне значення показника $T_{\text{екс}}$:

$$T_{\text{екс}} = \frac{(m-1)^2 \bar{S}_Q^2 \cdot \bar{S}_E^2 (1 - \bar{\eta}_n^2)}{m^2 S_Q^2 \cdot S_E^2 (1 - \eta_n^2)} . \quad (3.9)$$

Знайдене експериментальне значення $T_{\text{екс}}$ порівнювали з табличним (Додаток Б) для заданого рівня значущості $q=0.05$. У нашому випадку “вистрибуюча” точка $Q=0,172$. Провівши розрахунки згідно (3.9), отримали $T_{\text{екс}} = 0,665$. Отже при заданій надійності виводу $p=0,95$ експериментальне значення $T_{\text{екс}} = 0,665$ виявляється більше теоретично допустимого $T_{\text{доп}} = 0,494$, тому “вистрибуюче” значення залишається в розрахунках. Відзначимо що, необгрунтоване виключення із розрахунків окремих точок недопустиме.

Вибірковий коефіцієнт кореляції $\eta_n = -0,525$ характеризує тісноту лінійного зв'язку параметрів Q та E і цей зв'язок дійсно існує, якщо коефіцієнт кореляції суттєво відрізняється від нуля. Перевірка цієї умови здійснюється шляхом порівняння знайденого коефіцієнта кореляції η_n з табличним $\eta_{1-q/2} = 0,444$ значенням для заданого рівня значущості $q=0.05$. Якщо виявиться, що вибірковий коефіцієнт кореляції $|\eta_n| < \eta_{1-q/2}$, то лінійна кореляційна залежність з ймовірністю $p=1-q$ між параметрами, що вивчаються по наявним експериментальним даним, відсутня. У нашому випадку $|\eta_n| > \eta_{1-q/2}$, то дослідження продовжується.

Спочатку будемо довірливий інтервал для коефіцієнта кореляції за допомогою перетворення Фішера. Використовуючи значення коефіцієнта кореляції η_n , знаходимо нову величину

$$u_n = \frac{1}{2} \ln \frac{1+\eta_n}{1-\eta_n} = 0,583. \quad (3.10)$$

Для заданої надійності $\rho = 0,95$ будемо довірчий інтервал величини u

$$u_n - t(\rho) \frac{1}{\sqrt{m-3}} < u < u_n + t(\rho) \frac{1}{\sqrt{m-3}}, \quad (3.11)$$

$$-1,058 < u < -0,108,$$

де $t(\rho) = 1,96$ – квантіль нормально розподілу (Додаток В),

m – об'єм вибірки.

Для двох границь інтервалу (3.18) по формулі (3.17) знаходимо з тою ж самою ймовірністю ρ довірливий інтервал для коефіцієнта кореляції

$$\eta_1 < \eta < \eta_2, \quad (3.12)$$

$$-0,782 < \eta < -0,107.$$

Отже, оскільки $|\eta_n| > \eta_{1-q/2}$, ($\eta_{1-q/2} = 0,444$), то знайдений коефіцієнт кореляції суттєво значущий, а лінійна кореляційна залежність цілком стійка.

Відсутність значимої лінійної кореляції ще не означає, що кореляційна залежність відсутня взагалі. Необхідно вивчити наявність або нелінійної, або множинної кореляції.

Оцінку довірчого інтервалу для шуканого значення параметра E при фіксованому значенні параметра Q_0 (3.1) з надійністю ρ здійснили за допомогою формули [64]:

$$E = b \pm \frac{S_E \sqrt{1 - \eta_n^2} t(\rho m - 2)}{\sqrt{m - 2}} \sqrt{1 + \frac{m(Q_0 - \bar{Q})^2}{(m - 1)S_Q^2}} - aQ, \quad (3.13)$$

Де $t(\rho m - 2)$ – квантіль Стюдента з $(m - 2)$ степенями свободи.

Встановлено, що

$$E = 1,491 - 0,539Q. \quad (3.14)$$

Похибка обчислення E мінімальна в околі точки \bar{Q} і різко зростає по мірі віддалення від неї. Тому використання знайденої кореляційної залежності для екстраполяції за межі того проміжку по осі Q , всередині якого вміщуються спостережувані дані, дуже небезпечно і може робитися тільки у виключних випадках з відповідним застереженням.

Для того щоб об'єктивно оцінити приведену лінійну кореляційну залежність (3.14) і правильно нею скористатися, одночасно з рівнянням регресії приводимо не тільки вибіркового коефіцієнт кореляції $\eta_n = -0,525$, але і наступні дані:

$m = 20$ - об'єм вибірки (число пар спостережень);

$E_{min} = 1.4006$, $E_{max} = 1,398$ - мінімальне і максимальне значення параметра E ;

$Q_{min} = 0.1714$, $Q_{max} = 0,1685$ - мінімальне і максимальне значення параметра Q ;

$\bar{Q} = 0,17017$, $\bar{S} = 1,39943$ – середні значення параметрів Q та E ;

$S_Q = 9,995 \cdot 10^{-4}$, $S_E = 6,359 \cdot 10^{-4}$ – вибіркові середньоквадратичні похибки середніх значень параметрів.

Отже, на основі результатів експерименту, проведеного на газоперекачувальному агрегаті №9 дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу “Більче-Волиця”, встановлено лінійний кореляційний зв'язок ступеня підвищення тиску газу в газоперекачувальному агрегаті з масовою витратою газу в робочій точці відцентрового нагнітача. Встановлено також, що похибка обчислення ступеня підвищення тиску газу в околі точки середнього значення масової витрати газу різко зростає по мірі віддалення від неї, наближення до межі помпажної зони і збільшення коефіцієнту помпажу.

3.2. Аналіз характеристик коефіцієнту помпажу газоперекачувального агрегату дотискувальної компресорної станції

Забезпечення режиму роботи газоперекачувального агрегату дотискувальної компресорної станції поблизу межі помпажної зони є актуальною науково-практичною задачею автоматизації процесів керування на компресорних станціях підземних сховищ газу [71]. При цьому забезпечується максимальний ККД та завантаження агрегату. Проте, за такого режиму роботи необхідно забезпечити стабільну експлуатацію газоперекачувального агрегату і не дати робочій точці витрато-напірної характеристики нагнітача переміститися в зону помпажу. Для цього можна скористатися інформацією про зміну в часі і статистичні характеристики такого технологічного параметру, як коефіцієнт помпажу газоперекачувального агрегату $K_{\text{ромпаж}}(t)$.

Для проведення дослідження властивостей сигналу $K_{\text{ромпаж}}(t)$ методами математичної статистики [71÷74] використаємо графік $K_{\text{ромпаж}}(t)$, зображений на рис. 3.3. Цей графік отримано на ГПА-Н9 САК ГПА ДКС ПСГ «Більче-Волиця» під час випробувань системи автоматичного захисту ГПА від помпажу.

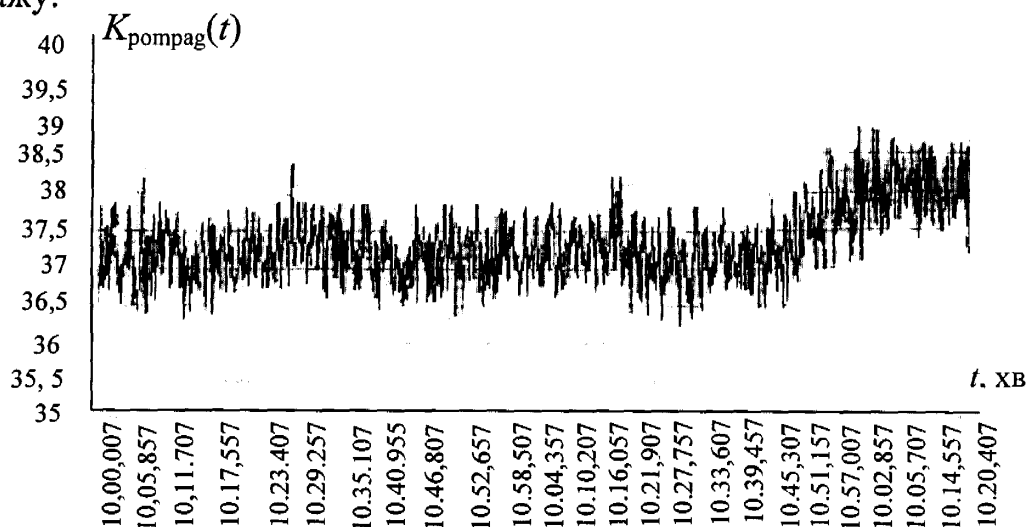


Рис. 3.3. Графік зміни технологічного параметру $K_{\text{ромпаж}}(t)$

Для зручності цифрового оброблення даного графіку замінимо час, представлений в хвилинах, на час в секундах. Отже, початковий час дорівнюватиме $10:00.007$ хв = $600,007$ с, відповідно, кінцевий час буде представлений як $13:42.757$ хв = $804,757$ с. Для дослідження вибрали ділянку, на якій процес є стаціонарним, а саме інтервал від $10:00.007$ хв ($600,007$ с) до $12:45.757$ хв ($765,757$ с).

Наступним кроком є оцифрування графіку з метою отримання таблиці значень технологічного параметру $K_{\text{ромпrag}}$, який позначимо як $x(t)$. Для проведення оцифрування графіку використаємо комп'ютерну програму Graph2Digit.

Для того, щоб отримати необхідну і достатню кількість значень x , потрібно правильно визначити період дискретизації Δt для даного графіку. В даному випадку скористались теоремою Котельникова [72] і визначили по графіку мінімальний період коливань, який дорівнює $0,702$ с. Це свідчить, що аналоговий сигнал $x(t)$ може бути однозначно і без втрат відновлений по своїм дискретним відлікам, взятим з кроком дискретизації $\Delta t \leq 0,702$. В програмі Graph2Digit проводимо оцифрування графіку з періодом дискретизації $0,3$ с. В результаті отримали таблицю значень x та t . Кількість значень становить 553. Отриману таблицю 3.1 експортуємо в MathCad для подальшого визначення числових характеристик випадкових значень.

Таблиця 3.1

Значення величин x і t

	0		0
	0	37.715	600
	1	37.692	600.3
x=	2	37.769	600.6
	3	37.618	600.9
	4	37.28	601.2
	5	37.406	601.5

З метою перевірки отриманих результатів в пакеті MathCad відтворимо неперервний графік залежності $x(t)$. Отриманий графік зображено на рис. 3.4. Як бачимо з рисунку, він практично не відрізняється від заданого рис.3.3. Це свідчить про те, що визначення періоду дискретизації, процес оцифрування та отримання таблиці даних проведено правильно.

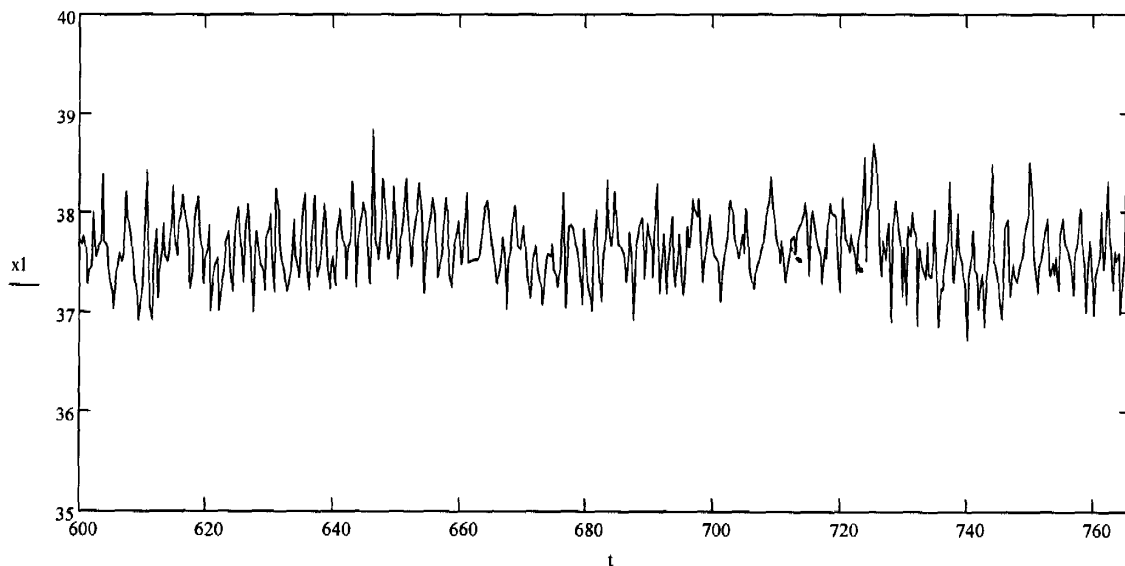


Рис. 3.4. Відтворений графік функції $x(t)$

Властивості випадкового сигналу $x(t)$ опишемо за допомогою понять теорії ймовірності та математичної статистики.

Оскільки математичне сподівання випадкової функції $x(t)$ – це середньоарифметичне значення нескінченної кількості реалізацій, тобто така не випадкова функція $M(x)$, навколо якої групуються всі реалізації даного випадкового процесу і яка повністю визначається одномірним законом розподілу, то оцінку математичного сподівання визначимо за формулою:

$$m = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^n x_i, \quad (3.17)$$

або за допомогою вбудованої функції MathCad:

$$m := \text{mean}(x). \quad (3.18)$$

Отже:

$$m = 37,6$$

Далі визначимо оцінку дисперсії, яка характеризує інтенсивність відхилень відносно середнього значення і також визначається одномірним законом розподілу. Для обчислення оцінки дисперсії скористаємось вбудованою функцією MathCad:

$$\begin{aligned} D &:= \text{var}(x) \\ D &= 1.0471 \times 10^3 \end{aligned} \quad (3.18)$$

Тоді середньоквадратичне відхилення, яке визначається як квадратний корінь із значення дисперсії, дорівнює:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sqrt{D} \\ \sigma &= 37,6 \end{aligned} \quad (3.19)$$

Отже, отримали такі характеристики досліджуваного випадкового процесу $K_{\text{ромпак}}(t)=x(t)$, як оцінки математичного сподівання, дисперсії та середньоквадратичне відхилення, які визначаються одномірним законом розподілу.

Визначимо тепер закон розподілу функції $x(t)$. Для цього поділимо вибірку значень x на інтервали та визначимо їх абсолютні та відносні частоти.

Спочатку впорядкуємо досліджувану вибірку у порядку зростання. Для цього застосуємо наступну функцію пакету MathCad:

$$Z := \text{sort}(x) \quad (3.20)$$

Тоді отримуємо таку таблицю значень:

	0
0	36.717
1	36.844
2	36.844
3	36.867
4	36.895

Z=

Знаходимо зону розсіювання значень (розмах) за формулою:

$$R := \max(x) - \min(x) \quad (3.21)$$

$$R = 2.116$$

Розділюємо її на 10 груп із інтервалами $h=0.2116$, визначеними за формулою Стерджеса. Далі визначимо границі інтервалів та збережемо їх як масив int , а також середини інтервалів (масив xi).

$$i := 0..9$$

$$int_0 := Z_0 \quad (3.22)$$

$$int_{i+1} := int_i + h \quad (3.23)$$

де Z_0 – найменше значення величини x ;

int_0 – нижня границя першого інтервалу;

int_{i+1} – верхня границя i -го інтервалу.

Середини інтервалів розрахуємо так:

$$xi_i := \frac{int_i + int_{i+1}}{2} \quad (3.23)$$

Для обчислення абсолютних частот інтервалів (масив mi) використаємо вбудовану функцію MathCad:

$$mi := \text{hist}(int, Z) \quad (3.24)$$

Відносні частоти обчислимо за формулою:

$$\omega_i := \frac{mi}{n} \quad (3.25)$$

Виконаємо перевірку обчислення абсолютних та відносних частот:

$$\sum_{i=0}^9 mi = 553$$

$$\sum_{i=0}^9 \omega_i = 1$$

Значення всіх розрахунків заносимо в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Значення абсолютних та відносних частот

Номер інтервалу	Границя інтервалу		Середина інтервалу, x_i	Абсолютна частота, m_i	Відносна частота, ω_i
	нижня	верхня			
1	36.717	36.9286	36.8228	8	0.0145
2	36.9286	37.1402	37.0344	22	0.0398
3	37.1402	37.3518	37.246	66	0.1193
4	37.3518	37.5634	37.4576	136	0.2459
5	37.5634	37.775	37.6692	140	0.2532
6	37.775	37.9866	37.8808	102	0.1844
7	37.9866	38.1982	38.0924	54	0.0976
8	38.1982	38.4098	38.304	17	0.0307
9	38.4098	38.6214	38.5156	6	0.0108
10	38.6214	38.833	38.7272	2	0.0036

Користуючись отриманими даними, побудуємо гістограму густини абсолютних частот, яка приведена на рис. 3.5.

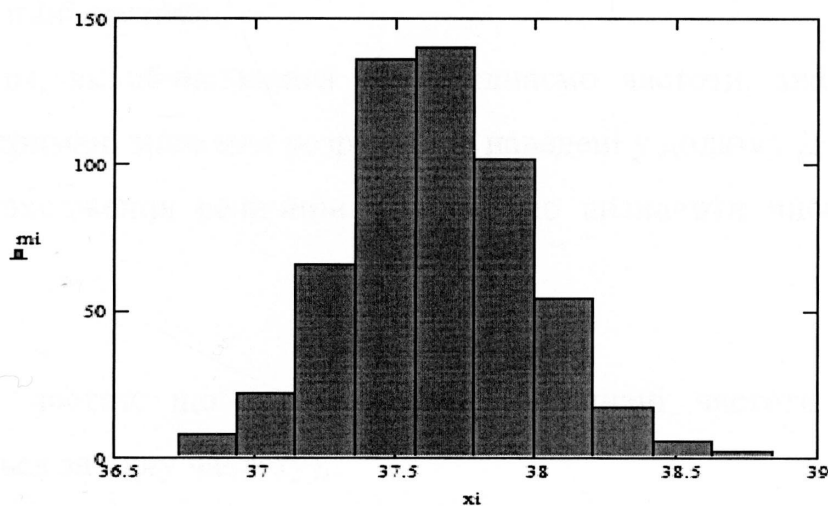


Рис. 3.5. Гістограма густини абсолютних частот

Аналіз отриманої гістограми дозволяє припустити, що даний розподіл підпорядковується нормальному закону. Для перевірки даної гіпотези скористаємось критерієм Пірсона χ^2 . Для цього спочатку потрібно знайти теоретичні значення частот випадкового процесу $x(t)$, котрі обчислюються як добуток ймовірностей середин всіх інтервалів на число експериментів (у нашому випадку число випадкових значень вибірки).

Обчислимо значення функції щільності:

$$f(x) := \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{(x-m)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (3.26)$$

Знаходимо ймовірність кожного інтервалу (при розрахунках вважаємо, що всі значення інтервалу зосереджені в його середині):

$$P := \frac{h}{\sigma} \cdot f(x) \quad (3.27)$$

Перемножуючи ймовірності P на n , отримуємо теоретичні значення частот. Тоді критерій Пірсона χ^2 знаходиться за формулою:

$$\chi^2 := \frac{(|m_i - mt_i|)^2}{mt_i} \quad (3.28)$$

де m_i – абсолютні частоти випадкових значень;

mt_i – теоретичні частоти.

Перед тим, як обчислювати χ^2 , об'єднаємо частоти, значення яких менше 5. Всі отримані значення розрахунків наведені у додатку Д

Після знаходження величини χ^2 потрібно визначити число степенів вільності:

$$k := n - r - 1 \quad (3.29)$$

де n - число частот, що порівнюються (об'єднані частоти на кінцях приймаються за одну частоту);

r – число параметрів теоретичної функції розподілу.

У нашому випадку $n=9$, $r=2$, оскільки нормальний закон розподілу двопараметричний, тому $k=9-2-1=6$. Далі, користуючись таблицею ймовірностей для критерію Пірсона χ^2 , знаходимо, що для $k=6$ і $\chi^2=3,654$ найближчим буде значення $P(\chi^2)=0,72$ [74,7]. Отже, даний статистичний розподіл близький до нормального розподілу.

Оскільки для випадкової функції $x(t)$ одномірний розподіл ймовірностей і отримані на основі нього характеристики, такі як оцінка математичного сподівання та дисперсія, ще не є достатніми для оцінки характеру протікання випадкового процесу в часі, необхідно ще встановити зв'язок між значеннями випадкового процесу в різні моменти часу. Це можна зробити за допомогою автокореляційної функції або функції спектральної густини.

Автокореляційною функцією є математичне сподівання похідних значень центрованої випадкової функції $x(t)$, взятих при двох моментах часу t та $t-\tau$ і визначається за формулою:

$$R_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)x(t-\tau)dt, \quad (3.30)$$

де τ – кореляційний зсув (лаг) [73].

Оскільки досліджувана реалізація $K_{\text{ромраг}}(t)$ являє собою сукупність дискретних значень сигналу $K_{\text{ромраг}}(1)$, $K_{\text{ромраг}}(2), \dots$, $K_{\text{ромраг}}(i), \dots$, $K_{\text{ромраг}}(k)$, отриманих через рівні проміжки Δt , то інтеграл (3.30) наближено замінимо сумою:

$$R_{xx}(\tau) = R(k\Delta t) \approx \frac{1}{n-k} \sum_{i=0}^{n-k} x^0(i\Delta t)x^0(i\Delta t + k\Delta t), \quad (3.31)$$

де $x^0(t) = x(t) - m$ – центровані значення;

k – дискретний поточний час.

$$x^0 := x - m \quad (3.32)$$

	0
0	0.0746
1	0.0516
2	0.1286
3	-0.0224
4	-0.3604

Для розрахунку автокореляційної функції $R_{xx}(\tau)$ робимо всі центровані значення x додатніми, тобто «піднімаємо» їх над віссю абсцис:

$$x0 := x0 - \min(x0) \quad (3.34)$$

Задаємо час зсуву $\tau=0,6$ с. і визначаємо автокореляційну функцію в MathCad з такою послідовністю:

$$\tau := 0.6$$

$$\Delta t := t_2 - t_1$$

$$\Delta t = 0.3$$

$$\Delta k := \text{floor}\left(\frac{\tau}{\Delta t}\right)$$

$$\Delta k = 2$$

$$i := 0..n$$

$$k := 1.. \left(\frac{n}{\Delta k}\right) - 1$$

$$R_{xx}(k) := \frac{1}{n-k} \left[\sum_{i=0}^{n-1-\Delta k \cdot k} (x0_i \cdot x0_{i+\Delta k \cdot k}) \right]$$

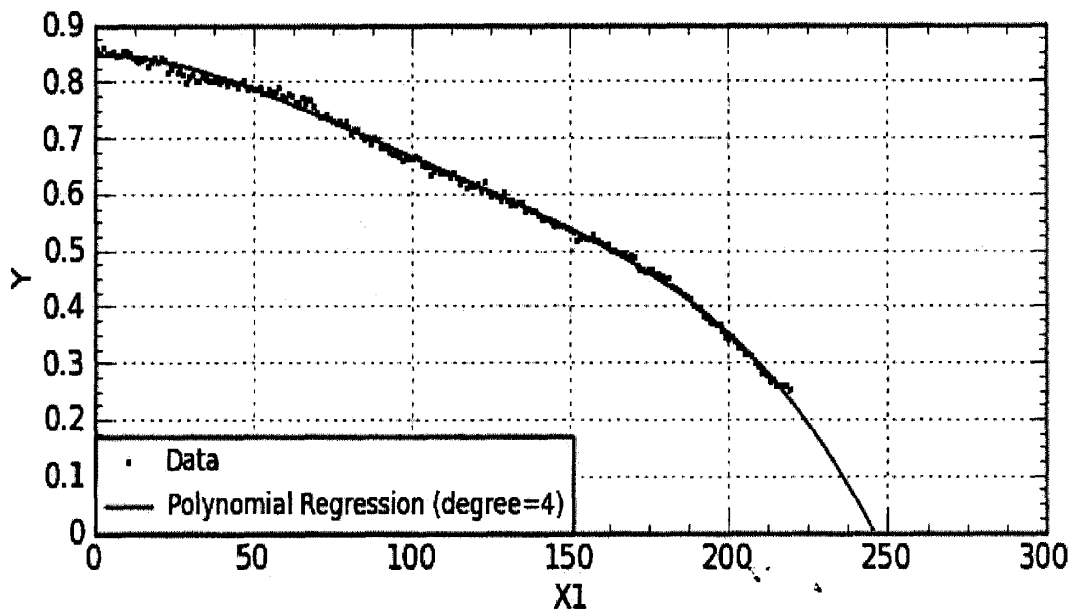


Рис. 3.6. Графік функції, описаної рівнянням 4 степені регресії

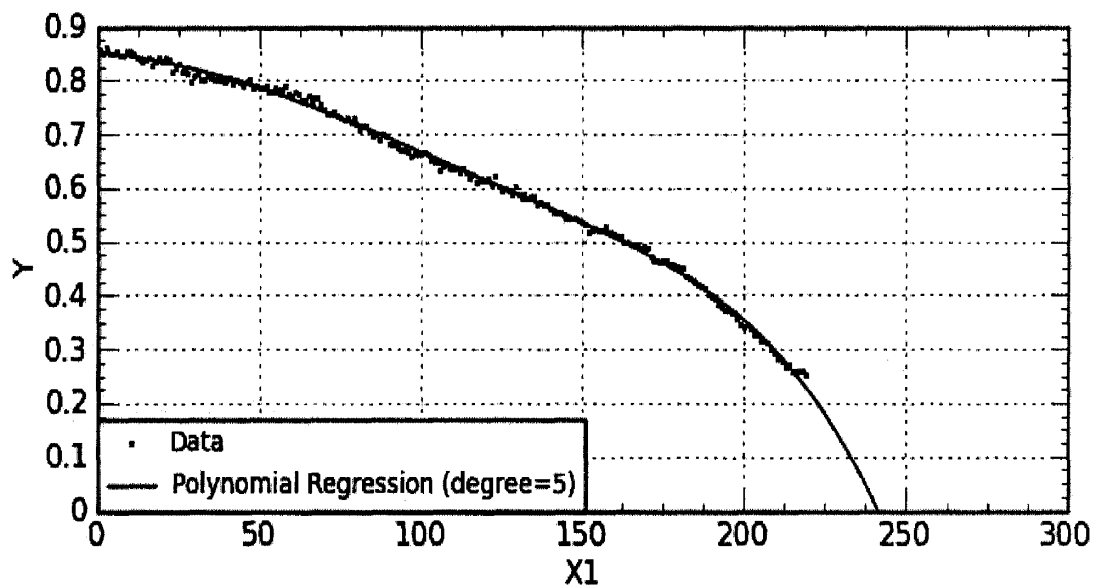


Рис.3.7. Графік функції, описаної рівнянням 5 степені регресії

Проаналізувавши всі рівняння і графіки, вибираємо рівняння регресії другого порядку:

$$R_{xx}(k) = 8,5539 \cdot 10^{-1} - 1,0662 \cdot 10^{-3}k - 7,3125 \cdot 10^{-6} \cdot k^2. \quad (3.34)$$

При статистичному аналізі стаціонарних випадкових функцій зручно користуватись спектральною густиною випадкової функції, тобто двохстороннім зображенням автокореляційної функції за Фур'є [72]:

$$f(\lambda) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\lambda\tau} R(\tau) d\tau, \quad (3.35)$$

де $R(\tau)$ – оригінал автокореляційної функції.

Відомо, що спектральна густина є додатною функцією у всьому діапазоні частот від 0 до ∞ і не містить відомостей про фази окремих гармонійних складових. За допомогою формули (3.35) визначимо спектральну густина по заданій аналітично автокореляційній функції $R_{xx}(\tau)$, використовуючи пакет MathCad. Оскільки попередньо визначили автокореляційну функцію $R_{xx}(\tau)$, то наступним кроком збережемо отримані значення функції в масив даних:

$$r_{k-1} := R_{xx}(k)$$

Далі використаємо перетворення Фур'є, взявши за основу вбудовану функцію $cfft(x)$:

$$z := cfft(r)$$

Отримане перетворення потрібно взяти за модулем, так як спектральна густина є додатною у всьому діапазоні частот. Отже:

$$S_i := |z_i|$$

$$i := 0.. \text{length}(z) - 1$$

$$\omega_i := i$$

На основі отриманих даних побудували залежність S від ω і отримали графік спектральної густини $S(\omega)$ (рис. 3.8).

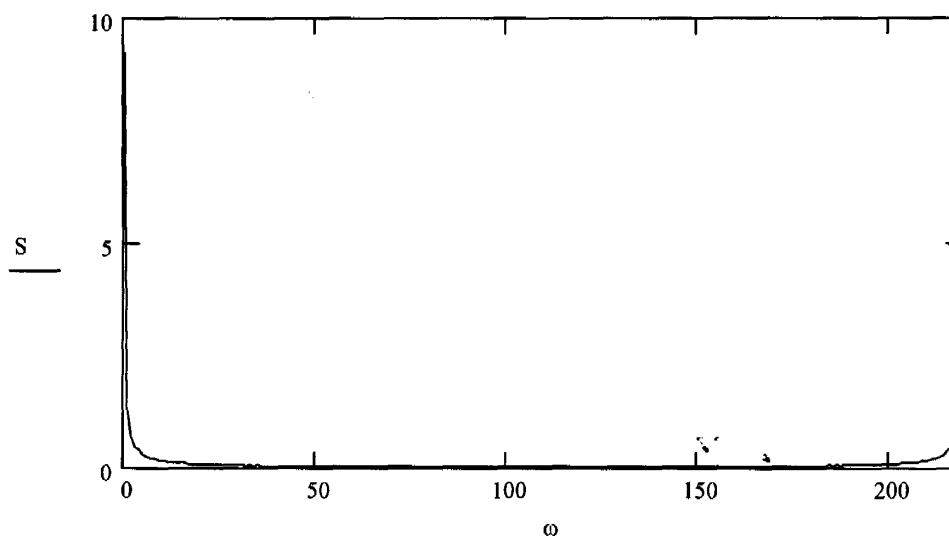


Рис.3.8. Графік спектральної густини досліджуваного процесу

Для одержання рівняння спектральної густини, як і у випадку із автокореляційною функцією, скористаємось програмою CurveExpert. В результаті знову отримуємо набір рівнянь із різними степенями регресії (Додаток Е) і відповідні графіки функцій, які описуються цими рівняннями (рис. 3.9-3.12).

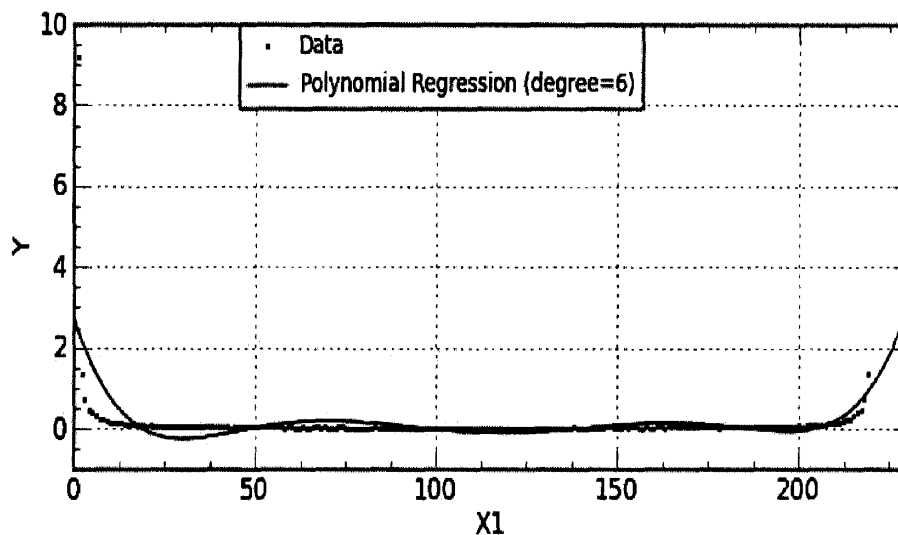


Рис.3.9. Графік функції, описаної рівнянням 6 степеня регресії

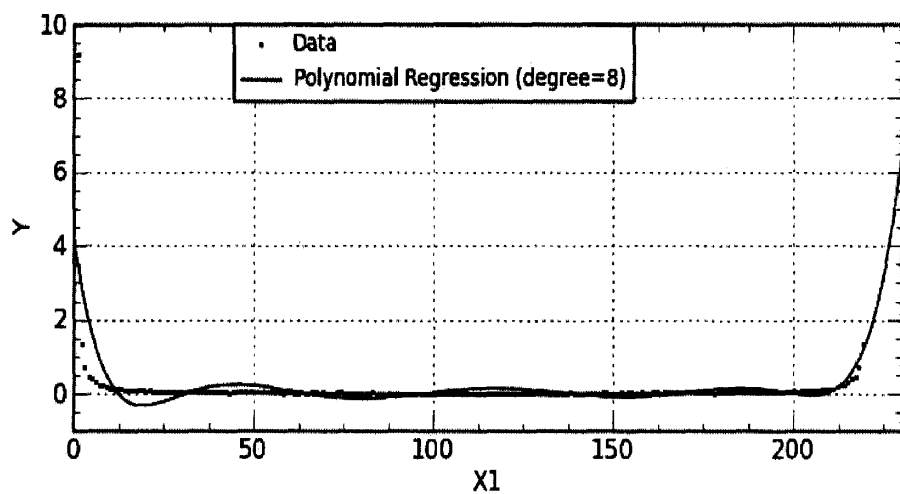


Рис.3.10. Графік функції, описаної рівнянням 8 степеня регресії

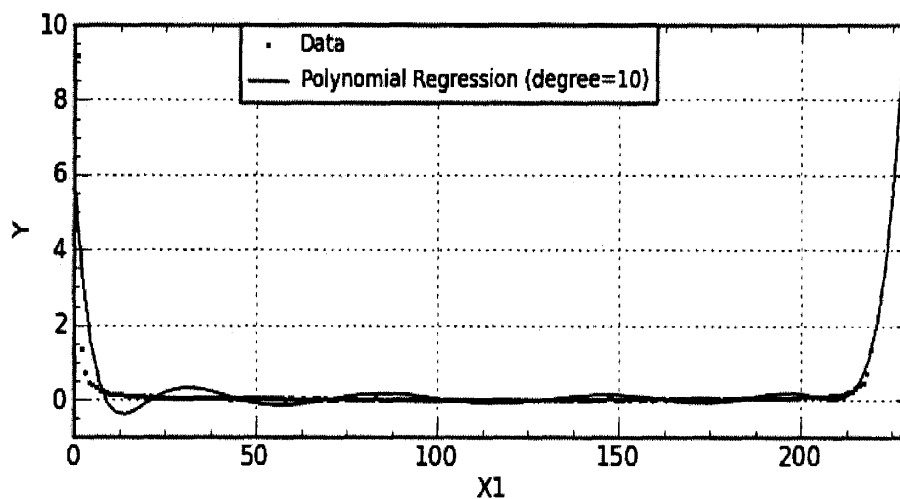


Рис.3.11. Графік функції, описаної рівнянням 10 степеня регресії



Рис.3.12. Графік функції, описаної рівнянням 12 степеня регресії

У результаті аналізу отриманих розрахунків вибираємо рівняння, ступінь регресії якого дорівнює 8:

$$S(\omega) = 4,1927 - 6,5827 \cdot \omega + 3,8589 \cdot 10^{-2} \cdot \omega^2 - 1,0403 \cdot 10^{-3} \cdot \omega^3 + \\ + 1,536 \cdot 10^{-5} \cdot \omega^4 - 1,3106 \cdot 10^{-7} \cdot \omega^5 + 6,4424 \cdot 10^{-10} \cdot \omega^6 - \\ - 1,6933 \cdot 10^{-12} \cdot \omega^7 + 1,8422 \cdot 10^{-15} \cdot \omega^8. \quad (3.36)$$

Отже, визначили, що процес підпорядковується нормальному закону розподілу (перевірку здійснили за критерієм Пірсона χ^2). На основі аналізу визначених автокореляційної функції та спектральної густини досліджуваного процесу встановили, що процес є стаціонарним та ергодичним. Отримані результати проведеного дослідження дозволяють оцінювати точність інтерполяції вимірюваної величини, вибирати крок дискретизації, синтезувати алгоритми контролю зміни коефіцієнту помпажу в часі та діагностувати стан процесу перекачування газу газоперекачувальним агрегатом з газотурбінним приводом.

3.3. Аналіз динамічних властивостей відцентрового нагнітача ГПА з газотурбінним приводом як об'єкта керування

3.3.1. Теоретичне обґрунтування методу визначення динамічних властивостей ВН ГПА з газотурбінним приводом

Основними задачами експлуатації ГПА з газотурбінним приводом є забезпечення надійної, безаварійної роботи відцентрових нагнітачів (ВН) із максимально високою економічністю і підтримання компримування точно за заданим графіком. Для успішного виконання даних завдань необхідно, при експлуатації нагнітачів, постійно підтримувати їхні динамічні властивості в

заданих межах, зазначених, наприклад, в паспортній документації устаткування. Витрата природного газу через ВН служить головним і досить важливим показником надійності і економічності роботи ГПА в цілому і визначається на компресорній станції по перепаду тиску на конфузори всмоктуючого патрубку ВН. Ступінь підвищення тиску газу ВН також є дуже важливим показником його роботи. Чим він вищий, тим витрати на перекачування газу менші. Однак для ВН він має свої межі, зазначені в наведених характеристиках, перевищувати які не можна. Під час роботи ВН при малих об'ємних витратах (нище $130 \text{ м}^3/\text{хв}$) і великих ступенях стиснення (вище 1,5) може виникнути явище помпажу.

Неконтрольована зміна хоча б одного показника роботи нагнітача, із вище зазначених, призводить до порушення газодинамічної характеристики ВН, а, отже, і самого перебігу технологічного процесу компримування газу, небажаним результатом чого може стати поломка устаткування. Для запобігання появи таких випадків необхідно постійно проводити детальне дослідження і аналіз газодинамічних властивостей ГПА.

Одним із основних методів здійснення такого дослідження є аналітичний. Він полягає у описі динамічних властивостей об'єкта за допомогою алгебраїчних і диференціальних рівнянь, побудованих на основі певних фізичних, хімічних, гідравлічних та інших законів. Сукупність таких рівнянь складає математичну модель досліджуваного об'єкта [72].

Диференціальне рівняння є найзагальнішою формою опису динамічних властивостей об'єкта. Проте, воно не дає уяви про передавальні особливості об'єкта. А для цього його потрібно розв'язати. Як відомо, одне і те ж диференціальне рівняння може мати декілька розв'язків, конкретний вигляд яких залежить від початкової умови, початкового стану об'єкта і виду внутрішньої дії. Тому досить поширеним методом опису властивостей об'єкта керування є операційний. Він полягає у встановленні відповідності

між функціями дійсної змінної і функціями комплексної змінної, що здійснюється за допомогою перетворення Лапласа. При цьому можна отримати так звану функцію передачі, тобто відношення вихідної величини, до вхідної, зображених за Лапласом, при нульових початкових умовах. За її допомогою можна судити про зв'язок між вхідною і вихідною величинами в динамічному режимі.

Оскільки, зміна параметрів ВН ГПА носить випадковий характер, то для побудови моделі можна застосувати методи математичної статистики. Адже випадкові процеси, як відомо [76], зручно описувати за допомогою статистичних характеристик, таких як: математичне сподівання, дисперсія, автокореляційна функції та спектральна густина.

Тепер розглянемо зв'язок між статистичними характеристиками двох стаціонарних сигналів – витратою $Q(t)$ і ступенем підвищення тиску газу $E(t)$, які є відповідно вхідним і вихідним сигналами лінійної динамічної ланки з шуканою функцією передачі $W(p)$. Для зручності введемо позначення $Q(t) = x(t)$, $E(t) = y(t)$.

Вихідний сигнал $y(t)$ зв'язаний з вхідним сигналом $x(t)$ інтегралом згортки [72]:

$$y(t) = \int_0^{\infty} x(t - \tau_1) W(\tau_1) d\tau_1, \tau_1 > 0, \quad (3.37)$$

де $W(\tau_1)$ – імпульсна перехідна функція ланки;

τ_1 – змінна інтегрування.

Знайдемо взаємну кореляційну функцію сигналів $x(t)$ і $y(t)$. Для цього підставимо вираз (3.37) у загальну формулу для визначення взаємної кореляційної функції, вважаючи при цьому, що $x_1(t) = x(t)$ і $x_2(t) = y(t)$.

Тоді отримаємо:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) \left[\int_0^{\infty} x(t + \tau - \tau_1) W(\tau_1) d\tau_1 \right] dt. \quad (3.38)$$

При зміні порядку інтегрування в правій частині виразу (3.44) утвориться автокореляційна функція вхідного сигналу з аргументом, рівним різниці $\tau - \tau_1$ і формула (3.38) набуде вигляду:

$$R_{xy}(\tau) = \int_0^{\infty} R_x(\tau - \tau_1) \mathcal{W}(\tau_1) d\tau_1. \quad (3.39)$$

Інтеграл (3.39) має такий самий вигляд, як інтеграл згортки (3.37), і тому функцію $R_{xy}(\tau)$ можна розглядати як реакцію ланки на вплив, який має форму кореляційної функції $R_x(\tau)$.

З виразу (3.39) випливає також, що в частковому випадку, коли вхідний сигнал $x(t)$ є білим шумом, його кореляційна функція рівна імпульсній перехідній функції ланки. Дійсно, підставивши в (3.39) $R_x(\tau) = \delta(\tau)$ і враховуючи "вихоплюючу" властивість дельта-функції, отримаємо:

$$R_{xy}(\tau) = \int_0^{\infty} \delta(\tau - \tau_1) \mathcal{W}(\tau_1) d\tau_1 = w(\tau). \quad (3.40)$$

Якщо інтеграл згортки (3.37) підставити у вираз для автокореляційної функції вихідного сигналу $y(t)$ і аналогічно змінити порядок інтегрування, тоді отримаємо:

$$R_y(\tau) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} w(\tau_1) w(\tau - \tau_1) d\tau. \quad (3.41)$$

При підстановці у вираз (3.41) одержуємо наступну формулу для обчислення дисперсії вихідного сигналу:

$$D_y = \int_0^{\infty} [w(\tau_1)]^2 d\tau_1 = \int_0^{\infty} [w(t)]^2 dt. \quad (3.42)$$

Таким чином, для визначення дисперсії вихідного сигналу при дії на вході ланки білого шуму необхідно проінтегрувати за часом квадрат імпульсної перехідної функції ланки.

Знайдемо тепер зв'язок між спектральними густинами сигналів $x(t)$ і $y(t)$.

Застосуємо спочатку формулу взаємної спектральної густини, вважаючи $x_1(t)=x(t)$. Підставивши в неї вираз (3.39) для функції $R_{xy}(\tau)$ і виконуючи деякі очевидні перетворення, отримаємо:

$$S_{xy}(j\omega) = \int_0^{\infty} W(\tau_1) e^{-j\omega\tau_1} d\tau_1 \int_0^{\infty} (\tau - \tau_1) e^{-j\omega(\tau - \tau_1)} d\tau. \quad (3.43)$$

Перший інтеграл є частотно-передавальною функцією $W(j\omega)$, а другий – спектральною густиною $S_x(\omega)$ вхідного сигналу. Тому замість виразу (3.43) можна записати наступні співвідношення між спектральними густинами:

$$S_{xy}(j\omega) = \int_0^{\infty} W(j\omega) S_x(\omega) d\tau. \quad (3.44)$$

Вираз (3.44) використовуються для ідентифікації – визначення характеристик керованих об'єктів за експериментальними реалізаціями вхідного і вихідного сигналів. Для цього спочатку обчислюють кореляційні функції $R_x(\tau)$ і $R_{xy}(\omega)$, а потім переходять до спектральних густин $S_x(\omega)$ і $S_{xy}(\omega)$.

Застосовуючи формулу для спектральної густини $S_y(\omega)$ вихідного сигналу, отримаємо:

$$S_{xy}(j\omega) = \int_0^{\infty} W(\tau_1) e^{-j\omega\tau_1} d\tau_1 \int_0^{\infty} W(\tau_2) e^{-j\omega\tau_2} d\tau_2 \times \\ \times \int_0^{\infty} R_x(\tau + \tau_1 - \tau_2) e^{-j\omega(\tau + \tau_1 - \tau_2)} d\tau. \quad (3.45)$$

Замінюючи перший і другий інтеграли функціями $W(j\omega)$ і $W(-j\omega)$, а третій – функцією $S_x(\omega)$, приходимо до одного з найважливіших в статистичній динаміці співвідношень між спектральними густинами вхідного і вихідного сигналів:

$$S_y(j\omega) = W(j\omega)W(-j\omega)S_x(\omega), \quad (3.46)$$

або

$$S_y(\omega) = |W(j\omega)|^2 S_x(\omega). \quad (3.47)$$

Співвідношення (3.47) показує, що спектральна густина вихідного сигналу рівна спектральній густині вхідного сигналу, помноженій на квадрат амплітудно-частотної характеристики ланки (системи).

Фазова характеристика ланки не впливає на спектральну густина вихідного сигналу.

Відзначимо, що до формули (3.47) можна прийти з фізичних уявлень. Амплітудно-частотна функція $W(j\omega)$ при кожному значенні аргументу ω визначає відношення амплітуд гармонік вхідного і вихідного сигналів, а спектральні густини $S_x(\omega)$ і $S_y(\omega)$ при фіксованому значенні ω дорівнюють квадратам амплітуд гармонік.

Отже, для застосування вище вказаних формул, при моделюванні помпажних характеристик ВН, необхідно провести аналіз динамічних властивостей нагнітача на основі методів математичної статистики.

3.3.2. Аналіз статистичних характеристик продуктивності відцентрового нагнітача

Вихідними даними для проведення аналізу статистичних характеристик продуктивності $Q(t)$ відцентрового нагнітача є експериментальні дані, отримані на ГПА № 9 ДКС «Більче-Волиця».

Користуючись підходом, викладеним у підрозділі 3.2., параметр $Q(t)$ позначили як $x(t)$, оцифрували графік і отримали таблицю значень x і t . Отриману таблицю експортуємо в програмний продукт MathCad для подальшого визначення числових характеристик випадкових значень (табл.3.3).

Таблиця 3.3

Значення величин x і t

	0		0
0	0.169	t =	600
1	0.1696	1	600.3
2	0.168	2	600.6
3	0.1685	3	600.9
4	0.1699	4	601.2
5	0.1687	5	601.5
6	0.1698	6	601.8
7	0.1679	7	602.1
8	0.1691	8	602.4
9	0.1707	9	602.7

З метою перевірки отриманих результатів в пакеті MathCad відтворимо неперервний графік залежності $x(t)$. Отриманий графік зображено на рис. 3.13.

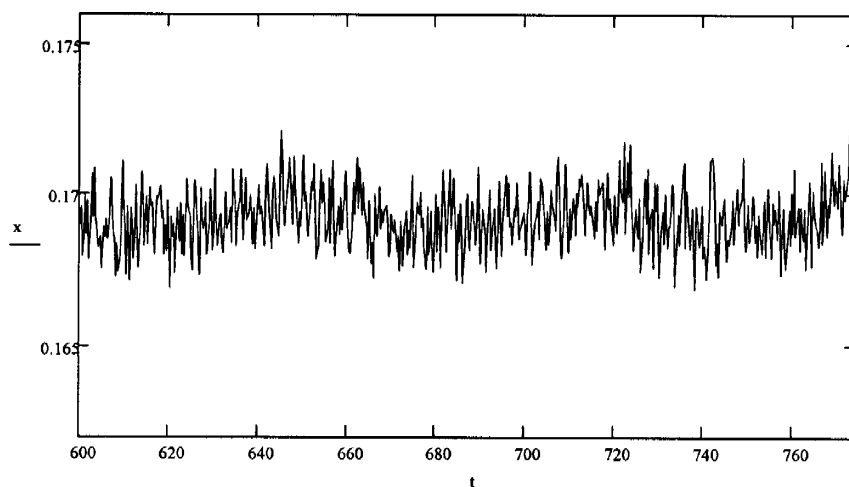


Рис. 3.13. Відтворений графік зміни продуктивності $Q(t) = x(t)$ відцентрового нагнітача

У зв'язку з дуже низькою величиною розмаху вибірки: $R = x_{\max} - x_{\min}$, змінюємо масштаб осі ОХ на 1000, тобто домножуємо всі значення на 1000. Одержуємо:

Таблиця 3.4

Значення величини x

	0
0	169.024
1	169.608
2	167.973
3	168.528
$x =$ 4	169.9
5	168.674
6	169.798
7	167.871
8	169.126
9	170.674

Визначили оцінку математичного сподівання $m = 169.257$:

$$m := \text{mean}(x) \quad (3.49)$$

та оцінку дисперсії $D := \text{var}(x)$:

$$D = 0.928 \quad (3.50)$$

Тоді середньоквадратичне відхилення дорівнює:

$$\sigma = \sqrt{D}, \sigma = 0,963 \quad (3.51)$$

Для оцінки характеру протікання випадкового процесу $x(t)$ визначимо його закон розподілу. З цією метою поділимо вибірку значень x на інтервали та визначимо їх абсолютні та відносні частоти.

Спочатку впорядкуємо досліджувану вибірку у порядку зростання. Для цього застосуємо наступну функцію пакету MathCad:

$$Z := \text{sort}(x) \quad (3.52)$$

Тоді отримуємо наступні значення:

Таблиця 3.5

Таблиця значень Z

	0
0	166.895
1	166.946
2	166.996
3	167.068
4	167.156
5	167.185
6	167.216
7	167.254
8	167.27
9	167.302

Знаходимо розмах за формулою:

$$R := \max(x) - \min(x) \quad (3.53)$$

$$R = 5.441$$

Розділюємо її на 10 груп із інтервалами $h=0,5441$ та визначаємо границі інтервалів. Збережемо їх як масив int , а також середини інтервалів (масив xi).

$$i := 0 .. 9 \quad (3.54)$$

$$int_0 := Z_0 \quad (3.55)$$

$$int_{i+1} := int_i + h \quad (3.56)$$

де Z_0 – найменше значення величини x ;

int_0 – нижня границя першого інтервалу;

int_{i+1} – верхня границя i -го інтервалу.

Середини інтервалів розрахуємо так:

$$xi_i := \frac{int_i + int_{i+1}}{2} \quad (3.57)$$

Для обчислення абсолютних частот інтервалів (масив mi) використаємо вбудовану функцію MathCad:

$$mi := \text{hist}(int, Z) \quad (3.58)$$

Відносні частоти обчислимо за формулою:

$$\omega_i := \frac{m_i}{n} \quad (3.59)$$

Результати усіх розрахунків заносимо в таблицю (Додаток Ж).

Виконаємо перевірку обчислення абсолютних та відносних частот:

$$\sum_{i=0}^9 m_i = 581$$

$$\sum_{i=0}^9 \omega_i = 1$$

Користуючись отриманими даними, побудуємо гістограму густини абсолютних частот, яка приведена на рис. 3.14.

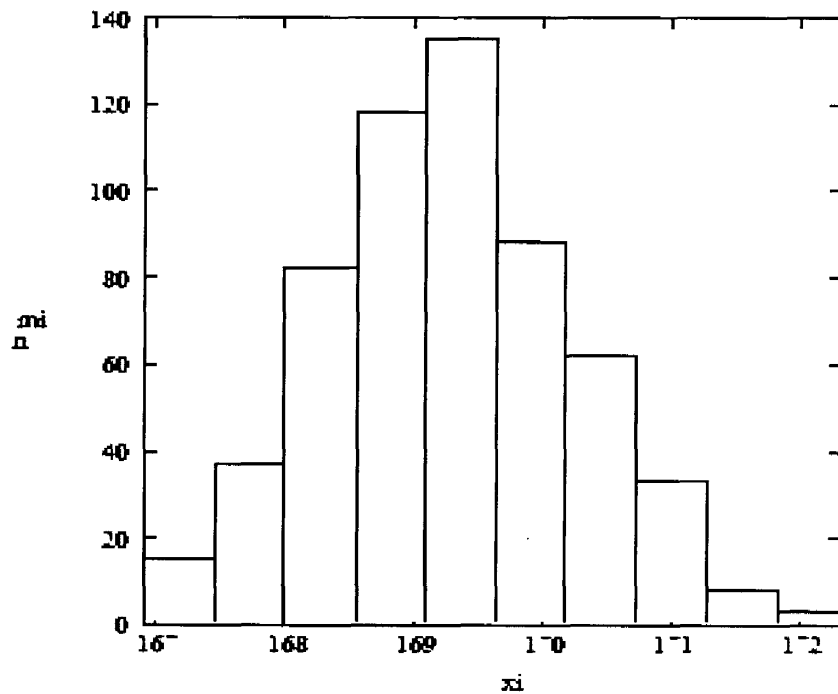


Рис. 3.14. Гістограма густини абсолютних частот сигналу $Q(t) = x(t)$

Для перевірки даної гіпотези про те, що даний розподіл підпорядковується нормальному закону, скористаємось критерієм Пірсона χ^2 .

Обчислимо значення функції щільності за формулою (3.26) та ймовірність кожного інтервалу за формулою (3.27).

Перемножуючи ймовірності P на n , отримуємо теоретичні значення частот й критерій Пірсона χ^2 за формулою (3.28).

Перед тим, як обчислювати критерій χ^2 , об'єднаємо частоти, значення яких менше 5. Всі отримані значення розрахунків заносимо у додатку 3. Графік узгодження кривих абсолютних та теоретичних частот зображений на рис. 3.15.

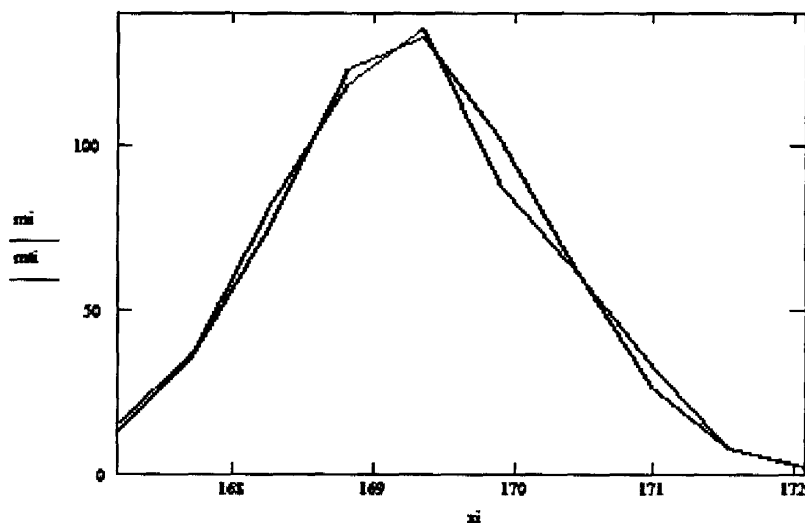


Рис. 3.15. Узгодження кривих абсолютних та теоретичних частот

Після знаходження величини χ^2 визначимо число степенів вільності за формулою (3.29).

В нашому випадку $n = 9$, $r = 3$. Оскільки нормальний закон розподілу двопараметричний, тому $k=9-2-1=6$. Далі, користуючись таблицею ймовірностей для критерію Пірсона, знаходимо, що для $k = 6$ і $\chi^2 = 4,621$ найближчим буде значення $P(\chi^2)=0,6$ [76]. Отже, досліджуваний статистичний розподіл близький до нормального розподілу.

Для оцінки характеру протікання випадкового процесу в часі, встановимо зв'язок між значеннями випадкового процесу в різні моменти часу за допомогою двохмірної функції розподілу – автокореляційної функції і функції спектральної густини, користуючись формулами (3.30) і (3.31).

Таблиця 3.6

Таблиця центрових значень x_0 : x -m

	0
0	-0.2333
1	0.3507
2	-1.2843
3	-0.7293
4	0.6427
5	-0.5833

Для розрахунку автокореляційної функції $R_{xx}(\tau)$ робимо всі центровані значення x додатними, тобто «піднімаємо» їх над віссю абсцис $x_0 := x - \min(x)$ задаємо час зсуву $\tau = 0,6$ с та визначаємо автокореляційну функцію в MathCad з такою послідовністю:

$$\tau := 0.6$$

$$\Delta t := t_2 - t_1$$

$$\Delta t = 0.3$$

$$\Delta k := \left(\frac{\tau}{\Delta t} \right)$$

$$\Delta k = 2$$

$$i := 0..n$$

$$k := 1..n$$

$$k := 1.. \frac{n}{\Delta k}$$

$$R_{xx}(k) := \frac{1}{n-k} \cdot \sum_{i=0}^{n-1-\Delta k \cdot k} (x_{0_i} \cdot x_{0_{i+k}})$$

У результаті отримуємо наступний графік автокореляційної функції $R_{xx}(k)$ (рис. 3.16).

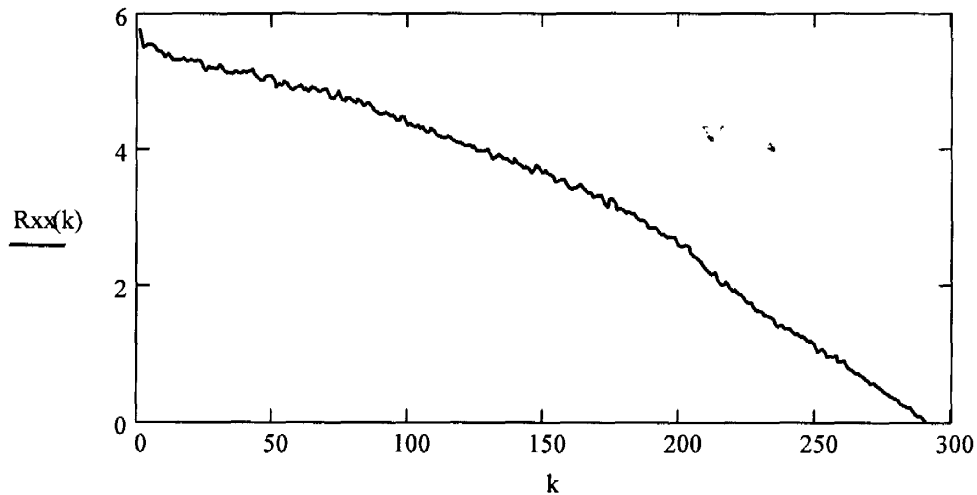


Рис. 3.16. Графік автокореляційної функції $R_{xx}(k)$

Графік отриманої автокореляційної функції підтверджує, що досліджуваний процес $Q(t) = x(t)$ є стаціонарним і ергодичним.

Для статистичного аналізу стаціонарного випадкового процесу $Q(t)=x(t)$ скористуємось спектральною густиною випадкової функції, тобто двохстороннім зображенням автокореляційної функції за Фур'є, яка обчислюється за формулою (3.35).

Оскільки спектральна густина є додатною функцією у всьому діапазоні частот від 0 до ∞ і не містить відомостей про фази окремих гармонійних складових, визначимо спектральну густина по заданій аналітично автокореляційній функції $R_{xx}(\tau)$, користуючись пакетом MathCad. Оскільки

попередньо визначили автокореляційну функцію $R_{xx}(\tau)$, то наступним кроком збережемо отримані значення функції в масив даних:

$$rr1_{k-1} := R_{xx}(k)$$

Далі використаємо перетворення Фур'є, взявши за основу вбудовану функцію $cfft(x)$:

$$z1 := cfft(rr1)$$

Отримане перетворення потрібно взяти по модулю, оскільки спектральна густина є додатною у всьому діапазоні частот. Отже:

$$Sx_i := |z1_i|$$

$$i := 0.. \text{length}(z1) - 1$$

$$\omega_i := i$$

На основі отриманих даних побудуємо залежність S від ω і отримаємо графік спектральної густини $S(\omega)$ (рис. 3.17).

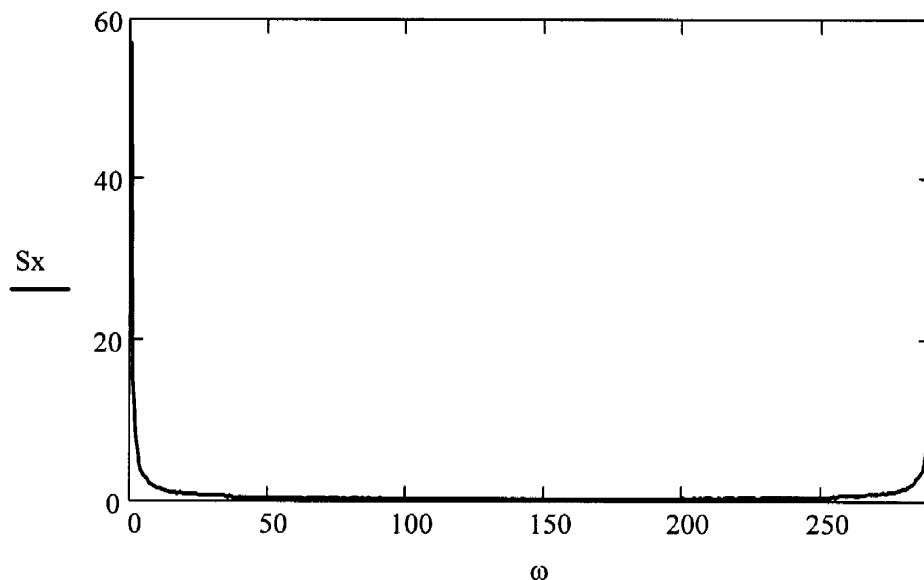


Рис. 3.17. Графік спектральної густини досліджуваного процесу $Q(t)=x(t)$

3.3.3 Аналіз статистичних оцінок ступеня підвищення тиску газу

Вихідними даними для проведення аналізу вихідного сигналу є графік зміни ступеня підвищення тиску газу $E(t)$, зображений на рис. 3.18.

Всі операції, що проводились в попередньому підрозділі із вхідним сигналом $Q(t)$, застосуємо і до вихідного сигналу $E(t)$. Отже, початковий час дорівнюватиме 10:00.007 хв = 600,007 с, відповідно, кінцевий час буде представлений як 13:24.847 хв = 804,847 с. Для дослідження вибираємо ділянку, на якій процес є стаціонарним, а саме інтервал від 10:00.007 хв (600,007 с) до 12:54.107 хв (774,107 с).

Оцифрування графіка $E(t)$ здійснюємо з періодом дискретизації 0,3 с. В результаті отримуємо таблицю значень y та t (табл. 3.7). Кількість значень становить 581.

Таблиця 3.7

Значення величин x і t

$y =$																							
	<table border="1" style="display: inline-table;"><thead><tr><th></th><th>0</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>1.4003</td></tr><tr><td>1</td><td>1.3994</td></tr><tr><td>2</td><td>1.4007</td></tr><tr><td>3</td><td>1.4001</td></tr><tr><td>4</td><td>1.3992</td></tr><tr><td>5</td><td>1.3998</td></tr><tr><td>6</td><td>1.4002</td></tr><tr><td>7</td><td>1.3994</td></tr><tr><td>8</td><td>1.3999</td></tr><tr><td>9</td><td>1.4</td></tr></tbody></table>		0	0	1.4003	1	1.3994	2	1.4007	3	1.4001	4	1.3992	5	1.3998	6	1.4002	7	1.3994	8	1.3999	9	1.4
	0																						
0	1.4003																						
1	1.3994																						
2	1.4007																						
3	1.4001																						
4	1.3992																						
5	1.3998																						
6	1.4002																						
7	1.3994																						
8	1.3999																						
9	1.4																						

$t =$																							
	<table border="1" style="display: inline-table;"><thead><tr><th></th><th>0</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>600</td></tr><tr><td>1</td><td>600.3</td></tr><tr><td>2</td><td>600.6</td></tr><tr><td>3</td><td>600.9</td></tr><tr><td>4</td><td>601.2</td></tr><tr><td>5</td><td>601.5</td></tr><tr><td>6</td><td>601.8</td></tr><tr><td>7</td><td>602.1</td></tr><tr><td>8</td><td>602.4</td></tr><tr><td>9</td><td>602.7</td></tr></tbody></table>		0	0	600	1	600.3	2	600.6	3	600.9	4	601.2	5	601.5	6	601.8	7	602.1	8	602.4	9	602.7
	0																						
0	600																						
1	600.3																						
2	600.6																						
3	600.9																						
4	601.2																						
5	601.5																						
6	601.8																						
7	602.1																						
8	602.4																						
9	602.7																						

Користуючись отриманими даними, відтворюємо неперервний графік залежності $E(t) = y(t)$ в пакеті MathCad (рис. 3.18).

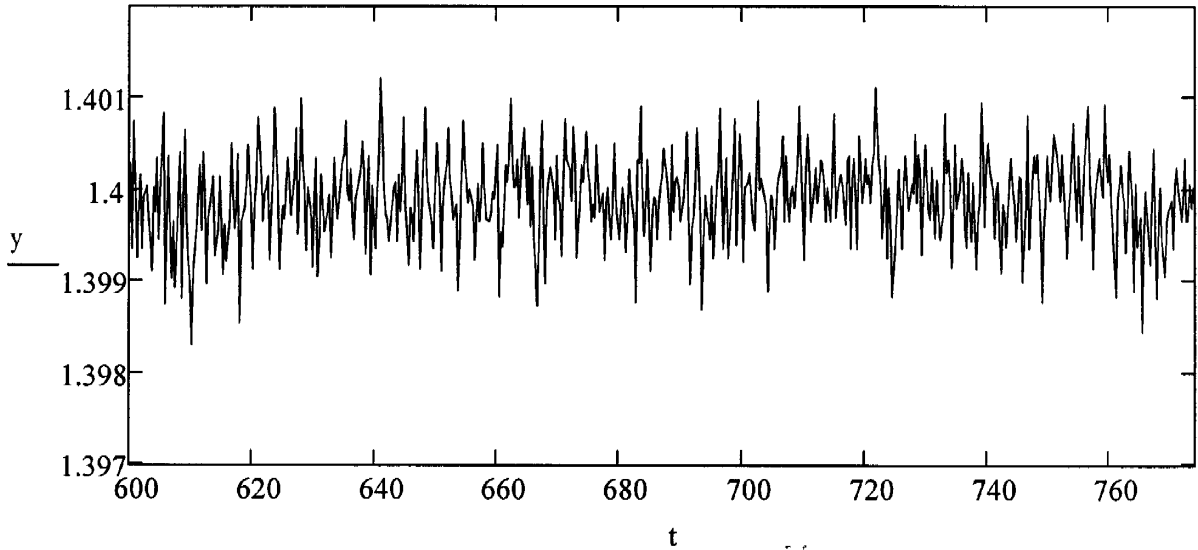


Рис. 3.18. Відтворений графік функції $E(t) = y(t)$

У зв'язку з дуже низькою величиною розмаху вибірки: $R = y_{\max} - y_{\min}$, змінюємо масштаб осі ОУ на 1000, тобто домножуємо всі значення на 1000. Одержуємо:

Таблиця 3.8

Значення величини y

	0
0	1400.282
1	1399.35
2	1400.74
3	1400.124
4	1399.249
5	1399.834
6	1400.154
7	1399.355
8	1399.91
9	1400.027

$y =$

Використовуючи формули (3.49–3.51), обчислюємо для випадкової функції $y(t)$ наступні величини:

- оцінку математичного сподівання:

$$m = 1399.895$$

- оцінку дисперсії:

$$D = 0.211$$

- середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma^2 = 0.459$$

Далі визначимо закон розподілу функції $y(t)$. Для цього ділимо вибірку y на інтервали. Застосовуючи формулу (3.52), отримуємо значення в порядку зростання:

Таблиця 3.9

Значення величини Z

	0
0	1398.308
1	1398.448
2	1398.541
3	1398.68
4	1398.726
5	1398.75
6	1398.761
7	1398.761
8	1398.796
9	1398.796

Зона розсіювання значень (розмах) становить:

$$R = 2.891$$

Розділюємо її на 10 груп із інтервалами $h=0,2891$. Потім за формулами (3.49–3.57) обчислюємо границі інтервалів, середини інтервалів, абсолютні і відносні частоти. Результати наведені у додатку К.

Виконуємо перевірку обчислення абсолютних та відносних частот:

$$\sum_{i=0}^9 m_i = 581$$

$$\sum_{i=0}^9 \omega_i = 1$$

Користуючись отриманими даними будуюмо гістограму густини абсолютних частот, яка приведена на рис. 3.19.

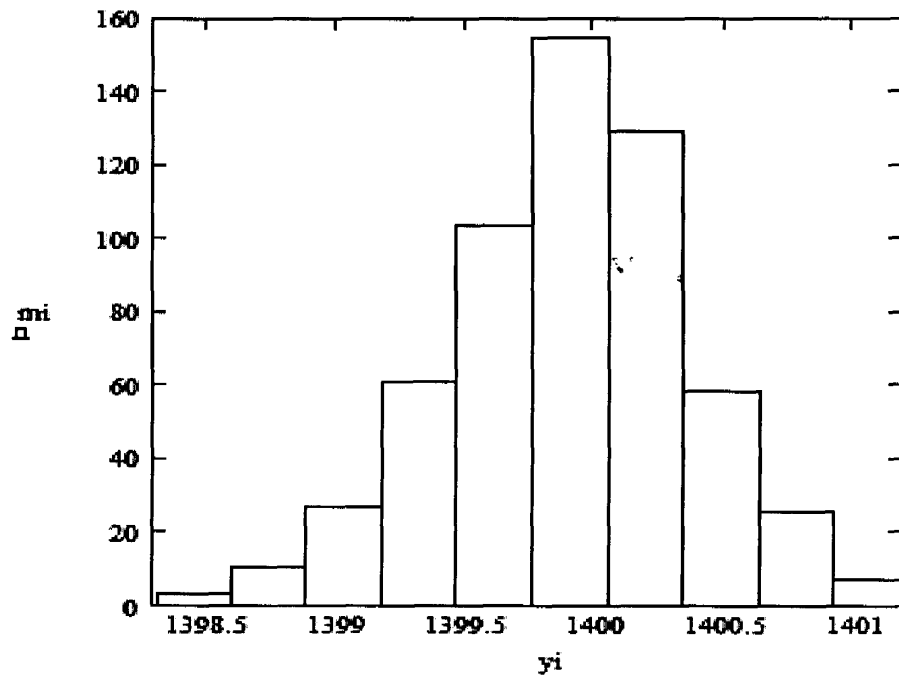


Рис. 3.19. Гістограма густини абсолютних частот

Як і у випадку із сигналом продуктивності нагнітача $Q(t)$, отримана гістограма дозволяє припустити, що даний розподіл також підпорядковується нормальному закону. Перевірку здійснюємо аналогічно за критерієм Пірсона χ^2 . Використовуючи формули (3.27-3.28), для кожного інтервалу знаходимо функції щільності, його ймовірність, теоретичну частоту і критерій χ^2 . Всі отримані значення розрахунків наведено у додатку Л. Графік узгодження кривих абсолютних та теоретичних частот зображений на рис. 3.20.

Користуючись таблицею ймовірностей для критерію Пірсона, знаходимо, що для $k=6$ і $\chi^2=5,0167$ найближчим буде значення $P(\chi^2)=0,51$ [76]. Отже, даний статистичний розподіл близький до нормального розподілу.

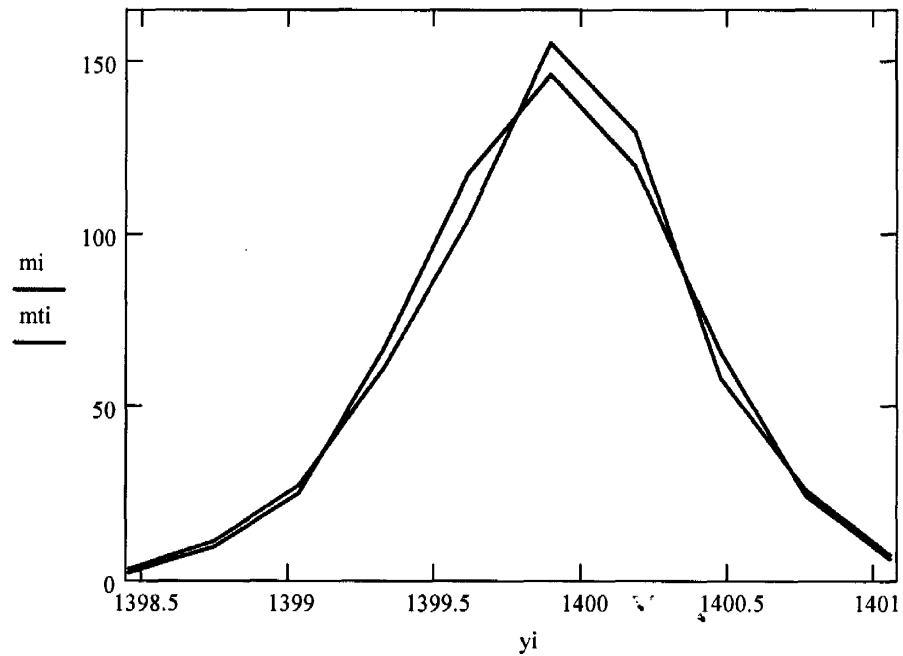


Рис. 3.21 Узгодження кривих абсолютних та теоретичних частот

Розрахуємо автокореляційну функцію вихідного сигналу $y(t)$ за допомогою формул (3.30–3.32), а також алгоритму, описаного в попередньому розділі, для розв'язку в Mathcad. Графік обчисленої автокореляційної функції зображений на рис. 3.21.

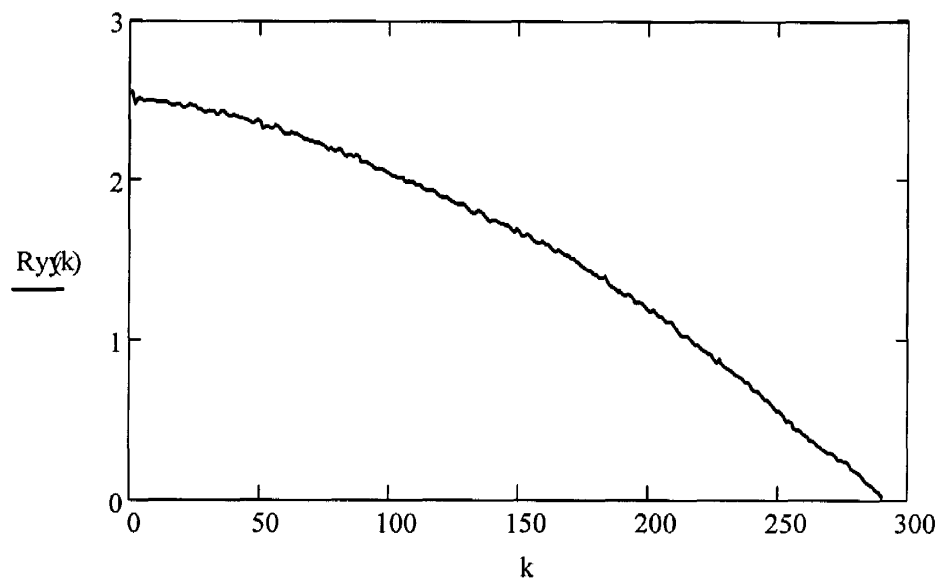


Рис. 3.21. Графік автокореляційної функції $R_{yy}(k)$

Графік отриманої автокореляційної функції підтверджує, що досліджуваний процес $E(t) = y(t)$ є також стаціонарним і ергодичним.

Залишилось визначити спектральну густину даної випадкової функції. Користуючись продуктом Mathcad, виконуємо пряме перетворення Фур'є автокореляційної функції. В результаті отримуємо бажану спектральну густину вихідного сигналу, графік якої зображений на рис. 3.22.

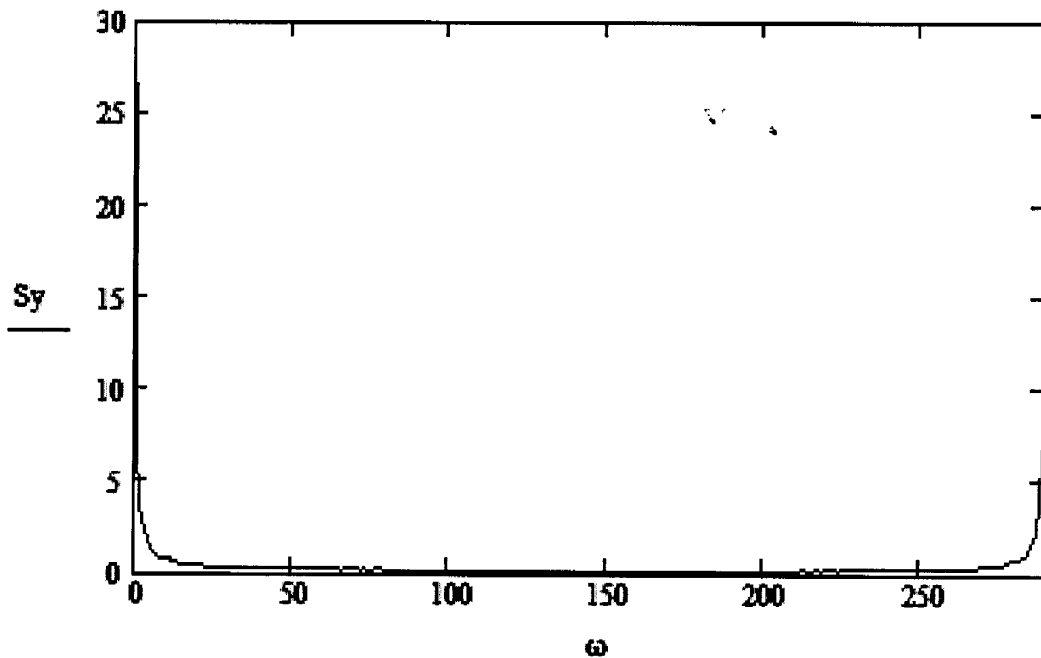


Рис. 3.22. Графік спектральної густини досліджуваного процесу

3.3.4. Визначення функції передачі відцентрового нагнітача ГПА як об'єкта керування

Для знаходження функції передачі ВН ГПА скористаємось методом, описаним у підрозділі 3.3.1. Як бачимо, для застосування формули (3.54), потрібно мати рівняння, які би описували функцію спектральних густин вхідного і вихідного сигналів. Для цього розраховані у попередніх підрозділах графіки спектральних густин (рис. 3.17 і 3.22) опишемо за

допомогою програмного продукту Mathcad і вбудованої функції узагальненої регресії *linfit*. Результатом роботи даної функції буде вектор із коефіцієнтів, потрібних для створення лінійної комбінації апроксимуючої функції.

Задаємо відповідні значення для кожної змінної функції *linfit* і визначаємо рівняння спектральної густини $S_x(\omega)$ вхідного сигналу в наступній послідовності:

$$\begin{aligned} vx &:= \omega \\ vy &:= Sx \\ F1(x) &:= \begin{pmatrix} x^0 \\ x^2 \\ x^4 \end{pmatrix} \\ K1 &:= \text{linfit}(vx, vy, F1) \\ g1(w) &:= K1 \cdot F1(w) \\ K1 &= \begin{pmatrix} 1.8429 \\ -1.2168 \times 10^{-4} \\ 1.6801 \times 10^{-9} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

У результаті отримуємо наступне рівняння функції спектральної густини вхідного сигналу:

$$S_y(\omega) = 1.843 - 1,217 \cdot 10^{-4} \cdot \omega^2 + 1,68 \cdot 10^{-9} \cdot \omega^4. \quad (3.60)$$

Графік спектральної густини $S_x(\omega)$ і її апроксимованої функції ($g1(w)$) зображено на рис. 3.23.

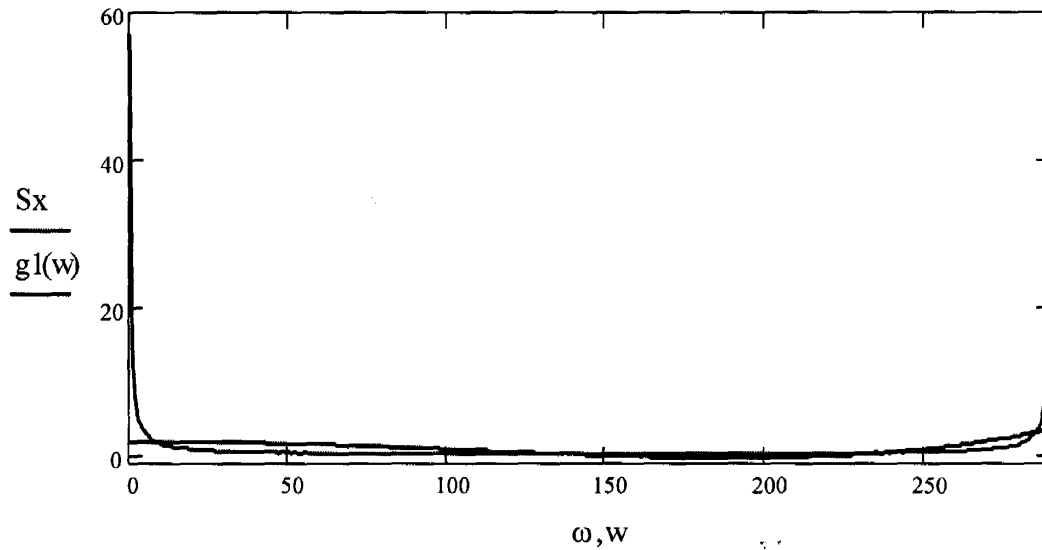


Рис. 3.23. Графік спектральної густини вхідного сигналу $Q(t)$ і її апроксимованої функції

Аналогічні операції проведемо і з функцією $S_y(\omega)$:

$$v_x := \omega$$

$$v_y := S_y$$

$$F_2(x) := \begin{pmatrix} x^0 \\ x^2 \end{pmatrix}$$

$$K_2 := \text{linfit}(v_x, v_y, F_2)$$

$$g_2(\omega) := K_2 \cdot F_2(\omega)$$

$$K_2 = \begin{pmatrix} 0.3828 \\ -5.8701 \times 10^{-7} \end{pmatrix}$$

Рівняння спектральної густини вихідного сигналу буде наступним:

$$S_y(\omega) = 0.383 - 5,87 \cdot 10^{-7} \cdot \omega^2 \quad (3.61)$$

Графік спектральної густини $S_y(\omega)$ і її апроксимованої функції ($g_2(\omega)$) зображено на рис. 3.24.

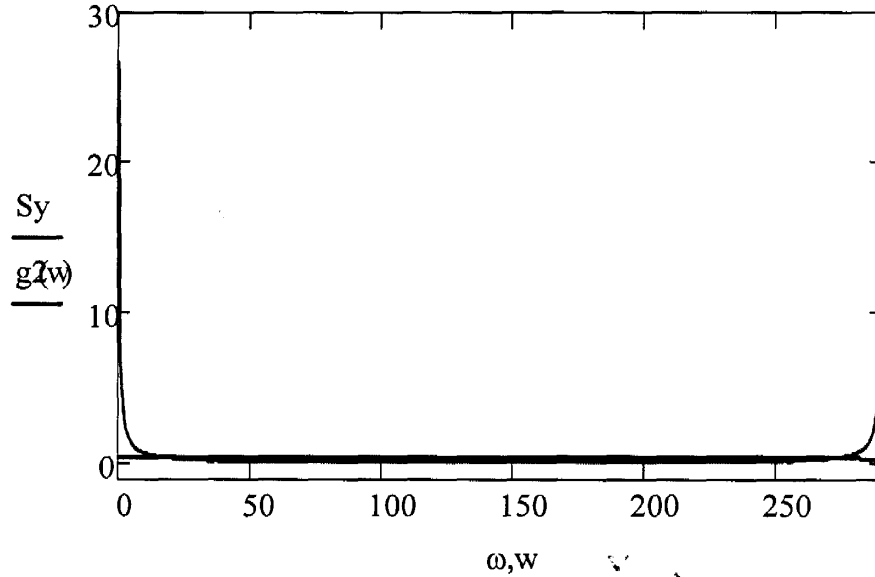


Рис. 3.24. Графік спектральної густини вихідного сигналу $E(t)$ і її апроксимованої функції

У результаті даних розрахунків отримуємо наступний вираз:

$$|W(j\omega)|^2 = \frac{0,383 - 5,87 \cdot 10^{-7} \cdot \omega^2}{1,843 - 1,217 \cdot 10^{-4} \cdot \omega^2 + 1,68 \cdot 10^{-9} \cdot \omega^4}. \quad (3.62)$$

Щоб отримати із виразу (3.62) функцію передачі, скористаємось програмним продуктом Matlab і функцією *fact*: $[W, W_]=fact(S)$, яка виконує факторизацію дробово-раціонального виразу [81]. Тут S – права частина виразу (3.62), $W, W_$ - функція передачі й комплексно спряжена їй функція.

Виконання роботи даної функції наведено у додатку М.

Отже, отримуємо наступну функцію передачі ВН ГПА:

$$W(p) = \frac{7,668 \cdot 10^{-4} \cdot p + 0,619}{4,099 \cdot 10^{-5} \cdot p^2 + 1,526 \cdot 10^{-2} \cdot p + 1,358} = \frac{Y(p)}{X(p)}. \quad (3.63)$$

Також, роблячи заміну $p = d/dt$ і вважаючи, що чисельник і знаменник функції передачі – це відповідно функції $Y(p)$ і $X(p)$, можемо визначити диференціальне рівняння відцентрового нагнітача:

$$7,668 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{dX(t)}{dt} + 0,619x(t) = 4,099 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{d^2Y(t)}{dt^2} + 1,526 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{dY(t)}{dt} + 1,358y(t). \quad (3.64)$$

Проаналізуємо отриману модель ВН у вигляді функції передачі (3.63), визначивши її основні характеристики: перехідну, імпульсну перехідну функцію, амплітудно-частотну характеристику (АЧХ), фазо-частотну (ФЧХ), а також амплітудно-фазову характеристику (АФХ). Для цього скористаємось програмним продуктом Matlab.

Сформуємо функцію передачі моделі, використовуючи функцію *tf*:

```
>> num=[7.662e-4 0.619];
dem=[4.099e-5 0.01526 1.358];
W=tf(num,dem)
```

Transfer function:

$$0.0007662 s + 0.619$$

$$4.099e-005 s^2 + 0.01526 s + 1.358$$

За допомогою вбудованих функцій *step(W)* та *impz(W)* знаходимо відповідно перехідну (рис. 3.25) й імпульсну перехідну (рис. 3.26) функції.

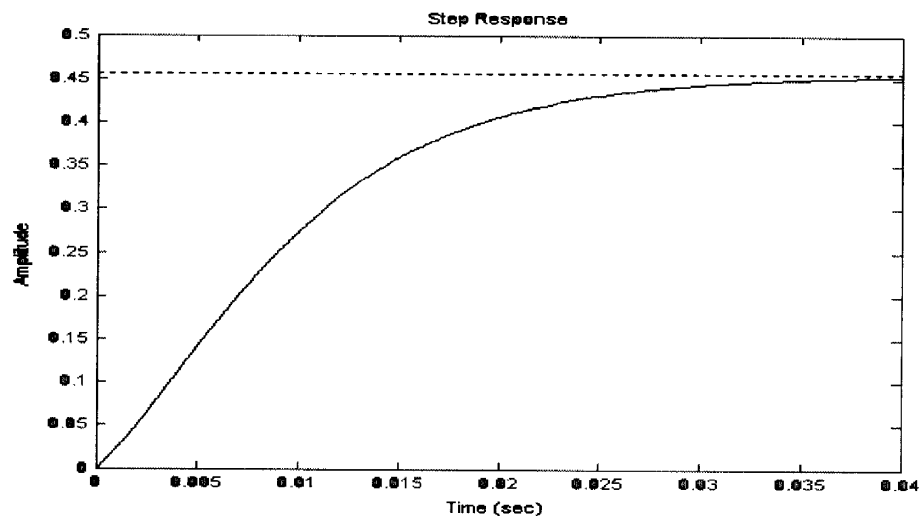


Рис. 3.25. Перехідна характеристика відцентрового нагнітача ГПА

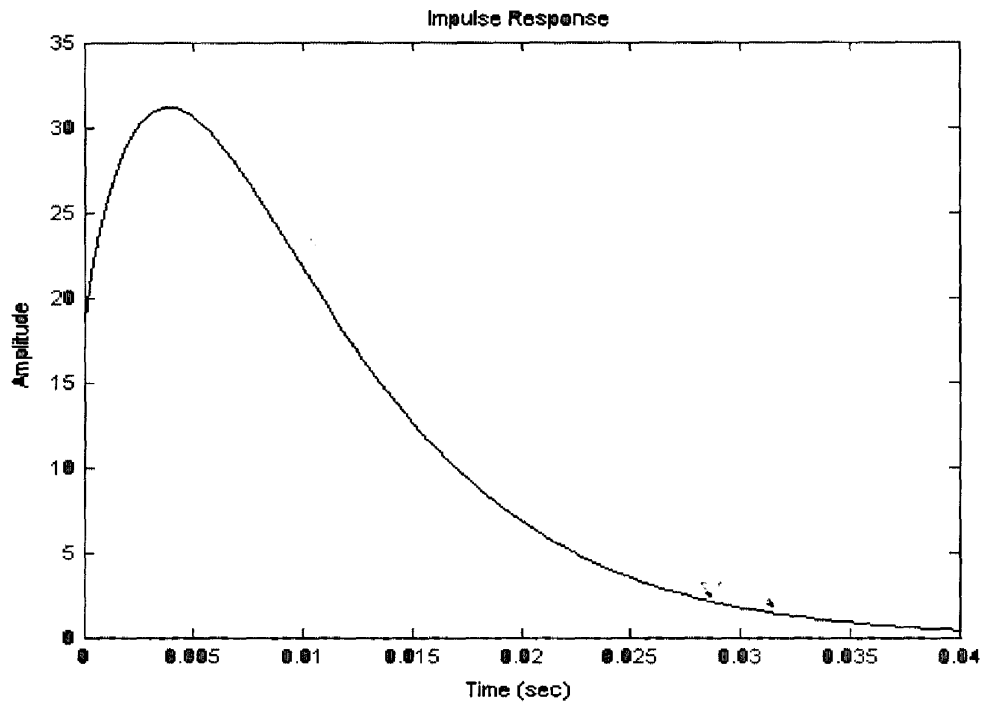


Рис. 3.26. Імпульсна перехідна характеристика відцентрового нагнітача ГПА

На основі даних характеристик можна зробити висновки, що даний об'єкт є стійким, час перехідного процесу становить 0,04 с. Застосовуючи функції *fregs* та *nyquist*, побудуємо відповідно ФЧХ, АЧХ та АФХ відцентрового нагнітача (рис. 3.27, 3.28, 3.29).

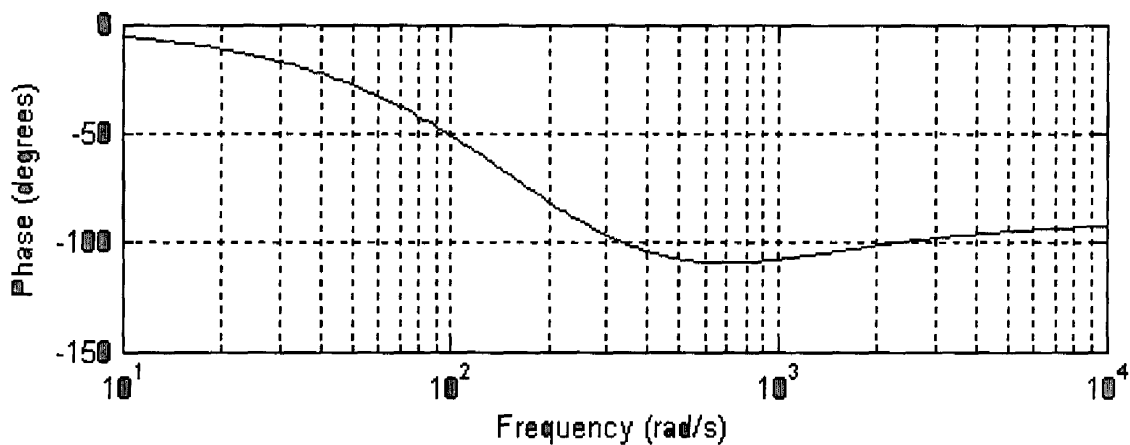


Рис. 3.27. Фазо-частотна характеристика ВН

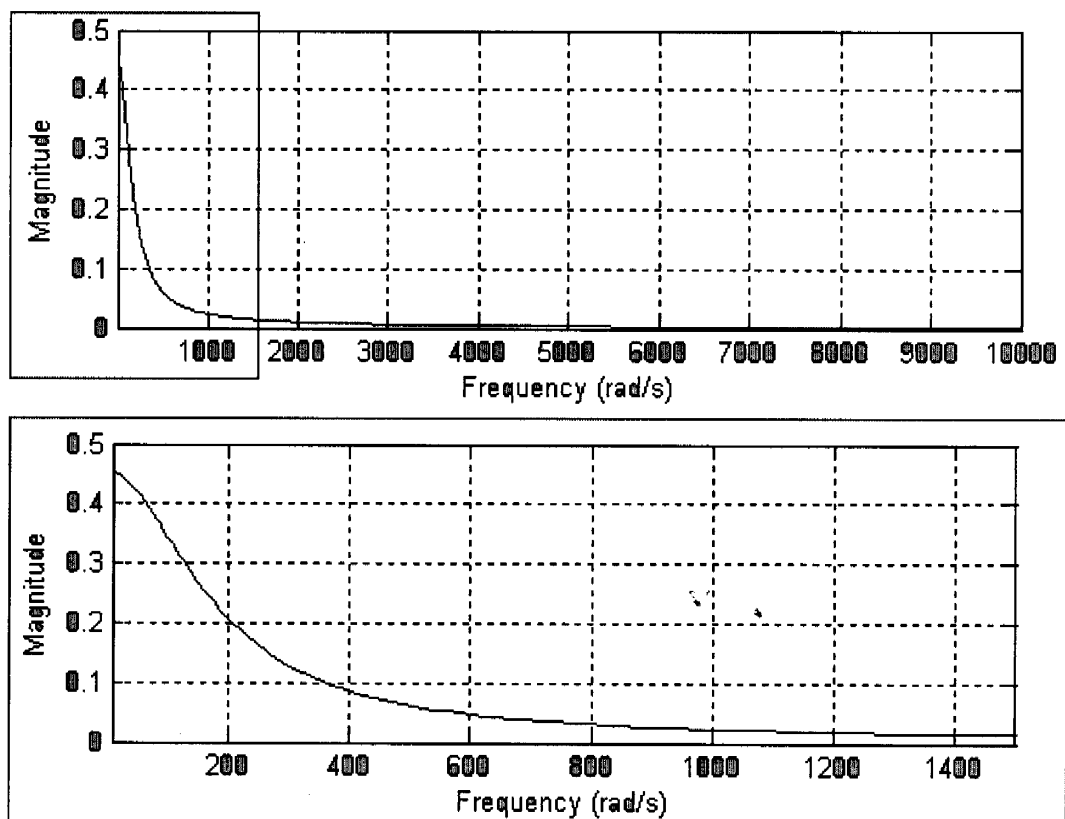


Рис. 3.28. Амплітудно-частотна характеристика ВН

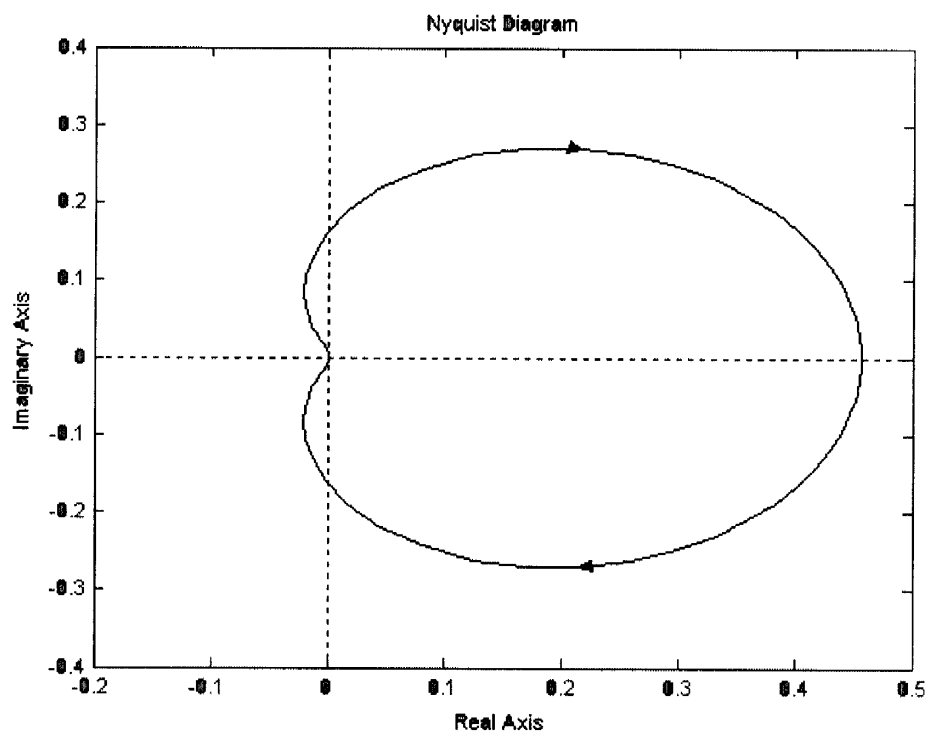


Рис. 3.29. Амплітудно-фазова характеристика ВН

3.4. Автоматична ідентифікація реальних приведених витратно-напірних характеристик відцентрових нагнітачів

Для вирішення цієї задачі використаємо витрато-напірні характеристики $E = f(Q_{np})$ відцентрового нагнітача типу НЦ-16/41-1,45 ГПА №9 ДКС ПСГ “Більче - Волиця” (рис.3.30). Для апроксимації заданих 7 характеристик $E = f(Q_{np})$, нумерацію яких здійснено зверху до низу, скористаємося методом комп’ютерного моделювання і програмним пакетом Curve Expert – 2.

Похибка апроксимації оцінюється стандартною абсолютною середньоквадратичною похибкою:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \Delta_i^2}{k-1}}, \quad (3.65)$$

де Δ_i – різниця між заданим значенням функції і функцією апроксимації;

k – кількість вузлів заданої вихідної функції;

$i = 1, 2, \dots, k$.

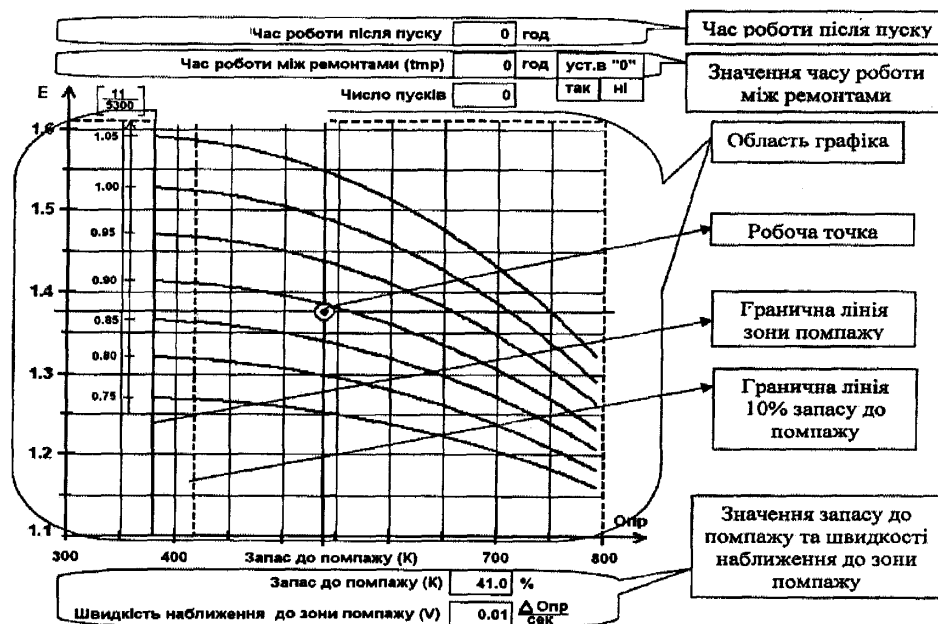
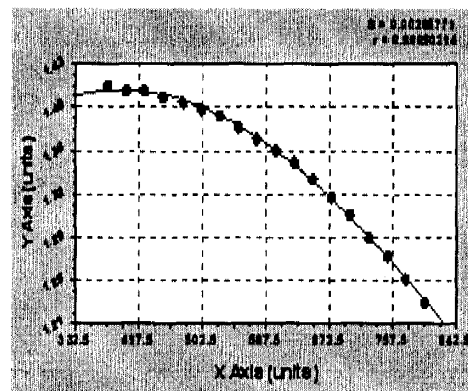


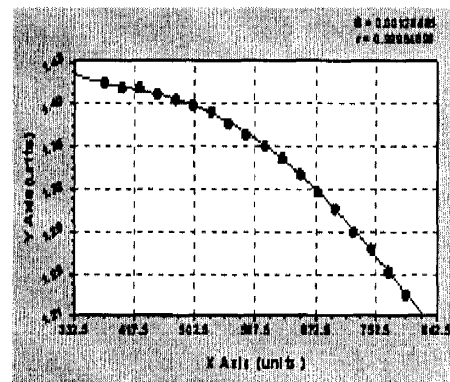
Рис. 3.30. Витратно-напірні характеристики відцентрового нагнітача

Для порівняння виберемо вісім інформаційних моделей: лінійну, квадратичну, поліном 3 порядку, поліном 4 порядку, синусоїдальну, поліном 5 порядку, поліном 6 порядку, поліном 7 порядку. В програмі позначення E змінено на y , а Q_{np} – на x . Результати аналізу наведено у додатку Н. Аналіз результатів засвідчив, що для опису всіх 7 витрато-напірних характеристик $E = f(Q_{np})$ відцентрового нагнітача найбільш підходить інформаційна модель 7th Degree Polinomial Fit, для якої коефіцієнт кореляції коливається в межах $r = 0,9995 \div 0,9998$, а стандартна похибка $S = 0,0008 \div 0,003$.

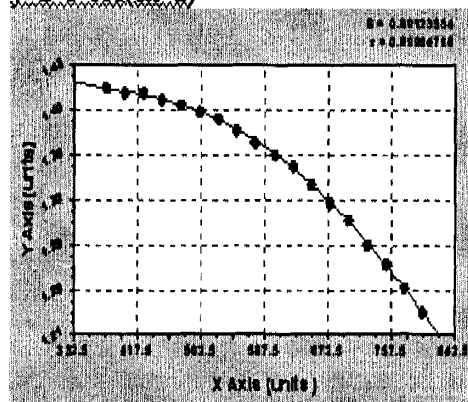
На рис.3.31 наведено приклади апроксимації першої кривої залежності $E = f(Q_{np})$ моделями Sinusoidal Fit та Polinomial Fit 5-го, 6-го і 7-го порядків.



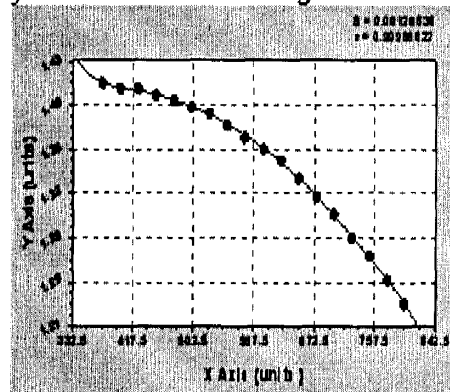
Синусоїдальна
 $y = a + b \cdot \cos(cx + d)$



поліном 6 порядку
 $y = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 + fx^5 + gx^6$



поліном 5 порядку
 $y = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 + fx^5$



поліном 7 порядку
 $y = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 + fx^5 + gx^6 + hx^7$

Рис. 3.31. Приклади вікон програмного середовища Curve Expert для інформаційних моделей Sinusoidal Fit та Polinomial Fit

Враховуючи, що стандартні похибки S і коефіцієнти кореляції r для декількох моделей мало відрізняються один від одного, проаналізуємо якість моделей з позиції найкращого співвідношення “коефіцієнт кореляції / стандартна похибка” і обиратимемо ту математичну модель, для якої коефіцієнт кореляції $r \rightarrow \max$, а стандартна похибка $S \rightarrow \min$.

Для цього скористаємося результатами, наведеними в табл.3.18. Результати обчислень критерію r/S наведено у додатку П і на рис. 3.32, 3.33.

Аналіз отриманих результатів дає змогу зробити висновок, що за критерієм r/S найкраща апроксимація витрато-напірних характеристик $E = f(Q_{np})$ відцентрових нагнітачів ГПА здійснюється 3-ма моделями 5 th ÷ 7th Degree Polinomial Fit. Проте для характеристики L1 і L4 кращий результат дає апроксимація поліномом 4-го порядку, для L2- поліномом шостого порядку, для L3, L5, L6, L7 – поліномом 7 порядку. Отже найбільш ефективним є використання поліномів 4÷7 порядків для реальної витрато – напірної характеристики в стабільному режимі роботи відцентрового нагнітача.

Для стабільного режиму роботи нагнітача витрата визначається [12] за формулою:

$$Q = K_{\text{конф}} \sqrt{\Delta P_{\text{конф}} \cdot \rho^{-1}}, \quad (3.66)$$

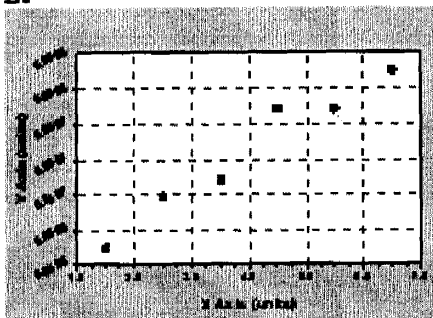
де Q – об’ємна витрата газу на вході ВН;

$K_{\text{конф}}$ – коефіцієнт витрати конфузора;

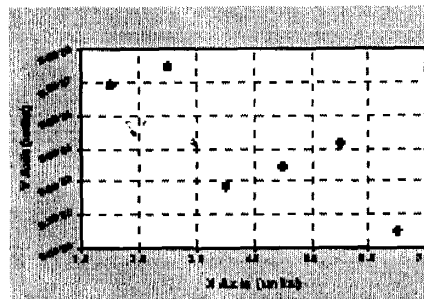
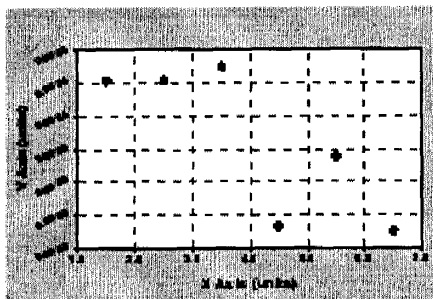
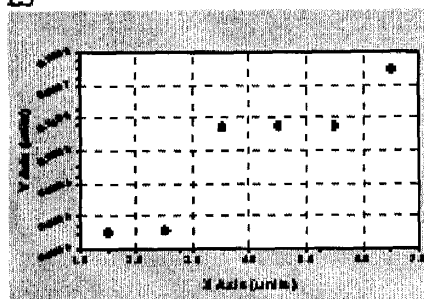
$\Delta P_{\text{конф}}$ – перепад тиску на конфузори;

ρ – густина газу на вході ВН.

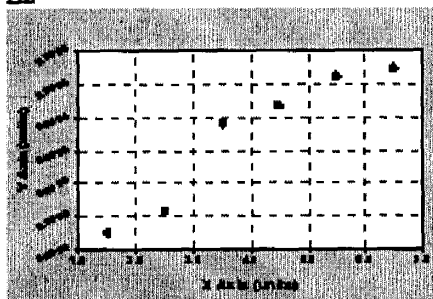
L1



L3



L2



L4

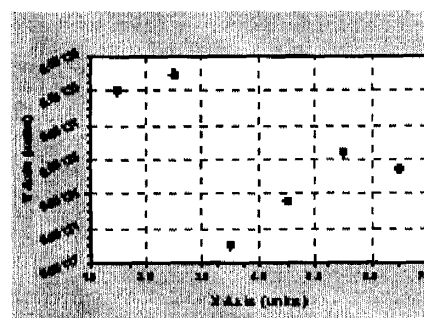
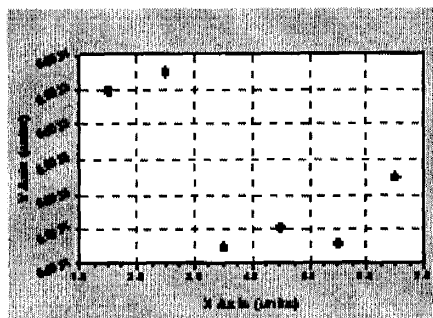
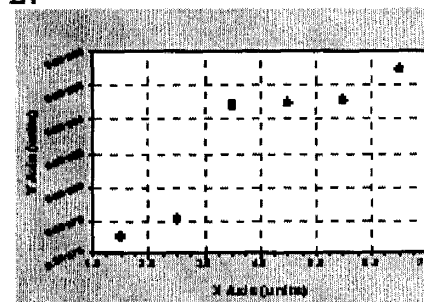
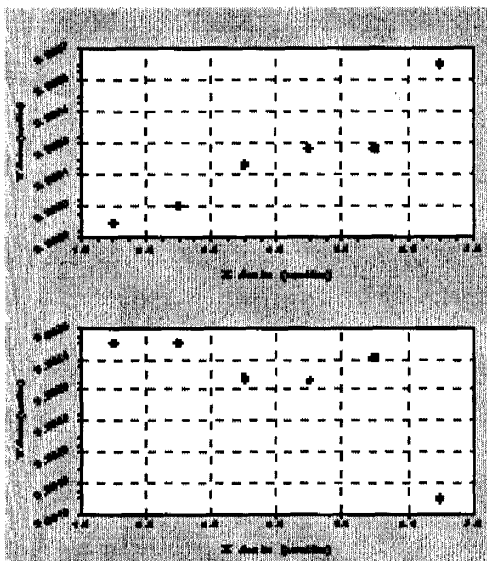
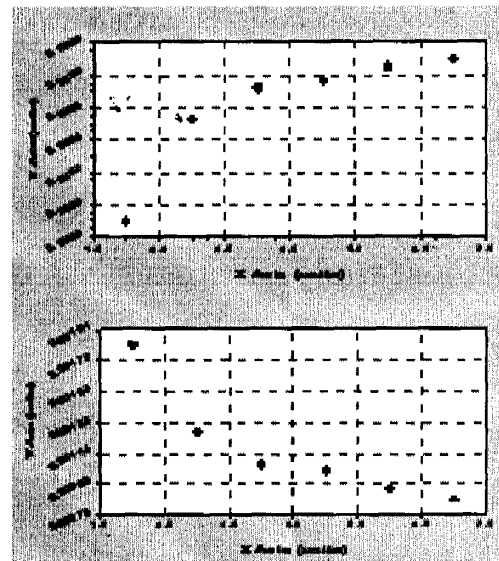


Рис. 3.32. Вікна програмного середовища Curve Expert для коефіцієнтів кореляції r і стандартних похибок S для 1÷4 характеристик $E = f(Q_{np})$ в залежності від порядку поліномів 2÷7

L5



L7



L6

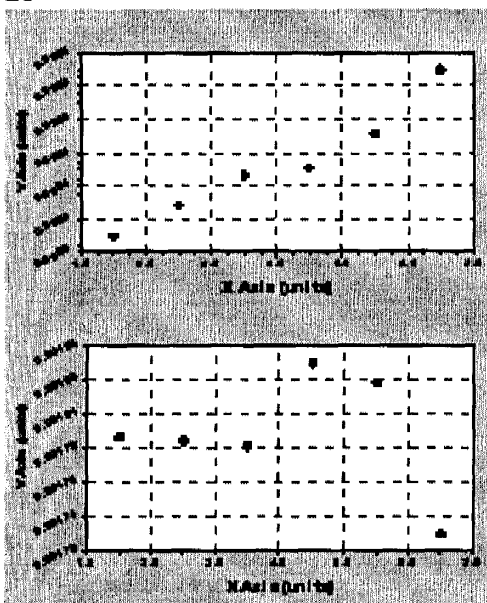


Рис. 3.33. Вікна програмного середовища Curve Expert для коефіцієнтів кореляції r і стандартних похибок S для 5÷7 характеристик $E = f(Q_{np})$ в залежності від порядку поліномів 2÷7

Обчислюється приведена витрата $Q_{пр}$. Далі за вимірними параметрами ГПА визначається приведена ступінь підвищення тиску $E_{пр}$, яка відповідає приведеним параметрам газу за формулою:

$$E_{пр} = E \left[\left(\frac{n}{n_{ном}} \right)_{пр} \right]^{-2}, \quad (3.67)$$

де E – ступінь підвищення тиску газу нагнітача;

$E_{пр}$ – приведена ступінь підвищення тиску газу нагнітача;

$(n/n_{ном})_{пр}$ – приведена відносна частота обертання нагнітача.

Далі складається система рівнянь, яка містить залежності приведенного ступеня підвищення тиску і приведеної витрати для кожного із n режимів роботи ГПА у вигляді поліномів n -го порядку із невідомими коефіцієнтами:

$$E_{пр1} = A + A_1 Q_{пр1} + A_2 Q_{пр1}^2 + A_3 Q_{пр1}^3 + \dots + A_7 Q_{пр1}^7, \quad (3.68)$$

$$E_{пр2} = A + A_1 Q_{пр2} + A_2 Q_{пр2}^2 + A_3 Q_{пр2}^3 + \dots + A_7 Q_{пр2}^7, \quad (3.69)$$

$$E_{пр3} = A + A_1 Q_{пр3} + A_2 Q_{пр3}^2 + A_3 Q_{пр3}^3 + \dots + A_7 Q_{пр3}^7, \quad (3.70)$$

.....

$$E_{пр7} = A + A_1 Q_{пр7} + A_2 Q_{пр7}^2 + A_3 Q_{пр7}^3 + \dots + A_7 Q_{пр7}^7. \quad (3.71)$$

У результаті розв'язання цієї системи рівнянь визначаються коефіцієнти $A, A_1 \div A_7$, і після підстановки значень $(n/n_{ном})_{пр} = 1,1; 1,05; 1; 0,95; 0,9; 0,85; 0,8; 0,75; 0,7$ будуються криві реальних приведених характеристик відцентрового нагнітача газу.

Розрахунки та побудова кривих реальної приведенної характеристики проведено в програмному середовищі MathCad для відцентрового нагнітача НЦ-16/41-1,45.

Для розглянутого прикладу коефіцієнти моделі дорівнюють:

L4:

$$A = 32.088; A_1 = -0.387; A_2 = 0.002; A_3 = -6.08 \cdot 10^{-6};$$

$$A_4 = 1.06 \cdot 10^{-8}; A_5 = -1.097 \cdot 10^{-11}; A_6 = 6.25 \cdot 10^{-15}; A_7 = -1.509 \cdot 10^{-18}$$

L5:

$$A = 113.172; A_1 = -1.431; A_2 = 0.008; A_3 = -2.305 \cdot 10^{-5};$$

$$A_4 = 4.063 \cdot 10^{-8}; A_5 = -4.246 \cdot 10^{-11}; A_6 = 2.436 \cdot 10^{-14}; A_7 = -5.92 \cdot 10^{-18}$$

L6:

$$A = -44.113; A_1 = 0.594; A_2 = -0.003; A_3 = 9.991 \cdot 10^{-6};$$

$$A_4 = -1.799 \cdot 10^{-8}; A_5 = 1.92 \cdot 10^{-11}; A_6 = -1.124 \cdot 10^{-14}; A_7 = 2.786 \cdot 10^{-18}$$

Для автоматизації процесу визначення приведених витрато–напірних характеристик ВН розроблено алгоритм програми побудови приведених характеристик (рис.3.34).

Нижче подано опис алгоритму:

Блок 2. проводиться введення таких даних від давачів, встановлених на ГПА:

- тиск на вході в ГПА - $P_{вх}$;
- тиск на виході в ГПА - $P_{вих}$;
- перепад тиску на конфузори - ΔP_k ;
- температура газу на вході в нагнітач - $T_{вх}$;
- фактична частота обертання ротора нагнітача – n ;

Ці дані зчитуються з давачів, встановлених на ГПА. Параметри $P_{вх}$, n , ΔP_k зчитуються, в реальному часі, для кожного з заданих режимів роботи ГПА.

Блок 3. Введення даних нагнітача:

1. Параметри нагнітача:

- номінальна швидкість обертання ротора нагнітача - $n_{ном}$;
- коефіцієнт витрати – A ; обчислюється за результатами тарування камери проточної частини з допомогою витрато-мірної дільниці на

випробувальному стенді (однотипні нагнітачі мають однакові (або близькі) значення коефіцієнта A);

- l – поправка на стиснення газу в камері, обчислюється за результатами тарування проточної частини;

2. Приведені характеристики:

- приведений коефіцієнт стисливості - z_{np} ;
- приведена газова стала – R_{np} ;
- приведена температура - T_{np} .

3. Дані лабораторії:

- атмосферний тиск – P_a ;
- густина газу - ρ ;
- коефіцієнт стисливості - z .

Блок 4. Обчислення приведенного ступеня підвищення тиску відцентрового нагнітача E_{np} для кожного із заданих режимів роботи ГПА.

Блок 5. Визначення приведеної витрати Q_{np} для кожного із заданих режимів роботи ГПА.

Блок 6. Складання системи рівнянь, яка містить залежності приведенного ступеня підвищення тиску і приведеної витрати для кожного із заданих режимів роботи ГПА у вигляді поліномів із невідомими коефіцієнтами.

Блок 7. Визначення коефіцієнтів $A_0 \div A_j$ системи рівнянь.

Блок 8. Побудова кривих реальних приведених характеристик відцентрового нагнітача газу при значеннях $(n/n_{ном})_{пр.} = 1,1; 1,05; 1; 0,95; 0,9; 0,85; 0,8; 0,75; 0,7$.

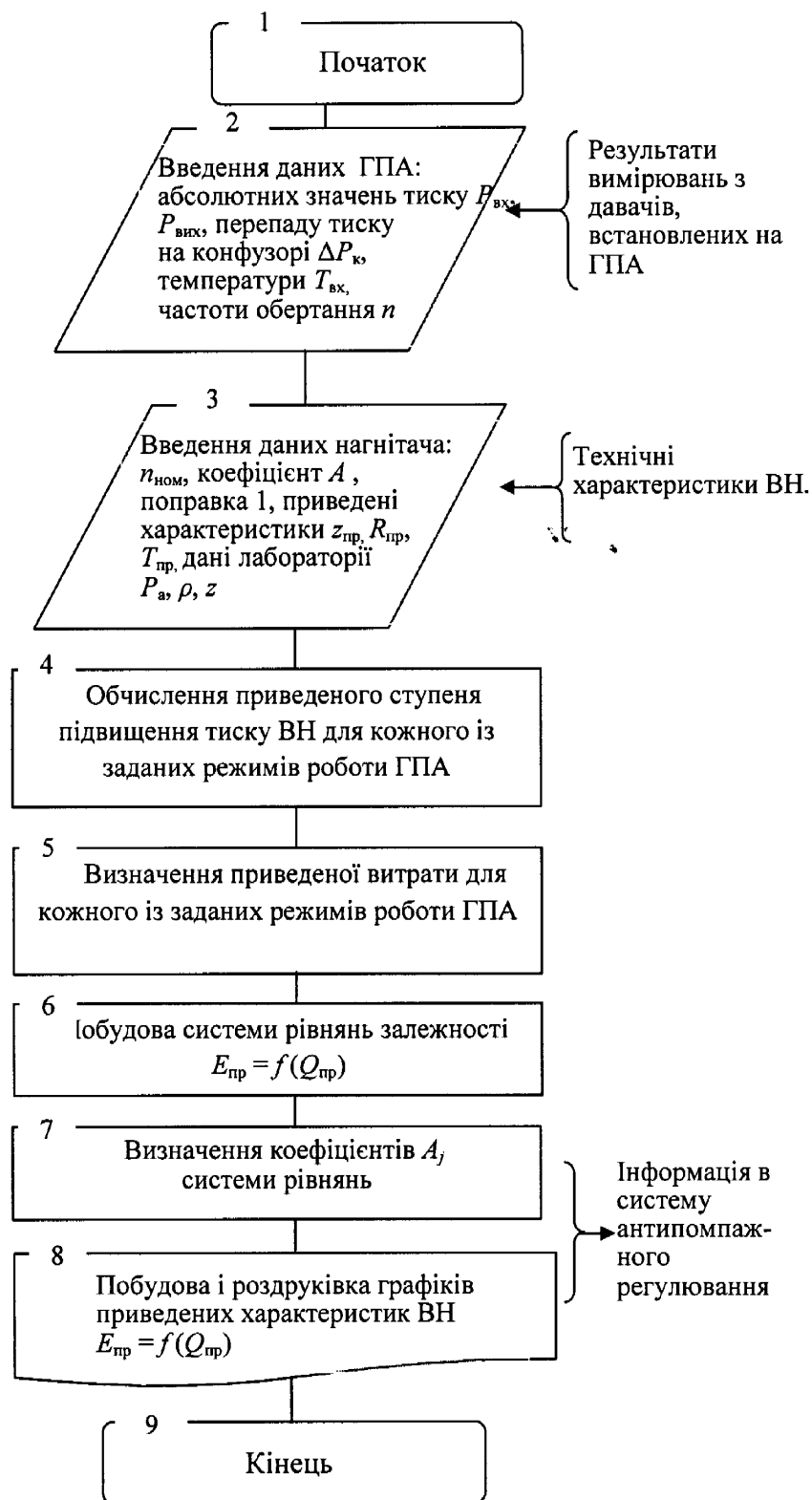


Рис. 3.34. Блок-схема алгоритму програми побудови графіків приведених витрато – напірних характеристик ВН ГПА ДКС ПГС

Висновки до третього розділу

1. На основі результатів експерименту проведеного на газоперекачувальному агрегаті №9 дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу “Більче-Волиця”, встановлено лінійний кореляційний зв'язок ступеня підвищення тиску газу в газоперекачувальному агрегаті з масовою витратою газу в робочій точці відцентрового нагнітача. Встановлено, що похибка обчислення ступеня підвищення тиску газу в околі точки середнього значення масової витрати газу різко зростає по мірі віддалення від неї. Тому використання знайденої кореляційної залежності для екстраполяції за межі того проміжку по осі витрати, всередині якого вміщуються дані спостереження, дуже небезпечно і може робитися тільки у виключних випадках з відповідним обумовленням.

2. На основі аналізу з використанням програмного пакету MathCad коефіцієнту помпажу K_{pompag} були визначені статистичні характеристики випадкового процесу $K_{\text{pompag}}(t)$, а саме: оцінки математичного сподівання, дисперсії та середньоквадратичне відхилення. Визначили, що процес підпорядковується нормальному закону розподілу (перевірку здійснили за критерієм Пірсона χ^2), що він є стаціонарним та ергодичним. Отримані результати проведеного дослідження дозволяють оцінювати точність інтерполяції вимірюваної величини, вибирати крок дискретизації, синтезувати алгоритми контролю зміни коефіцієнту помпажу в часі та діагностувати стан процесу перекачування газу.

3. Теоретично обґрунтовано використання методу дослідження динамічних властивостей ВН ГПА, що базується на взаємозв'язках статистичних характеристик вхідних і вихідних параметрів нагнітача.

4. Аналіз динамічних властивостей відцентрових нагнітачів газоперекачувального агрегату з газотурбінним приводом, як об'єкта керування дозволило визначити функцію передачі відцентрового нагнітача, а також його часові і частотні характеристики.

5. Удосконалено технологію ідентифікації приведених витратно-напірних характеристик ВН, яка впроваджена в системі автоматичного керування ГПА дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу «Більче-Волиця». Досвід експлуатації довів ефективність запропонованого методу, що забезпечує підвищення точності і вірогідності контролю технічного стану відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату компресорної станції.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ АПРОБАЦІЇ ПІДСИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПОМПАЖНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДЦЕНТРОВОГО НАГНІТАЧА У СКЛАДІ САК ГПА ДКС ПСГ «БІЛЬЧЕ-ВОЛИЦЯ»

4.1 Методика автоматичної ідентифікації помпажної характеристики відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату Ц-16 ДКС “Більче-Волиця” УМГ “Львівтрансгаз”

Управління магістральних газопроводів (УМГ) “Львівтрансгаз” має багаторічний досвід розробки і впровадження на об’єктах підприємства систем автоматичного керування (САК) газоперекачувальними агрегатами (ГПА) і компресорними станціями (КС). Сьогодні УМГ “Львівтрансгаз” проводить експлуатаційні випробування підсистеми автоматичної ідентифікації помпажної характеристики на газоперекачувальних агрегатах Ц-16 та Ц-6,3 з різними типами нагнітачів обладнаних системою керування, яка виготовлена ТОВ “Укргазтех” для ДКС “Більче-Волиця” та ДКС «Дашава». Розробка і впровадження цієї системи здійснюється у відповідності з технічним завданням, затвердженим ДК “Укртрансгаз” [89,90].

Випробування проводяться з метою уточнення помпажної межі на газодинамічній характеристиці відцентрового нагнітача для внесення їх в підсистему антипомпажного регулювання та захисту системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом, що функціонує у взаємодії з системою керування подачі паливного газу, швидкодіючим антипомпажним клапаном фірми “Моквелд”, який встановлений на вихідному колекторі

обов'язки нагнітача та призначений для антипомпажного регулювання та захисту цього нагнітача при наближенні до помпажних явищ.

До складу системи САК ГПА входять: пристрій оператора (ПО) ААДЦ 421413.204, що містить у собі системний блок промислової ПЕОМ, монітор, панель керування і пристрій безперебійного живлення, який розміщено в операторній ДКС; стійка контролерів та перетворювачів, що знаходиться в блоці автоматики на ГПА; датчі і сигналізатори, які розміщені безпосередньо на ГПА; програмне забезпечення (ПЗ), яке реалізує алгоритм керування та регулювання, на СД-дисках, враховуючи ліцензійне ПЗ.

Основними функціями САК ГПА є функції керування, контролю, ідентифікації помпажних характеристик, регулювання, а також інформаційні функції. Система автоматичного керування реалізує такі традиційні [91,93] функції як: автоматична перевірка готовності до пуску, керування режимом роботи ГПА, автоматичний захист ГПА за технологічними параметрами, автоматичне керування виконавчими механізмами і крановою обв'язкою ГПА за заданими алгоритмами, екстренна та аварійна зупинка ГПА при відмові САК або за командою оператора, дистанційне управління виконавчими механізмами і допоміжним обладнанням, заборона виконання команд оператора під час роботи ГПА в автоматичному режимі керування, якщо вони не передбачені алгоритмом керування.

Крім традиційних задач, досліджувана САК ГПА реалізує одну із функцій розширення можливостей управління ГПА, а саме – автоматизоване безударне визначення помпажної характеристики відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату (рис.4.1). На рис.4.1 показано помпажну характеристику відцентрового нагнітача Н-16/56-1,44 на ГПА №9 ДКС "Більче-Волиця" УМГ "Львівтрансгаз".

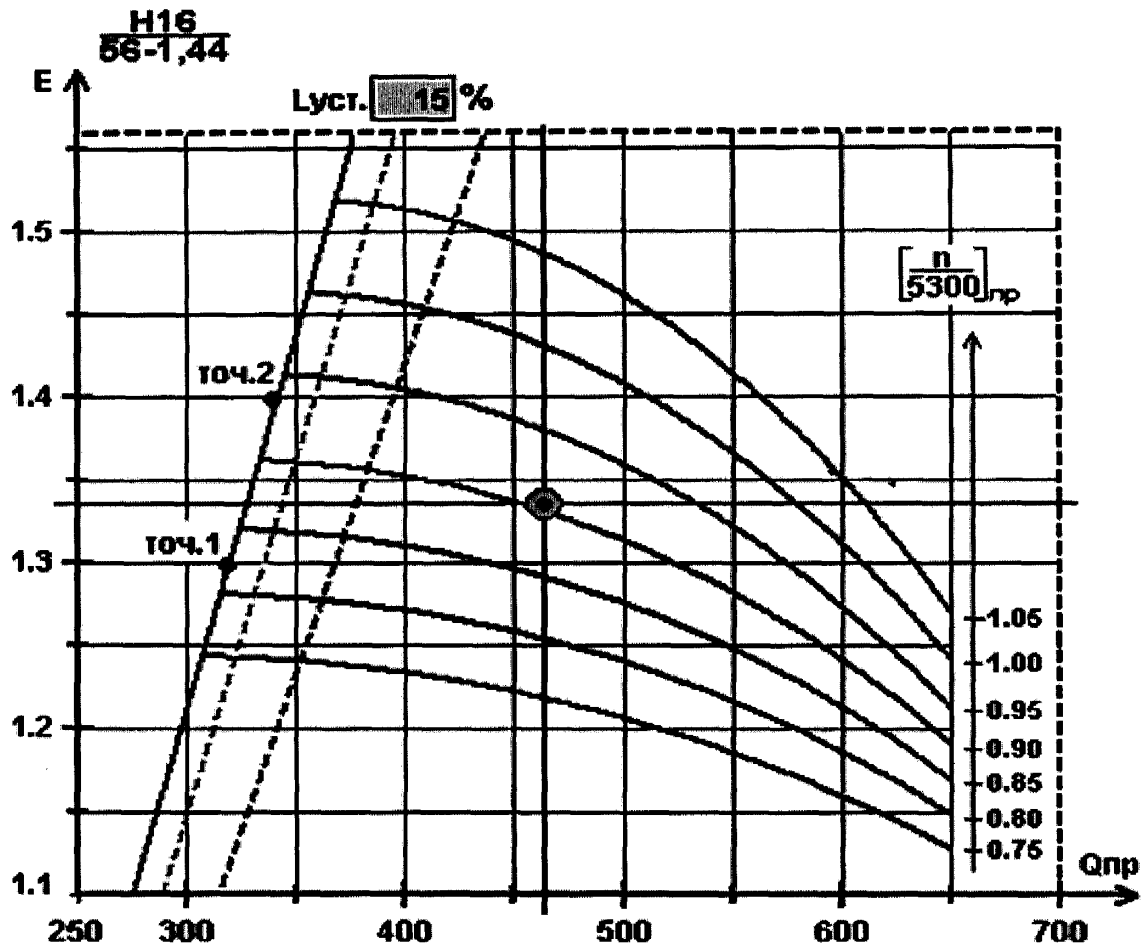


Рис.4.1. Помпжна характеристика відцентрового нагнітача Н-16/56-1,44:

- - помпжна лінія (запас по помпажу «0»);
- - попереджувальна лінія (запас по помпажу 5%);
- - задана лінія регулювання (рівень уставки 15%);
- - крива навантаження відцентрового нагнітача;
- - точ.1: точки спрацювання системи антипомпжного захисту;
- - робоча точка нагнітача.

Для запобігання аварій, що пов'язані з помпажем, експлуатаційний персонал вимушений проводити переналагоджування попереджувальної лінії запасу по помпажу. Потреба в переналагодженні виникає після експлуатації агрегату протягом одного сезону “відбору-закачування” газу, враховуючи зміни характеристик нагнітача і ГПА вцілому, що пояснюється фізичним зношуванням їх робочих частин.

Методика автоматичної ідентифікації помпажної характеристики відцентрового нагнітача ГПА базується на наступному:

- в підсистемі АПР відключається програма випереджувального антипомпажного регулювання, яка унеможливорює входження ГПА в помпаж;
- технологічною схемою КС створюються умови для виникнення помпажних явищ в нагнітачі досліджуваного агрегату;
- система антипомпажного регулювання працює в режимі захисту: тобто забезпечує форсоване відкриття антипомпажного клапана при перших ознаках виникнення помпажних явищ;
- газоперекачувальний агрегат вводиться в помпажний режим роботи на різних обертах та ступенях стиснення (2-4 рази);
- точки 1 та 2 на рис.4.1 - це точки відпрацювання антипомпажного захисту з повідомленням САК ГПА “жорсткий помпаж” фіксуються системою, як запас по помпажу “0” і використовуються для побудови уточненої помпажної характеристики.

Випробування в умовах КС “Більче-Волиця” довели працездатність запропонованого методу.

Перевага описаної методики у відсутності аварійних зупинок, що в свою чергу дозволяє економити моторесурс обладнання, зменшити втрати газу та проводити випробування з мінімальною витратою робочого часу і людських ресурсів.

4.2. Метрологічне забезпечення вимірювальних каналів системи автоматичного керування агрегатом Ц-6,3 та підсистеми ідентифікації помпажних характеристик

Повірку вимірювальних каналів САК ГПА і підсистеми ідентифікації помпажних характеристик запропоновано здійснювати в робочих умовах експлуатації засобів вимірювання (ЗВ) (рис.4.2).

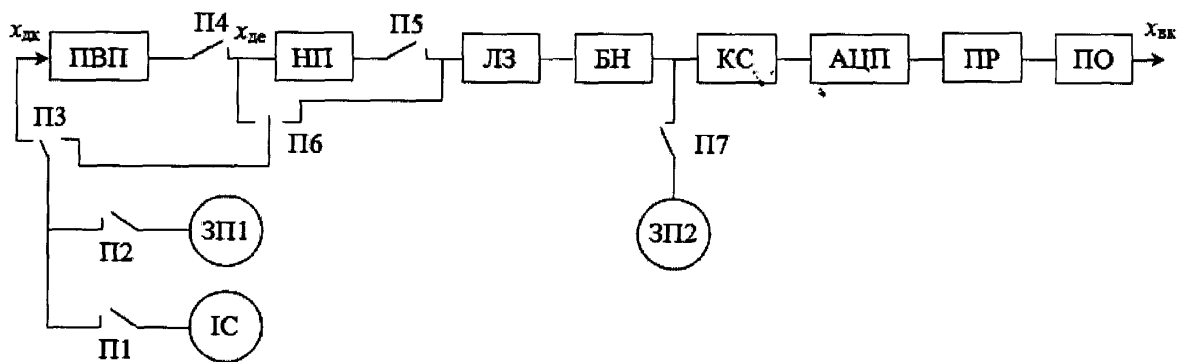


Рис. 4.2. Схема повірки вимірювальних каналів з електричним виходом первинного вимірювального перетворювача:

ІС- імітатор сигналу;

ЗП1 – зразковий прилад для вимірювання величини вхідного сигналу (взірцева міра);

П1-П7 – перемикачі;

ЗП2 – зразковий прилад вимірювання величини вихідного аналогового сигналу;

$X_{дк}$ – дійсне значення сигналу X на вході вимірювального каналу (вхідний сигнал ВК);

$X_{де}$ – дійсне значення сигналу X на вході елемента вимірювального каналу (вхідний сигнал елемента ВК);

$X_{вк}$ – виміряне значення сигналу X на виході вимірювального каналу (результат вимірювання або вихідний сигнал ВК).

ВК САК ГПА повіряються комплексно, включаючи первинні вимірювальні перетворювачі (ПВП), нормуючі перетворювачі (НП), гальванічні розв'язки (ГР), лінії зв'язку (ЛЗ), блоки навантажень (БН), комутатори сигналів (КС), аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП), процесор (ПР) і пульт оператора (ПО). Ця сукупність ЗВ і ЛЗ, розподілених у просторі, складають неперервний вимірювальний ланцюг від ПВП (давача) до термінального пристрою [92]. Якщо експериментальне визначення або контроль метрологічних характеристик ВК викликає технічні труднощі, тоді передбачено відокремлення давача із вимірювального ланцюга і оцінювання результуючої метрологічної характеристики ВК експериментально-розрахунковим методом.

Вхідним сигналом ВК під час повірки в контрольованих точках діапазону вимірювання є фіксоване значення взірцевої міри, яка імітує технологічний параметр, а результатом вимірювання є іменоване число, зареєстроване на принтері. Розглядатимемо конкретну систему, яка була розроблена і використовується на ГПА Ц-6,3 ДКС «Більче-Волиця». Схему комплексу технічних засобів САК ГПА Ц-6,3 наведено на рис.4.3.

Структурна схема САК ГПА Ц-6,3 в комплексі складається з давачів (первинних вимірювальних перетворювачів - ПВП) і виконавчих механізмів (на рис.4.3 не показано); пристрою керування (ПК); комп'ютерної мережі; пристрою оператора (ПО) – робочої станції. САК ГПА виконує наступні функції: автоматичний пуск агрегату з ручним (за командою оператора) завантаженням в трасу і підтримку заданого режиму роботи: автоматичне розвантаження на холостий хід; підтримку агрегату в стані готовності до запуску з контролем умов готовності; автоматичний пуск агрегату; нормальну зупинку агрегату; аварійну зупинку агрегату із стравлюванням газу із контура нагнітача за командою оператора або у випадку спрацювання захисту; екстрену аварійну зупинку агрегату при відмові основних функціональних вузлів САК впливом на виконавчі механізми через фізичні канали.

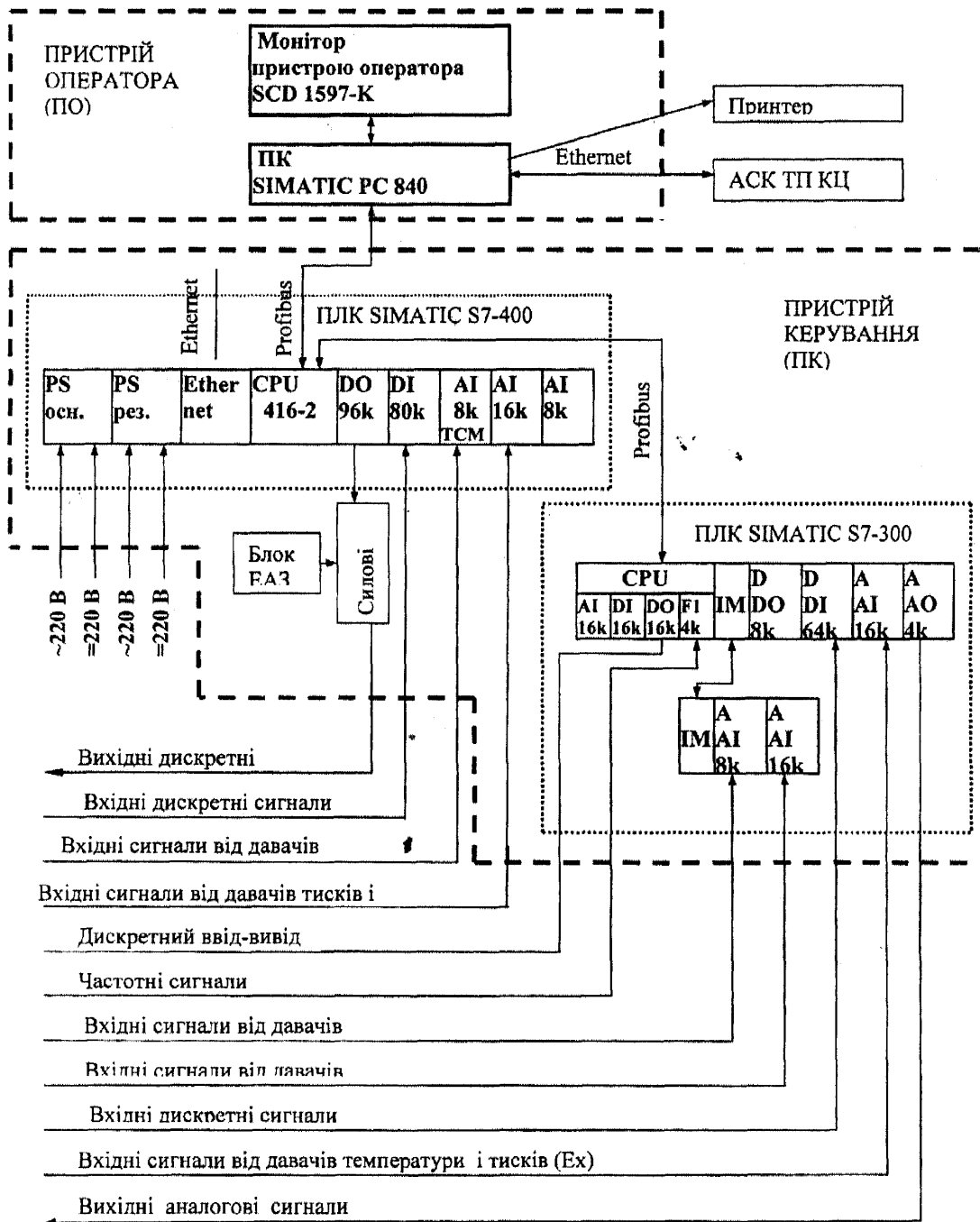


Рис 4.3. Схема комплексу технічних засобів САК ГПА Ц-6,3

Швидкодія каналів дискретного керування та захисту ГПА – не більше 100 мс, а каналів керування та захисту ГПА стосовно температурних параметрів – не більше 3 сек.

Вхідні та вихідні сигнали електричних трактів (ЕТ) наступні:

- *Кількість вхідних сигналів*: постійного струму 4-20 мА – 30; імпульсних з частотою 0-10 кГц – 4; від термопар – 4; від термометрів опору – 24; дискретних – 144.

Всі вхідні аналогові і дискретні канали гальванічно розв'язані від внутрішньої шини та між собою. Всі аналогові канали і ПВП нагнітача іскробезпечного виконання.

- *Кількість вихідних сигналів*: постійного струму 4-20 мА – 2; дискретних – 64.

Максимальний струм навантаження, який комутують виконавчі органи САК при кожному вихідному сигналі керування не перевищує:

- 2,0 А за напругою 220 В, 50 Гц змінного струму;
- 5,0 А за напругою 24 В постійного струму;
- 1,0 А за напругою 220 В постійного струму.

САК ГПА – засіб автоматичного керування, що містить вимірювальні канали, до складу яких входять відповідні ЕТ і ПВП.

Вимірювальні канали (ВК) САК ГПА Ц-6,3 мають структуру двох видів:

- давач (ПВП) – лінія зв'язку – модуль зв'язку з об'єктом і процесор в складі комплексу;
- давач (ПВП) – нормуючий перетворювач – лінія зв'язку – модуль зв'язку з об'єктом і процесор в складі комплексу.

Ця сукупність засобів вимірювання і ЛЗ, розподілених у просторі, складає неперервний вимірювальний ланцюг від давача до термінального пристрою.

Вхідним каналом ВК під час повірки в контрольованих точках діапазону вимірювання є фіксоване значення взірцевої міри, яка імітує технологічний параметр, а результатом вимірювання (вихідним сигналом) є іменоване число, зареєстроване на принтері.

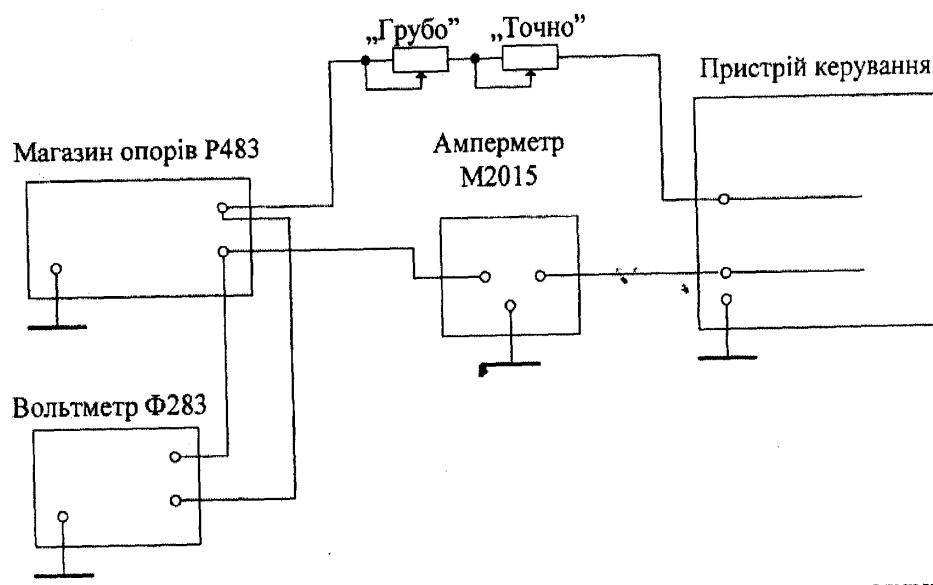


Рис. 4.4. Схема метрологічної атестації (МА) електричних трактів тиску, перепаду тиску, температури повітря на вході ПОП, вібрації нагнітача, осьового зсуву нагнітача та рівня оливи

Із рис. 4.4 випливає, що при МА САК ГПА експериментальні дослідження ВК, через специфіку цієї системи, можливо виконати лише по частинним способом експериментально-розрахунковим методом. При цьому дослідження електричного тракту (ЕТ) САК ГПА здійснюють експериментально у відповідності до схеми рис.3, а довірчу границю зведеної похибки ВК САК ГПА знаходять розрахунковим методом із врахуванням реальних значень довірчих границь допустимих похибок ПВП, взятих із їх паспортів або із свідоцтв про їх МА чи повірку.

Експериментальні дослідження ЕТ температури із рис.4.4 здійснюють методом прямих вимірювань за допомогою калібратора (міри) опору – магазина опору Р4831 (ЕТ із вхідними сигналами від термометрів опору) та за допомогою калібратора (міри) напруги МК4702 – ЕТ із вхідними сигналами від термоелектричних перетворювачів (термопар).

Експериментальні дослідження ЕТ тиску, перепаду тиску, температури повітря на вході ПОП, вібрації нагнітача, осьового зсуву нагнітача та рівнів масла виконують у відповідності до схеми рис.4.3 методом непрямих вимірювань вихідного струму ПВП: при цьому силу струму визначають через виміряну за допомогою цифрового вольтметра Ф 283 спаду напруги на відомому значенні опору (200 або 100 Ом), відтвореному магазином опору Р4831, при цьому виставлять значення опору 4,00 мА; 8,00 мА; 12,0 мА; 16 мА і 19,84 мА. Для цього змінними резисторами «Грубо» і «Точно» виставляють 4,00; 8,00; 12,00; 16,00 і 19,84 мА (тобто приблизно 5380...5580 Ом; 2510...2620 Ом; 1482...1660 Ом; 963...1185 Ом; 605...910 Ом відповідно), орієнтовано контролюючи струм за допомогою амперметра М2015. Точне значення виставленого струму визначають за показами вольтметра Ф283 і значеннями опору 200 Ом для струмів 4 і 8 мА та 100 Ом - для решти значень струмів. При цьому покази магазина Р4831 виставляють методом «дев'яток», тобто наступним чином: $(1 \times 100 \text{ Ом}) + 9 \times 10 \text{ Ом} + 9 \times 1 \text{ Ом} + 9 \times 0,1 \text{ Ом} + 10 \times 0,01 \text{ Ом}$. Для кожного значенні виставленого струму фіксують 20 показів дисплея пристрою керування.

Оцінку довірчої границі зведеної похибки ЕТ ($\Delta_{\text{ЕТ}}$) за результатами експериментальних спостережень при заданій ймовірності $P = 0,95$ здійснюють у відповідності до МІ 1317-86 за формулою:

$$\Delta_{\text{ЕТ}} = kS_{\Sigma}, \quad (4.1)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від заданої ймовірності P_d ; при цьому, якщо $P_d = 0,95$, то $k = 1,96$.

S_Σ – оцінка сумарного середньоквадратичного відхилення результату вимірювання ЕТ:

$$S_\Sigma = \sqrt{S^2(x_i) + \frac{1}{3} \sum_1^n \theta_i^2}, \quad (4.2)$$

де S – середнє квадратичне відхилення похибки відповідного ЕТ;

θ_i – границя i -тої не вилученої систематичної похибки ЕТ.

Оцінку середньоквадратичного відхилення похибки виконують за формулою ГОСТ 8.009:

$$S(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - x_{0i})^2}{n-1}}, \quad (4.3)$$

де x_i – i -тий показ ЕТ у певній контрольованій точці його діапазону вимірювання;

x_{0i} – i -тий показ робочого еталону у цій же контрольованій точці ЕТ;

n – кількість спостережень ($i = 1, \dots, n$).

Оцінку динамічної складової похибки ВК здійснюють (за необхідності) згідно з методикою ГОСТ 8.508.

4.3. Програма проведення помпажних тестів на ГПА ст. №4 типу Ц-6,3ВА ЗПЧ/46-1,7 з газотурбінним приводом Д-336-2 для ДКС «Дашава» УМГ «Львівтрансгаз»

Об'єктом випробувань є підсистема автоматичної ідентифікації помпажних характеристик та антипомпажного регулювання (АПР), що функціонує у взаємодії з центральною частиною САК ГПА Ц-6,3, системою

керування подачею палива, швидкодіючим антипомпажним клапаном (АПК) ("Моквелд"), який встановлений на вихідному колекторі (послідовно з краном №6) обв'язки нагнітача, та призначений для антипомпажного регулювання та захисту цього нагнітача при наближенні до помпажних явищ. Ця програма розроблена згідно "Технічних вимог до систем антипомпажного регулювання відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів", які затверджені наказом ДК "Укртрансгаз" №399 від 30.12.1999 р. та "Програми випробувань антипомпажного регулювання ДКС "Більче-Волиця", а також згідно акту від 18.05.2007р. про приймання у промислову експлуатацію системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом ГПА-Ц-6,3 постачання ТОВ "Укргазтех" для ДКС "Дашава" Дашавського ВУПЗГ УМГ "Львівтрансгаз".

У даній програмі використовуються такі терміни:

Помпаж – системи "нагнітач ГПА-трубопровід" є автоколивальний процес обміну енергії між частинами системи "нагнітач ГПА" і "трубопровід". Втрати стійкості роботи цієї системи виникає при неузгодженості витратно-напорних характеристик нагнітача та трубопроводу.

Першопричиною помпажу є зривні явища, що розвиваються в прилеглому шарі потоку газу на лопатках робочого колеса по мірі зниження витрати нагнітача до порогового (помпажного) рівня Q_n

На пристрої оператора САК ГПА робоча точка віддаленості від зони помпажу відображається на мнемосхемі «техніко-економічні показники (ТЕП)» у графічному вигляді і оцінюється по формулі:

$$L = (Q_{\text{ном}} - Q_n) / Q_n \cdot 100\%, \quad (4.4)$$

де $Q_{\text{ном}}$ – поточна об'ємна витрата;

Q_n – максимальна допустима помпажна об'ємна витрата.

Віддаленість робочої точки від помпажу в зоні помпажу протягом інтервалу часу більшого за 2,5 сек. вважається неусувним помпажем внаслідок якого виконується режим аварійної зупинки.

Передпомпаж - це зона нестабільної роботи яка відповідає знаходженню віддаленості робочої точки відцентрового нагнітача від лінії помпажу в межах від 1% до 5,0% (рис.4.5).

Знаходження лінії помпажу та лінії передпомпажу буде уточнено після першого етапу випробувань – визначення помпажної характеристики.

Неусувний помпаж – неможливість відновлення необхідної витрати через нагнітач за рахунок керування рециркуляцією протягом інтервалу, що не перевищує 2,5 сек., або перевищення допустимого перепаду тиску газу на захисній решітці.

Антипомпажний захист (АПЗ) це:

- ідентифікація помпажу з формування сигналу "Помпаж";
- переривання виниклого помпажу шляхом форсованого відкриття АПК з подальшим переходом до режиму антипомпажного регулювання (АПР);
- формування сигналу "АЗ" (аварійна зупинка) при ідентифікації неусувного помпажу.

Антипомпажне регулювання – випереджувальне керування антипомпажним клапаном що запобігає виникненню помпажу і обмежує мінімальне значення віддаленості робочої точки відцентрового нагнітача від межі помпажу на заданому рівні ($L_{уст.} \geq 5\%$):

- виведення робочої точки із небезпечної зони ($L < L_{уст.}$) при компенсації швидкозмінних і значних збурень;
- слідкування робочою точкою за лінією регулювання ($L \approx L_{уст.}$), яка зсувається адекватно зміщенню межі помпажу при зміні частоти обертання нагнітача (завантаження в трасу, виведення з траси);

- стабілізація робочої точки на віддаленості уставки ($L=L_{уст.}$) при компенсації сталих збурень;
- повного закриття АПК при ($L > L_{уст.}$);

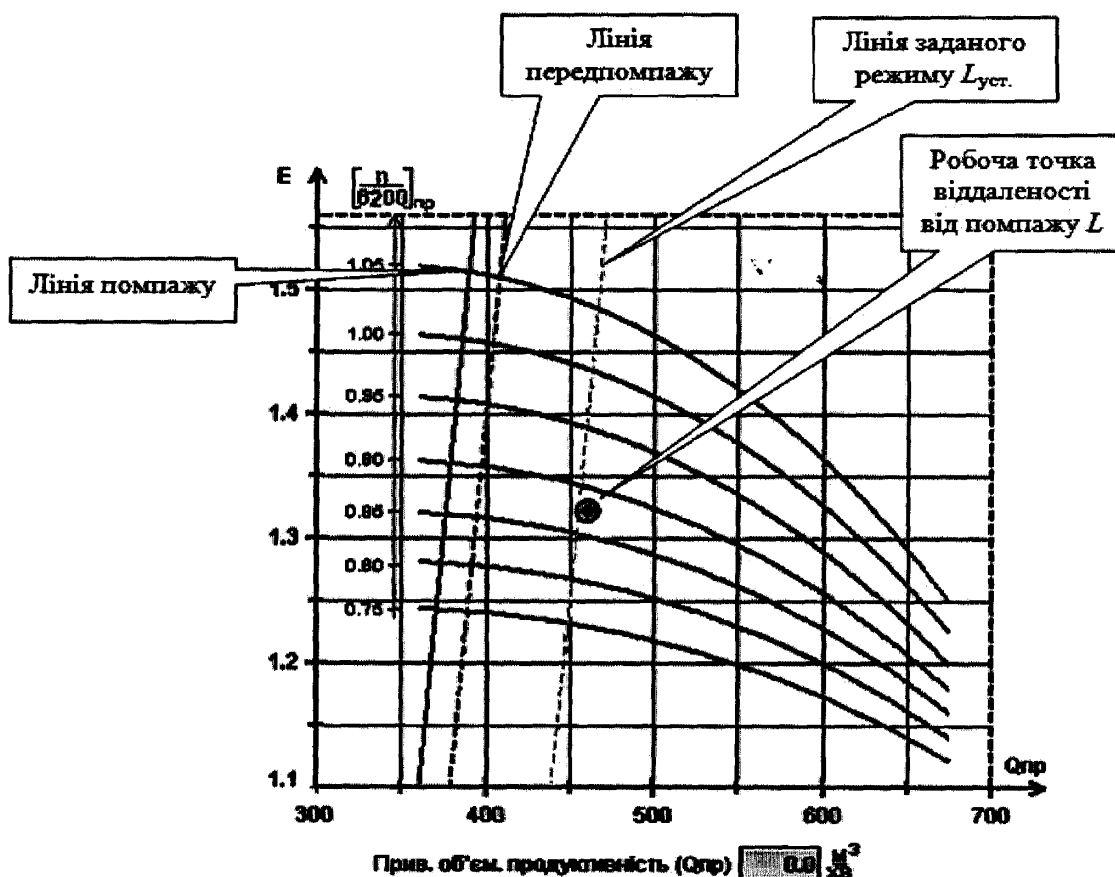


Рис.4.5. Помпажні характеристики нагнітача для пояснення зони нестабільної роботи

Уставка запасу регулювання ($L_{уст.}$) повинна вводитись в САК ГПА Ц-6,3 оперативним персоналом КЦ з пристрою оператора (ПО) САК ГПА Ц-6,3 і постійно відображатися на екрані ПО. Ввід уставки повинен бути захищений від несанкціонованої зміни через пароль.

Програма розроблена для поетапного проведення наступних випробувань на ГПА Ц-6,3 ДКС "Дашава" УМГ "Львівтрансгаз":

1-й етап – ідентифікація помпажної характеристики;

2-й етап – випробування роботи антипомпажного захисту і регулювання.

Виходячи з необхідності оцінки параметрів АПР в основних ("магістраль"), а не проміжних ("кільце") умовах роботи, випробування АПР повинні проводитися в режимі "магістраль". Випробування провести на ГПА Ц-6,3 з приводом Д-336-2 і новим типом змінної проточної частини: ЗПЧ-6,3/46-1,7.

Метою проведення цього випробування є уточнення помпажної характеристики на приведеній напорно-витратній характеристиці нагнітача (мнемосхема ТЕП на пульті оператора) див. рис.4.5. Ця характеристика формується по трьох точках на різних частотах обертання (6500 об/хв., 7200 об/хв. і 7900 об/хв.) силової турбіни (СТ) при роботі ГПА в режимі "магістраль" і різних робочих тисках в нагнітачі (визначається керівником випробувань) з створенням помпажа нагнітача шляхом прикриття режимного крану 6ВР.

Метод створення помпажної ситуації визначає керівник випробувань (пост1). Випробування проводяться при закритих вхідних та вихідних кранах КЦ, з організацією перекачування газу по схемі «станційне кільце». Для забезпечення проведення випробувань, під час роботи ГПА в режимі «МАГІСТРАЛЬ», шляхом плавного прикриття режимного станційного крану 6ВР типу «Моквелд» ДУ-300мм створюється помпажний режим завантаження агрегату. З дозволу керівника випробувань (пост1), на час проведення випробувань антипомпажний захист (АПЗ) - блокується, а система антипомпажного регулювання - відключається спеціалістами розробника САК ГПА Ц-6,3, про що виконується запис в оперативному журналі.

По команді керівника випробувань (пост1) проводиться запуск ГПА в режимі "Магістраль". Нагнітач ГПА доводиться до помпажного стану, по команді керівника випробувань (пост1), при швидкості обертання $CT=6500$ об/хв., а учасниками експерименту ідентифікується помпаж цього нагнітача.

Початком розвитку помпажних явищ в нагнітачі вважається самовільна, комплексна зміна параметрів ГПА, а саме:

- зміна швидкості обертання CT , з розвитком коливального процесу;
- поступлення повідомлення «Помпаж» в журнал подій САК ГПА від системи захисту;
- падіння значення параметру перепаду тиску на конфузори нагнітача;
- фіксування помпажу «на слух» постом №3.

Переривання виниклого помпажу проводиться шляхом форсованого відкриття АПК ГПА з пульта оператора, пост №1, або поверненням режимного крану 6ВР типу «Моквелд» (пост 2) у відкрите положення. Як наслідок - ГПА переводиться до стаціонарного режиму роботи. Результати проведених випробувань при швидкості обертання $CT=6500$ об/хв. занести до протоколу випробувань. Нагнітач ГПА доводиться до помпажного стану по команді керівника випробувань (пост1) при швидкості обертання $CT=7200$ об/хв. і ідентифікується помпаж цього нагнітача способом визначеним в пункті 3.4 (Переривання виниклого помпажу проводиться шляхом форсованого відкриття АПК ГПА з пульта оператора, пост №1, або поверненням режимного крану 6ВР типу «Моквелд» (пост 2) у відкрите положення). ГПА переводиться до звичайного режиму роботи. Результати проведених випробувань при швидкості обертання $CT=7200$ об/хв. занести до протоколу випробувань. Нагнітач ГПА доводиться до помпажного стану по команді керівника випробувань (пост1) при швидкості обертання $CT=7900$ об/хв. і ідентифікується помпаж цього нагнітача способом. (Переривання виниклого помпажу проводиться шляхом форсованого

відкриття АПК ГПА з пульта оператора, пост №1, або поверненням режимного крану 6ВР типу «Моквелд» (пост 2) у відкрите положення).

ГПА переводиться до звичайного режиму роботи.

Результати проведених випробувань при швидкості обертання $ST=7900$ об/хв. занести до протоколу випробувань. По команді керівника випробувань (пост1) розробником САК ГПА Ц-6,3 підключаються АПЗ і відновлюється антипомпажне регулювання, про що робиться запис в журналі. Отримані результати виконаних випробувань вносяться в математичну модель даного типу нагнітача, на підставі цих даних проводиться розрахунок і побудова помпажної характеристики нагнітача, що пройшов випробування.

Математична модель і програмне забезпечення розроблене з застосуванням матеріалів автора дисертаційної роботи. За результатами розрахунків розробником системи вносяться зміни до програмного забезпечення САК ГПА. Результати проведених змін заносяться до спільного протоколу за участі спеціалістів з числа експлуатаційного персоналу і розробника САК ГПА.

Антипомпажний захист і регулювання

Метою проведення цього етапу випробування є перевірка роботи антипомпажного захисту і регулювання, після внесення в програмне забезпечення САК ГПА змін помпажної характеристики. Перевірка вводу захищеності уставки (L уст.) від несанкціонованої зміни через пароль і контроль діапазону припустимих (від 5% до 100%) значень. Ці перевірки можуть проводитись на робочому так і на зупиненому ГПА. Результати проведених випробувань занести до протоколу випробувань. Випробування антипомпажного захисту і регулювання. По команді керівника випробувань (пост1) на пульта оператора САК ГПА Ц-6,3 включається антипомпажне регулювання кнопкою "АПР". Нагнітач ГПА доводиться до помпажного стану

по команді керівника випробувань (пост1) при будь-яких обертах СТ способом визначеним в пункті 3.1. Переривання виниклого помпажу повинно відбутися в автоматичному режимі, шляхом випереджувального регулювання, а при наростанні помпажних явищ - з форсованим відкриттям АПК. Результати проведених випробувань занести до протоколу випробувань. Перевірка факту переривання виниклого помпажу за допомогою форсованого відкриття АПК, з подальшим переходом до режиму регулювання і стабілізації роботи ГПА.

Випробування режимів обмежувального регулювання. Це випробування проводиться з включеним режимом антипомпажного регулювання. Виведення робочої точки із небезпечної зони ($L < L_{уст}$) при компенсації швидкозмінних і значних збурень. По команді керівника випробувань (пост1) при будь-яких обертах СТ на працюючому ГПА задається уставка робочої точки запасу по помпажу, наприклад $L_{уст} = 30\%$, на пульті оператора САК ГПА Ц-6,3. По команді керівника випробувань (пост1) створюються швидкозмінні і значні збурення в магістралі шляхом поступового прикриття загальностанційного режимного крану не доводячи до помпажу. Переконавшись що робоча точка, короткочасно перемістившись вліво від лінії заданого режиму $L_{уст}$, вернулась вправо від цієї лінії (рис.4.5.).

Результати проведених випробувань занести до протоколу випробувань.

Слідкування робочою точкою за лінією регулювання ($L \approx L_{уст}$) яка зсувається адекватно зміщенню межі помпажу при зміні частоти обертання нагнітача (завантаження в магістраль, виведення з магістралі). По команді керівника випробувань (пост1) при будь-яких обертах СТ на працюючому ГПА задається уставка робочої точки запасу по помпажу, наприклад $L_{уст}=25\%$, на пульті оператора САК ГПА Ц-6,3. По команді керівника випробувань (пост1) змінюються оберти роботи СТ, наприклад в границях +/- 500 об./хв. Переконавшись що робоча точка зсувається адекватно зміщенню

межі помпажу по лінії заданого режиму $L_{уст}$ (рух точки вгору при збільшенні обертів СТ і вниз при їх зменшенні) (рис.4.5). Подібний рух точки буде відбуватися при завантаженні в магістраль і виведення з магістралі ГПА.

Результати проведених випробувань занести до протоколу випробувань.

Стабілізація робочої точки на віддаленості уставки ($L = L_{уст}$) при компенсації сталих збурень. По команді керівника випробувань (пост1) при будь-яких обертах СТ на працюючому ГПА задається уставка робочої точки запасу по помпажу, наприклад $L_{уст}=15\%$, на пульті оператора САК ГПА Ц-6,3.

Переконайтеся що робоча точка знаходиться на лінії заданого режиму $L_{уст}$ на протязі певного часу (рис.4.5). Результати проведених випробувань занести до протоколу випробувань. Повного закриття АПК при ($L > L_{уст}$). По команді керівника випробувань (пост1) при будь-яких обертах СТ на працюючому ГПА задається уставка робочої точки запасу по помпажу, наприклад $L_{уст} = 10\%$, на пульті оператора САК ГПА Ц-6,3. По команді керівника випробувань (пост1) створюються стійкий режим системи "нагнітач ГПА-трубопровід". Переконайтеся що робоча точка зсувається вправо, а АПК повністю закривається. Результати проведених випробувань занести до протоколу випробувань. За результатами проведення помпажних тестів складається акт, де дається оцінка успішності експерименту та відповідності отриманих результатів до паспортних експлуатаційних характеристик.

За результатами випробувань розробником САК ГПА – виконується внесення реальних помпажних та навантажувальних характеристик, для випробуваного типу нагнітача в підсистемі антипомпажного захисту і регулювання.

4.4. Результати попередніх випробувань підсистеми антипомпажного регулювання та захисту на газоперекачувальному агрегаті (ГПА) № 9 дотискувальної компресорної станції (ДКС) “Більче-Волиця”

Розроблена підсистема повністю інтегрована в САК ГПА на базі контролерів “Siemens”, не вимагає спеціальних навиків та знань, а також оперативного і поточного втручання експлуатаційного персоналу в її роботу.

Всі діагностичні та робочі повідомлення від системи АПР фіксуються в журналі подій САК ГПА і мають наступні характеристики:

1. Попереджувальне повідомлення “ПП” – передпомпаж нагнітача. При даному повідомленні виконується випереджувальне керування АПК.
2. Попереджувальне повідомлення “МП” – м’який помпаж нагнітача. При даному повідомленні виконується швидкісне керування АПК.
3. Аварійне повідомлення “ЖП” – жорсткий помпаж нагнітача. При даному повідомленні виконується форсоване відкриття АПК.
4. Аварійне повідомлення – “Неусувний помпаж”, формується при наявності жорсткого помпажу нагнітача більше 2-ох секунд. При даному повідомленні здійснюється аварійна зупинка агрегату.
5. Показник відкриття АПК – відображається на мнемосхемі 7 “ТЕП” піктограмою, з процентною шкалою стану та сигналізацією крайніх положень антипомпажного клапана “закритий – відкритий”.

На мнемосхемі 7 “ТЕП” відображено техніко-економічні показники роботи ГПА та графічну характеристику нагнітача з робочою точкою (рис.4.6). Основою принципу роботи підсистеми АПР є аналіз динамічної зміни комплексу параметрів двигуна і нагнітача в реальному часі без врахування їх абсолютних значень, що забезпечує безперервну роботу підсистеми без необхідності її налаштування та адаптації до даного типу агрегату. Одним з

найважливіших параметрів на підставі якого алгоритмом виноситься висновок про наявність помпажних явищ в контурі нагнітача, є сигнал, що отриманий від акустичного сенсора фірми “Simens”.

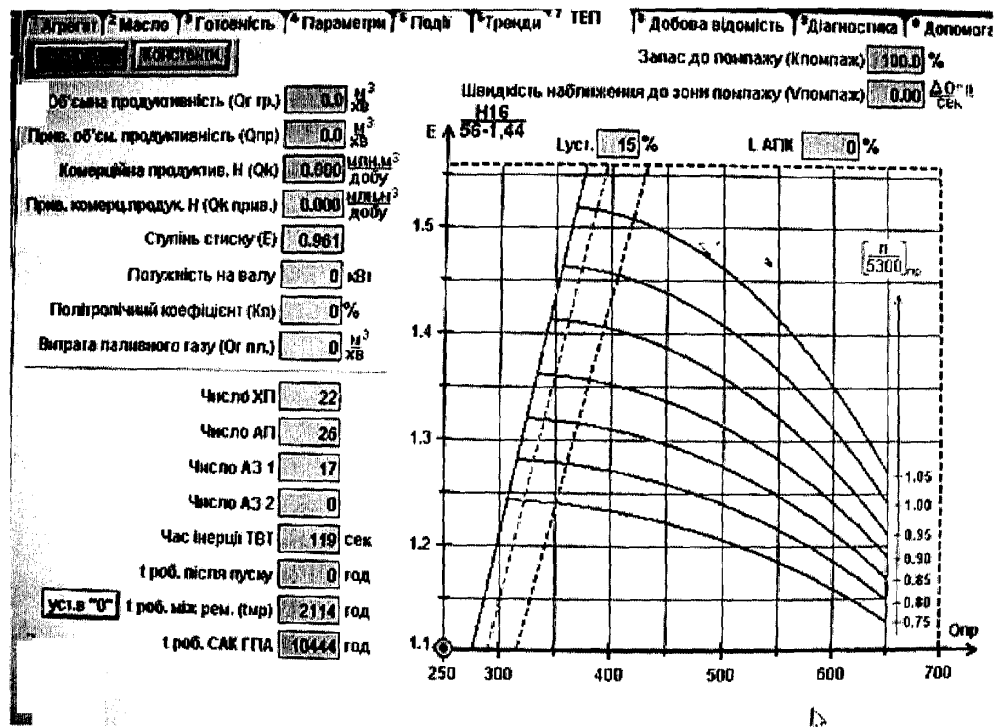


Рис.4.6. Характеристика нагнітача з робочою точкою та техніко-економічні показники роботи ГПА

На підставі аналізу поточного стану газоперекачувального агрегату і комплексу його параметрів підсистемою виноситься висновок про наявність помпажних явищ в нагнітачі та їх класифікація (ПП, МП, ЖП). Також аналізується швидкість розвитку самого процесу: так звана “швидкість входження в помпаж”. Далі підсистемою проводиться розрахунок процентного ступеню відкриття АПК (час реакції не більше 10 мс) і при потребі віддається команда на його керування, з занесенням відповідних повідомлень в журнал подій.

Контроль за керуванням АПК ведеться підсистемою безперервно, а також ведеться моніторинг розвитку помпажних явищ, на підставі яких керуюча дія може бути скоригована підсистемою АПР. При знятті помпажних явищ повністю та проходженні часу стабілізації, що складає близько 30-ти секунд, підсистема АПР видає команду на плавне (1,6-2% в секунду) закриття АПК “Моквелд”, чим забезпечується плавне завантаження ГПА в режим “Магістраль”. На ДКС “Більче-Волиця” було проведено попередні випробування підсистеми АПР за затвердженою Дочірньою Компанією “Укртрансгаз” програмою [95]. Мета випробувань: перевірити працездатність підсистеми АПР цілomu та відповідність її функцій технічному завданню. Суть випробувань: методом варіативного прикриття, а також повного закриття загально-станційних кранів 6-2 (Ду700мм), 6-2М (Ду300мм) і 6-2Р (Ду150мм), що забезпечують рух газу по “станційному кільцю” - отримати помпажні явища в контурі нагнітача агрегату №9. Відслідкувати реакцію підсистеми АПР на створення помпажних явищ та оцінити результати керування АПК.

Хід випробувань [96]:

Етап 1: кран 6-2р (Ду150) відкритий повністю; кран 6-2 (Ду700) закритий повністю. Кран 6-2М (Ду300) керується з ГЩУ-1 і поступово закривається по команді диспетчера. О 16.14 хв. ГПА №9 виводиться на режим “Магістраль” і забезпечує проходження газу по станційному кільцю через крани в положеннях (Етап 1). О 16.17 кран 6-2М різко закривається на 70%. Відпрацювання системи показано на графіках, що наведені на рис 4.7. Як видно з наведених графіків: АПК відкрився на 55% при виникненні помпажних явищ; АПК почав відпрацьовувати закриття, тобто автоматичне завантаження ГПА в “Магістраль”, але на межі 25% закритого положення помпажні явища повторилися і АПК повторно відпрацював відкриття до 80%.

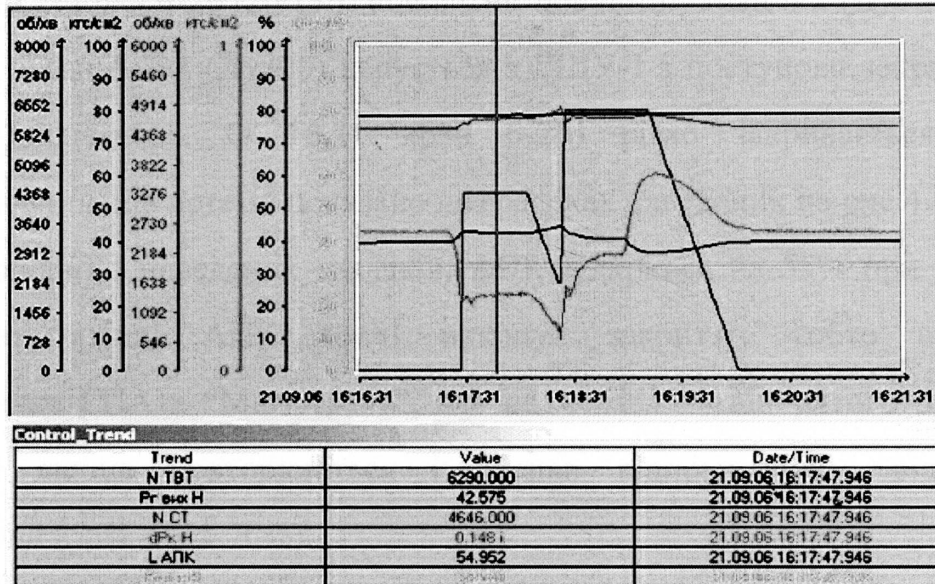


Рис. 4.7. Графіки зміни в часі параметрів ГПА при проведенні 1 етапу випробувань підсистеми АПР

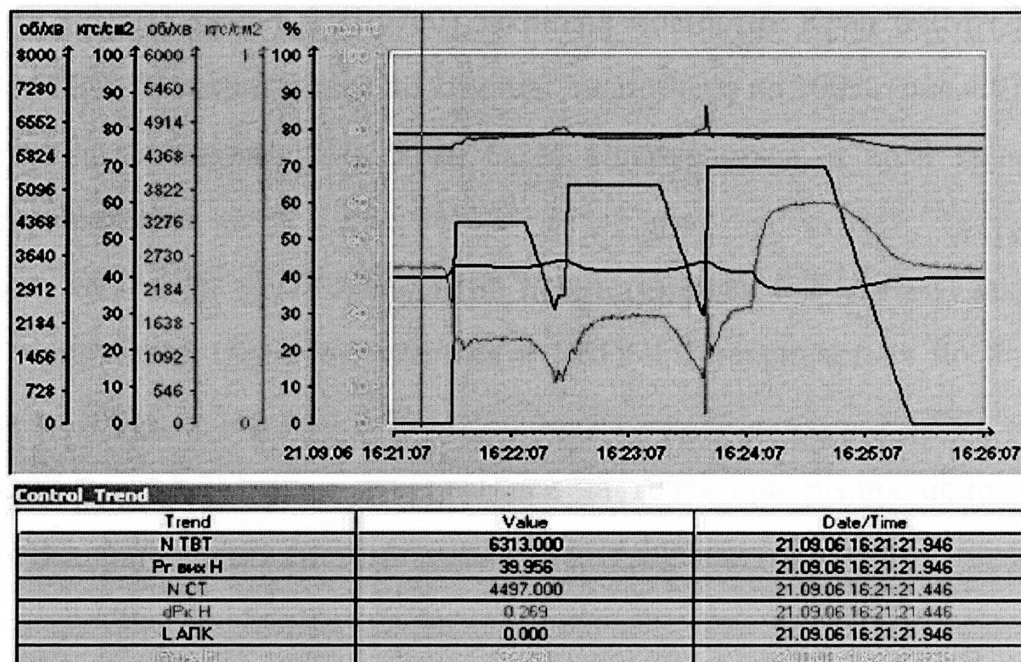


Рис. 4.8. Графіки зміни в часі параметрів ГПА при проведенні 2 етапу випробувань підсистеми АПР

Етап 2: кран 6-2р (Ду150) відкритий повністю; кран 6-2 (Ду700) закритий повністю. Кран 6-2М (Ду300) керується з ГЩУ-1 і поступово закривається по команді диспетчера. О 16.21 кран 6-2М різко закривається на 80%. Відпрацювання підсистеми показано на графіках наведених на рис.4.8

Як видно з наведених графіків: АПК відкрився на 55% при виникненні помпажних явищ; АПК тричі виконує закриття, тобто автоматичне завантаження ГПА в “Магістраль”, але на межі 35% відкритого положення - помпажні явища повторюються і клапан відпрацьовує відкриття по наростаючій (55%-65%-70%).

Як видно з графічного матеріалу, з кожним наступним циклом відпрацювання, підсистема АПР забезпечує більшу степінь відкриття АПК, з метою більш якісного усунення помпажних явищ. **Етап 3:** кран 6-2р (Ду150) відкритий повністю; кран 6-2 (Ду700) закритий повністю. Кран 6-2М (Ду300) керується з ГЩУ-1 і закривається по команді диспетчера на 100% (рис.4.9).

Після відпрацювання АПК кран 6-2М відкривається, а кран кран 6-2р (Ду150) закривається.

Етап 4: кран 6-2р (Ду150) закритий повністю; кран 6-2 (Ду700) закритий повністю. Кран 6-2М (Ду300) керується з ГЩУ-1 і закривається по команді диспетчера на 100%.

О 16.27 кран 6-2М різко закривається на 100% при різних положеннях крану 6-2р. Відпрацювання системи показано на графіках (рис.4.10).

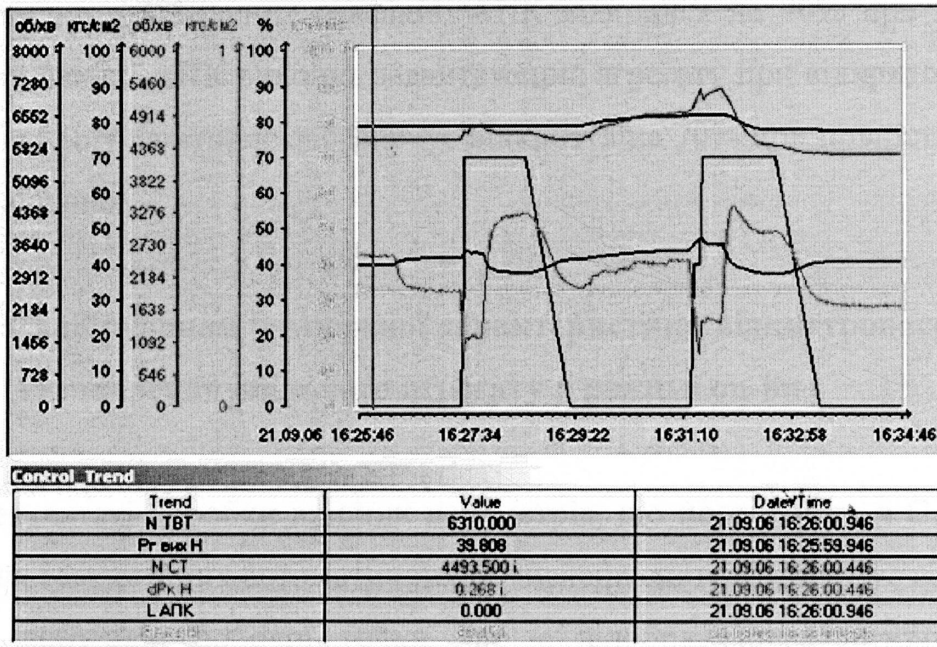


Рис. 4.9. Графіки зміни в часі параметрів ГПА при проведенні 3 етапу випробувань підсистеми АПР

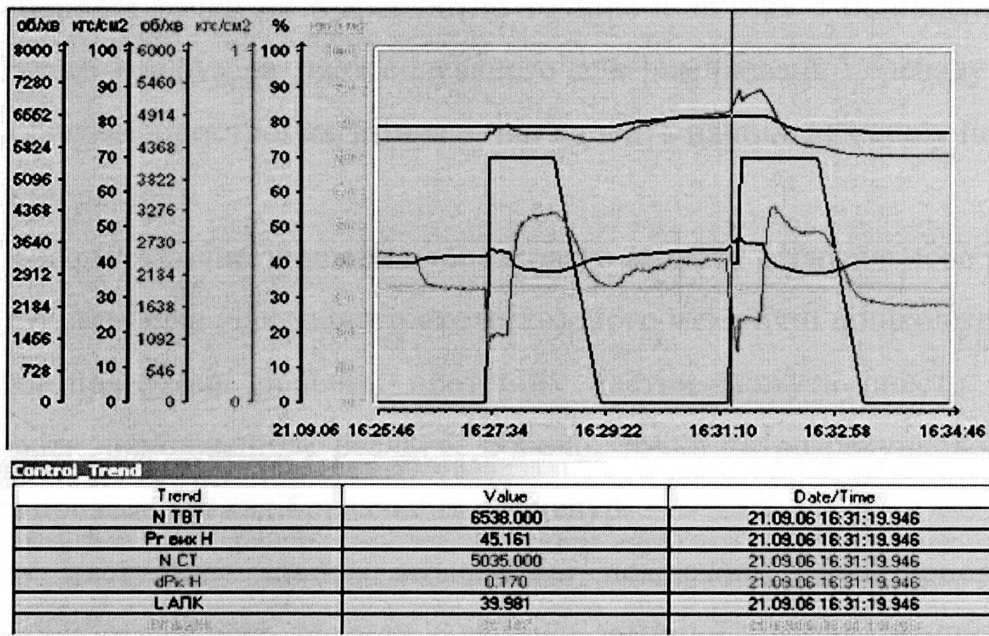


Рис. 4.10. Графіки зміни в часі параметрів ГПА при проведенні 4 етапу випробувань підсистеми АПР

Як видно з наведених графіків: АПК відкрився на 70% при виникненні помпажних явищ; АПК виконує завантаження агрегату при відкритому крані 6-2М, а після цього повторно забезпечує відкриття на 70% при повністю закритих режимних кранах.

4.5. Калібрування помпажної характеристики відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату в режимі on-line

В результаті обробки вхідних параметрів, що поступають в САК ГПА та проведення самостійних автоматичних обчислень система отримує всі необхідні дані для побудови робочої точки, що є відображенням поточного стану нагнітача та виконуваної ним транспортної роботи в режимі реального часу.

Проте, режими реальної експлуатації доводять, що розрахунковий метод визначення робочої точки не є абсолютно точним в зв'язку з індивідуальною характеристикою конфузора, застосовуваного для вимірювань перепаду тиску газу на звужуючому пристрої нагнітача – він вносить найбільш значну похибку в результати обчислень.

Крім цього механічне зношення лопаткового апарату нагнітального ротора відцентрового нагнітача (так званого «колеса»), його механічні пошкодження та забрудненість поверхонь робочих протічних частин можуть внести значні відхилення між знаходженням реальної робочої точки та розрахунковою, яка знайдена без проведення калібрувальних процедур.

А тому наступним етапом визначення помпажної характеристики є проведення калібрувального тесту із задіянням замірної ділянки компресорної станції, або роботи одного досліджуваного ГПА в магістральний газопровід з наявною на ньому замірною ділянкою.

Типова схема калібрування характеристики відцентрового нагнітача приведена на рис.4.11 і складається з наступних основних складових. Газоперекачувальний агрегат з ГТУ – газотурбінною установкою типу НК-16СТ та відцентровий нагнітач типу ВН-16/56-1,44 з приводом від силової турбіни СТ. САК ГПА - типу “Simens” виробництва ТОВ «Укргазтех» на базі процесорів S-7-400 та S-7-300.

Пульти оператора, або ПЕОМ типу ноутбук з встановленим програмним забезпеченням (ПЗ) WinCC – Windows Control Center розробки фірми “Simens” та ПЗ для опитування замірного комплексу “SuperFloo-II” типу “FlouWin”, або “FlouHost”. ПЕОМ під’єднується до САК ГПА за допомогою стандартного протоколу ProfiBus, а до витратомірного комплексу через СОМ-порт за протоколом RS-485.

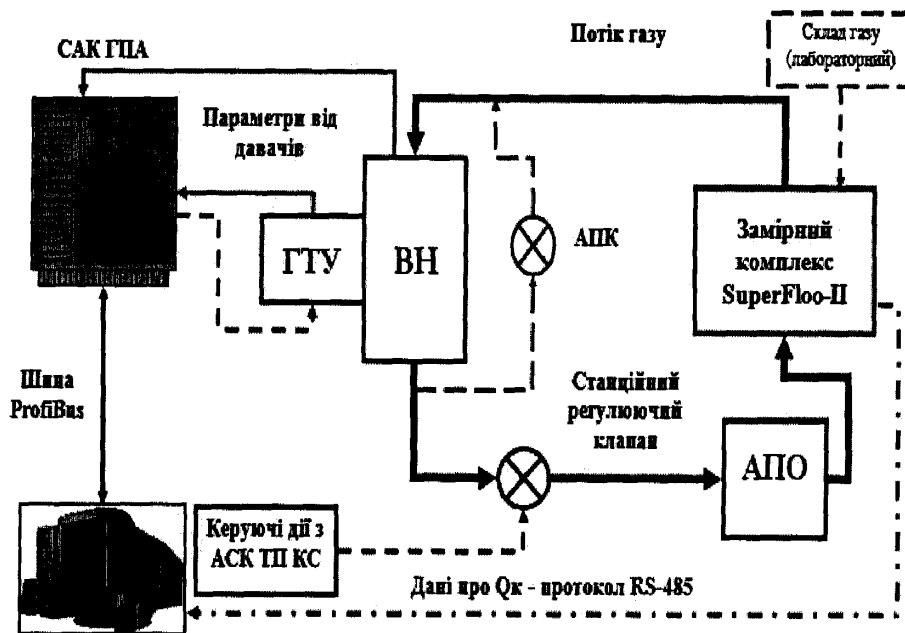


Рис.4.11. Типова схема калібрування характеристики відцентрового нагнітача

Регулюючий клапан типу RZD “Mokveld”, або “Fisher” великого діаметру ДУ 300...400 мм. - керований від автоматизованої системи керування технологічним процесом компресорної станції. Найбільш безпечним і зручним є використання регулюючого клапана, що керується від загальностанційної від пульта оператора чи ПЕОМ. Це забезпечує постійний контроль за положенням клапана та можливість точного аналогового регулювання його положення.

Антипомпажний клапан ГПА - керований від пульта оператора, або ПЕОМ через САК ГПА типу RZD “Mokveld”, або “Fisher” малого діаметру ДУ 150-300мм. Система антипомпажного регулювання на час процедури калібрування повинна бути переведена в режим захисту (без регулювання): відпрацювання аварійної зупинки ГПА, якщо виник неусувний помпаж на час більше ніж 2,5 секунди. У схему «станційне кільце» необхідно включити апарати повітряного охолодження, що забезпечать в процесі експерименту підтримання нормальної робочої температури газу після компримування.

Експеримент розпочинають з найбільш середньо-статистичного (ненавантаженого) режиму, а далі шляхом прикриття регулюючого клапана, або станційного режимного крану створюють опір руху газу по вихідному трубопроводу. Також поетапно проводиться підймання та пониження обертів силової турбіни ГТУ, а відповідно й нагнітача.

Мета першого етапу експерименту – перевірити відповідність положення робочої точки на графічній навантажувальній характеристиці нагнітача реальним показникам шляхом звіряння на різних режимах роботи ГПА наступних параметрів: $Q_{пр}$ – витрата через нагнітач, показник на осі X графіку повинен відповідати даним, які отримуються з витратомірної дільниці; $N_{ст}$ – оберти силової турбіни повинні відповідати положенню робочої точки на номограмі приведеній до номінальних; E – обчислена системою ступінь

підвищення тиску газу повинна відповідати положенню робочої точки відносно осі У.

За умови відповідності всіх перелічених показників з реальними параметрами, які контролюються замірною дільницею та системою САК ГПА – можна переходити до зміни режиму роботи агрегату шляхом впливу на регулюючий клапан, або керування обертами силової турбіни. Успішним можна вважати експеримент, який забезпечує максимально точне співпадіння показників перелічених параметрів в трьох різних режимах:

- велика витрата, низькі оберти, низька ступінь підвищення тиску газу: регулюючий клапан максимально відкритий;
- середня витрата, максимально можливі оберти, ступінь підвищення тиску газу вище середньої: регулюючий клапан прикривається до моменту забезпечення ступені підвищення тиску газу вище середньої;
- мінімальна витрата, високі оберти, ступінь підвищення тиску газу максимальна: регулюючий клапан максимально прикривається для забезпечення мінімально можливої витрати.

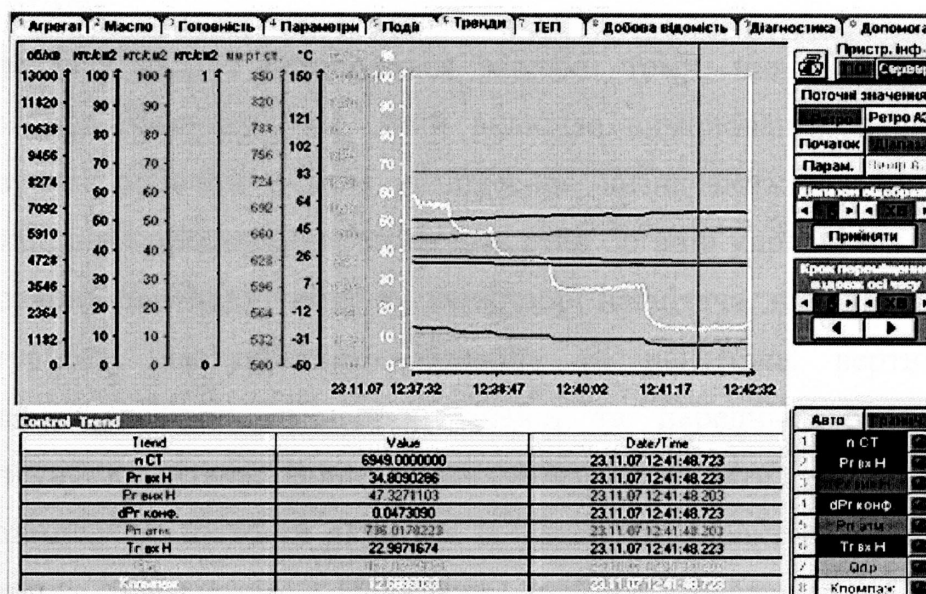


Рис.4.12. Результати експерименту по калібруванню нагнітача

На графіках показано експеримент по калібруванню нагнітача типу ВН-6,3/56-1,44 ДКС «Опарі-2», що був проведений 23.11.07. Параметр $Q_{пр}$ – відповідає показнику витрати через нагнітач в момент перетину його з вертикальною сірою лінією зрізу в моменти часу: 12год 39хв.- $203\text{м}^3/\text{хв}$. Та о 12год 41хв – $167\text{м}^3/\text{хв}$. З наведених графіків також можна від слідкувати і зміну $P_{вх}H$ від $35,3\text{ кгс}/\text{см}^2$ до $34,8\text{ кгс}/\text{см}^2$ і $P_{вих}H$ з $45,7\text{ кгс}/\text{см}^2$ до $47,32\text{ кгс}/\text{см}^2$, а також обертів $N_{ст}$ з $6750\text{ об}/\text{хв}$. до $6949\text{ об}/\text{хв}$. (рис.4.12). У ході експерименту велося порівняння з показниками миттєвої витрати газу через замірну дільницю Опарського ВУПЗГ і було підтверджено правильність обчислень, що виконуються програмним забезпеченням з побудови робочої точки на графічній характеристиці відцентрового нагнітача. З вирахованої робочої точки візуально можна зробити наступні висновки: ГПА з нагнітачем типу ВН-16/56-1,44 працює на обертах нижче номінальних – орієнтовно $0,89 \cdot 5300\text{ об}/\text{хв}$. = $4717\text{ об}/\text{хв}$., при підвищенні тиску газу $\approx 1,377$, з приведеною продуктивністю $Q_{пр} = 540\text{ м}^3/\text{хв}$. Підтримання робочої точки помпажної характеристики нагнітача поблизу помпажної зони дозволить забезпечити оптимальний режим роботи компресорної станції з максимальним завантаженням агрегатів і попередити аварійні ситуації.

Поставлена задача вирішується завдяки тому, що у способі захисту компресора від помпажу [66], який включає вимірювання параметрів, що характеризують робочий режим компресора визначають відмінність їх від заданої величини і пропорційно змінюють стан органів управління компресора. Це вимірювання перепаду тиску на конфузори нагнітача, швидкості обертання силової турбіни газотурбінного приводу та нагнітача, вертикального і горизонтального вібропереміщення заданої та передньої опор нагнітача, осьового зсуву нагнітача. Вони дають змогу визначити момент настання і ступінь розвитку помпажних явищ та їх вплив на характер зміни цієї групи технологічних параметрів. Приклади роботи програми (Додаток Р)

автоматичної ідентифікації помпажних характеристик у нормальному і передпомпажному режимах роботи ГПА наведено на рис. 4.13. і рис. 4.14.

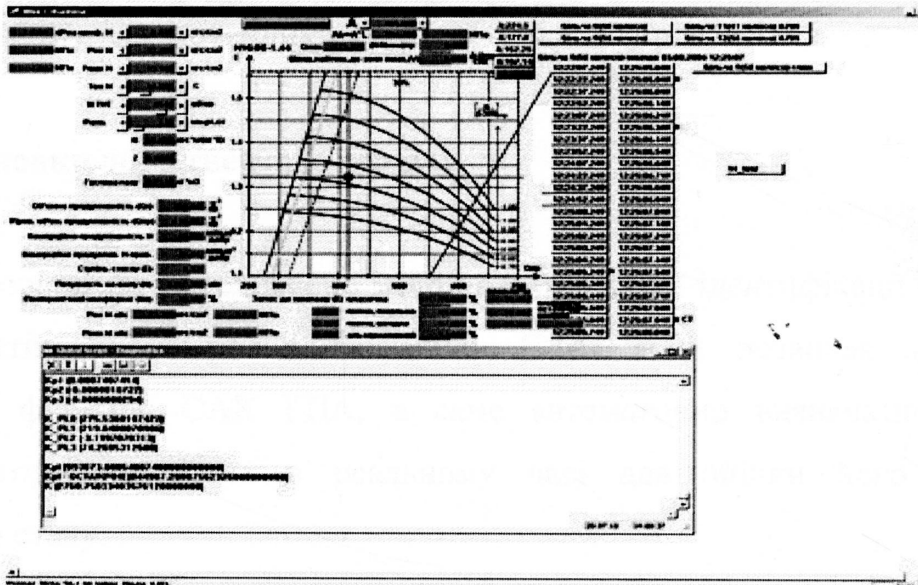


Рис. 4.13. Приклад роботи підсистеми автоматичної ідентифікації помпажної характеристики. Режим роботи ГПА – нормальний

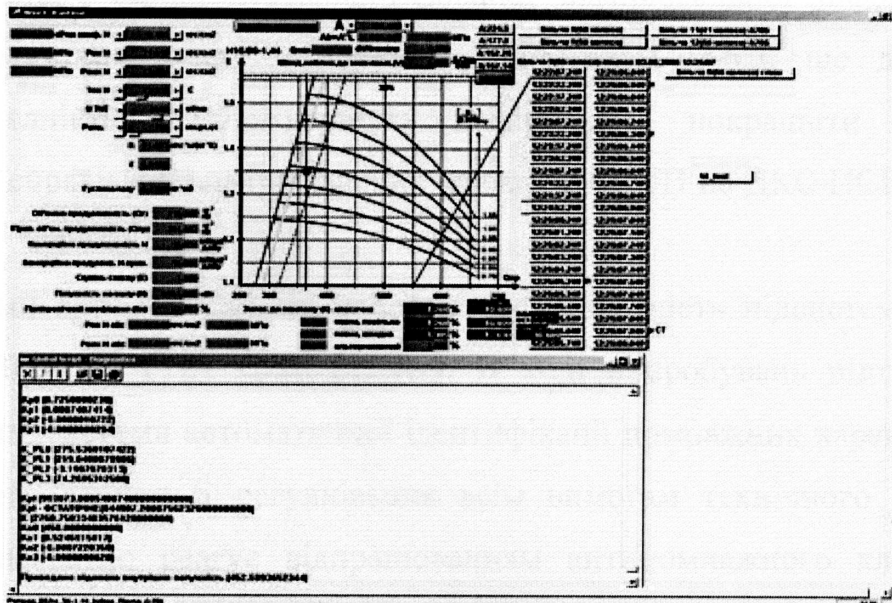


Рис. 4.14. Приклад роботи підсистеми автоматичної ідентифікації помпажної характеристики. Режим роботи ГПА – передпомпажний

Замкнутий контур регулювання та ідентифікації, що включає давачі, АЦП, програмний модуль контролера, виконавчі органи САК функціонує в одному темпі з керованим ГПА і підтримує його за допомогою керувальних дій в оптимальному для поточних умов перекачки газу режимі.

Висновки до четвертого розділу

1. Розроблено і досліджено метод автоматичної ідентифікації помпажних характеристик відцентрових нагнітачів ГПА, який дозволяє здійснювати додаткову функцію САК ГПА, а саме автоматично визначати помпажну характеристику нагнітача в реальному часі для оцінки його поточного технічного стану.

2. Розроблено схему метрологічної атестації електричних трактів тиску, перепаду тиску, температури повітря, вібрації нагнітача, осьового зсуву нагнітача та рівня оливи нестандартизованої вимірювальної інформаційної системи автоматичної системи керування агрегатом Ц-6,3, що дає змогу забезпечити єдність і достовірність вимірювань, покращити контроль метрологічної справності вимірювальних каналів АСКТП на ДКС ПСГ «Більче-Волиця».

3. Даними випробуваннями доведено працездатність підсистеми АПР в складі САК ГПА на ГПА Ц-16 ст. №9. В ході випробувань підтверджено відповідність підсистеми автоматичної ідентифікації помпажних характеристик антипомпажного захисту і регулювання всім вимогам технічного завдання. Підсистема адекватно реагує відпрацюванням антипомпажного клапана на створювані штучно помпажні явища. Створені в ході випробувань різні умови настання передпомпажних і помпажних явищ: різні оберти вільної турбіни 4400-4800 об/хв.; різна інтенсивність та степінь закриття режимних кранів дали,

в результаті, різний характер та швидкість антипомпажного захисту за допомогою клапана. При всіх випробуваних варіантах імітації помпажних явищ – підсистема АПР безвідмовно усувала помпажні явища і виводила ГПА в режим стійкої роботи, або наступного завантаження в режим “Магістраль”.

4. Встановлено, що при реальній роботі компресорного цеху і агрегата в режимі “Магістраль”, такої інтенсивності помпажні явища виникають не часто. Це обумовлено більшою протяжністю станційних комунікацій, в порівнянні з роботою “на кільце”, що забезпечує кращу стискуваність газу в значному об’ємі труби, а також призводить до “демпферування” процесу помпажу і більш плавного його виникнення.

5. Результати досліджень довели, що необхідно враховувати і обставини виникнення помпажних явищ при аварійних зупинках “паралельних” агрегатів, які не можуть зупинитися, (а відповідно і розвантажитися з “Магістралі”) миттєво. Процес перестановки кранів і зупинки самого нагнітача триває протягом 5-10 секунд, що забезпечує достатній часовий проміжок для розвантаження сусіднього агрегату системою АПР та виводу його в зону стійкої роботи.

В процесі реальної експлуатації наявність системи АПР на агрегаті забезпечує збереження його в режимі “Магістраль” і дає можливість без будь-яких часових та виробничих втрат повернути ГПА в нормальну роботу.

6. Розроблено алгоритм виконання процедури калібрування помпажної характеристики нагнітача ГПА в режимі on-line, ефективність якого підтверджена результатами експериментальних досліджень.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації наведені теоретичне узагальнення і нове вирішення важливої науково-практичної задачі у галузі автоматизації процесів керування, яка полягає у розробленні універсального способу і системи автоматичної ідентифікації помпажної характеристики для відцентрових нагнітачів незалежно від типу авіаційного газотурбінного приводу, який застосовується для приведення їх в дію, розробленні промислового взірця системи та здійснення його випробування.

За результатами проведених досліджень сформульовані та обґрунтовані такі наукові висновки:

1. На основі аналізу сучасного стану задачі автоматичної ідентифікації помпажних характеристик відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів з газотурбінним приводом встановлено, що традиційно ідентифікація помпажних характеристик ГПА здійснюється на основі обробки паспортних даних або фактичних характеристик відцентрових нагнітачів ГПА, але під час вирішення цієї задачі має місце невизначеність в апріорній інформації, яка може погіршити оцінки або вони можуть, навіть, втратити сенс. Доведена та обґрунтована доцільність розроблення універсального способу і системи автоматичної ідентифікації помпажної характеристики для однотипних відцентрових нагнітачів незалежно від типу авіаційного газотурбінного приводу, який застосовується для приведення його в дію.

2. Розроблено новий метод автоматичної ідентифікації помпажних характеристик відцентрового нагнітача ГПА як об'єкта керування, який реалізовано на базі удосконаленої методики визначення його витратно-напірних характеристик. Він дозволяє визначити реальні помпажні

характеристики для кожного типу нагнітача в режимі реального часу, що дозволить реалізувати більш точне регулювання нагнітача антипомпажним клапаном, що у свою чергу вплине на зниження аварійності при роботі у перехідних і передпомпажних режимах та забезпечить економію пускового газу.

3. Досліджено вплив кроку дискретизації інформативних параметрів на час перехідного процесу САК ГПА, що дало змогу вибрати оптимальний крок дискретизації $\Delta t \approx 7$ мс та збільшити швидкодію САК ГПА.

4. На основі статистичної обробки змін в часі масової витрати природного газу і ступені підвищення тиску відцентрового нагнітача ГПА отримано кореляційні функції масової витрати і ступеня підвищення тиску газу, що дало змогу визначити функцію передачі відцентрового нагнітача, його диференційне рівняння та використати їх для розв'язання задачі автоматичної ідентифікації помпажних характеристик.

5. Удосконалено загальну структуру САК ГПА і розроблено програмне забезпечення підсистеми автоматичної ідентифікації помпажних характеристик відцентрового нагнітача дотискувальної компресорної станції, яка реалізує запропонований метод ідентифікації і побудову помпажних характеристик нагнітачів із газотурбінним приводом в реальному часі шляхом контролю масової витрати і ступені підвищення тиску газу, що характеризують роботу нагнітача. Це дало змогу підвищити надійність експлуатації ГПА і КС в цілому, розширити можливу зону роботи відцентрових нагнітачів, прогнозувати реальну продуктивність кожного ГПА, зменшити об'єми рециркуляції транспортованого газу в передпомпажних режимах роботи компресорного цеху, а відповідно скоротити об'єми споживання паливного газу за рахунок розширення використовуваного робочого діапазону нагнітачів.

6. Розроблені у дисертації метод, підсистема автоматичної ідентифікації помпажних характеристик відцентрових нагнітачів ГПА та програмні засоби випробувані в експлуатаційних умовах дотискувальних компресорних станцій підземного сховища газу «Більче-Волиця» на ГПА Ц-16МВт з нагнітачами типу НЦ-16/41-1,45 і НЦ-16/29-1,6 цеху №1а і №2, а також на ГПА Ц-6,3МВт ст. №№ 3,4,5 ДКС «Дашава» з метою визначення реальних навантажувальних і помпажних характеристик нагнітачів типу НЦ-56 та НЦ-41. Розроблена система автоматичної ідентифікації помпажних характеристик відцентрових нагнітачів прийнята в промислову експлуатацію на ДКС «Більче-Волиця» Стрийського ВУПЗГ та на ДКС «Дашава» філії УМГ «Львівтрансгаз», що підтверджено відповідними актами впровадження.

Викладені у дисертації наукові положення, висновки і рекомендації використовуються у лекційному курсі «Автоматизація технологічних процесів і виробництв у нафтовій і газовій промисловості» для студентів ІФНТУНГ спеціальності 7.050202 «Автоматизоване управління технологічними процесами».

Результати роботи можуть бути використані підприємствами ДК «Укртрансгаз», НАК «Нафтогаз України», а також студентами спеціальності 8.050202 «Автоматизоване управління технологічними процесами» під час написання дипломних проєктів та магістерських робіт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про схвалення енергетичної стратегії України на період до 2030 року: розпорядження Кабінету Міністрів України від 15.03.2006р., № 145. – Режим доступу:
<http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi.nreg='45-2006%FO>.
2. Мамонов О.І. Впровадження енергозберігаючих технологій при протипомпажному керуванні нагнітачами / О.І.Мамонов, В.О.Таргонський, В.В.Ніщета // Інформаційний огляд ДК «Укртрансгаз».– 2006.– №1(37).– С.6-7.
3. Підземні сховища газу та їх роль в надійності транзитних поставок газу до Європи та газопостачання споживачів України // Офіційна веб-сторінка відділу зв'язків з громадськістю НАК «Нафтогаз України» - 03.07.2008. – Режим доступу:
<http://www.ngbi.com.ua/am/ctg.html>
4. Деркач М.П. Ефективність колекторної схеми зберігання і розподілу газу / М.П.Деркач // Нафтова і газова промисловість.– 2004.–№2.– С.48-49.
5. Козакевич В.В. Автоколебання (помпаж) в компресорах / В.В. Козакевич. – М.: Машиностроение.– 1974.– 264 с.
6. Система автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом з двигуном НК-16-СТ (САК ГПА) (і адаптацією до двигуна ДЗ36 САК ГПА Ц 6,3). Програма впровадженнь антипомпажного регулювання.– К.:ДК «Укртрансгаз», 2006.– 10 с.
7. Гімер П.Р. Вплив сумісної роботи свердловини і збірного колектора на продуктивність свердловини ПСГ / П.Р.Гімер, М.П.Деркач // «Нафта і газ України–2000»: зб.наук.праць за матеріалами 6-ої Міжнар. наук.-практ.конф. – Івано-Франківськ.–2000.– 98 с.
8. Гіренко С.Г. Метод автоматизованого захисту компресора докачуючої компресорної станції підземного сховища газу від помпажу / С.Г. Гіренко // Нафтогазова енергетика.– 2008.– №1(6) .– С.43-47.

9. Герасименко В.П. Вращающийся срыв в турбинном режиме работы компрессора / В.П.Герасименко, М.В.Бойко, А.А.Гарагуль, Н.Б.Налесный // Энергетические и технологические процессы и оборудование. – 2005. – №6. – С.65-71.
10. Технологічні вимоги до систем антипомпажного регулювання відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів. – К.: ДК «Укртрансгаз», 1999. – №399. – 9 с.
11. Цыпкин Я.З. Оптимальная идентификация динамических объектов / Я.З.Цыпкин // Измерения, контроль, автоматизация. – Вып.3[47]. – 1986. – С.47-60.
12. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя; пер. с англ. А.С.Манделя и А.В.Назина; под ред. Я.З.Цыпкина. – М.: Наука. – 1991. – 432 с.
13. Цыпкин Я.З. Синтез оптимальной настраиваемой модели в задачах идентификации / Я.З.Цыпкин // Автоматика и телемеханика. – 1981. – № 12. – С.62-67.
14. Цыпкин Я.З. Оптимальные критерии качества в задачах идентификации / Я.З.Цыпкин // Автоматика и телемеханика. – 1982. – № 11. – С.5-24.
15. Цыпкин Я.З. Оптимальные алгоритмы оценивания параметров в задачах идентификации / Я.З.Цыпкин // Автоматика и телемеханика. – 1982. – № 12. – С.9-23.
16. Измайлов Р.А. Нестационарные процессы в центробежных компрессорах / Р.А.Измайлов, К.П.Селезнев // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1995. – №11. – С.20-24.
17. Продовиков С. Опыт автоматизации сложных промышленных объектов на примере газокomppressorных станций / С. Продовиков, А.Макаров, В.Бунин, А.Черников // Системная интеграция. Нефтегазовая промышленность. – 1999. – №2. – С.16-25.
18. Ахмедзянов Д.А. Имитационное моделирование неустановившихся режимов работы авиационных ГТД с элементами систем управления:

- авторреф. дис. на соискание уч. степ. д-ра техн.наук: спец. 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов». – Уфа.– 2007.– 32 с.
19. Мислюк М.А. Моделювання явищ і процесів у нафтогазопромисловій справі: [навчальний підручник] / М.А.Мислюк, Ю.О.Зарубін. – Івано-Франківськ: Факел. – 1999.– 496с.
20. Гіренко С.Г. Моделювання елементів магістрального газопроводу як об'єкта управління / С.Г.Гіренко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008.–№3.– С.76-81.
21. Адаменко А.В. Идентификация технического состояния центробежных нагнетателей газоперекачивающих агрегатов, / А.В.Адаменко, В.А.Адаменко, О.А.Тевяшева // Радиоэлектроника и информатика. – Харьков, 1999.–№3.– С.24-30.
22. Гіренко С.Г. Математичне моделювання ланок підсистеми антипомпажного регулювання докачуючої компресорної станції підземного сховища газу / С.Г.Гіренко // Нафтогазова енергетика, 2008, №2(7). – С.48-52.
23. Кику В.Г. Адаптивные системы идентификации. В.Г.Кику, В.И.Костюк, В.Е.Краскевич, А.Н.Сильвестров, С.В.Шпит. – К.:Техника. – 1975. – 288 с.
24. Горбійчук М.І. Моделювання об'єктів і систем керування в нафтовій і газовій промисловості. Ч.ІІ / М.І.Горбійчук. – Івано-Франківськ: Факел. – 1999. – 226с.
25. Остапенко Ю.О. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування / Ю.О.Остапенко. – Київ: «Задруга» . – 1999. – 424 с.
26. Каминскас В. Идентификация динамических систем по дискретным наблюдениям / В. Каминскас. – Вильнюк: Мокслас. – 1985. – 152 с.
27. Бляут Ю.Є Аналіз методів ідентифікації помпажних характеристик газоперекачувальних агрегатів з газотурбінним приводом / Ю.Є.Бляут // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2007: Международная научно-практическая конференция: сборник научных трудов. – Одеса, 2007. – С.24-26

28. Трубопровідний транспорт газу / [Ковалко М.П., Грудз В.Я., Михалків В.Б., Тимків Д.Ф., Шлапак Л.С., Ковалко О.М.]: за редакцією М.П.Ковалка.– Київ: Агенство з раціонального використання енергії та екології, 2002.–600с.
29. Гіренко С.Г. Аналіз способів та систем автоматизації антипомпажного захисту та регулювання роботи газоперекачувальних агрегатів / С.Г.Гіренко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2007.– №6.– С.25-28.
30. Пат. 89302 Україна. Спосіб захисту компресора від помпажу / Беккер М.В., Шимко Р.Я., Семенцов Г.Н., Бляут Ю.Є., Гіренко С.Г., Петеш М.О., Сукач О.В., Репета А.Ф. - № а2008 07810; заявл. 09.06.2008; опубл. 25.11.2009, Бюл. № 22 . – 10 с.
31. Гіренко С.Г. Автоматичне антипомпажне регулювання відцентрового нагнітача дотискувальної компресорної станції: дис. на здобуття наук. ступ. канд. техн. наук: спец. 05.13.07 «Автоматизація процесів керування» / С.Г.Гіренко. – Івано-Франківськ. – 2010. – 187 с.
32. Марчук Я.С. Автоматическое определение приведенных характеристик нагнетателя / Я.С.Марчук, Г.С.Коденський, Д.В.Долинський, С.Г.Гіренко, Т.И.Ткаченко // Нафта і газ України–2002: 7^а міжнар. наук.- прак. конф. – Київ: Нора-прінт, 2003.– С.197-199.
33. Куцевич В.М. Построение гарантированных оценок параметров при ограниченной скорости изменения помех / В.М.Кунцевич // Кибернетика и вычислительная техника. – 1994. – Вып. 101. – С.54-58.
34. Волосов В.В. Робастные методы эллипсоидального оценивания состояния динамических систем при ограничениях на величину помехи измерения их выходы и скорость ее измерения / В.В. Волосов, В.Н. Шевченко // Автоматика–2008: науково-технічна конференція: збірник наукових праць. – Одесса, 2010. – С.100-103.
35. Трубопровідний транспорт газу / [Ковалко М.П., Грудз В.Я., Михалків В.Б., Тимків Д.Ф., Шлапак Л.С., Ковалко О.М.]: за редакцією М.П.Ковалка.– Київ: Агенство з раціонального використання енергії та екології, 2002.–600с.

36. Крутиков Т.Е. Система диагностирования предпомпажного состояния центробежного компрессора: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук спец. 05.04.06 «Вакуумная, компрессорная техника и пневмосистемы» / Т.Е.Крутиков. – Санкт-Петербург, 2003.–18 с.
37. Селезнев К.П. О нестационарных процессах в проточной части центробежных компрессоров / К.П.Селезнев, Р.А.Измайлов // Химическое и нефтяное машиностроение.–1972.– № 3.– С.34-38.
38. Измайлов Р.А. Нестационарные процессы в центробежных компрессорах / Р.А.Измайлов, К.П.Селезнев // Химическое и нефтяное машиностроение.– 1995.– № 11.– С.23-27.
39. Марчук Я.С. Досвід створення і впровадження в дію програмно-технічного обладнання і виробничих показників компресорних цехів (станцій) магістральних газопроводів (ІНФО-КЦ+) / Я.С.Марчук, М.В.Беккер, І.Н.Богаєнко, Г.С.Коденський, С.Г.Гіренко, А.К.Славінський // Нафта і газ України - 2002: 7^а Міжнародна науково-практична конференція: збірник наукових праць.– Київ, 2003.– С.289-291.
40. Алиев Р.А. Трубопроводный транспорт нефти и газа: [учебник ВУЗов] / Р.А.Алиев, В.Д.Белоусов, А.Г.Немудров и др. – М.: Недра, 1988.– 368 с.
41. Доброхотов В.Д. Центробежные нагнетатели природного газа / В.Д.Доброхотов. – М.: Недра. – 1972. – 127 с.
42. Довідник працівника газотранспортного підприємства / [В.В Розгонюк, А.А.Руднік, В.М.Коломеєв, М.А.Гричіль та ін.]. – К.: Росток, 2001. – 1091с.
43. Гостев В.И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления / В.И.Гостев. – К.: Радиоаматор. – 2003. – 512 с.
44. Аранович Б.И. Автоматическое управление газотурбинными установками / Б.И.Аранович, Ю.Т.Лячек, В.А.Олейников, А.А.Файнштейн.– Л.:Недра, 1974.–216 с.
45. Ревзин Б.С. Газотурбинные газоперекачивающие агрегаты / Б.С.Ревзин. – М.: Недра. – 1986. – 215 с.

46. Боровский С.А. Трубопроводный транспорт газа / С.А.Боровский, С.А.Щербаков, Е.И.Яковлев и др. – М.: Наука. – 1976. – 495 с.
47. Зельмат Мимун. Методы использования и управления режимами работы трубопроводного транспорта газа: дис. на соискание уч. степени докт. техн. наук: спец 05.13.07 «Автоматизация технологических процессов и производств»; спец. 5.15.13: «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ» / Мимун Зельмат. – М., 1992. – 332 с.
48. Никифоров И.В. Последовательное обнаружение изменения свойств случайных величин (независимые наблюдения, скалярный диаметр) / И.В.Никифоров // Измерения, контроль, автоматизация. – 1988. – № 2(66). – С. 21-29.
49. Фреїк Д.М. Аналіз сплеск-перетворень і їх прикладне застосування (огляд) / Д.М.Фреїк, В.І.Голота // Фізика і хімія твердого тіла. – Т. – 2005. – С. 181-193.
50. Кику В.Г. Адаптивные системы идентификации. В.Г.Кику, В.И.Костюк, В.Е.Краскевич, А.Н.Сильвестров, С.В.Шпит. – К.:Техника. – 1975. – 288с.
51. Громько В.Д. Самонастраивающие системы с моделью / В.Д.Громько, Е.А.Санковский. – М.: Энергия. – 1974. – 80 с.
52. Ситников В.С. Управление свойствами адаптивного цифрового фильтра при выборе периода дискретизации / В.С.Ситников, И.Д.Яковлева // Автоматика – 2008: Міжнародна конференція з автоматичного управління: тези доповідей. – Одеса, 2008. – С.544-546.
53. Карпаш О.М. Технічна діагностика бурового та нафтогазового обладнання: [посібник] / О.М.Карпаш. – Івано-Франківськ: Факел, 2007. – 272 с.
54. Коршунов Ю.М. Цифровые сглаживающие и преобразующие системы / Ю.М.Коршунов, А.И.Баюиков. – М.: Энергия, 1973. – 127 с.
55. Дехтяренко П.И. Определение характеристик звеньев системы автоматического регулирования / П.И.Дехтяренко, В.П.Ковалко. – М.: Энергия, 1973. – 127 с.

56. ГОСТ 8.009-84. ГСИ Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. – М.: Изд-во стан-ов, 1976. – 19 с.
57. Гольденберг Л.М. Цифровая обработка сигналов: [справочник] / Л.М.Гольденберг, Б.Д.Меташкин, М.Н.Поляк. – М.: Радио и связь, 1985. – 312 с.
58. Аронович Б.И. Автоматическое управление газотурбинными установками / Б.И.Аронович, Ю.Т.Лячек, В.А.Олейников, А.А.Файнштейн. – Л.: Недра, 1974. – 216 с.
59. Продовиков С. Опыт автоматизации сложных промышленных объектов на примере газокomppressorных станций. Системная интеграция / С.Продовиков, А.Макаров, В.Бунин, А.Черников // Нефтегазовая промышленность. – 1999. – № 2. – С. 26-25.
60. Палагушкин В.А. Интеллектуальные системы управления современными системами / В.А.Палагушкин // Проблемы нефтегазового комплекса. – Уфа. – 1998. – С. 43-48.
61. Елифанов С.В. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / С.В.Елифанов, В.Л.Кузнецов, И.И.Богаенко и др. – К.: Техніка. 1998. – 312 с.
62. Дранкова А.О. Методы трендового анализа в задачах диагностики дизель-генераторов / А.О.Дранкова, О.В.Глязева, Н.М.Муха, А.Р.Миська // Автоматика – 2008: XV міжнародна конференція з автоматичного управління: тези доповідей. – Одеса, 2008. – С. 162-164.
63. Горбійчук М.І. Моделювання та ідентифікація процесу заглиблення свердловин / М.І.Горбійчук, В.Б.Кропивницька // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2004, № 1. – 432 с.
64. Гіренко С.Г. Функції автоматизованої системи антипомпажного захисту та регулювання газоперекачувальних агрегатів на дотискувальних компресорних станціях підземних сховищ газу // Нафтогазова енергетика. – 2007.– №4(5).– С.43-46.

65. Гіренко С.Г. Аналіз способів та систем автоматизації антипомпажного захисту та регулювання роботи газоперекачувальних агрегатів/ С.Г.Гіренко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2007.– №6.– С.25-28.
66. Пат. 89302 Україна. Спосіб захисту компресора від помпажу / Беккер М.В., Шимко Р.Я., Семенцов Г.Н., Бляут Ю.Є., Гіренко С.Г., Петеш М.О., Сукач О.В., Репета А.Ф. - № а2008 07810; заявл. 09.06.2008; опубл. 25.11.2009, Бюл. №22 . – 10 с.
67. Пустыльник Е.И. Статические методы анализа и обработки наблюдений / Е.И.Пустыльник. - М: Наука.- 1968.-228с.
68. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. Справочное руководство. / Л.З. Румшинский. - М.: Наука.- 1971.-192с.
69. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. / Н.В.Смирнов, И.В. Дунин-Барковский.– М.: Наука.- 1969.-512с.
70. Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества. / Р. Шторм. – М.: Мир. -1970.-368с.
71. Петеш М.О. Оцінювання статистичних характеристик акустичного сигналу давача, встановленого на газоперекачувальному агрегаті / М.О.Петеш, Я.В.Рудавський, А.І.Лагойда // Нафтогазова енергетика, №2(13). – 2010. – С.70-76.
72. Семенцов Г.Н. Теорія автоматичного керування / Г.Н.Семенцов. – Івано-Франківськ: Факел. – 1999. – 610 с.
73. Назаренко М.В. Теоретичні засади та принципи побудови моделей динамічних процесів та їх регуляторів: [монографія] / М.В.Назаренко. – Кривий Ріг: Діоніс (ФОП Чернявський Д.О.). – 2010. – 204 с.
74. Бляут Ю.Є. Визначення кореляційного зв'язку ступеня підвищення тиску газу в газоперекачувальному агрегаті з масовою витратою газу / Ю.Є.Бляут, Л.І.Давиденко, Г.Н.Семенцов // Перспективные инновации в науке,

- образовании, производстве и транспорте'2011: научно-практическая конференция: сборник научных трудов. – Одесса, 2012. - С.14-20.
75. Бармин С.Ф. Компрессорные станции с газотурбинным приводом / С.Ф.Бармин, П.Д.Васильев. – Л.: Недра, 1968. – 280 с.
76. Бендат Дж. Применение корреляционного и спектрального анализа; пер. с англ / Дж.Бендат, А.Пирсол. – М.: Мир, 1983. – 312 с.
77. Попович М.Г. Теорія автоматичного керування: [підручник] / М.Г.Попович, О.В.Ковальчук. – К.: Либідь, 1997. – 544 с.
78. Полонский А.Д. Синтез алгоритма идентификации аномальных наблюдений / А.Д.Полонский // Вісник Сумського державного університету. – 1996. – № 2(6) . –С.102-103.
79. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем: [учебник для ВУЗОВ] / Н.Н.Иващенко. – М.:Машиностроение, 1978. – 736 с.
80. Дьяконов В.П. Mathcad 11, 12, 13 в математике: [справочник] / В.П.Дьяконов. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2007. – 958 с.
81. Волков В.Л. Разработка алгоритмов оценивания процес сов на основе Matlab / АПИ НГТУ; сост. В.Л.Волков // Арзамас: ООО «Ассоциация ученых», 2009. – 58 с.
82. Лазарев Ю.Ф. Начало программирования в среде Matlab: [учеб.пособие] // Ю.Ф.Лазарев. – К.: НТУУ «КПИ», 2003. – 424 с.
83. Баранник Н.Г. Выбор программных средств для разработки распределенных информационных систем в газотранспортной промышленности / Н.Г. Баранник, И.Н. Богаенко, С.Г.Гиренко, Г.С.Коденский, В.Л. Вялов // Вісник Технологічного університету Поділля.- 2002,-№3,-С.12-15.
84. Пат. 52128А Україна. Спосіб захисту компресора від помпажу / Гіренко С.Г., Спиченков Ю.М., Бобков В.Ю. - №2002021583; заявл.26.02.2002; опубл.16.12.2002, Бюл.№12. - 3с.
85. Гіренко С.Г. Антипомпажне регулювання та захист газоперекачувального агрегату докачуючої компресорної станції підземного сховища газу /

- С.Г.Гіренко // “Автоматика-2008”: XV международная научнр-практическая конференция: сборник научных трудов. – Одесса, 2008. – С.741-745.
86. Семенцов Г.Н. Показник нестационарності для визначення моменту входу робочої точки нагнітача в зону помпажу / Г.Н. Семенцов, С.Г.Гіренко // Вимірювання витрати та кількості газу: 5^a всеукраїнська науково-технічна конференція: збірник тез доповідей – Івано-Франківськ, 2007.-С.52.
87. Гіренко С.Г. Методи виявлення сигналів з випадковою амплітудою для попередження помпажних явищ компресорів докачуючих компресорних станцій / С.Г. Гіренко // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании-2007: Международная научно-практическая конференция: сборник научных трудов.– Одесса, 2007.–С.26-30.
88. Гіренко С.Г. Нові методи антипомпажного регулювання відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів / С.Г. Гіренко // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2007: Международная научно-практическая конференция: сборник научных трудов. – Одесса, 2007. – С.18-19.
89. Гіренко С.Г. Вимоги до антипомпажного регулювання відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів компресорного цеху підземного сховища газу / С.Г. Гіренко // Vedeck potencial sveta: IV Mezinarodova vedeckí-praktična. konferencia. – Praha , 2007. – St.7-11.
90. Технологічні вимоги до систем антипомпажного регулювання відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів. – К.: ДК «Укртрансгаз», 1999. – № 399.– 9 с.
91. Прошовиков С. Опыт автоматизации сложных промышленных объектов на примере газокompрессорных станций / С. Прошовиков, А.Макаров, В.Бунин, А.Черников // Системная интеграция. Нефтегазовая промышленность.– 1999.– №2.– С.16-25. – Режим доступа: <http://www.cta.ru>.
92. Семенцов Г.Н. Методические указания к применению методов и средств поверки нестандартизованных измерительных информационных систем автоматизированных систем управления технологическими процессами

- (АСУТП) в нефтяной и газовой промышленности / Г.Н.Семенов, М.И.Горбийчук. – Ивано-Франковск: ИФИНГ, 1989. – 60 с.
93. Горбийчук М.І. Оптимальне керування роботою нагнітачів природного газу із врахуванням технічного стану ГПА / М.І.Горбийчук, Я.І.Заячук // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2008. - №4/3(34). – С.22-24.
94. Технічні вимоги до систем антипомпажного регулювання відцентрових насосів газоперекачувальних агрегатів / ДК «Укртрансгаз». – Київ. – 1999. – 15 с.
95. Система автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом з двигуном НК-16-СТ (САК ГПА) (в адаптацію до двигуна ДЗ36 САК ГПА Щ-6,3). Програма випробувань антипомпажного регулювання. ДК «Укртрансгаз», ТЗОВ «Укргазтех». – Київ. – 2006. – 11 с.
96. Про попередні випробування підсистеми антипомпажного регулювання та захисту на ГПА №9 ДКС «Більче-Волиця»: Звіт про НДР / Дочірня компанія «Укртрансгаз» НАК «Нафтогаз України» УМГ «Львівтрансгаз». – Львів. – 2006. – 17с.
97. Мислюк М.А. Моделювання явищ і процесів у нафтогазовій справі / М.А.Мислюк. - К.:Екор. - 1999. – 488 с.
98. Семенов Г.Н. Автоматична система антипомпажного регулювання відцентрових нагнітачів дотискувальної компресорної станції / Г.Н.Семенов, С.Г.Гіренко, Ю.Є.Бляут // Нафтогазова енергетика, №2(13). – 2010. - С.44-52.
99. Патент 89302 Україна, №а200807810. Спосіб захисту компресора від помпажу» / М.В.Беккер, М.Я.Шимко, Г.Н.Семенов Ю.Є.Бляут, С.Г.Гіренко, М.О.Петеш, О.В.Сукач, А.Ф.Репета // заявл. 09.06.2008, опубл. 25.11.2009, бюл. №22, 10 с.
100. Бляут Ю.Є. Безударне визначення помпажної характеристики відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату Ц-16 ДКС «Більче-Волиця» УМГ «Львівтрансгаз» / Ю.Є.Бляут // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2007:

Международна научно-практическая конференция: сборник научных трудов. – Одесса, 2007. – С.20-22.

101. Бляут Ю.Є. Система автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом Ц-6,3 та метрологічне забезпечення її вимірювальних каналів / Ю.Є.Бляут // Нафтогазова енергетика. – 2010. – С.46-49.
102. Бляут Ю.Є. Результати попередніх випробувань підсистеми антипомпажного регулювання та захисту на газоперекачувальному агрегаті ГПА №9 докачуючої компресорної станції (ДКС) «Більче-Волиця» / Ю.Є.Бляут // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, №1(104). – 2008. – С.53-57.
103. Ковалів Є.А. Оптимальне керування роботою , багато цехових компресорних станцій з різними типами приводів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд.техн.наук: спец. 05.13.07 «Автоматизація технологічних процесів» / Є.А.Ковалів.–Івано-Франківськ, 2005.–20с.
104. Бляут Ю.Є. Параметрична ідентифікація помпажної характеристики відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату в режимі on-line / Ю.Є.Бляут, М.О.Петеш // Нафтогазова енергетика, № 1(14). - 2011. - С.65-75.
105. Семенцов Г.Н. Автоматична система антипомпажного регулювання відцентрових нагнітачів дотискувальної компресорної станції / Г.Н.Семенцов, С.Г.Гіренко, Ю.Є.Бляут // Нафтогазова енергетика, №2(15). – 2010. – С.44-53.
106. Бляут Ю.Є. Аналіз впливу кроку дискретизації інформативних параметрів під час регулювання системи автоматичної ідентифікації помпажних характеристик / Ю.Є.Бляут // Нафтогазова енергетика, №1(10). – 2009. – С.56-60.
107. Семенцов Г.Н. Ідентифікація помпажної характеристики відцентрового нагнітача та газоперекачувального агрегату / Г.Н.Семенцов, Ю.Є.Бляут // Нафтогазова енергетика, №4(9). – 2008. – С.16-23.

108. Бляут Ю.Є. Енергоощадна технологія для антипомпажного керування відцентровим нагнітачем газоперекачувальних агрегатів дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу / Ю.Є.Бляут // Нафтогазова енергетика, №2(7). – 2008. – С.33-38.
109. Бляут Ю.Є. Автоматична ідентифікація реальних приведених витратно-напірних характеристик відцентрових нагнітачів / Ю.Є.Бляут, Л.І.Давиденко // Нафтогазова енергетика. – 2012. – № 1(16). – С. 117-127.
110. Бляут Ю.Є. Алгоритмічна структура камери згоряння газоперекачувального агрегату / Ю.Є.Бляут // Нафтогазова енергетика, №4(5). – 2007. – С.63-66.
111. Пат. 91465 Україна. Акустичний спосіб контролю передпомпажного стану відцентрового нагнітача / Беккер М.В., Шимко Р.Я., Семенцов Г.Н., Бляут Ю.Є., Гіренко С.Г., Петеш М.О., Сукач О.В., Репета А.Ф. - № а2009 07520; заявл. 17.07.2009; опубл. 26.07.2010, Бюл. №14,2010 . – 4с.
112. Бляут Ю.Є. Калібрування помпажної характеристики відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату (ГПА) в режимі on-line / Ю.Є.Бляут, Г.Н.Семенцов // Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте'2011: научно-практическая конференция: сборник научных трудов. – Одесса, 2011. - С.3-6.
113. Бляут Ю.Є. Система автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом Ц-6,3 та метрологічне забезпечення її вимірювальних каналів / Ю.Є.Бляут // АВТОМАТИКА-2010: 17 Міжнародна конференція з автоматичного управління: тези доповідей. – Харків, 2010. – С.186-188.
114. Семенцов Г.Н. Технологія визначення реальних приведених витратно-напірних характеристик відцентрового нагнітача / Г.Н.Семенцов, Ю.Є. Бляут // Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання: V всеукраїнська науково-технічна конференція: тези доповідей. – Івано-Франківськ, 2008. –С.187-190.

115. Бляут Ю.Є. Ідентифікація помпажних характеристик відцентрового нагнітача газоперекачувальних агрегатів з газотурбінним приводом / Ю.Є.Бляут // *Современные направления теоретических и прикладных исследований: международна научно-практическая конференция: сборник научных трудов.* – Одеса, 2008. – С.37-39.
116. Бляут Ю.Є. Метод контролю границі помпажу відцентрового нагнітача природного газу за витратно-напірними характеристиками / Ю.Є.Бляут // *Приладобудування 2008: стан і перспективи: VII науково-технічна конференція: збірник наукових праць.* – Київ, 2008. – С.223-224.
117. Бляут Ю.Є. Аналіз методів ідентифікації помпажних характеристик газоперекачувальних агрегатів з газотурбінним приводом / Ю.Є.Бляут // *Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2007: Международная научно-практическая конференция: сборник научных трудов.* – Одеса, 2007. – С.24-26.
118. Бляут Ю.Є. Методика уточнення помпажної характеристики на приведеній напорно-витратній характеристиці відцентрового нагнітача / Ю.Є.Бляут // *Вимірювання витрати та кількості газу: V всеукраїнська науково-технічна конференція: тези доповідей.* – Івано-Франківськ, 2007. – 53 с.
119. Семенцов Г.Н. Спосіб визначення помпажної характеристики відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату / Г.Н.Семенцов, Ю.Є.Бляут // *Perspektyvirne opracowania nauki i techniki - 2007: II Międzynarodna naukowo-prakticzna konferencja.* – Przemysl, 2007. – С.17-19.
120. Семенцов Г.Н. Ієрархія і особливості автоматизованого управління газотранспортною системою / Г.Н.Семенцов, Ю.Є.Бляут // *Dynamika naukowych badan-2007:Międzynarodna konferencja.*–Przemysl, 2007.– С.17-19.
121. Бляут Ю.Є. Автоматизоване калібрування помпажної характеристики відцентрового нагнітача із за діянням вимірювального комплексу «SUPER FLOO-II» типу «FLOU WIN» або «FLOU HOST» / Ю.Є. Бляут, М.О.Петеш, Г.Н.Семенцов // *Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і*

нафтогазопромислового обладнання: VI міжнародна науково-технічна конференція: тези доповідей. – Івано-Франківськ, 2011. – С.259-263.

122. Бляут Ю.Є. Результати аналізу характеристик коефіцієнту помпажу газоперекачувального агрегату дотискувальної компресорної станції / Ю.Є.Бляут, Л.І.Давиденко, Є.М.Лесів, М.О.Петеш, Г.Н.Семенцов // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании-2011: научно-практическая конференция: сборник научных трудов. – Одесса, 2011. – С.83-97.
123. Режим доступу. – <http://www.utg.ua.uk>
124. Биков Г.О. Використання паспортних характеристик газових нагнітачів як одна з причин неефективності їх роботи / Г.О.Биков, О.Г.Бикова, С.В.Ізбаш // Нафтова і газова промисловість, №1. – 2012. – С.41-44.

ДОДАТКИ

Додаток А

Характеристики ГПА, що експлуатуються на ДКС «Більче-Волиця»

Ст. №	Тип ГПА	ГТП		Нагнітач						
		Тип ГТП	ККД, %	Тип змінної проточної частини (ЗПЧ)	Q, млн. м ³ /добу	ККД %	Р газу на вході, МПа (кгс/см ²)	Р газу на виході, МПа (кгс/см ²)	Ступінь стис.	Номінальна частота обертів ротора, об/хв
КЦ №1, рік введення в експлуатацію - 1985										
1	ГПА-Ц-6.3	НК-12СТ	22,5	6.3/41 - 1.45	11,57	80	2.773 (28.28)	4.021 (41)	1.45	8 200
2	ГПА-Ц-6.3	НК-12СТ	22,5	6.3/41 - 1.45	11,57	80	2.773 (28.28)	4.021 (41)	1.45	8 200
3	ГПА-Ц-6.3	НК-12СТ	22,5	6.3/56 - 1.45	12,04	82	3.79 (38.62)	5.49 (56)	1.45	8 200
4	ГПА-Ц-6.3	НК-12СТ	22,5	6.3/41 - 1.45	11,57	80	2.773 (28.28)	4.021 (41)	1.45	8 200
5	ГПА-Ц-6.3	НК-12СТ	22,5	6.3/29 - 1.65	8,237	80	1.724 (17.58)	2.845 (29)	1.65	8 200
6	ГПА-Ц-6.3	НК-12СТ	22,5	6.3/29 - 1.65	8,237	80	1.724 (17.58)	2.845 (29)	1.65	8 200
7	ГПА-Ц-6.3	НК-12СТ	22,5	6.3/29 - 1.65	8,237	80	1.724 (17.58)	2.845 (29)	1.65	8 200
8	ГПА-Ц-6.3	НК-12СТ	22,5	6.3/29 - 1.65	8,237	80	1.724 (17.58)	2.845 (29)	1.65	8 200
КЦ №2, рік введення в експлуатацію - 1987										
9	ГПА-Ц-16	НК-16СТ	27,5	16/56 - 1.44	30,94	82	3.81 (38.85)	5.49 (56)	1.44	5 300
10	ГПА-Ц-16	НК-16СТ	27,5	16/56 - 1.44	30,94	82	3.81 (38.85)	5.49 (56)	1.44	5 300
11	ГПА-Ц-16	НК-16СТ	27,5	16/41 - 1.45	29,62	82	2.79 (28.5)	4.02 (41)	1.44	5 300
12	ГПА-Ц-16	НК-16СТ	27,5	16/56 - 1.44	30,94	82	3.81 (38.85)	5.49 (56)	1.44	5 300
13	ГПА-Ц-16	НК-16СТ	27,5	16/56 - 1.44	30,94	82	3.81 (38.85)	5.49 (56)	1.44	5 300
14	ГПА-Ц-16	НК-16СТ	27,5	16/76 - 1.44	33,25	83	5.17 (52.73)	7.45 (76)	1.44	5 300
КЦ №3, рік введення в експлуатацію - 1989										
15	ГПА-Ц-16	НК-16СТ	27,5	16/100 - 1.7	20,52	78	5.83 (59.4)	9.9 (101)	1.7	5 300
16	ГПА-Ц-16	НК-16СТ	27,5	16/100 - 1.7	20,52	78	5.83 (59.4)	9.9 (101)	1.7	5 300
17	ГПА-Ц-16	НК-16СТ	27,5	16/100 - 1.7	20,52	78	5.83 (59.4)	9.9 (101)	1.7	5 300
18	ГПА-Ц-16	НК-16СТ	27,5	16/100 - 1.7	20,52	78	5.83 (59.4)	9.9 (101)	1.7	5 300
19	ГПА-Ц-16	НК-16СТ	27,5	16/100 - 1.7	20,52	78	5.83 (59.4)	9.9 (101)	1.7	5 300

Продовження додатку А

КЦ №1А, рік введення в експлуатацію - 1992										
20	ГПА-Ц-16	НК-16СТ	27,5	16/29 - 1.6	16,5	74,5	1.778 (18.12)	2.845 (29)	1.6	5 200
				16/41 - 1.45	29,62	82	2.79 (28.5)	4.02 (41)	1.44	5 300
21	ГПА-Ц-16	НК-16СТ	27,5	16/29 - 1.6	16,5	74,5	1.778 (18.12)	2.845 (29)	1.6	5 200
				16/41 - 1.45	29,62	82	2.79 (28.5)	4.02 (41)	1.44	5 300
22	ГПА-Ц-16	НК-16СТ	27,5	16/41 - 1.45	29,62	82	2.79 (28.5)	4.02 (41)	1.44	5 300
				16/29 - 1.6	16,5	74,5	1.778 (18.12)	2.845 (29)	1.6	5 200
23	ГПА-Ц-16	НК-16СТ	27,5	16/41 - 1.45	29,62	82	2.79 (28.5)	4.02 (41)	1.44	5 300
КЦ №4, рік введення в експлуатацію - 1993										
24	ГПА-Ц-6.3В	НК-12СТ	24	6.3В/29 - 1.7	7,4	78	1.67 (17.06)	2.84 (29)	1.7	8 200
25	ГПА-Ц-6.3В	НК-12СТ	24	6.3В/29 - 1.7	7,4	78	1.67 (17.06)	2.84 (29)	1.7	8 200
26	ГПА-Ц-6.3В	НК-12СТ	24	6.3В/29 - 1.7	7,4	78	1.67 (17.06)	2.84 (29)	1.7	8 200
27	ГПА-Ц-6.3В	НК-12СТ	24	6.3В/41 - 1.45	11,55	80	2.77 (28.27)	4.02 (41)	1.45	8 200
28	ГПА-Ц-6.3В	НК-12СТ	24	6.3В/41 - 1.45	11,55	80	2.77 (28.27)	4.02 (41)	1.45	8 200

Додаток Б

Мінімальне допустиме значення відношення (формула (3.9))

Число пар вимірювань, <i>m</i>	Надійність, ρ	
	0.90	0.95
10	0.268	0.220
11	0.309	0.260
12	0.345	0.296
13	0.378	0.329
14	0.407	0.359
15	0.434	0.386
16	0.458	0.412
17	0.480	0.435
18	0.500	0.456
19	0.519	0.476
20	0.536	0.494
22	0.567	0.527
24	0.593	0.555
26	0.617	0.581
28	0.637	0.603
30	0.655	0.623
35	0.693	0.664
40	0.723	0.697
45	0.748	0.823
50	0.768	0.745
55	0.785	0.764
60	0.799	0.780
65	0.811	0.794
70	0.822	0.806
75	0.832	0.816

Продовження додатку Б

80	0.841	0.826
90	0.855	0.842
100	0.867	0.855
200	0.926	0.919
300	0.948	0.943

Додаток В

Квантилі нормального розподілу $t(\rho)$

ρ	$t(\rho)$
0.20	0.25
0.50	0.67
0.60	0.84
0.70	1.04
0.75	1.15
0.80	1.28
0.85	1.44
0.90	1.64
0.95	1.96
0.96	2.05
0.98	2.33
0.99	2.58
0.995	2.81
0.998	3.09
0.999	3.29
0.9999	3.89

Додаток Д
Значення критерію Пірсона χ^2

Номер інтервалу	Абсолютна частота, m_i	Функція щільності, $f(x)$	Ймовірність інтервалу, P	Теоретична частота, mt_i	Критерій Пірсона, χ^2
1	8	0.0164	0.0107	5.9282	0.7241
2	22	0.0691	0.0452	24.9808	0.3557
3	66	0.1898	0.1241	68.6414	0.1016
4	136	0.3429	0.2242	123.9876	1.1638
5	140	0.3974	0.2598	143.6921	0.0949
6	102	0.3	0.1962	108.4713	0.3861
7	54	0.1532	0.1002	55.3831	0.0345
8	17	0.044	0.0288	15.9166	0.0737
9	6	0.0131	0.0086	4.7212	0.7196
10	2	0.0034	0.0022	1.2125	
Сума	553	—	1	553	3.654

Додаток Е

Результати розрахунку рівнянь спектральної густини

Степінь регресії	Рівняння	Коефіцієнти рівняння	Коефіцієнт кореляції	Похибка
6	$F(x)=a+b*x+c*x^2+ \\ +d*x^3+e*x^4+f*x^5+ \\ +g*x^6$	$a = 2.7255+00$ $b = -2.7719E-01$ $c = 9.3377E-03$ $d = -1.4235E-04$ $e = 1.0832E-06$ $f = -4.0149E-09$ $g = 5.7749E-12$	5.8316E-01	5.2306E-01
8	$F(x)=a+b*x+c*x^2+ \\ +d*x^3+e*x^4+f*x^5+ \\ +g*x^6+h*x^7+i*x^8$	$a = 4.1927E+00$ $b = -6.8527E-01$ $c = 3.8589E-02$ $d = -1.0403E-03$ $e = 1.536E-05$ $f = -1.3106E-07$ $g = 6.4424E-10$ $h = -1.6933E-12$ $I = 1.8422E-15$	6.8302E-01	4.7252E-01
10	$F(x)=a+b*x+c*x^2+ \\ +d*x^3+e*x^4+f*x^5+ \\ +g*x^6+h*x^7+i*x^8+ \\ +j*x^9+k*x^{10}$	$a = 5.9077E+00$ $b = -1.3962E+00$ $c = 1.1686E-01$ $d = -4.8247E-03$ $e = 1.1367E-04$ $f = -1.6453E-06$ $g = 1.5137E-08$ $h = -8.8766E-11$ $I = 3.2125E-13$ $j = -6.5379E-16$ $k = 5.7229E-19$	7.6347E-01	4.1982E-01

Продовження додатку Е

12	$F(x)=a+b*x+c*x^2+$ $+d*x^3+e*x^4+f*x^5+$ $+g*x^6+h*x^7+i*x^8+$ $+j*x^9+k*x^{10}+$ $+l*x^{11}+m*x^{12}$	$a = 7.85498E+00$ $b = -2.5017E+00$ $c = 2.8879E-01$ $d = -1.6778E-02$ $e = 5.6952E-04$ $f = -1.2255E-05$ $g = 1.7508E-07$ $h = -1.6997E-09$ $i = 1.12627E-11$ $j = -5.01458E-14$ $k = 1.4347E-16$ $l = -2.3824E-19$ $m = 1.7453E-22$	8.2746E-01	3.6678E-01
----	---------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------	------------

Додаток Ж

Значення абсолютних та відносних частот для побудови гістограми
 густини абсолютних частот сигналу $Q(t) = x(t)$

Номер інтервалу	Границя інтервалу		Середина інтервалу, x_i	Абсолютна частота, m_i	Відносна частота, ω_i
	нижня	верхня			
1	166,895	167,4391	167,167	15	0,0258
2	167,4391	167,9832	167,7112	37	0,0637
3	167,9832	168,5273	168,2553	82	0,1411
4	168,5273	169,0714	168,7994	118	0,2031
5	169,0714	169,6155	169,3435	135	0,2324
6	169,6155	170,1596	169,8876	88	0,1515
7	170,1596	170,7037	170,4317	62	0,1067
8	170,7037	171,2478	170,9758	33	0,0568
9	171,2478	171,7919	171,5199	8	0,0138
10	171,7919	172,336	172,064	3	0,0052

Додаток 3

Значення критерію Пірсона χ^2

Номер інтервалу	Абсолютна частота, m_i	Функція щільності, $f(x)$	Ймовірність інтервалу, P	Теоретична частота, mt_i	Критерій Пірсона, χ^2
1	15	0,0379	0,0214	12,4276	0,5325
2	37	0,11	0,0621	36,0975	0,0226
3	82	0,2322	0,1312	76,2098	0,4399
4	118	0,3563	0,2113	122,7479	0,1836
5	135	0,3974	0,2285	132,7353	0,0386
6	88	0,3221	0,1749	101,6343	1,829
7	62	0,1897	0,1072	62,2716	0,0012
8	33	0,0812	0,0459	26,6621	1,5066
9	8	0,0253	0,0143	8,2967	0,0672
10	3	0,0057	0,0032	1,8766	
Сума	581	–	1	581	4,6212

Додаток К

Значення абсолютних та відносних частот

Номер інтервалу	Границя інтервалу		Середина інтервалу, x_i	Абсолютна частота, m_i	Відносна частота, ω_i
	нижня	верхня			
1	1398,308	1398,5971	1398,4525	3	0,0052
2	1398,5971	1398,8862	1398,7416	11	0,0189
3	1398,8862	1399,1753	1399,0307	27	0,0465
4	1399,1753	1399,4644	1399,3198	61	0,105
5	1399,4644	1399,7535	1399,6089	104	0,179
6	1399,7535	1400,0426	1399,898	155	0,2668
7	1400,0426	1400,3317	1400,1871	129	0,222
8	1400,3317	1400,6208	1400,4762	58	0,0998
9	1400,6208	1400,9099	1400,7653	26	0,0448
10	1400,9099	1401,199	1401,0544	7	0,012

Додаток Л

Значення критерію Пірсона χ^2

Номер інтервалу	Абсолютна частота, m_i	Функція щільності, $f(x)$	Ймовірність інтервалу, P	Теоретична частота, mt_i	Критерій Пірсона, χ^2
1	3	0,0062	0,0039	2,2659	0,3512
2	11	0,0169	0,0039	9,6853	
3	27	0,0677	0,0167	24,7622	0,2022
4	61	0,1818	0,0426	66,5187	0,4579
5	104	0,3284	0,2018	117,269	1,5014
6	155	0,3989	0,2513	145,9995	0,5549
7	129	0,3259	0,2053	119,2851	0,7912
8	58	0,1791	0,1128	65,5368	0,8667
9	26	0,0662	0,0417	24,2161	0,1314
10	7	0,0164	0,0104	6,0192	0,1598
Сума	581	–	1	581	5,0167

Додаток М

Виконання роботи функцією *fact*: $[W, W_] = \text{fact}(S)$ для отримання функції передачі нагнітача

```
>> S=tf([-5.87e-7 0 0.383], [1.68e-9 0 -1.217e-4 0 1.843])
```

```
>>
```

Transfer function:

$$-5.87e-007 s^2 + 0.383$$

$$1.68e-009 s^4 - 0.0001217 s^2 + 1.843$$

```
>> [W,W_]=fact(S)
```

Transfer function:

$$0.0007662 s + 0.6189$$

$$4.099e-005 s^2 + 0.01526 s + 1.358$$

Transfer function:

$$0.0007662 s - 0.6189$$

$$4.099e-005 s^2 - 0.01526 s + 1.358$$

Лістинг програми для функції *fact* в Matlab:

```
function[W,W_]=fact(S)
```

```
[c,d]=tfdata(S,'v');
```

```
nul=roots(c);
```

```
pol=roots(d);
```

```
m=1;
```

```
for i=1:length(nul) if real(nul(i))<0 p(m)=nul(i); m=m+1; end
```

```
end
```

```
m=1;
```

```
for i=1:length(nul) if real(nul(i))>0 p_(m)=nul(i); m=m+1; end
end
m=1;
for i=1:length(pol) if real(pol(i))<0 pp(m)=pol(i); m=m+1; end
end
m=1;
for i=1:length(pol) if real(pol(i))>0 pp_(m)=pol(i); m=m+1; end
end
b=poly(p); b_=poly(p_);
a=poly(pp); a_=poly(pp_);
a=sqrt(abs(d(1)))*a; a_=sqrt(abs(d(1)))*a_;
b=sqrt(abs(c(length(pol)-length(nul)+1)))*b; b_=sqrt(abs(c(length(pol)-
length(nul)+1)))*b_;
W=tf(b,a); W_=tf(b_,a_);
```

Додаток Н

Результати аналізу залежності ступеня підвищення тиску газу E від
приведеної масової витрати газу $Q_{пр}$

Модель	Рівняння	Коефіцієнт кореляції, r	Стандартна похибка, S
Крива 1			
лінійна	$y=a+bx$	0,96576963	0,02304000
квадратична	$y=a+bx+cx^2$	0,99962122	0,00252460
поліном 3 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3$	0,99967370	0,00242545
поліном 4 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4$	0,99969228,	0,00244434
синусоїдальна	$y=a+b \cdot \cos(cx+d)$	0,9995021	0,0020677
поліном 5 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5$	0,9998477	0,0012355
поліном 6 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6$	0,9998490	0,0012848
поліном 7 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6+hx^7$	0,9998662	0,0012684
Крива 2			
лінійна	$y=a+bx$	0,96701788	0,02040264
квадратична	$y=a+bx+cx^2$	0,99919391	0,00332106
поліном 3 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3$	0,99923449	0,00335002
поліном 4 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4$	0,99939916	0,00308006

Продовження додатку Н

синусоїдальна	$y=a+b \cdot \cos(cx+d)$	0.9989166	0.0039850
поліном 5 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5$	0.9994350	0.0031088
поліном 6 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6$	0.9994900	0.0030848
поліном 7 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6+hx^7$	0.9995051	0.0031874
Крива 3			
лінійна	$y=a+bx$	0,96519926	0,01845011
квадратична	$y=a+bx+cx^2$	0.99930144	0.00272306
поліном 3 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3$	0,99930844	0,00280447
поліном 4 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4$	0,99957635	0,00227805
синусоїдальна	$y=a+b \cdot \cos(cx+d)$	0.9991824	0.0030493
поліном 5 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5$	0.9995789	0.0023638
поліном 6 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6$	0.9995800	0.0024657
поліном 7 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6+hx^7$	0.9997275	0.0020832
Крива 4			
лінійна	$y=a+bx$	0,96713263	0,01558752
квадратична	$y=a+bx+cx^2$	0.99977371	0.00134683
поліном 3 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3$	0,99978345	0,00136378
поліном 4 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4$	0,99984672,	0,00119071

Продовження додатку Н

синусоїдальна	$y=a+b \cdot \cos(cx+d)$	0.99950214	0.00206771
поліном 5 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5$	0.99984766	0.00123554
поліном 6 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6$	0.99984898	0.00128485
поліном 7 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6+hx^7$	0.99986622	0.00126836
Крива 5			
лінійна	$y=a+bx$	0,97101229	0,01251999
квадратична	$y=a+bx+cx^2$	0.99893850	0.00249188
поліном 3 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3$	0,99901079	0,00249000
поліном 4 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4$	0,99918870	0,00234022
синусоїдальна	$y=a+b \cdot \cos(cx+d)$	0.99856329	0.00300048
поліном 5 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5$	0.99925780	0.00232979
поліном 6 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6$	0.99925791	0.00243320
поліном 7 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6+hx^7$	0.99962110	0.00182369
Крива 6			
лінійна	$y=a+bx$	0,96599327	0,01210581
квадратична	$y=a+bx+cx^2$	0.99931072	0.00179504
поліном 3 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3$	0,99935881	0,00179207

поліном 4 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4$	0,99940705	0,00178843
синусоїдальна	$y=a+b \cdot \cos(cx+d)$	0.99887787	0.00237045
поліном 5 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5$	0.99941713	0.00184555
поліном 6 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6$	0.99947345	0.00183216
поліном 7 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6+hx^7$	0.99957402	0.00172841
Крива 7			
лінійна	$y=a+bx$	0,96955477	0,00941179
квадратична	$y=a+bx+cx^2$	0.99895240	0.00181652
поліном 3 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3$	0,99951479	0,00127893
поліном 4 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4$	0,99968490	0,00107033
синусоїдальна	$y=a+b \cdot \cos(cx+d)$	0.99956429	0.00121280
поліном 5 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5$	0.99972949	0.00103221
поліном 6 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6$	0.99980347	0.00091897
поліном 7 порядку	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6+hx^7$	0.99984705	0.00085027

Додаток II

Результати обчислення критерію r / S для вибору типу моделі $E = f(Q_{np})$

Номер кривої Тип моделі	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
Лінійна	2.84	47.3	53.60	62.04	77.68	79.79	103.01
Квадратична	41.95	308.87	366.98	742.33	400.89	556.72	549.93
3th Degree Polinomial Fit	412.15	298.27	356.33	733.14	401.21	557.67	934.02
4th Degree Polinomial Fit	408.98	324.80	438.79	839.71	426.96	558.82	558.82
Sinusoidal Fit	483.38	250.67	327.67	483.38	332.81	421.39	824.17
5th Degree Polinomial Fit	809.26	321.48	422.86	809.26	429.24	541.54	968.54
6th Degree Polinomial Fit	778.20	324.00	405.394	778.20	410.67	545.53	1088.04
7th Degree Polinomial Fit	788.29	313.80	479.89	788.35	548.15	578.32	1176.01

Додаток Р

Лістинг програми автоматичної ідентифікації координат точки помпажу для відцентрових нагнітачів з газотурбінним приводом.

```

// Вхідні
float      N_oberty_pruv = 5300.0;
// float    A = 128.8;
float      A = (float)GetTagFloat("3_A");
float
// таги для ПЛАВАЮЧОЇ межі помпажа
float      pl_Q_pryved_min;

const float      PL_x0 = 1.10,      PL_y0 = 275.536;
const float      PL_x1 = 1.25,      PL_y1 = 308.512;
const float      PL_x2 = 1.40,      PL_y2 = 341.344;
const float      PL_x3 = 1.55,      PL_y3 = 375.536;

float      K_PL0, K_PL1, K_PL2, K_PL3;
// const float      K_PL0 = 275.5360107422;
// const float      K_PL1 = 219.8400878906;
// ct      L = 1.385e-3;
// float      L = (float)GetTagFloat("3_L");
float      Q_pryved_min = 360.0;
float      Nmex = 100.0;

float      Zpryved = 0.925;
float      Rpryved = 51.68329654;
float      Tpryved = 288.0;

//-----
const float      N_x0 = 360,      N_y0 = 450;
const float      N_x1 = 441,      N_y1 = 492.5;
const float      N_x2 = 520.5,    N_y2 = 525;
const float      N_x3 = 630,      N_y3 = 550;
float      Kn0, Kn1, Kn2, Kn3;
// const float      Kn0 = 450;
// const float      Kn1 = 0.52469158;
// const float      Kn2 = (float)(-0.000722);
// const float      Kn3 = (float)(-0.0000008628);
//-----
const float      P_x0 = 360,      P_y0 = 0.725;
const float      P_x1 = 441,      P_y1 = 0.785;
const float      P_x2 = 520.5,    P_y2 = 0.82;
const float      P_x3 = 630,      P_y3 = 0.665;
float      Kp0, Kp1, Kp2, Kp3;
// const float      Kp0 = 0.725;
// const float      Kp1 = 0.00074074;
// const float      Kp2 = (float)(-0.0000018722);

```


Продовження додатку Р

```

//      const float          Kp3 = (float)(-0.0000000294);
//-----
float   gamma, temp_01, dP_mm_rt_st, Pvh_abs_m2, Pvh_abs_cm2, Patm_cm2, T,
P_vyhid_abs_cm2;
float   Q_ob, Q_pryved, Qkom, Qkom_pryved, E, N, K_politrop, K_pompag;

float   M0, M1, M2, RZT;
short int P_light=0, P_hard=0;
//-----
float   P_atm=GetTagFloat("3_Patm_тиск_атмосф_значення"); // 750      -----
-----CPU
float   Z=GetTagFloat("3_Z_коєфіц_стиснення_значення");           // 0.9255
-----CPU (в паспорті)
float   R=GetTagFloat("3_R_газова_стала_значення");           // 52.5      -----
-----CPU (в паспорті)

int     N_oberty=GetTagSDWord("3_N_ТНТ_значення");
float   P_vhid=GetTagFloat("3_Pг_вх_Н_значення");
float   P_vyhid=GetTagFloat("3_Pг_вих_Н_значення");
float   t_vhid_nagn=GetTagFloat("3_Тг_вх_Н_значення");
float   delta_P=GetTagFloat("3_dPг_конф_Н_значення");
float   gustuna=GetTagFloat("3_RN_густина_газу_значення");
//-----
// для відображення
int     baza_zero_X=330; // абсолютна координата перетину віток графіку на
мнемосхемі
int     baza_zero_Y=430; // абсолютна координата перетину віток графіку на
мнемосхемі
int     x, y;

//
*****
*****
if ( GetTagByte("Перемикач_алгоритмів_помпажа")!=6 ) return 0;
//
*****
*****

// підготовка даних
dP_mm_rt_st=      delta_P * 735.56;
Patm_cm2= P_atm / 735.56;
// Patm_cm2= P_atm; // беремо цю стрічку(розремлюємо) а попередню заремлюємо,
якщо на вході маємо атмосферний тиск в кгс/см2
Pvh_abs_cm2=      P_vhid+Patm_cm2;
Pvh_abs_m2=Pvh_abs_cm2*10000;
P_vyhid_abs_cm2= P_vyhid+Patm_cm2;
T= t_vhid_nagn + 273.15;
SetTagFloat("3_Pг_вх_Н_абс_значення", Pvh_abs_cm2);
SetTagFloat("3_Pг_вих_Н_абс_значення", P_vyhid_abs_cm2);

```

```

// Q_ob
    if ( Pvh_abs_cm2<=0 ) return 0;
//    L= 1 - L * dP_mm_rt_st / Pvh_abs_cm2;
    L= 1 - delta_P / Pvh_abs_cm2;
SetTagFloat("3_AL", A*L);

if ( gustuna==0 ) return 0;
    RZT= 34.550017373789273480101374295809*Z*T / gustuna; // беремо цю
стрічку(розрешуємо) якщо на вході маємо маємо замість R густину газу
//    RZT= R*Z*T;
    if ( RZT==0 ) return 0;
    gamma= Pvh_abs_m2 / RZT;

    if ( gamma==0 ) return 0;
    temp_01= dP_mm_rt_st / gamma;
    if ( temp_01<0 ) return 0; // під коренем X має бути >=0
    Q_ob= A * L * sqrt( temp_01 );

// Q_pryved
    if (N_oberty<1.0) N_oberty=1;
    Q_pryved= N_oberty_pruv * Q_ob / N_oberty;

// Комерційна продуктивність
    temp_01= dP_mm_rt_st * gamma;
    if ( temp_01<0 ) return 0; // під коренем X має бути >=0
    if ( gustuna==0 ) return 0;
    Qkom= ( 1.44e-3 * A * L * sqrt(temp_01) ) / gustuna;
    SetTagFloat("3_Комерційна_продуктивність_Нагнітача_значення", Qkom);

// Приведена комерційна продуктивність
    temp_01= (Z*T*Rpryved*gustuna) / (Zpryved*Тpryved*34.55);
    if ( temp_01<0 ) return 0; // під коренем X має бути >=0
    Qkom_pryved= Qkom * sqrt(temp_01);
    SetTagFloat("3_Комерційна_продуктивність_Нагнітача_приведена_значення",
Qkom_pryved);

// E
    E= P_vyhid_abs_cm2 / Pvh_abs_cm2; // 1.201

// Потужність N на муфті приводу
    M0=Q_pryved-N_x0;
    M1=Q_pryved-N_x1;
    M2=Q_pryved-N_x2;

    Kn0 = N_y0;

    Kn1 = N_y0/(N_x0-N_x1) +
        N_y1/(N_x1-N_x0);

```

Продовження додатку Р

```

Kn2 = N_y0/((N_x0-N_x1)*(N_x0-N_x2)) +
      N_y1/((N_x1-N_x0)*(N_x1-N_x2)) +
      N_y2/((N_x2-N_x0)*(N_x2-N_x1));

Kn3 = N_y0/((N_x0-N_x1)*(N_x0-N_x2)*(N_x0-N_x3)) +
      N_y1/((N_x1-N_x0)*(N_x1-N_x2)*(N_x1-N_x3)) +
      N_y2/((N_x2-N_x0)*(N_x2-N_x1)*(N_x2-N_x3)) +
      N_y3/((N_x3-N_x0)*(N_x3-N_x1)*(N_x3-N_x2));

printf("Kn0 (%.10f)\r\n", Kn0);
printf("Kn1 (%.10f)\r\n", Kn1);
printf("Kn2 (%.10f)\r\n", Kn2);
printf("Kn3 (%.10f)\r\n\r\n", Kn3);

temp_01= Zpryved*Rpryved*Tpryved / RZT; // 0.91*50*293=13331.5
if ( temp_01<0 ) return 0; // під коренем X має бути >=0
temp_01= N_oberty * sqrt(temp_01) / N_oberty_pruv; // 0.91*50*293=13331.5
N= (Kn0+M0*(Kn1+M1*(Kn2+M2*Kn3))) * gamma *
(temp_01*temp_01*temp_01) + Nmex;

printf("Приведена відносна внутрішня потужність (%.10f)\r\n\r\n",
(Kn0+M0*(Kn1+M1*(Kn2+M2*Kn3))));

// Політропічний ККД
M0=Q_pryved-P_x0;
M1=Q_pryved-P_x1;
M2=Q_pryved-P_x2;

Kp0 = P_y0;

Kp1 = P_y0/(P_x0-P_x1) +
      P_y1/(P_x1-P_x0);

Kp2 = P_y0/((P_x0-P_x1)*(P_x0-P_x2)) +
      P_y1/((P_x1-P_x0)*(P_x1-P_x2)) +
      P_y2/((P_x2-P_x0)*(P_x2-P_x1));

Kp3 = P_y0/((P_x0-P_x1)*(P_x0-P_x2)*(P_x0-P_x3)) +
      P_y1/((P_x1-P_x0)*(P_x1-P_x2)*(P_x1-P_x3)) +
      P_y2/((P_x2-P_x0)*(P_x2-P_x1)*(P_x2-P_x3)) +
      P_y3/((P_x3-P_x0)*(P_x3-P_x1)*(P_x3-P_x2));

printf("Kp0 (%.10f)\r\n", Kp0);
printf("Kp1 (%.10f)\r\n", Kp1);
printf("Kp2 (%.10f)\r\n", Kp2);
printf("Kp3 (%.10f)\r\n\r\n", Kp3);

```

Продовження додатку Р

```

K_politrop=100*(Kp0+M0*(Kp1+M1*(Kp2+M2*Kp3)));

// блок для плаваючого помпажа
// Patm_cm2= P_atm / 735.56;
// Patm_cm2= P_atm; // беремо цю стрічку(розземлюємо) а попередню заремлюємо,
якщо на вході маємо атмосферний тиск в кгс/см2
// Pvh_abs_cm2= P_vhid+Patm_cm2;
// P_vyhid_abs_cm2= P_vyhid+Patm_cm2;
// E= P_vyhid_abs_cm2 / Pvh_abs_cm2; // 1.201
M0=E-PL_x0;
M1=E-PL_x1;
M2=E-PL_x2;

K_PL0 = PL_y0;

K_PL1 = PL_y0 / (PL_x0-PL_x1) +
        PL_y1 / (PL_x1-PL_x0);

K_PL2 = PL_y0 / ((PL_x0-PL_x1) * (PL_x0-PL_x2)) +
        PL_y1 / ((PL_x1-PL_x0) * (PL_x1-PL_x2)) +
        PL_y2 / ((PL_x2-PL_x0) * (PL_x2-PL_x1));

K_PL3 = PL_y0 / ((PL_x0-PL_x1) * (PL_x0-PL_x2) * (PL_x0-PL_x3)) +
        PL_y1 / ((PL_x1-PL_x0) * (PL_x1-PL_x2) * (PL_x1-PL_x3)) +
        PL_y2 / ((PL_x2-PL_x0) * (PL_x2-PL_x1) * (PL_x2-PL_x3)) +
        PL_y3 / ((PL_x3-PL_x0) * (PL_x3-PL_x1) * (PL_x3-PL_x2));

printf("K_PL0 (%.10f)\r\n", K_PL0);
printf("K_PL1 (%.10f)\r\n", K_PL1);
printf("K_PL2 (%.10f)\r\n", K_PL2);
printf("K_PL3 (%.10f)\r\n\r\n", K_PL3);

pl_Q_pryved_min= (K_PL0+M0*(K_PL1+M1*(K_PL2+M2*K_PL3)));
SetTagFloat("3_ПЛАВАЮЧИЙ_Qmin_значення", pl_Q_pryved_min);

SetTagFloat("3_ПЛАВАЮЧИЙ_Кромп_коэф_помпажу_значення", ( Q_pryved /
pl_Q_pryved_min - 1) * 100);

SetTagFloat("3_ПЛАВАЮЧИЙ_Кромп_коэф_помпажу_СТАРИЙ_по_НОВОМУ_значення",
( (1.0-delta_P/Pvh_abs_cm2)*sqrt(delta_P*Z*(t_vhid_nagn +
273.15)/(Pvh_abs_cm2*gustuna))*(1.0/N_oberty)*(
A*sqrt(735.56*34.550017373789273480101374295809)*N_oberty_pruv/pl_Q_pryved_min)
)-100.0 );

SetTagFloat("3_ПЛАВАЮЧИЙ_Кромп_коэф_помпажу_СТАРИЙ_по_НОВОМУ_Скорочена_значення",
//( A*( sqrt(735.56*Rpryved*Zpryved)*N_oberty_pruv/pl_Q_pryved_min) * (1.0-
delta_P/Pvh_abs_cm2) * (sqrt(delta_P*(t_vhid_nagn +
273.15)/(P_vhid+1.012834))/N_oberty) )-100.0 );//

```

Продовження додатку Р

```

( A * 993873.000541/pl_Q_pryved_min *                               (1.0-
delta_P/(P_vhid+1.012834))*(sqrt(delta_P*(t_vhid_nagn +
273.15)/(P_vhid+1.012834))/N_oberty )-100.0 );

printf("Kpl (%.20f)\r\n", sqrt(735.56*Rpryved*Zpryved)*N_oberty_pruv );

SetTagFloat("3_ ПЛАВАЮЧИЙ_Кромп_коэф_помпажу_СТАРИЙ_по_НОВОМУ
_Скорочена_ОСТАТОЧНА_значення",
(
(1.0-delta_P/Pvh_abs_cm2) * sqrt(delta_P*Z*(t_vhid_nagn +
273.15)/(Pvh_abs_cm2*gustuna)) * (1.0/N_oberty) *
// ( A *
sqrt(735.56*34.550017373789273480101374295809)*N_oberty_pruv/pl_Q_pryved_min)
( A * 844907.28887562326/pl_Q_pryved_min)
)-100.0
);
printf("Kpl - ОСТАТОЧНЕ(% .20f)\r\n",
sqrt(735.56*34.550017373789273480101374295809)*N_oberty_pruv );

// Запас до помпажу
K_pompag= ( Q_pryved / Q_pryved_min - 1) * 100; // 27.029 (1) Точно
// K_pompag= 100-N_oberty*0.7228e-2*sqrt(Pvh_abs_cm2 / (dP_mm_rt_st*T) ); //
99.305
// K_pompag= 100-N_oberty*0.7228e-2*sqrt(Pvh_abs_cm2 / (delta_P*T) ); // 81.163
// K_pompag= 100-N_oberty*0.7228e-2*sqrt(Pvh_abs_m2 / (delta_P*T) ); // -1783.672
// K_pompag= 100-N_oberty*0.7228e-2*sqrt(Pvh_abs_cm2/ (delta_P*T) ); // -1783.672
*0.0980665
SetTagFloat("3_Кромп_коэф_помпажу_НОВИЙ_значення", (1-
Q_pryved_min/Q_pryved)*100); //Return-Type: BOOL
SetTagFloat("3_поділити_N_на_Nномінальне_приведене_значення",
(N_oberty/N_oberty_pruv)*sqrt( Zpryved*Rpryved*Trpyved/ RZT) ); //Return-Type:
BOOL

SetTagFloat("3_Кромп_коэф_помпажу_СТАРИЙ_по_НОВОМУ_значення",
// повна формула
( (1.0-delta_P/Pvh_abs_cm2)*sqrt(delta_P*Z*(t_vhid_nagn +
273.15)/(Pvh_abs_cm2*gustuna))*(1.0/N_oberty)*(
A*sqrt(735.56*34.550017373789273480101374295809)*N_oberty_pruv/Q_pryved_min) )-
100.0 );// (2) Точно

SetTagFloat("3_Кромп_коэф_помпажу_СТАРИЙ_по_НОВОМУ_Скорочена_значення",
// коли несправний давач тиску то переходим на константу 730 мл.рт.ст 730/
735.56=0.99244113328620370873892000652564
// коли несправний давач тиску то переходим на константу 745 мл.рт.ст 745/
735.56=1.0128337593126325520691717874816
//( A* 2760.7583348357612* (1.0-
delta_P/(P_vhid+1.012834))*(sqrt(delta_P*(t_vhid_nagn +
273.15)/(P_vhid+1.012834))/N_oberty )-100.0 );

```

Продовження додатку Р

```

// коли справний давач тиску то переходим на давач
//( A* 2760.7583348357612* (1.0-
delta_P/(Pvh_abs_cm2))*(sqrt(delta_P*Z*(t_vhid_nagn +
273.15)/(Pvh_abs_cm2))/N_oberty) )-100.0 );

// коли справний давач тиску то переходим на давач
//( A* 2760.7583348357612* (1.0-
delta_P/(P_vhid+1.012834))*(sqrt(delta_P*Z*(t_vhid_nagn +
273.15)/(P_vhid+1.012834))/N_oberty) )-100.0 );

// printf("A (%.10f)\r\n", A );
// printf("K (%.20f)\r\n", (
sqrt(735.56*Rpryved*Zpryved)*N_oberty_pruv/Q_pryved_min) );
// printf("L (%.10f)\r\n", (1.0-delta_P/(P_vhid+1.012834)));

// -0.006
//( (1.0-delta_P/(P_vhid+1.012834))*sqrt(delta_P*Z*(t_vhid_nagn +
273.15)/((P_vhid+1.012834)*gustuna))*(1.0/N_oberty)*(
A*sqrt(735.56*34.550017373789273480101374295809)*N_oberty_pruv/Q_pryved_min) )-
100.0 );

// -0.0064
//( A * 2346.9646913211759 * (1.0-
delta_P/(P_vhid+1.012834))*sqrt(delta_P*Z*(t_vhid_nagn +
273.15)/((P_vhid+1.012834)*gustuna))*(1.0/N_oberty) )-100.0 );

// -0.0064
//( A * 2346.9646913211759 * (1.0-
delta_P/(P_vhid+1.012834))*(sqrt(delta_P*Z*(t_vhid_nagn +
273.15)/((P_vhid+1.012834)*gustuna))/N_oberty) )-100.0 );

// -0.0064
//( A * 2346.9646913211759 *sqrt(Z/gustuna) * (1.0-
delta_P/(P_vhid+1.012834))*(sqrt(delta_P*(t_vhid_nagn +
273.15)/(P_vhid+1.012834))/N_oberty) )-100.0 );

// -1.381
//( A * ( sqrt(735.56*Rpryved*gustuna)*N_oberty_pruv/Q_pryved_min) *sqrt(Z/gustuna) *
(1.0-delta_P/(P_vhid+1.012834))*(sqrt(delta_P*(t_vhid_nagn +
273.15)/(P_vhid+1.012834))/N_oberty) )-100.0 );

// -1.381
//( A * ( sqrt(735.56*Rpryved)*N_oberty_pruv/Q_pryved_min) *sqrt(Z) * (1.0-
delta_P/(P_vhid+1.012834))*(sqrt(delta_P*(t_vhid_nagn +
273.15)/(P_vhid+1.012834))/N_oberty) )-100.0 );

// -1.381
//( A * ( sqrt(735.56*Rpryved*Z)*N_oberty_pruv/Q_pryved_min) * (1.0-
delta_P/(P_vhid+1.012834))*(sqrt(delta_P*(t_vhid_nagn +
273.15)/(P_vhid+1.012834))/N_oberty) )-100.0 );

```

Продовження додатку Р

```

// -3.16
//( A * ( sqrt(735.56*Rpryved*Zpryved)*N_oberty_pruv/Q_pryved_min) * (1.0-
delta_P/(P_vhid+1.012834))*(sqrt(delta_P*(t_vhid_nagn +
273.15)/(P_vhid+1.012834))/N_oberty) )-100.0 );

// -3.16
( A * 2760.7583348357612 * (1.0-delta_P/(P_vhid+1.012834))*(sqrt(delta_P*(t_vhid_nagn
+ 273.15)/(P_vhid+1.012834))/N_oberty) )-100.0 ); // (3) +-3

printf("К (%.20f)\r\n", ( sqrt(735.56*Rpryved*Zpryved)*N_oberty_pruv/Q_pryved_min) );

//-----
if(K_ropmag<=10) P_light=1; // м'який помпаж 10 % (на графіку червона
штрихпунктирна лінія)
if(K_ropmag<=5) P_hard=1; // жорсткий помпаж 5 % (на графіку не
відображається)
// помпаж 0 % (на графіку суцільна червона лінія)

if((K_ropmag<0)||(K_ropmag>100))
SetTagByte("3_Кромр_коэф_помпажу_статус", 3);
else if (P_hard==1) SetTagByte("3_Кромр_коэф_помпажу_статус", 2);
else if (P_light==1) SetTagByte("3_Кромр_коэф_помпажу_статус",
1);
else SetTagByte("3_Кромр_коэф_помпажу_статус", 0);

SetTagFloat("3_Q_обем_продуктив_значення",Q_ob); //Return-Type: float
SetTagFloat("3_Q_привед_продуктив_значення",Q_pryved); //Return-
Type: float

SetTagFloat("3_E_коєфіц_стиску_значення",E); //Return-Type: float
SetTagFloat("3_N_потужність_H_значення",N); //Return-Type: float
SetTagFloat("3_Kpolitr_коєф_політроп_значення",K_politrop); //Return-Type: float
SetTagFloat("3_Кромр_коєф_помпажу_значення",K_ropmag); //Return-
Type: float
SetTagBit("3_Статус_м'який_помпаж",P_light);
SetTagBit("3_Статус_жорсткий_помпаж",P_hard);

// по Y: 1.559-1.1=0.459 на 340 пікселях
// 1 піксель по Y = 0,459/340 = 0.00135

// по X: 700-300=400 на 370 пікселях
// 1 піксель по X = 400/370 = 1,(081)

// 700-250=450 (значення) на 370 пікселях (450/370=1.(216) )
// для відображення розрахунок координат X і Y
if ( (Q_pryved<250) || (Q_pryved>700) )
SetTagByte("3_Q_привед_продуктив_статус", 3);
else SetTagByte("3_Q_привед_продуктив_статус", 0);
if(Q_pryved<250) Q_pryved=250;

```

Продовження додатку Р

```
if(Q_pryved>700) Q_pryved=700;
x=(int)(baza_zero_X+((Q_pryved-250)/1.216));

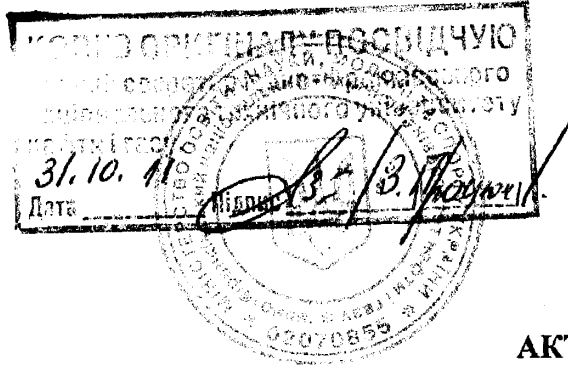
// 1.559-1.1=0.459 (значення) на 340 пікселях (0.459/340=0.00135)
    if ( (E<1.1) || (E>1.559) ) SetTagByte("3_E_кофіц_стиску_статус", 3);
        else SetTagByte("3_E_кофіц_стиску_статус", 0);
if(E<1.1) E=1.1;
if(E>1.559) E=1.559;
y=(int)(baza_zero_Y-((E-1.1)/0.00135));

    SetTagSDWord("Координата_X_графіка_антипомпажного_захисту",x);

    SetTagSDWord("Координата_Y_графіка_антипомпажного_захисту",y);

return 0;
}
```


Додаток С



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ


Комісія в складі представників Стрийського виробничого управління підземного зберігання газу (ВУПЗГ): начальника ДКС «Більче-Волиця» ПАВЛІВА Петра Олексійовича, начальника служби КВПіА, метрології і газовимірювань Стрийського ВУПЗГ ГАТАЛЯКА Василя Михайловича; завідувача кафедри автоматизації технологічних процесів і моніторингу в екології (АТПіМЕ) д.т.н., професора СЕМЕНЦОВА Георгія Никифоровича; здобувача кафедри АТПіМЕ БЛЯУТА Юрія Євстахійовича, склали даний акт про те, що по компресорному цеху №1а ДКС «Більче-Волиця» у грудні 2010 року проведено випробування на ГПА типу Ц-16 з задіянням «Системи автоматичного зняття та побудови помпажної характеристики відцентрових нагнітачів». При розробці робочої документації випробувань та промислового зразка системи використані результати дисертаційної роботи Бляута Ю.Є. «Автоматизація процесу ідентифікації помпажних характеристик газоперекачувальних агрегатів з газотурбінним приводом».

Система прийнята в промислову експлуатацію на ДКС «Більче-Волиця» Стрийського ВУПЗГ з 31 грудня 2010 року, згідно «Акту приймання у промислову експлуатацію системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом ГПА-Ц-16 виробництва ТОВ «Укргазтех» для ДКС «Більче-Волиця».


Очікуваний ефект: зняття та побудова реальної помпажної характеристики відцентрових нагнітачів ГПА типу НЦ-16/41-1.45 та НЦ-16/29-1.6 забезпечує підвищення надійності експлуатації ГПА та КС вцілому, розширення можливої зони роботи відцентрових нагнітачів і дає змогу якісно прогнозувати реальну продуктивність кожного ГПА. Внаслідок побудови реальної помпажної характеристики вдається забезпечити більш точне антипомпажне регулювання і уникнути значної кількості помпажних аварійних зупинок (АЗ). Результатом впровадження є зменшення кількості позапланових ремонтів обладнання викликаних виникненням помпажних явищ в нагнітачах, що в результаті дасть значну економію пускового, паливного та стравлюваного в результаті АЗ газу, а також зменшення виробничих витрат на ліквідацію наслідків аварійної зупинки. Очікуваний економічний ефект складе понад 1,2 млн. грн./рік.

Від Стрийського ВУПЗГ:

начальник ДКС «Більче-Волиця»

 /Павлів П.О./

Начальник служби КВПіА, МіГ

 /Гаталяк В.М./

Від ІФНТУНГ:

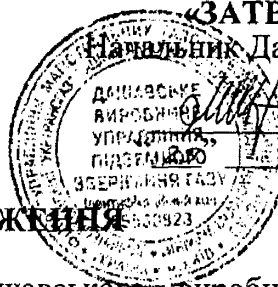
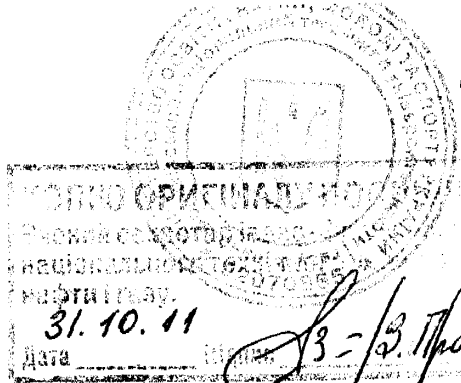
Зав.каф. АТПіМЕ, д.т.н., проф.

 /Семенцов Г.Н./

Здобувач каф. АТПіМЕ

 /Бляут Ю.Є./

Додаток Т



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Начальник Дашавського ВУПЗГ

Штинда М.В.
2011 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Комісія в складі представників Дашавського виробничого управління підземного зберігання газу (ВУПЗГ): начальника ГКС «Дашава» Дулиша Ігора Дмитровича, начальника служби КВПіА, метрології і газовимірювань Дашавського ВУПЗГ Курилишина Миколи Степановича; завідувача кафедри автоматизації технологічних процесів і моніторингу в екології (АТПіМЕ) д.т.н., професора СЕМЕНЦОВА Георгія Никифоровича; здобувача кафедри АТПіМЕ БЛЯУТА Юрія Євстахійовича, склали даний акт про те, що на ДКС «Дашава» протягом 9-17 серпня 2011 року проведено комплекс тестів на ГПА ст. №№3,4,5 з метою визначення реальних навантажувальних і помпажних характеристик нагнітачів типу НЦ-56 та НЦ-41. Обробка результатів випробувань та побудова помпажних характеристик нагнітачів виконувалися з використанням «Системи автоматичного зняття та побудови помпажної характеристики відцентрових нагнітачів». При розробці методики випробувань та промислового зразка системи використані результати дисертаційної роботи Бляута Ю.Є. «Автоматизація процесу ідентифікації помпажних характеристик газоперекачувальних агрегатів з газотурбінним приводом».

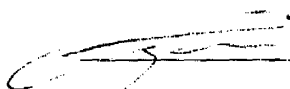
Система прийнята в промислову експлуатацію на ДКС «Дашава» філії УМГ «Львівтрансгаз» з 31 грудня 2010 року, згідно «Акту приймання у промислову експлуатацію системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом ГПА-Ц-6,3 виробництва ТОВ «Укргазтех».

Очікуваний ефект: зняття та побудова реальної помпажної характеристики нагнітачів типу НЦ-56 та НЦ-41 на ГПА Ц-6,3 ДКС «Дашава» забезпечить зменшення об'ємів рециркуляції транспортованого газу, в передпомпажних режимах роботи компресорного цеху, а відповідно скорочення об'ємів споживання паливного газу за рахунок розширення використовованого робочого діапазону вказаних нагнітачів. Визначення реальної помпажної кривої, для кожного типу нагнітача, дозволить реалізувати точне регулювання нагнітача антипомпажним клапаном, що в свою чергу вплине на зниження аварійності, при роботі в перехідних і передпомпажних режимах та забезпечить економію пускового газу.


Очікуваний економічний ефект складе понад 0,8 млн. грн. на рік: за рахунок економії паливного і пускового газу, а також скорочення об'ємів рециркуляції по КС орієнтовно на 80%.

Від Дашавського ВУПЗГ:

начальник ГКС «Дашава»

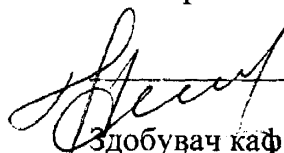
 /Дулиш І.Д./

Начальник служби КВПіА, МіГ

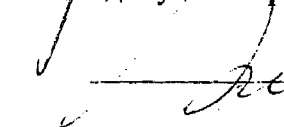
 /Курилишин М.С./

Від ІФНТУНГ:

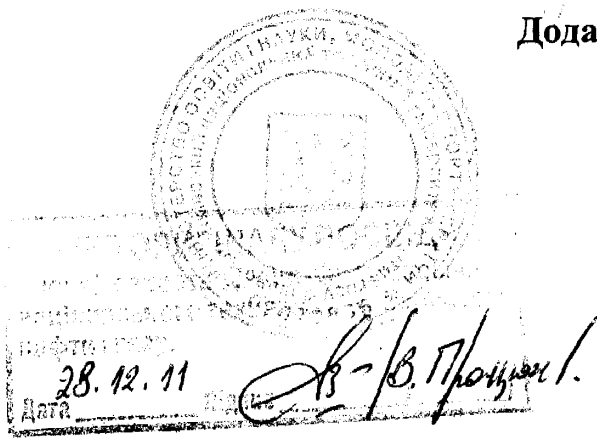
Зав.каф. АТПіМЕ, д.т.н., проф.

 /Семенцов Г.Н./

Здобувач каф. АТПіМЕ

 /Бляут Ю.Є./

Додаток У




ЗАТВЕРДЖУЮ:
 Ректор Івано-Франківського
 національного технічного
 університету нафти і газу
 Є.І. Крижанівський
 26.12 2011 р.

АКТ


**про впровадження матеріалів дисертації здобувача
 кафедри автоматизації технологічних процесів і моніторингу в екології
 Бляута Юрія Євстаховича
 у навчальний процес**

Ми, що нижче підписалися, проректор, доктор фізико-математичних наук, професор Галушак М.О., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації технологічних процесів і моніторингу в екології ІФНТУНГ Семенцов Г.Н. та здобувач кафедри АТП і МЕ Бляут Ю.Є, склали цей акт у тому, що матеріали дисертації «Автоматизація процесу ідентифікації помпажних характеристик газоперекачувальних агрегатів з газотурбінним приводом» впроваджені у навчальний процес при вивченні дисципліни «Автоматизація технологічних процесів і виробництв у нафтовій і газовій промисловості» (змістовний модуль ЗМ2: «Автоматизація в газовій промисловості») студентами спеціальності 7.050202 – Автоматизоване управління технологічними процесами.

Проректор
 з науково-педагогічної роботи

 Галушак М.О.

Завідувач кафедри АТП і МЕ

 Семенцов Г.Н.

Здобувач кафедри АТП і МЕ

 Бляут Ю.Є.