

УДК 621.438.9

КП

№ держреєстрації 0117U007375

Інв.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, тел. (0542) 33 41 08
факс (0542) 33 40 58

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи

д. ф-м. н., професор

_____ А. М. Черноус

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗВІТ
ПРО НАУКОВО-ТЕХНІЧНУ РОБОТУ
«РОЗРОБЛЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА
ДЛЯ УТИЛІЗАЦІЇ ЕНЕРГІЇ СТИСНУТИХ ГАЗІВ»
ЕТАП 2. Виготовлення дослідного зразка турбогенератора та складання
експериментального стенду для проведення його випробувань.
Розроблення методики і програми проведення випробувань дослідного
зразка турбогенератора.**

Начальник НДЧ,
к. ф-м. н., снс

Д. І. Курбатов

Керівник НТР,
к.т.н., доцент

С. М. Ванєєв

Суми – 2018

Рукопис закінчено 17 вересня 2018 р.

Результати роботи розглянуто науковою радою СумДУ,
протокол від 20 вересня 2018 р. №3

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НТР Провідний науковий співробітник к.т.н., доцент	С. М. Ванєєв (реферат, вступ, розділи 1, 2, 3, 4, висновки)
Відповідальний виконавець Провідний науковий співробітник к.т.н., професор	В. М. Арсен'єв (вступ, розділ 3, висновки)
Виконавці: Провідний науковий співробітник к.т.н.	І.М. Дегтярьов (розділ 2)
Провідний науковий співробітник к.т.н.	В.М. Бага (розділи 2, 3)
Провідний науковий співробітник, к.ф-м.н., доцент	В.О. Журба (розділи 2, 3)
Науковий співробітник	Д.В. Мірошніченко (вступ, розділи 1, 2, 3, 4)
Науковий співробітник	Є.М. Олада (розділ 2)
Науковий співробітник	Я.В. Знаменщиков (розділ 2)
Молодший науковий співробітник	Т.С. Родимченко (розділ 1, 4)

РЕФЕРАТ

Звіт про НТР: 64 с., 42 рис., 4 табл., 8 джерел.

Об'єкт дослідження - дослідний зразок енергозберігаючого турбогенератора на основі вихрової розширювальної машини.

**ВИХРОВА РОЗШИРЮВАЛЬНА ТУРБОМАШИНА,
ТУРБОГЕНЕРАТОР, ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОР, СТЕНД, ДОСЛІДНИЙ
ЗРАЗОК.**

Мета роботи - створення дослідного зразка турбогенератора та експериментального стенду для проведення його випробувань.

Методи дослідження - фізичний експеримент, аналіз.

Створений дослідний зразок енергозберігаючого турбогенератора на основі вихрової розширювальної машини на параметри: номінальна потужність на клеммах електрогенератора - 3 кВт; тиск газу на вході - 0,3-0,6 МПа (абс.); тиск газу на виході - 0,1-0,3 МПа (абс.); температура газу на вході - 283-313 К; номінальна частота обертання ротора турбогенератора - 3000 об/хв; витрата газу - не більше 500 нм³/год.; ККД – не нижче 40%.

Конструкція турбогенератора дозволяє досліджувати вплив основних геометричних параметрів проточної частини на ефективність вихрової розширювальної турбомашини і генератора в цілому.

Створено експериментальний стенд для проведення випробувань дослідного зразка турбогенератора на основі вихрової розширювальної машини.

У складі стенду створена інформаційно-вимірювальна система, яка забезпечує контроль стану обладнання; здійснює реєстрацію інформації та обробку даних вимірювань з представленням результатів у табличному і графічному вигляді; забезпечує надійне зберігання отриманої інформації тощо.

Розроблена програма і методика проведення випробувань дослідного зразка турбогенератора.

Розроблено методику обробки дослідних даних випробувань вихрового турбогенератора.

Результати роботи можна використовувати в різних галузях економіки і суспільства: найбільш перспективним є використання вихрових розширювальних турбомашин для створення тихохідних (з частотою обертання 3000 об/хв) турбогенераторів і трубопроводів відносно невеликої потужності (до 500 кВт).

ЗМІСТ

С.

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧОК, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	.....
ВСТУП.....	.....
1 ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ДОСЛІДНОГО ЗРАЗКА ВИХРОВОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА .....	.....
2 СТЕНД ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ ДОСЛІДНОГО ЗРАЗКА ВИХРОВОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА.....	.....
2.1 Мета і завдання випробувань.....	.....
2.2 Опис стенду.....	.....
2.2.1 Джерело стиснутого повітря.....	.....
2.2.2 Вихрова розширювальна турбомашинна.....	.....
2.2.3 Електрогенератор.....	.....
2.2.4 Система силового підключення, контролю та регулювання електроенергії, що виробляється.....	.....
2.2.5 Трубопровідна обв'язка стенду.....	.....
3 КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ ТА ПРИЛАДИ.....	.....
3.1 Вимірювані параметри.....	.....
3.2 Інформаційно-вимірювальна система (ІВС) для випробувань .....	.....
3.2.1 Вимоги до ІВС для забезпечення газодинамічних випробувань.....	.....
3.2.2 Будова і функціонування ІВС.....	.....
4 МЕТОДИКА ОБРОБКИ ДОСЛІДНИХ ДАНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВИХРОВОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА.....	.....
ВИСНОВКИ.....	.....
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	.....

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧОК, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- D – діаметр, м;
- π_T – ступінь зниження тиску в турбіні;
- p – тиск, Па; кількість пар полюсів електрогенератора;
- ρ – густина, кг/м³;
- i – питома ентальпія, Дж/кг;
- c_p – масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К);
- k – показник адіабати;
- R – питома газова стала, Дж/(кг·К);
- h_s – питома ізентропна різниця ентальпії (питома наявна робота розширювальної машини), Дж/кг;
- C_s – ізентропна швидкість витікання, що характеризує наявну питому роботу розширювальної машини, м/с;
- λ_u – безрозмірна швидкість в коловому напрямку;
- n – частота обертання робочого колеса, об/хв;
- u – колова швидкість робочого колеса на зовнішньому діаметрі;
- \bar{u} – наведена колова швидкість робочого колеса;
- G – масова витрата, кг/с;
- N_g – потужність на валу турбіни, Вт;
- N_s – наявна потужність, Вт;
- V – об'ємна витрата газу, м³/с;
- U – напруга в ланцюгах електрогенератора;
- I – сила струму в ланцюгах електрогенератора;
- f – частотою струму в електромережі;
- МРЕ – мала розподілена енергетика;
- ДГА – детандер-генераторний агрегат;

ЕРС – електрорушійна сила;

СГ – синхронний генератор;

АГ – асинхронний генератор;

ІВС – інформаційно-вимірювальна система.

Решта умовних позначень пояснюються в тексті.

ВСТУП

Енергозбереження в Україні та в світі здійснюється за допомогою централізованих електричних систем через великі теплові електростанції з потужними паровими турбінами, енергія від яких розподіляється по складній системі мереж, що має певні переваги, так як при будівництві великих станцій знижується вартість кіловата встановленої потужності.

В теперішній час зношення обладнання перевищує 60 %, в результаті надійності і якість постачання як електричної, так і теплової енергії знижується до критичного рівня. Доля втрат в мережах в різних регіонах досягає 25-32 %. Зростає собівартість і тарифи на вироблену енергію. Коштів для кардинального оновлення обладнання немає.

Вихід з ситуації, що виникла, полягає в ускоренні розвитку малої розподіленої енергетики (МРЕ): системи, яка складається з великої кількості, переважно малих, джерел енергії, які знаходяться безпосередньо у споживача (рисунок В.1). Така система забезпечує доповнення і резервування централізованих систем. При цьому споживач, який володіє власним джерелом енергії, по-перше, отримує її по собівартості, яка в рази нижче тарифів; по-друге, збільшує надійність енергопостачання; по-третє, може отримувати додаткові вигоди від продажу електроенергії сусідам; в четвертих, знижує пікове навантаження, що призведе до збільшення терміна служби основного обладнання. Збільшується серійність випускаємих промисловістю малих енергоустановок, внаслідок чого знижується їх собівартість.

Рішення проблеми розвитку МРЕ потребує наявності енергетичних комплексів малої і понадмалої одиничної потужності, які можна встановлювати на окремих об'єктах енергоспоживання, аж до індивідуального або автономного застосування.

Насичення економіки незалежними розподіленими енергоджерелами, як показує міжнародний досвід, веде до зниження вартості енергії, збільшення конкурентоздатності підприємств і енергетичної безпеки країни.

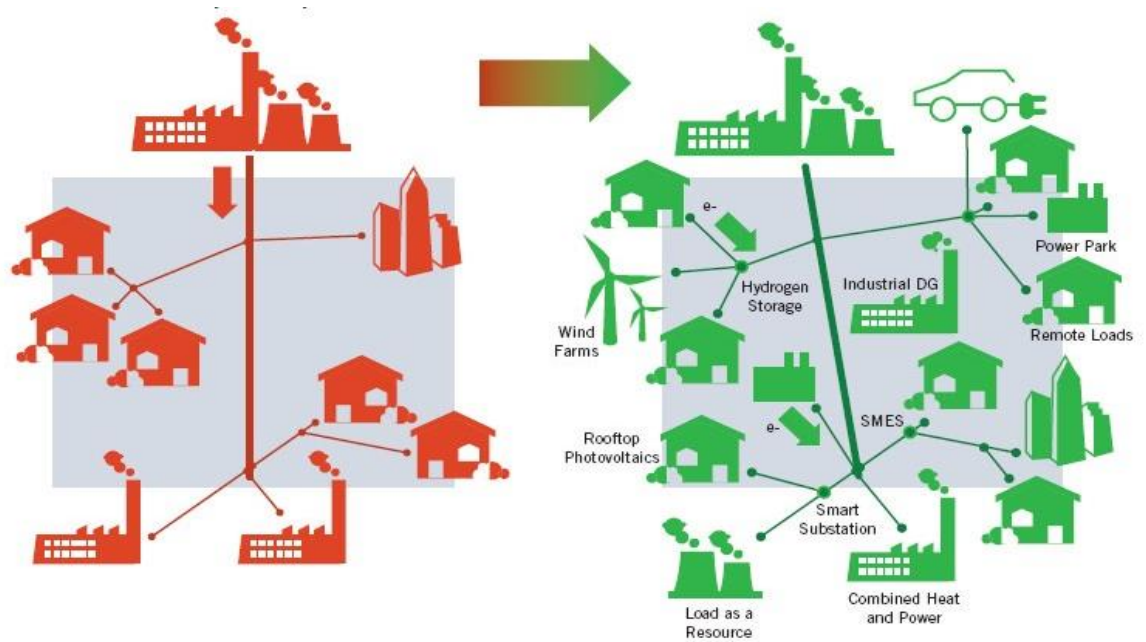


Рисунок В.1. Перехід від централізованої схеми енергопостачання до розподіленої.

Слід відмітити, що розширення децентралізації енергопостачання потребує рішення, принаймні, двох основних проблем:

- суттєвого збільшення ефективності (коефіцієнта використання енергії палива) енергоустановок за рахунок реалізації нових схем (технологій) перетворення енергії, принципів когенерації і утилізації ексергії, яка втрачається на вузлах редукування і викидним теплом;

- раціонального використання в малих енергоустановках різних місцевих, більш дешевих палив і теплоносіїв, у тому числі і нетрадиційних.

Часто, з різних причин, виникає необхідність забезпечення автономного енергозабезпечення, що обумовлює застосування автономних джерел електроенергії різних типів, які не залежать від надійності повітряних ліній електропередач.

Існує два напрямки застосування автономних джерел: власне автономне енергозабезпечення і використання їх поряд з великою енергетикою як засобів для зменшення витрат.

Основні вимоги до автономних джерел електроенергії:

- висока надійність;
- стійка робота у великому діапазоні навантаження;
- мінімальні обсяги технічного обслуговування;
- висока ремонтпридатність;
- вандалозахищеність;
- можливість розміщення в єдиному блок-боксі зі споживачами;
- низька вартість.

Основними вимогами до автономних джерел енергії є надійність, тривалість автономної роботи і зручність експлуатації. Вартість енергії, яка виробляється, може не являтися основним показником. Для використання автономних джерел в якості основного енергопостачання основним фактором є економічність. Окрім того, установки повинні бути довговічними, використовувати природне паливо і простими в експлуатації.

Основними критеріями вибору автономних джерел електроенергії є: вид палива; потужність установки; довготривалість автономної роботи; режим обслуговування (інтервал профілактичного огляду); можливість роботи паралельно з мережею та іншими джерелами; можливість дистанційного управління; зовнішнє антивандальне виконання; можливість роботи в суворих кліматичних умовах; екологічні характеристики.

Допоміжними критеріями є: габарити; ККД.

Перспективним напрямком є створення турбогенераторів і турбоприводів потужністю до 500 кВт на базі вихрових розширювальних турбомашин [1-5] для систем малої розподіленої енергетики, для автономних джерел живлення і в якості більш надійних турбоприводів.

Широке впровадження турбоустановок для автономного енергозабезпечення вимагає широких всебічних теоретичних і експериментальних досліджень і випробувань модельних і натурних розширювальних турбомашин та турбогенераторів у цілому. Для виконання таких досліджень необхідно створення матеріально-технічної бази, що включає нові і модернізовані стенди, експериментальні модельні та натурні

установки, об'єкти дослідження, виробниче та технологічне обладнання, обчислювальні і програмні комплекси. Необхідно розробити комплекс методик та програм проведення і обробки результатів експериментальних модельних досліджень і натурних випробувань, що дозволить отримати достовірні характеристики розширювальних турбомашин, інших елементів турбогенераторів та турбогенераторів в цілому. Отримані дослідні характеристики повинні підтвердити правочинність і достовірність розроблених принципів проектування розширювальних турбомашин і утилізаційних турбогенераторів на їх основі, що використовують енергію стисненого газу.

На цьому етапі роботи по розробленій на першому етапі конструкторській документації виготовлено дослідний зразок енергозберігаючого турбогенератора на базі вихрової розширювальної турбомашини і складено стенд для його досліджень. Розроблено також програму та методику випробувань цього турбогенератора.

1 ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ДОСЛІДНОГО ЗРАЗКА ВИХРОВОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Для утилізації енергії надлишкового тиску газів і парів на вузлах редукування в якості альтернативи класичним лопатковим розширювальним машинам (осьовим і доцентровим) пропонується використовувати в турбоагрегатах і установках вихрову розширювальну машину в діапазоні потужностей до 500 кВт. Вихрові розширювальні турбомашини, маючи усі переваги класичних турбін, мають також і ряд переваг перед ними: вони набагато простіші конструктивно і дешевші у виготовленні та обслуговуванні, порівняно низькообертові, що дозволяє створювати турбодетандерні агрегати в безредукторному виконанні з терміном окупності 1-2 роки.

У газовій промисловості утилізаційні турбогенератори можуть встановлюватися паралельно або замість вузлів редукування на газорозподільних станціях (ГРС) магістральних газопроводів, газорозподільних та газорегуляторних пунктах (ГРП) промислових підприємств, на компресорних станціях (КС) з газотурбінним приводом компресорів (рисунок 1.1). На ГРС, ГРП і КС вже використовуються вироби закінченої заводської готовності: нагрівачі, для очищення газу, засоби вимірювання витрат і т. ін., тому додаткового спеціального обладнання при установці детандер-генераторних агрегатів (ДГА) на основі вихрових турбомашин на ГРС, ГРП або КС не потрібно. У газовій промисловості ДГА виконують у вибухозахищеному виконанні. Тому оптимальним варіантом є використання конструкції з робочим колесом безпосередньо на валу асинхронного генератора у вибухозахищеній оболонці (рисунок 1.2).

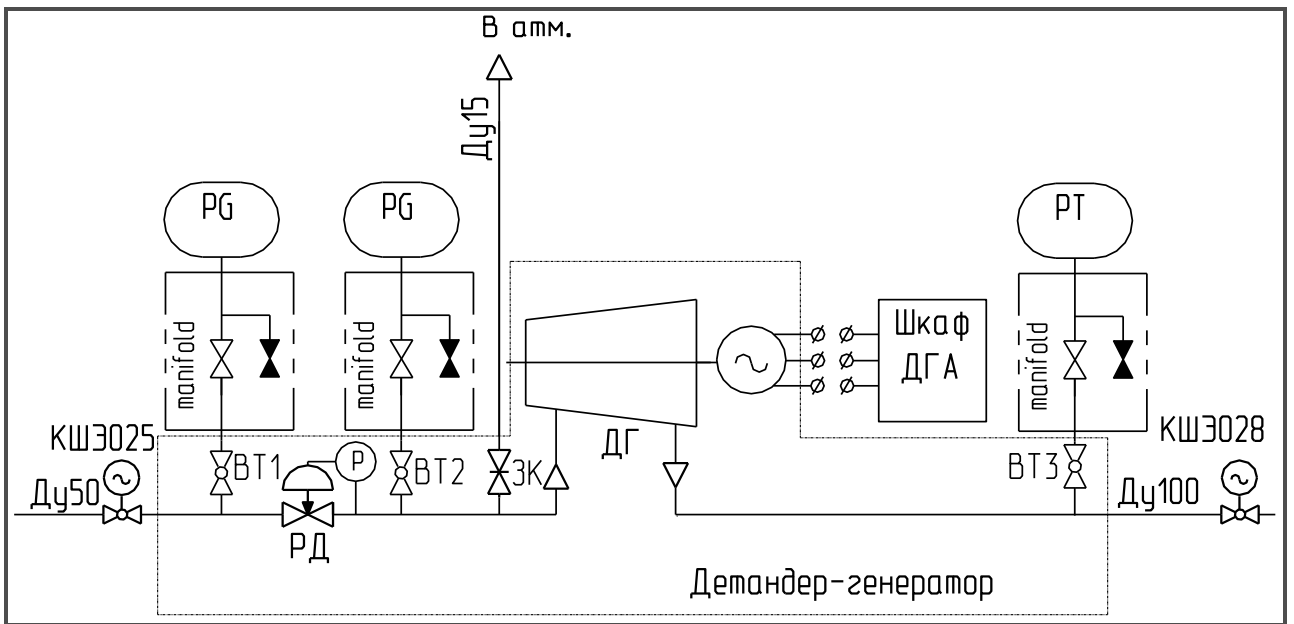
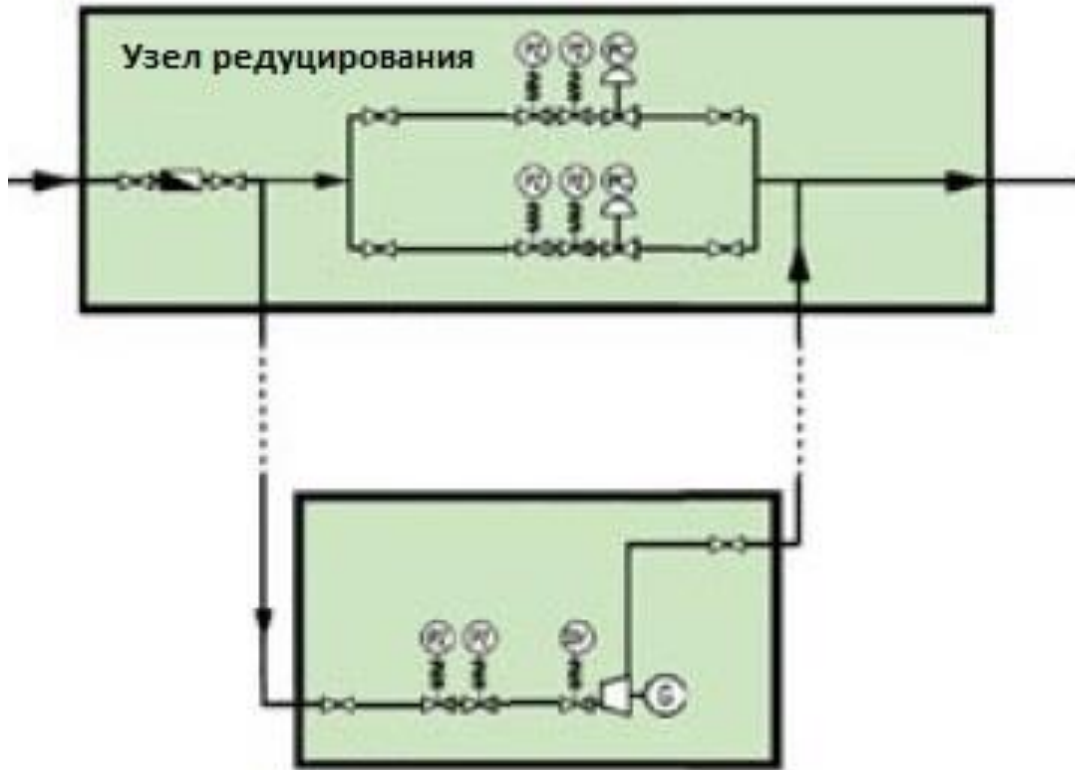


Рисунок 1.1 - Модернізація вузла редукування газу шляхом установки утилізаційного ДГА на базі вихрової розширювальної машини

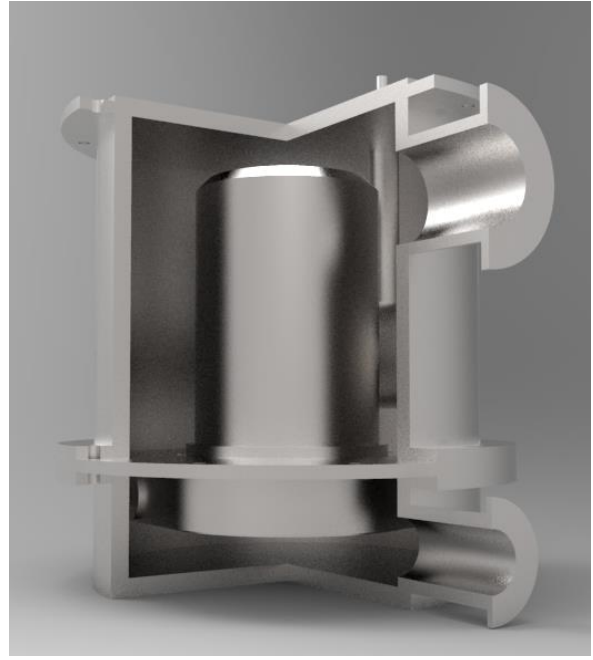


Рисунок 1.2 – Конструкція турбогенератора на базі асинхронного електрогенератора

В енергетиці, хімічній, харчовій промисловості, в комунальному господарстві є багато енерговузлів, на яких дроселюється до параметрів технологічних процесів водяна пара, що виробляється в різних котлах. На цих енерговузлах також дуже вигідно використання вихрових утилізаційних турбогенераторів.

Малопотужні парові турбіни встановлюються в котельнях з котлами ДКВР або іншими, працюють в схемі котельні замість РОП (редукційно-охолоджувального пристрою) або паралельно з ним, на перепаді тисків насиченої або перегрітої пари, що йде від котла на технологію або на опалення і гаряче водопостачання.

Застосування протитискових парових турбін в котельнях з паровими котлами - найбільш простий спосіб утилізації енергії парового потоку для вироблення електроенергії, який перетворює ці котельні в мініТЕЦ. Це пов'язано з тим, що насичена або перегріта пара, що виробляється в котлах при тиску 0,6-1,4 МПа, марно дроселюється до 0,12-0,4 МПа в РОП. Якщо паралельно РОП встановити паровий турбогенератор і редукувати пару в його турбіні, то потужність на виході генератора може скласти 50-600 кВт.

При роботі на парі з-за високих температур турбіну ДГА, як правило, виконують в окремому корпусі для охолодження опор і генератора (рис. 1.3). Турбіна і генератор за такою схемою монтуються на рамі і з'єднуються муфтою.

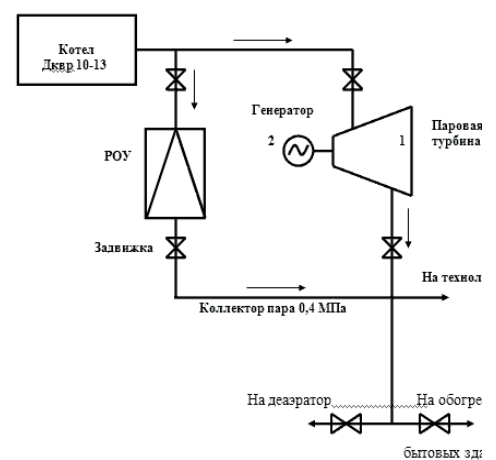


Рисунок 1.3 - Турбогенераторна установка на основі ступеня тиску з повторним підведенням робочого тіла, тобто за багатоступінчасто-петлевою схемою розширення на одному робочому колесі.

У даній роботі конструкція вихрової розширювальної турбомашини дослідного зразка турбогенератора виконана в окремому корпусі (рис. 1.4). Робоче колесо розташоване консольно на валу розширювальної машини для зручності зміни геометричних параметрів та імітації роботи при установці безпосередньо на вал генератора. Вал генератора і розширювальної машини з'єднуються муфтою. Така конструкція турбогенератора дозволяє досліджувати різні типи електрогенераторів і, при необхідності, вимірювати момент і потужність безпосередньо на валу розширювальної машини.

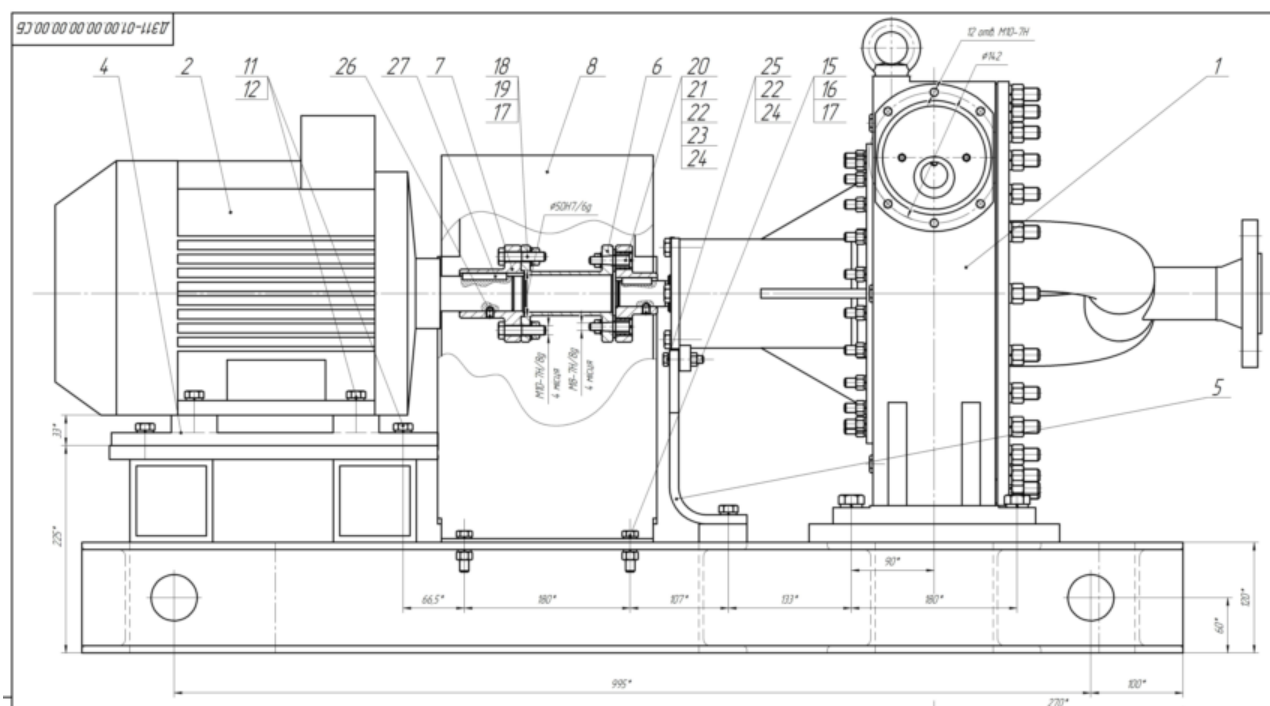


Рисунок 1.4 – Турбогенератор на базі вихрової розширювальної машини

2 СТЕНД ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ ДОСЛІДНОГО ЗРАЗКА ВИХРОВОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА

2.1 Мета і завдання випробувань

Метою випробувань дослідного зразка турбогенератора на базі вихрової розширювальної турбомашини є перевірка шляхом випробувань його відповідності заданим технічним вимогам.

Завдання випробувань:

- отримання достовірних характеристик вихрової розширювальної машини і турбогенератора;
- визначення впливу режимних і геометричних параметрів на економічність і характеристики вихрової розширювальної турбомашини і турбогенератора на її основі на номінальному і змінних режимах;
- отримання коефіцієнтів для уточнення методик розрахунку вихрової розширювальної турбомашини і турбогенератора на її основі.

2.2 Опис стенду

Випробуванням піддається дослідний зразок турбогенератора потужністю 3 кВт на основі вихрової розширювальної машини.

При проведенні випробувань в якості робочого тіла буде використовуватися повітря.

Показники дослідного зразка турбогенератора згідно ТЗ:

- номінальна потужність на клеммах електрогенератора повинна складати 3 кВт;
- тиск газу на вході: 0,3-0,6 МПа (абс.);
- тиск газу на виході: 0,1-0,3 МПа (абс.);

- температура газу на вході: 283-313 К;
- номінальна частота обертання ротора турбогенератора: 3000 об/хв;
- витрата газу – не більше 500 нм³/год.;
- ККД – не нижче 40%.

Потужність на клеммах електрогенератора може становити 10 кВт при збільшенні тиску на вході до 0,8-1,6 МПа (абс.) та/або витрати газу до 600-1500 нм³/год.

Основними складовими дослідного зразка енергозберігаючого турбогенератора є:

- вихрова розширювальна турбомашина;
- електрогенератор постійного струму з блоком керування вихідною напругою для проведення випробувань з метою визначення характеристик турбогенератора в широкому діапазоні зміни навантаження за допомогою перетворювача струму (синхронного інвертора);
- електрогенератор трифазного змінного струму (асинхронний генератор) з перетворювачем частоти змінного струму для визначення можливості використання його в промислових зразках, як більш дешевого і економічного.

Вихрова розширювальна турбомашина призначена для отримання механічної роботи на валу шляхом перетворення енергії надлишкового тиску повітря при його розширенні в проточній частині турбіни.

Турбогенератор на базі вихрової розширювальної турбомашини призначений для вироблення електроенергії шляхом перетворення механічної роботи на валу в електроенергію.

Принципова схема стенду показана на рис. 2.1, складальне креслення стенду – на рис. 2.2.

Основними складовими стенду є:

- джерело стиснутого повітря (компресор) (рис. 2.1);
- турбогенератор (поз. 1, рис. 2.2), який складається з вихрової розширювальної турбомашини і електрогенератора;

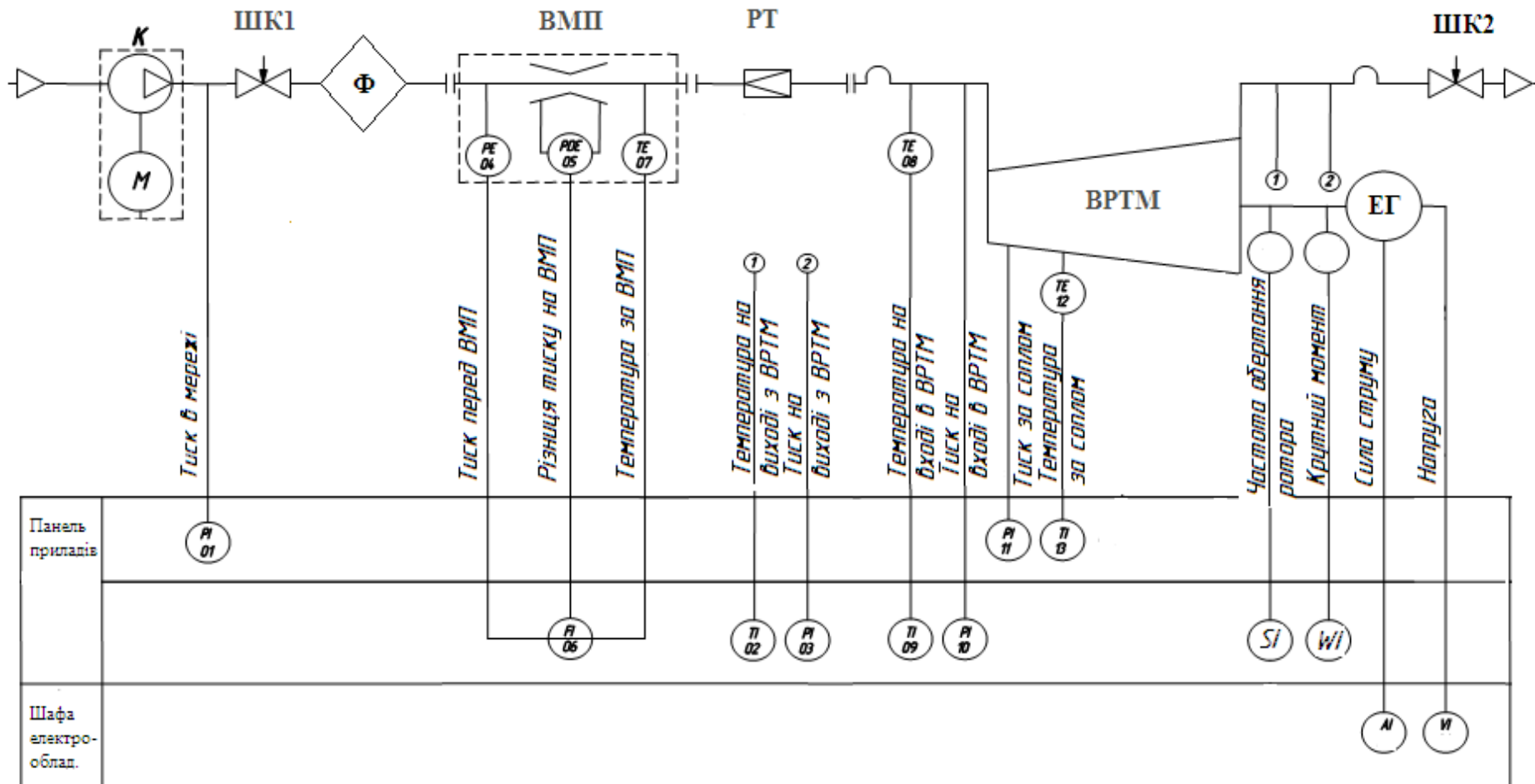


Рисунок 2.1 - Схема стенда (принципова)

К - компресор; ВРТМ - вихрова розширювальна турбомашина; ЕГ - електрогенератор; РТ - регулятор тиску; ШК – шаровий кран; ВМП - витратомірний пристрій; Ф - фільтр; FI - блок індикації витратоміра; PI - манометр; TI - термометр; SI - блок тахометра; WI - блок індикації крутного моменту

- система силового підключення, контролю та регулювання електроенергії, що виробляється (поз. 2, рис. 2.2),

- система вимірювання витрати робочого тіла (поз. 22, рис. 2.2), частоти обертання ротора, крутного моменту на валу (при необхідності), тисків і температур на вході і виході розширювальної машини (поз. 13, рис. 2.2);

- трубопровідна обв'язка стенду (поз. 4-9, рис. 2.2), а також арматура запирання і регулювання тиску газу (поз. 23, рис. 2.2).



Рисунок 2.3– Фото стенда

2.2.1 Джерело стиснутого повітря

В якості джерела стиснутого повітря на кафедрі ТТФ використовується кілька компресорів:

- поршневий компресор ГСВ-1/12-1101-В5 (рис. 2.4);

- поршневий компресор СБ 4/Ф-500.LB 75 рис. 2.5;
- гвинтовий компресор ВВ-0,35/8 У2 рис. 2.6.

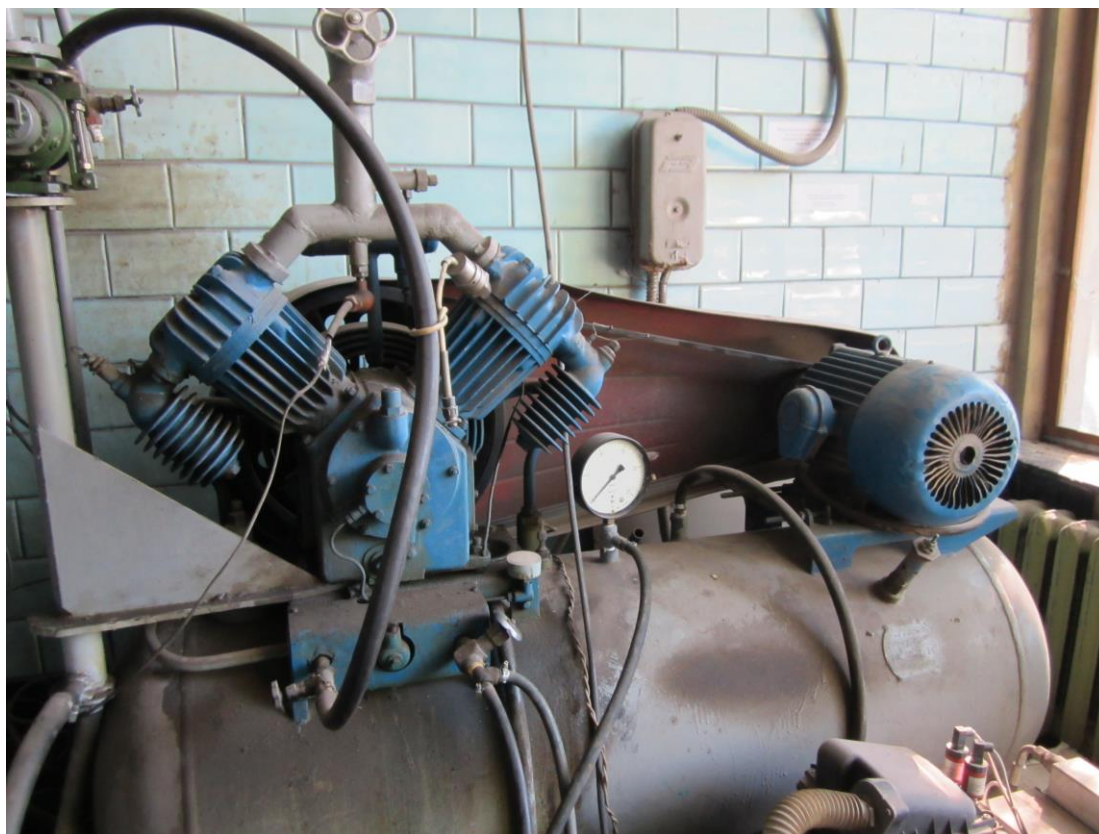


Рисунок 2.4– Компресор ГСВ-1/12-1101-В5

Технічні характеристики компресора ГСВ-1 / 12-1101-В5:

- продуктивність – 1000 літрів за хвилину (+/- 5%);
- ємність ресивера – 500 літрів;
- кінцевий тиск стисненого повітря – 12 атмосфер;
- число ступенів стиснення – 2;
- число циліндрів – 4;
- число обертів колінчастого валу компресора – 750 об/хв;
- потужність електроприводу - 10 кВт;
- повітряне охолодження;
- автоматичне видалення конденсату;
- габарити 1866*670*1430 мм (Д Ш В);
- вага – 520 кг (без масла).

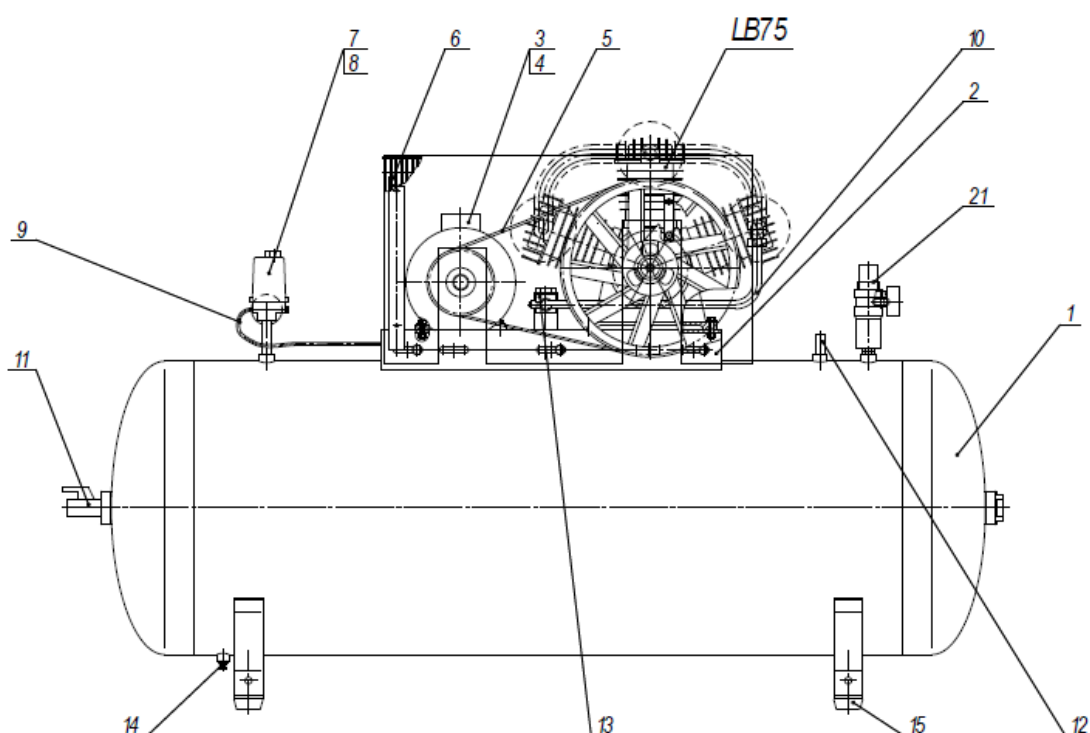


Рисунок 2.5– Компрессор СБ 4/Ф-500.LB 75: а) –фото компрессора;
 б) – загальний вид компрессора.

Технічні характеристики компресора СБ 4/Ф-500.LB 75 надані у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Технічні характеристики компресора СБ 4/Ф-500.LB 75

Тип поршневого компресора по кількості ступенів стиснення	Одноступеневий
Тип поршневого компресора по застосуванню мастила	Масляний
Тип поршневого компресора по розташуванню циліндрів	Кутовий
Тип поршневого компресора	з ремінним приводом
Тип компресора по мобільності	Стаціонарний
Продуктивність	0.95(куб. м/хв)
Максимальний тиск	1.0(МПа)
Об'єм ресивера	500.0(л)
Розташування ресивера	Горизонтально
Максимальна температура навколишнього середовища	40.0(град.)
Мінімальна температура навколишнього середовища	5.0(град.)
Рівень шуму	80.0(дБ)
Вага	230.0(кг)
Габаритні розміри	
Ширина	610.0(мм)
Довжина	2000.0(мм)
Висота	1250.0(мм)
Електричні параметри	
Споживана потужність	5500.0(Вт)
Частота струму	50(Гц)
Додаткові характеристики	
Регулювання тиску	Так
Система автоматичного захисту	Так
Повітряний фільтр	Так
Система охолодження циліндрів	Повітряна



Рисунок 2.6– Компресор ВВ-0,35/8 У2

Технічні характеристики компресора ВВ-0,35/8 У2 надані у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. Технічні характеристики компресора ВВ-0,35/8 У2.

Продуктивність	0.35(куб. м/хв)
Максимальний тиск	0.88 (МПа)
Вага	85.0(кг)
Габаритні розміри	
Ширина	479.0(мм)
Довжина	842.0(мм)
Висота	594.0(мм)
Електричні параметри	
Споживана потужність	3300.0(Вт)
Частота струму	50(Гц)
Додаткові характеристики	
Регулювання тиску	Так
Система автоматичного захисту	Так
Повітряний фільтр	Так
Система охолодження циліндрів	Повітряна

2.2.2 Вихрова розширювальна турбомашина

Вихрова розширювальна турбомашина (рис. 2.7) призначена для отримання механічної роботи на валу шляхом перетворення енергії надлишкового тиску повітря при його розширенні в проточній частині машини.

У вихровій розширювальній турбомашині робоче тіло через сопло надходить у проточну частину, утворену каналом корпусу і міжлопатковими каналами робочого колеса, що обертається в корпусі з малими радіальними і торцевими зазорами. З проточної частини газ відводиться через вихідний отвір. Між соплом і вихідним отвором розташований відсікач.

Середня колова складова швидкості (середньовитратна швидкість) робочого тіла в каналі більша за колову швидкість робочого колеса. Щоб ефективно використовувати енергію робочого тіла, що знаходиться в каналі, потрібно організувати поздовжньо-вихровий рух вздовж проточної частини. Тоді частинки газу в проточній частині турбіни рухаються за спіралеподібною траєкторією від входу до виходу машини, багаторазово взаємодіючи з лопатками робочого колеса і поступово віддаючи йому енергію (рис. 2.8).

При переміщенні частинок в міжлопаткових каналах робочого колеса змінюється напрям і величина їх швидкості і момент кількості руху, в результаті чого на лопатках з'являються сили, що призводять колесо в рух. Ця поздовжньо-вихрова течія є базовою при обміні енергією між частинками газу в каналі корпусу і лопатками робочого колеса, і чим інтенсивніше воно організовано, тим вища ефективність турбіни.

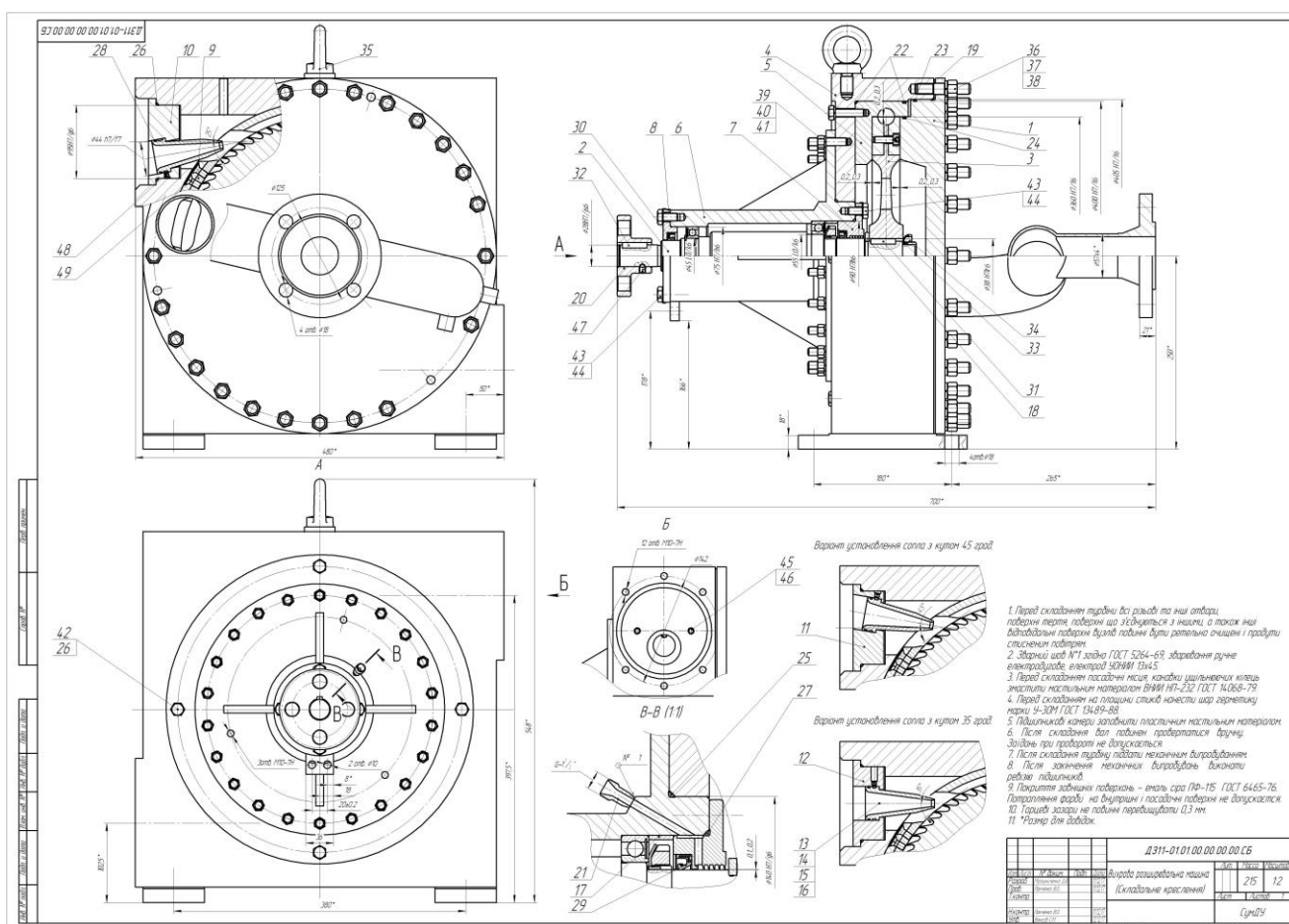


Рисунок 2.7 - Вихрова розширювальна турбомашина с зовнішнім периферійним каналом

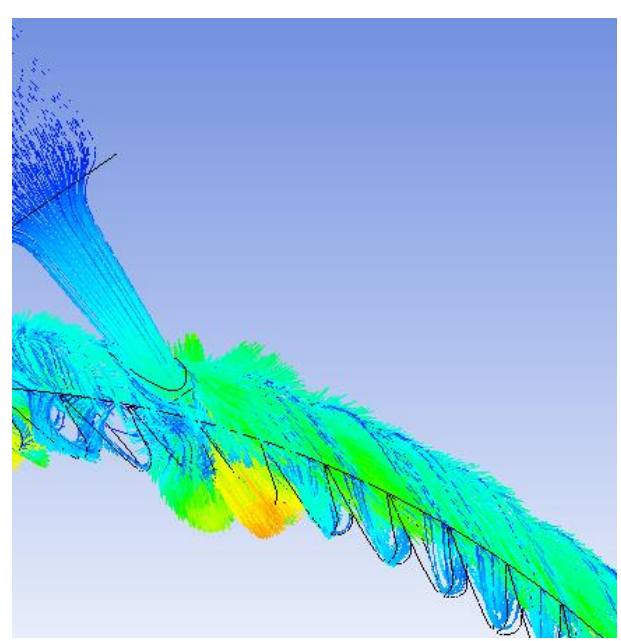


Рисунок 2.8 - Візуалізація течії газу у вихровій РТМ з зовнішнім периферійним каналом

На ефективність передачі енергії від газового потоку до лопаток робочого колеса суттєвий вплив мають геометричні параметри, що характеризують як ступінь у цілому (відношення діаметра меридіонального перерізу проточної частини до діаметра робочого колеса, відношення площі вихідного перерізу сопла до площі меридіонального перерізу проточної частини тощо), так і окремі його елементи (кути установки, нахилу і число лопаток робочого колеса, кути нахилу сопла і вихідного патрубку тощо).

В процесі випробувань вихрової розширювальної турбомашини і турбогенератора на її основі передбачено регулювання:

а) частоти обертання робочого колеса n [об/хв] для визначення оптимальних, з точки зору гідравлічного ККД, значень наведеної колової швидкості;

б) кута входу потоку газу, що витікає з сопла на лопатки робочого колеса (кута між віссю сопла і дотичній до зовнішнього діаметру робочого колеса);

в) діаметра сопла d_c , що дозволяє змінювати витрату і швидкості на виході з сопла, а також - відношення площі сопла до площі меридіонального перерізу проточної частини.

2.2.3 Електрогенератор

В якості електрогенератора використовується генератор асинхронного типу або генератор синхронного типу.

Синхронний генератор (СГ) - це синхронна машина, яка працює в режимі генератора і в якій частота обертання магнітного поля статора дорівнює частоті обертання ротора. Ротор з магнітними полюсами створює обертове магнітне поле, яке, перетинаючи обмотку статора, наводить в ній електрорушійну силу (далі – ЕРС).

У синхронному генераторі ротор виконаний у вигляді постійного магніту або керованого електромагніту. Число полюсів ротора може бути два, чотири і т.д., але кратне двом. У побутових електростанціях використовується, як

правило, ротор з двома полюсами, що обумовлює частоту обертання валу вихрової розширювальної машини, як двигуна електростанції, 3000 об/хв для досягнення змінної напруги частотою 50 Гц.

Ротор СГ, при запуску, створює слабе магнітне поле, але зі збільшенням обертів, збільшується і ЕРС в обмотці збудження. Напруга з цієї обмотки через блок автоматичного регулювання (AVR) надходить на ротор, що, у свою чергу, дозволяє контролювати вихідну напругу за рахунок зміни магнітного поля ротора. Наприклад, підключене індуктивне навантаження «розмагнічує» ротор генератора і знижує вихідну напругу, а при підключенні ємнісного навантаження відбувається «підмагнічування» ротора генератора і підвищення вихідної напруги. Це називається "реакцією якоря" на зовнішній вплив. Для забезпечення стабільності вихідної напруги необхідно змінювати магнітне поле ротора шляхом регулювання струму в його обмотці, що і забезпечується блоком AVR.

Перевагою таких генераторів є висока стабільність вихідної напруги, а недоліком – можливість перевантаження по струму, так як при підвищеному навантаженні регулятор може надмірно підвищити струм в обмотці ротора. Ще до недоліків синхронного генератора можна віднести наявність щіткового вузла, який рано чи пізно доведеться обслуговувати.

Завдяки такому способу регулювання, незалежно від зміни струму навантаження і обертів валу вихрової розширювальної машини, як двигуна електростанції, стабільність вихідної напруги генератора залишається дуже високою, приблизно $\pm 1\%$ від номінальної.

На сучасних електростанціях використовують трифазні синхронні генератори змінного струму частотою 50 Гц, які призначено для перетворення механічної енергії первинного двигуна в електричну енергію. Для роботи вони з'єднуються безпосередньо з первинними двигунами електростанції, зазвичай з паровими, газовими або гідравлічними турбінами.

Між швидкістю обертання ротора СГ n , об/хв, і частотою струму в мережі f , Гц, існує зв'язок

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}$$

де p – кількість пар полюсів генератора.

Номінальні параметри синхронних генераторів.

Генератори випускають для визначеного довгодопустимого режиму роботи. Якщо генератор працює безвідмовно в умовах, для яких його спроектовано і виготовлено, то відповідний його режим роботи називають номінальним.

Крім частоти обертання, СГ характеризують такими основними номінальними параметрами, як номінальна напруга, номінальний струм, номінальна повна потужність, номінальна активна потужність, номінальний струм ротора, номінальний коефіцієнт потужності, номінальний коефіцієнт корисної дії.

Номінальна напруга трифазного генератора, кВ, – це лінійна напруга статорної обмотки.

Номінальний струм статора, кА, – це такий струм, за якого генератор може нормально працювати тривалий час за номінальних значень потужності та напруги.

Номінальна повна потужність, кВА – це потужність, тривалу роботу з якою для генератора визначено заводом-виробником.

Номінальний струм ротора, А, – це максимальний струм збудження генератора, за яким генератор віддає в мережу номінальну потужність у разі відхилення напруги статора в межах $\pm 5\%$ від номінального значення і номінального коефіцієнта потужності.

Номінальний коефіцієнт корисної дії визначається для кожного генератора за номінального навантаження і номінального коефіцієнта потужності. Значення коефіцієнта корисної дії сучасних генераторів становлять 96,65 - 98,75%.

В даній розробці використовується генератор синхронного типу KS 10000E-3 ATS (рис. 2.9) з наступними характеристиками:

- номінальна потужність – 7,5 кВт;
- максимальна потужність – 8,0 кВт;
- напруга – трифазна (380 В).

Вибраний генератор має вбудований блок автоматичного регулювання (AVR), що звільняє від необхідності в розробці блоку керування електрогенератором.

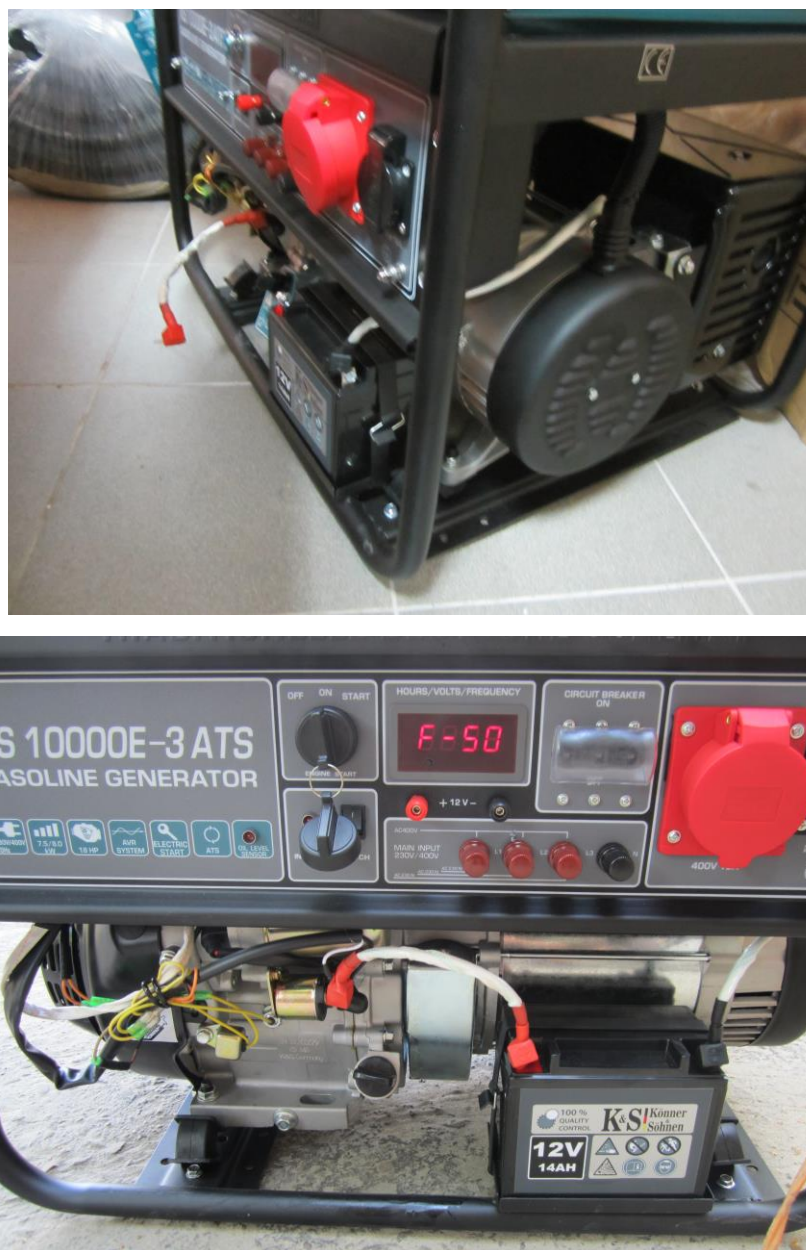


Рисунок 2.9 - Генератор синхронного типу KS 10000E-3 ATS з блоком автоматичного регулювання

Асинхронний генератор (АГ) – це асинхронна машина (двигун), що працює в режимі гальмування, ротор якої обертається з випередженням, але в тому ж напрямку що й магнітне поле статора.

Незважаючи на простоту обслуговування, малу чутливість до короткого замикання і невисоку вартість, асинхронні генератори застосовуються досить рідко, так як є ряд недоліків: асинхронний генератор завжди споживає намагнічуючий струм значної сили, тому для його роботи необхідне джерело реактивної потужності (конденсатори), що залежить від активно-індуктивного характеру навантаження; ненадійність роботи в екстремальних умовах; збудження асинхронного генератора залежить від випадкових чинників і відбувається, як правило, при швидкості, що перевищує або дорівнює синхронній; залежність вихідної напруги і частоти струму від стійкості роботи двигуна тощо.

Автономні асинхронні генератори – це трифазні машини, що перетворюють механічну енергію первинного двигуна в електричну енергію змінного струму. Їх безсумнівною перевагою перед іншими видами генераторів є відсутність колекторно-щіткового механізму і, як наслідок цього, велика довговічність і надійність.

Якщо відключений від мережі асинхронний двигун привести в обертання від будь-якого первинного двигуна, то відповідно до принципу оборотності електричних машин при досягненні синхронної частоти обертання, на затискачах обмотки статора під дією залишкового магнітного поля утворюється деяка ЕРС. Якщо тепер до затискачів обмотки статора підключити батарею конденсаторів C (рис. 2.10), то в обмотках статора потече випереджаючий ємнісний струм, який в даному випадку намагнічує ротор. Ємність батареї C повинна перевищувати деяке критичне значення C_0 , залежне від параметрів автономного асинхронного генератора: тільки в цьому випадку відбувається самозбудження генератора і на обмотках статора встановлюється трифазна симетрична система напруг. Значення напруги залежить, в кінцевому рахунку,

від характеристики машини і ємності конденсаторів. Таким чином, асинхронний короткозамкнений електродвигун може бути перетворений в асинхронний генератор.

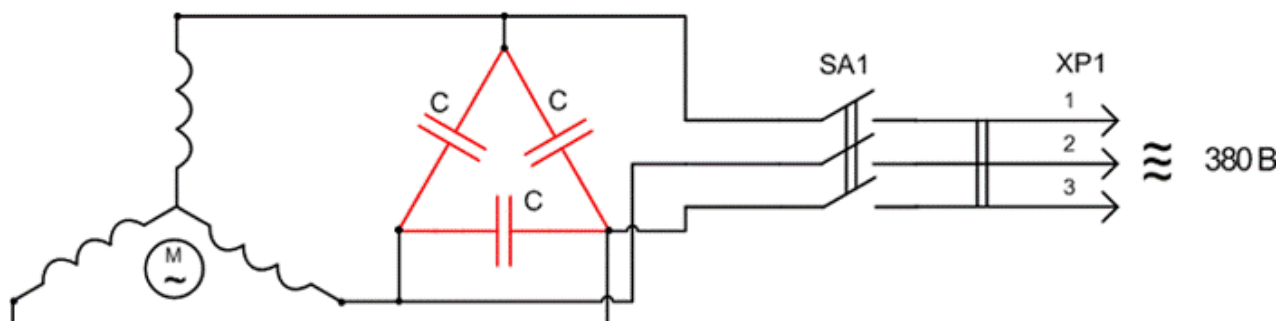


Рисунок 2.10 - Стандартна схема включення асинхронного електродвигуна як генератора.

Можна підібрати ємність таким чином, щоб номінальна напруга і потужність асинхронного генератора дорівнювали відповідно напрузі і потужності при роботі його в якості електродвигуна.

Для підтримки напруги постійною зі збільшенням навантаження необхідно збільшувати і ємність конденсаторів, тобто підключати додаткові конденсатори. Цю обставину необхідно розглядати як недолік асинхронного генератора. Слід також зазначити, що асинхронні генератори добре зарекомендували себе при роботі на постійну потужність, тобто коли немає потреби змінювати ємність конденсаторів.

Частота обертання ротора асинхронного генератора в нормальному режимі повинна перевищувати асинхронну частоту статора на величину ковзання $S=2\ldots 10\%$, і відповідати синхронній частоті. Невиконання цієї умови призведе до того, що частота напруги, що генерується може відрізнитися від промислової частоти 50 Гц, що призведе до нестійкої роботи частото-залежних споживачів електроенергії: електронасосів, пральних машин, пристроїв з трансформаторним входом. Особливо небезпечно зниження частоти, що генерується, так як в цьому випадку знижується індуктивний опір обмоток

електродвигунів, трансформаторів, що може стати причиною їх підвищеного нагрівання і передчасного виходу з ладу.

У якості асинхронного генератора може бути використаний звичайний асинхронний короткозамкнений електродвигун відповідної потужності без будь-яких переробок. Потужність електродвигуна-генератора визначається потужністю пристроїв, що підключаються до нього.

Окремо необхідно розглянути первинний механічний двигун, який буде приводити в обертання генератор. Як відомо, будь-яке перетворення енергії пов'язано з її неминучими втратами. Їх величина визначається ККД пристрою. Тому потужність механічного двигуна повинна перевищувати потужність асинхронного генератора на 50...100%. Наприклад, при потужності асинхронного генератора 5 кВт, потужність механічного двигуна повинна бути 7,5...10 кВт. За допомогою передавального механізму домагаються узгодження обертів механічного двигуна і генератора так, щоб робочий режим генератора встановлювався на середніх обертах механічного двигуна. При необхідності, можна швидко збільшити потужність генератора, підвищуючи оберти механічного двигуна.

Для використання в якості генератора асинхронного типу вибрано загальнопромисловий асинхронний електродвигун АІР132М2 (рис. 2.11).

Електродвигуни серії АІР - трифазні, асинхронні, змінного струму, загальнопромислові, застосовуються для комплектації агрегатів і механізмів різного призначення електроприводами (промислові насоси, вентиляційні системи, транспортери, підйомники тощо).

Умовне позначення електродвигуна АІР132М2:

АІ - позначення серії електродвигуна;

Р - варіант прив'язки потужності до настановних розмірів (стандарт РС3031-71);

132 - висота осі обертання, мм;

М - установчі розміри по довжині станини;

2 - число полюсів.

Електродвигуни серії АІР виготовляються за замовчуванням на напругу 380В або 220/380В.



Рисунок 2.11 - Генератор асинхронного типу (асинхронний електродвигун АІР132М2)

Параметри асинхронного електродвигуна АІР132М2 надані в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 - Характеристики електродвигуна АІР132М2.

Модель електродвигуна	Частота обертання ротора електродвигуна, об/хв.	Потужність електродвигуна, кВт	ККД, %	$\cos\varphi$	I_n/I_n	M_n/M_n	M_{max}/M_n	M_{min}/M_n	Маса електродвигуна, кг
АІР132М2	2930	11	89	0,86	7,5	1,6	2,2	1,2	60,4

2.2.4 Система силового підключення, контролю та регулювання електроенергії, що виробляється

Функціональна схема електричного навантаження турбогенератора з синхронним генератором показана на рис. 2.12.

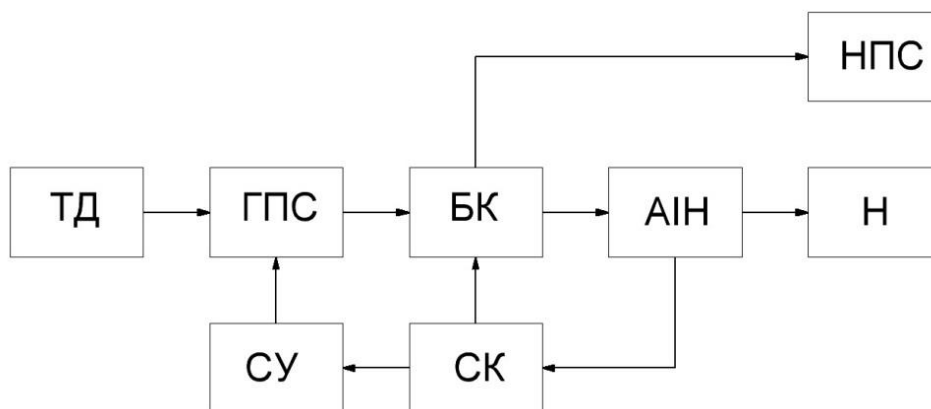


Рисунок 2.12 – Функціональна схема електричного навантаження турбогенератора з синхронним генератором

ТД – турбодетандер (вихрова розширювальна турбомашина); ГПС – генератор постійного струму (синхронний генератор); БК – блок керування ГПС; СК – система керування вихідними параметрами турбогенератора; СУ – система контролю вихідної напруги ГПС; АН – автономний інвертор напруги; НПС – навантаження постійного струму; Н – навантаження змінного струму

У вихровій розширювальній турбомашині енергія надлишкового тиску стиснутого газу перетворюється в механічну енергію на валу машини. В синхронному генераторі механічна енергія перетворюється в електричну енергію постійного струму. За допомогою блока керування і системи контролю вихідної напруги синхронного генератора, а також системи керування вихідними параметрами турбогенератора маємо на виході генератора струм необхідних параметрів. Автономний інвертор напруги (рис 2.13) перетворює постійну напругу в змінну напругу необхідного значення і форми. В системі передбачені навантаження постійного струму і навантаження змінного струму.



Рисунок 2.13 - Автономний інвертор

Функціональна схема електричного навантаження турбогенератора з асинхронним генератором показана на рис. 2.14.

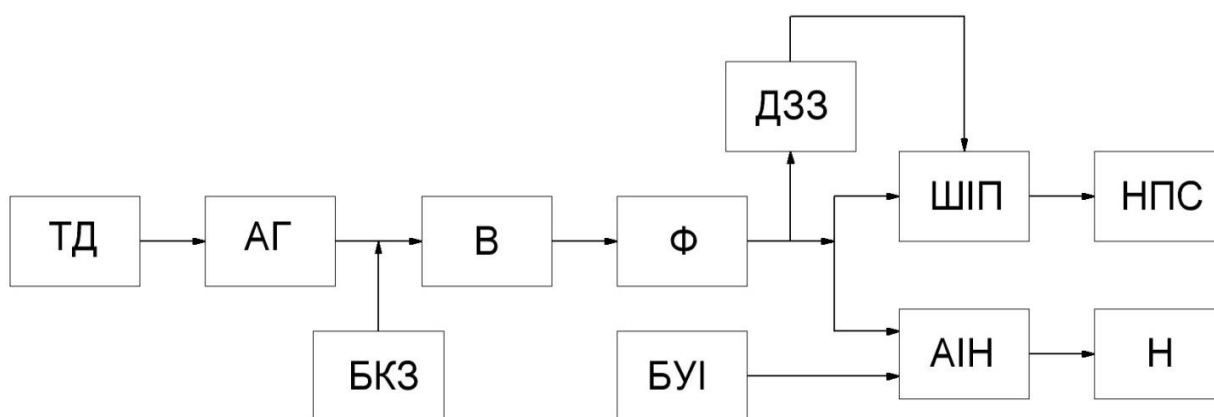


Рисунок 2.14 – Функціональна схема електричного навантаження турбогенератора з асинхронним генератором

ТД – турбодетандер (вихрова розширювальна турбомашина); АГ – асинхронний генератор; БКЗ – блок самозбудження; В – випрямляч; Ф – ємнісний фільтр; ШІП – широтно-імпульсний перетворювач; ДЗЗ – датчик зворотного зв'язку по напрузі; БУІ – блок управління інвертором; АІН – автономний інвертор напруги; НПС – навантаження постійного струму; Н – навантаження змінного струму.

У порівнянні з попередньою схемою, при наявності в системі асинхронної електричної машини для роботи її в генераторному режимі необхідно мати блок самозбудження, що забезпечує самозбудження АГ при відсутності додаткових джерел електроживлення, а також стійкий режим роботи АГ (на основі блока конденсаторів рис 2.15 та частотного перетворювача струму). В систему входить також блок випрямлячів рис. 2.16, що перетворює трифазну змінну напругу в постійну і ємнісний фільтр, що згладжує пульсації випрямленої напруги. Широтно-імпульсний перетворювач автоматично регулює навантаження АГ, підтримуючи стабільність випрямленої напруги за допомогою датчика зворотного зв'язку по напрузі.



Рисунок 2.15 – Блок конденсаторів



Рисунок 2.16 – Блок випрямлячів

Для живлення елементів системи силового підключення, контролю та регулювання електроенергії використовується акумулятор з зарядним пристроєм та трансформатор напруги рис. 2.17.



Рис. 2.17 – Елементи живлення частин системи силового підключення

Для реєстрації та контролю напруги та сили струму, що протікає в різних частинах схем застосовуються амперметри та вольтметри змінного або постійного струму рис. 2.18.

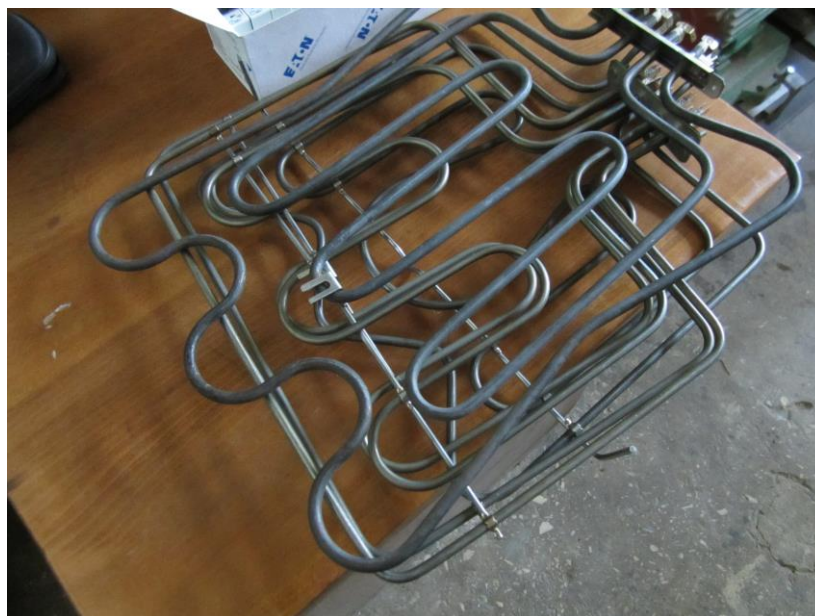


Рисунок 2.18 – Амперметри та вольтметри змінного (зліва) та постійного (зправа) струму.

В якості навантаження використовуються галогенові прожектори потужністю до 1000 Вт та повітряні ТЕНи потужністю до 2 кВт (рис. 2.19).



а)



б)

Рисунок 2.19 – Електричне навантаження для дослідного зразка вихрового турбогенератора: а) прожектори, б) ТЕНи

Прилади та пристрої системи силового підключення, контролю та регулювання електроенергії, що виробляється розміщені у шафі (рис. 2.20).



Рисунок 2.20 – Шафа з приладами та пристроями системи силового підключення, контролю та регулювання електроенергії, що виробляється

2.2.5 Трубопровідна обв'язка стенду

Трубопровідна обв'язка стенду складається з:

- рукава подачі стиснутого повітря від ресивера до вхідного трубопроводу (рис. 2.21);
- трьох кранів ДУ50 для запирання частини трубопроводу та регулювання тиску в ньому (рис. 2.22);

- кранів ДУ25 для з'єднання трубопроводу з атмосферою (рис. 2.23);
- ліній відбору тиску (рис. 2.24);



Рисунок 2.21 – Рукав подачі стиснутого повітря від ресивера



Рисунок 2.22 – Крани ДУ50

- Сталевих зварних ділянок трубопроводу, з'єднаних фланцями та ущільнених резино-технічними ущільненнями.



Рисунок 2.23 – Крани ДУ25 для з'єднання трубопроводу з атмосферою

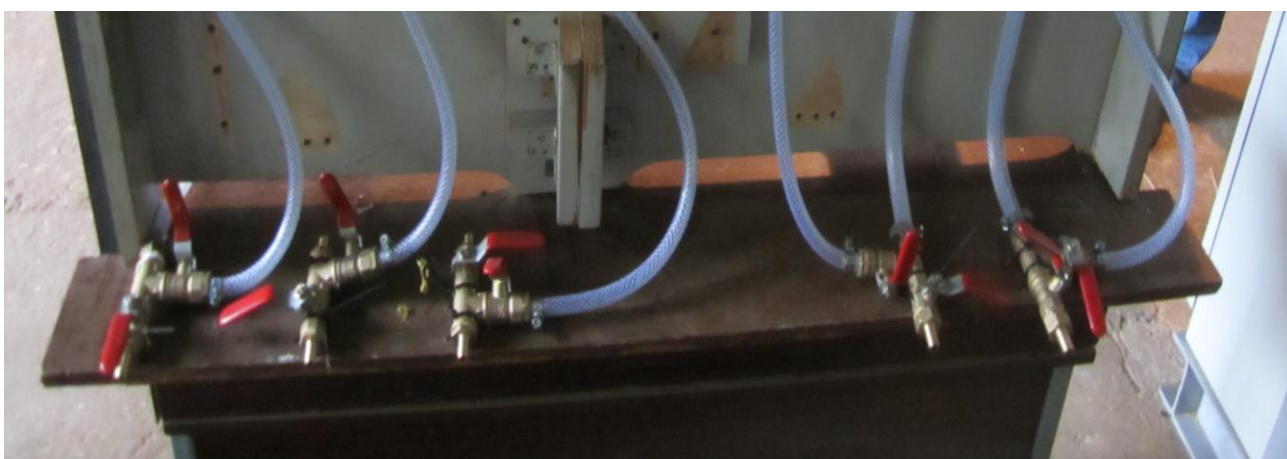


Рисунок 2.24 – Лінії відбору тиску на приладовий щит

3 КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ ТА ПРИЛАДИ

3.1 Вимірювані параметри

В процесі випробувань вимірюються наступні параметри:

$P_{вх}$, $P_{вих}$, $P_{вих}$ - тиск на вході до підводного сопла, тиск на виході із сопла, тиск на виході із розширювальної машини, відповідно, вимірюються за допомогою зразкових манометрів типу МО (клас точності 0,4) з верхньою межею шкали вимірювання 10 кгс/см^2 (ГОСТ 6521-72) і датчиків тиску (рис. 3.1);

$t_{вх}$, $t_{вих}$ - температура на вході в турбіну і температура у вихідному патрубку, відповідно, вимірюються цифровим датчиком температури DS18B20 (див. нижче рис. 3.7). Параметри точності такого вимірювання достатньо високі – похибка вихідної напруги мікросхеми, откаліброваної при температурі $+25^\circ\text{C}$, в межі всього робочого діапазона температур $45\dots+125^\circ\text{C}$ складає менше $0,5^\circ\text{C}$;

n - частота обертів ротора турбогенератора, вимірюється приладом VIBROPORT-41 фірми «SCHENCK». Окрім того, на вихідному валу турбіни встановлюється датчик-відбивач, який генерує електричні імпульси, відбиваючи лазерний промінь. Ці імпульси реєструються частотомером, який здатний визначити частоту обертання ротора з точністю до 1 об/хв ((див. нижче рис. 3.8, 3.9);

$M_{кр}$ - крутний момент на валу турбіни (при необхідності) вимірюється за допомогою спеціально розробленого пристрою) ((див. нижче рис. 3.10-3.13);

m - масова витрата повітря на вході в турбогенератор визначається за допомогою стандартної камерної діафрагми і диференціального манометра (рис. 3.1);

\dot{V} - об'ємна витрата повітря на виході із розширювальної турбомашини (при необхідності) визначається за допомогою ротаційного газового лічильника

РГ-40 [6, 7], який оснащений водним диференційним манометром для визначення втрат тиску і порівняння їх з допустимими (30 мм вод. ст.). Похибка лічильника складає 1% на витратах 20-100% від номінальної.

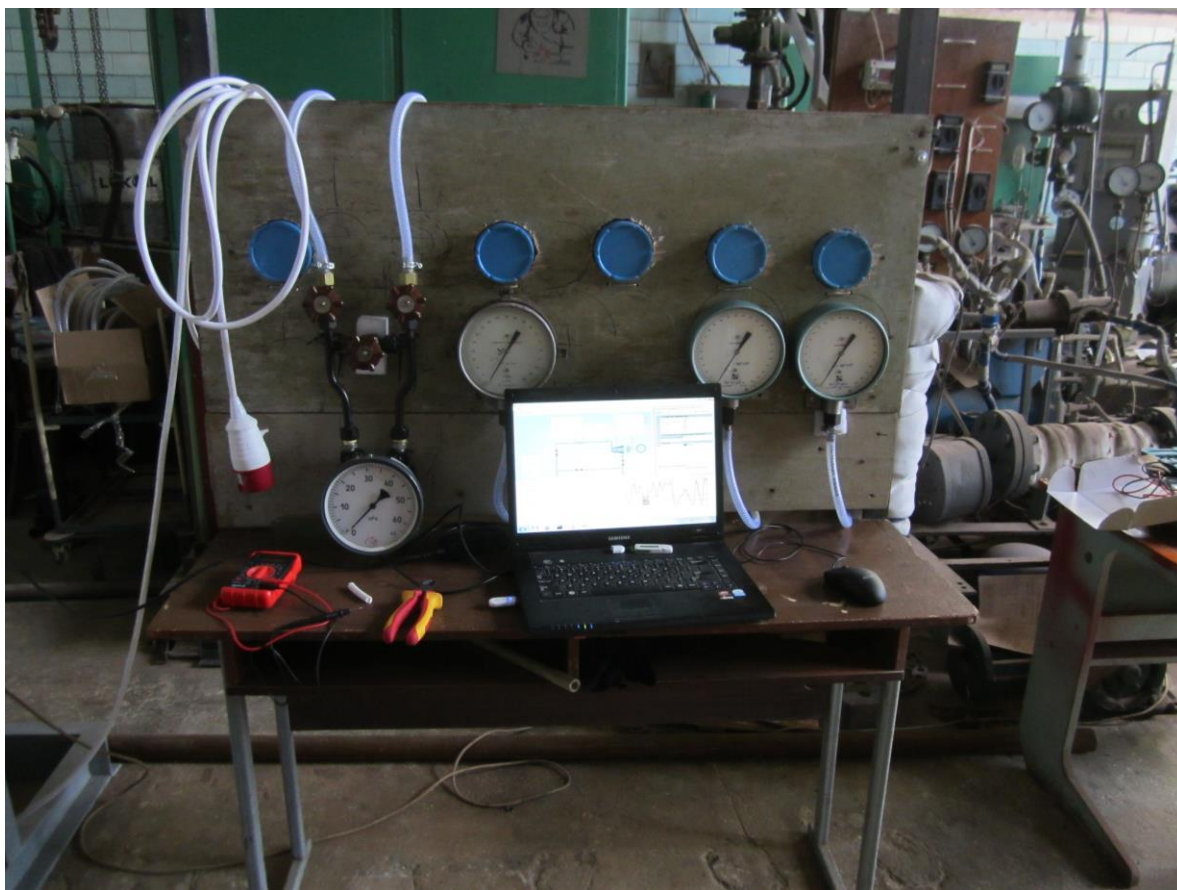
U - напруга в ланцюгах генератора, визначається за допомогою вольтметрів (рис. 2.18);

I – сила струму в ланцюгах генератора, визначається за допомогою амперметрів (рис. 2.18).

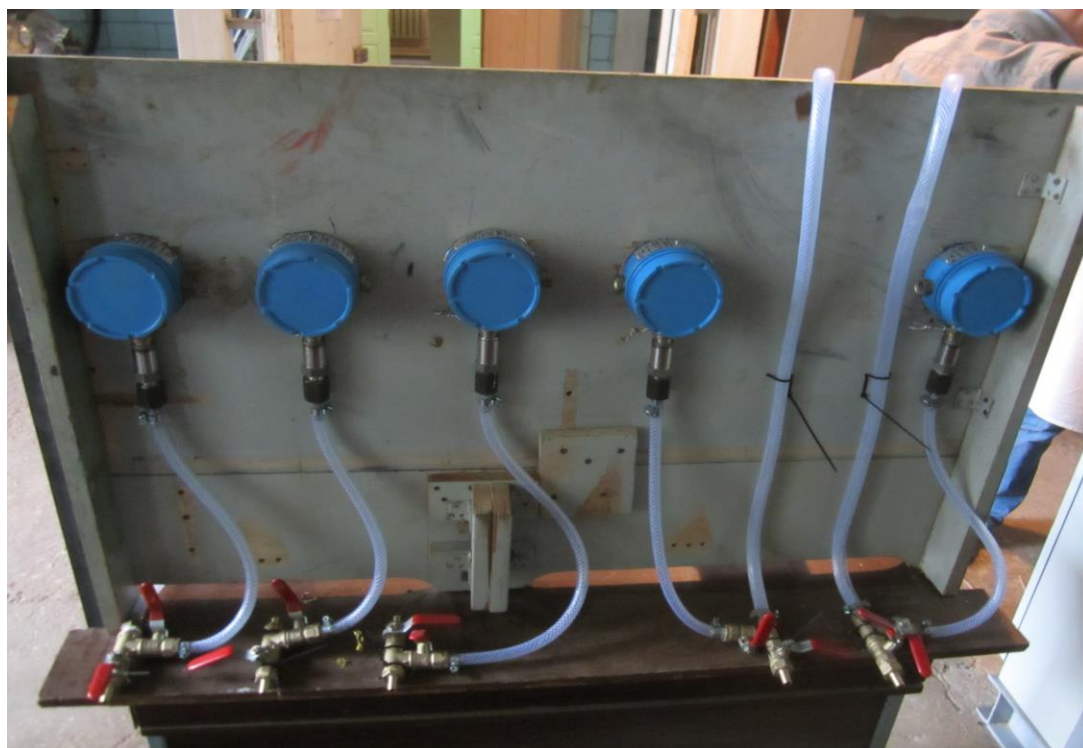
Нижче, у таблиці 3.1, надані характеристики засобів вимірювання.



a)



б)



в)

Рис. 3.1 - Система вимірювання тисків и витрати газу при випробуваннях: а) прилади, б) щит приладовий (вид спереду), в) щит приладовий (вид ззаду)

Таблиця 3.1 – Перелік вимірюваних параметрів, контрольно-вимірювальних пристроїв і апаратури

Найменування параметрів, розмірність і діапазон вимірювання	Позначення	Найменування датчиків і приладів	Тип, ГОСТ	Клас точності, похибка	Кількість
1 Тиск газу перед звужувальним пристроєм, кгс/см ²	р _{д.вх}	Манометр зразковий МО, 0-10 кгс/см ²	ГОСТ 6521-72	Кл.0,4	1
		Датчик тиску «Сапфир 22-ДИ»	ТУ 25-2472.0049-89	±0,5%	1
2 Перепад тиску на звужувальному пристрої, кПа	Δр	Манометр диференціальний, 0-63 кПа	ТУ 25-7310.0063-87	Кл.1,5	1
3 Тиск газу за діафрагмою, кгс/см ²	Р _{д.вих}	Датчик тиску «Сапфир 22-ДИ»	ТУ 25-2472.0049-89	±0,5%	1
4 Температура газу перед звужувальним пристроєм, °С	Т _д	Цифровий датчик від – 55 до +125 °С	Тип DS18B20	±0,2°С	1
5 Тиск газу на вході ВТГ, кгс/см ²	р _{вх}	Манометр зразковий МО, 0-10 кгс/см ²	ГОСТ 6521-72	Кл.0,4	1
		Датчик тиску «Сапфир 22-ДИ»	ТУ 25-2472.0049-89	±0,5%	1
6 Температура газу на вході ВТГ, °С	Т _{вх}	Цифровий датчик від – 55 до +125 °С	Тип DS18B20	±0,2°С	1
7 Тиск газу на виході із сопла, кгс/см ²	р _с	Манометр зразковий МО, 0-10 кгс/см ²	ГОСТ 6521-72	Кл.0,4	1
		Датчик тиску «Сапфир 22-ДИ»	ТУ 25-2472.0049-89	±0,5%	1
8 Тиск газу на виході ВТГ, кгс/см ²	р _{вих}	Манометр зразковий МО, 0-10 кгс/см ²	ГОСТ 6521-72	Кл.0,4	1
		Датчик тиску «Сапфир 22-ДИ»	ТУ 25-2472.0049-89	±0,5%	1
9 Температура газу на виході ВТГ, °С	Т _{вих}	Цифровий давач від – 55 до +125 °С	Тип DS18B20	±0,2°С	1
10 Число обертів вихідного ротора ВТГ, об/хв	n	Датчик обертів, вібропорт фірми «Шенк»	-	±0,5%	1
11 Напруга в ланцюзі генератора, В	U	Вольтметр Э365-1	ТУ 25-04.3577-78	Кл.1,5	3
12 Сила струму в ланцюзі генератора, А	A	Амперметр М381	ТУ 25-04.3720-79	Кл.1,5	3

3.2 Інформаційно-вимірювальна система (ІВС) для випробувань

3.2.1 Вимоги до ІВС для забезпечення газодинамічних випробувань

ІВС повинна мати такі можливості:

1) Забезпечувати контроль стану обладнання. Для візуального контролю стану обладнання в складі ІВС є мнемосхема (рис. 3.2), яка в реальному масштабі часу відображає поточні параметри вузлів стенду в процесі випробувань. Індикація поточного часу дозволяє судити про працездатність програмного забезпечення ІВС.

2) Здійснювати реєстрацію інформації і обробку даних вимірювань за допомогою спеціального програмного забезпечення, що надходять від датчиків в процесі випробувань і роботи ІВС (рис. 3.3).

3) Забезпечувати надійне зберігання отриманої інформації.

4) Представляти результати вимірювань в табличному і графічному вигляді (рис. 3.3).

5) Будувати графіки газодинамічних характеристик, порівнювати отримані результати з проектними характеристиками і видавати попередні дані про відповідність одержуваних параметрів розрахунковим.

6) Реєструвати швидкозмінні процеси, що виникають при знятті характеристик.

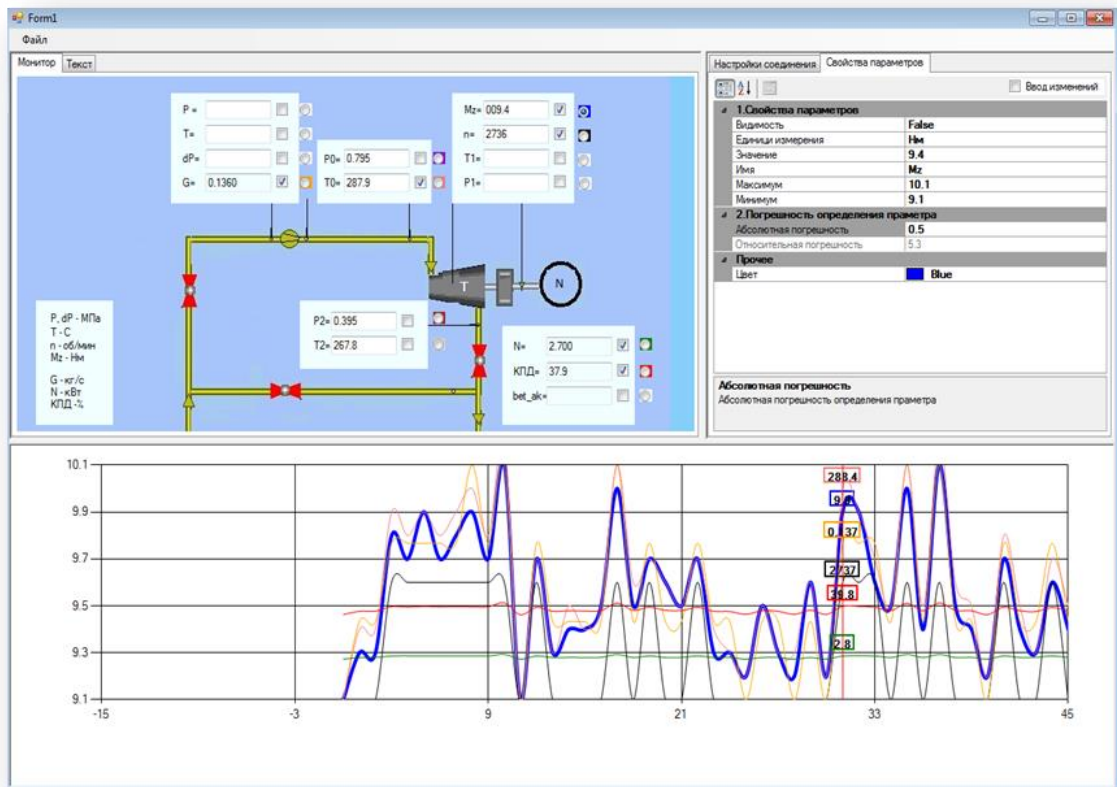


Рисунок 3.2 – Интерфейс программы для контролю ИВС (мнемосхема) .

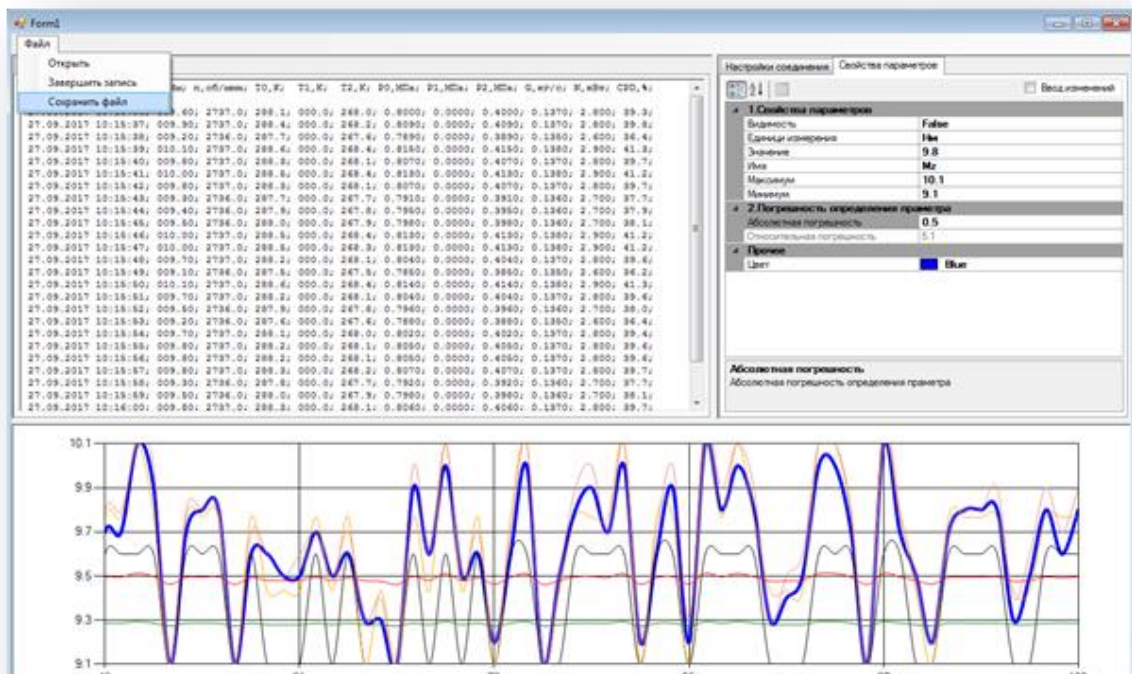


Рисунок 3.3 – Интерфейс программы для контролю ИВС (запис данных).

3.2.2 Будова і функціонування ІВС.

Стенд оснащений датчиками для виміру статичних тисків, температур, частоти обертання і крутного моменту і є джерелом інформації (сигналів) для реалізації алгоритму випробувань.

В ІВС є 5 каналів тиску (оснащених датчиками (перетворювачами)) для перетворення тиску в електричний сигнал 4-20 мА, що подається в аналогоцифровий перетворювач аналогових сигналів в цифровий, що сприймається комп'ютером.

Є також до 10 температурних каналів для реєстрації температури повітря уздовж повітряного тракту стенду.

Крім цього, в ІВС передбачений канал вимірювання частоти обертання ротора, і канал вимірювання крутного моменту.

Для визначення і реєстрації значення крутного моменту розроблений прилад який складається з торсіона і розміщених в ньому тензорезисторів, мікропроцесори, wi-fi передавача і акумулятора. Прилад дозволяє передавати показання бездротовим методом.

Обробка інформації може здійснюватися комп'ютером, який встановлюється як в операторній стенду, так в щиті управління стендом.

Робота ІВС здійснюється в реальному масштабі часу і після встановлення нового режиму роботи система дозволяє дуже швидко отримувати і обробляти інформацію про випробування вихрового турбогенератора (час обробки інформації, що знімається з одного каналу менше 1 сек).

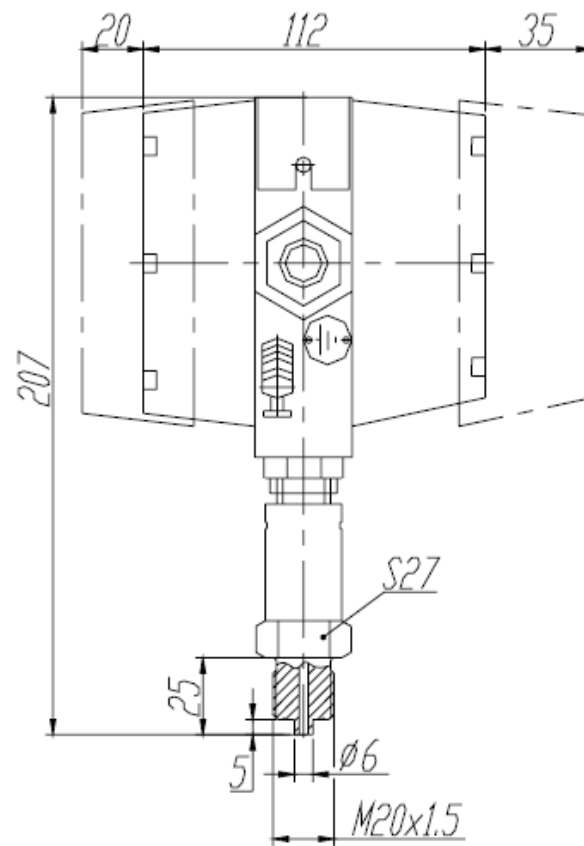
Цифровий прилад для вимірювання тиску.

Перетворювачі типу “Сапфир-22” використовуються в системах автоматики для безперервного перетворення вимірюваного розрядження, надлишкового, абсолютного, гідростатичного тиску, а також різниці тисків нейтральних і агресивних середовищ в уніфіковані пропорційні електричні сигнали 4-20 мА.

Перетворювач тиску Сапфир 22-ДИ складається з вимірювального блоку і електронного приладу. Перетворювачі різних параметрів мають уніфікований електронний пристрій і відмінні тільки в конструкції вимірювального блоку. Вимірюваний параметр (в даному випадку повітря) подається в камеру вимірювального блоку і лінійно перетворюється в деформацію чутливого елемента і зміну електричного опору тензорезисторів тензоперетворювача, який розміщується в вимірювальному блоці. Електронний пристрій перетворювача перетворює цю зміну опору в струмовий вихідний сигнал 4-20 мА. Чутливим елементом тензоперетворювача є пластина із монокристалічного сапфіра з кремнієвими плівковими тензорезисторами (структура КНС), міцно з'єднана з металевою мембраною тензоперетворювача. Зовнішній вид і розміри перетворювача тиску, який використовується при дослідах, наведений на рис. 3.4, схема включення перетворювача на рис. 3.5



а



б)

Рисунок 3.4 –Перетворювач тиску Сапфир 22-ДИ: а) – зовнішній вид, б) - розміри.

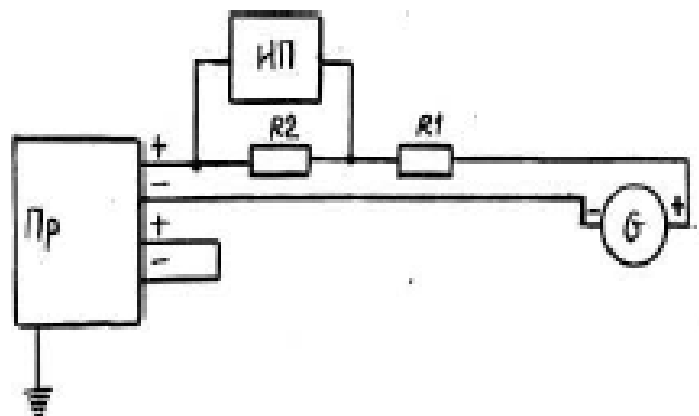


Рисунок 3.5 - Схема включення перетворювача з граничними значеннями вихідного сигналу 4 і 20 мА.

Цифровий прилад та пристосування для вимірювання температури.

Датчик DS18B20 (рис. 3.6, 3.7) виготовляється компанією DALLAS Semiconductor. Максимальний розмір датчика (чутливого елемента) не перевищує 5 мм. Він представляє собою мікросхему з мікропроцесором. Діапазон вимірюваних температур -55 — $+125$ °С, ціна поділки $0,1$ °С. Цей прилад має велику точність вимірювання завдяки тому, що сигнал, який виникає у чутливому елементі, одразу ж перетворюється у цифровий код та вже потім передається на вторинний прилад без зайвих втрат.

Принцип дії цифрових датчиків температури фірми DALLAS заснований на підрахунку кількості імпульсів, що виробляються генератором з низьким температурним коефіцієнтом у часовому інтервалі, який формується генератором з великим температурним коефіцієнтом. Лічильник ініціюється значенням, яке відповідає -55 °С (мінімальній вимірюваній температурі). Якщо

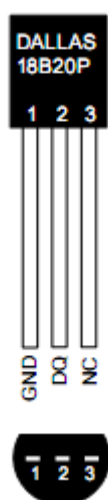


Рисунок 3.6. - Принципова схема зонду

лічильник досягає нуля перед тим, як закінчується часовий інтервал (значить, що температура більша за -55 °С), тоді регістр температури, який також ініціалізований значенням -55 °С, інкрементується. Одночасно лічильник перевстановлюється новим значенням, яке задається схемою формування нахилу характеристики. Ця схема потрібна для компенсації параболічної залежності частот генераторів від температури. Лічильник знову починає

працювати, і якщо він знову досягає нуля, коли інтервал ще не закінчився, то процес повторюється знову. Схема формування нахилу загрузає лічильник значеннями, які відповідають кількості імпульсів генератора на один градус Цельсія для кожного конкретного значення температури. По закінченню процесу перетворення регістр температури буде вміщати значення температури. Для DS18B20 температура представлена у вигляді 12-бітного

значення у додатковому коді. Можливо зменшити кодування сигналу до 9 біт, що вплине на збільшення кількості приєднаних датчиків з одночасним збільшенням коефіцієнта дискретності сигналу температури з $0,0125^{\circ}\text{C}$ до $0,5^{\circ}\text{C}$. Це призведе до зменшення чутливості вимірювання температури та до збільшення похибки її вимірювання. Зчитувані значення вимірюваної температури, а також передача команди початку перетворення та інших команд виконується за допомогою 1-провідного інтерфейсу (1-Wire™) фірми DALLAS.

Для вимірювання та реєстрації температур використовуються зонди з чутливим елементом DS18B20, принципова схема конструкції яких представлена на рисунку 3.6, а зовнішній вигляд – на рис. 3.7.



Рисунок 3.7. - Зовнішній вигляд зондів для вимірювання температур

Цифровий прилад для вимірювання обертів.

Індукційні датчики виконують з постійним магнітом або електромагнітом, через обмотку якого пропускається постійний струм. Ці датчики на відміну від індуктивних, трансформаторних і магнітопружних датчиків відносять до розряду генераторних, так як при впливі вхідної величини вони генерують електричну енергію. В них використовується явище електромагнітної індукції — наведення ЕРС в електричному контурі, в якому змінюється магнітний потік.

Конструктивна схема індукційного датчика представлена на рис. 3.8. Датчик складається з індукційної котушки 4, магнітопроводу 2, постійного магніту 1, серцевини 3 і корпусу.

Конструктивні схеми пристрою для вимірювання числа обертів валу на основі індукційного датчика представлені на рис. 3.8, 3.9. Принцип роботи цього пристрою наступний.

Датчик є безконтактним, тому що видалений від вала 5, який обертається, на відстань монтажного або установчого зазору Δ . Магнітний потік через повітряний зазор передається від магнітопроводу через вал на серцевину магнітної системи датчика. На валу на радіальній поверхні є спеціальні лиски 6. Під час обертання вала лиски проходять через зону датчика і тим самим змінюють зазор між валом і магнітопроводом. Зміна повітряного зазору призводить до зміни магнітної провідності системи і, відповідно, до зміни магнітного потоку, який проходить через серцевину датчика. На обмотках котушки в цей момент генерується ЕРС у вигляді почергових імпульсів.

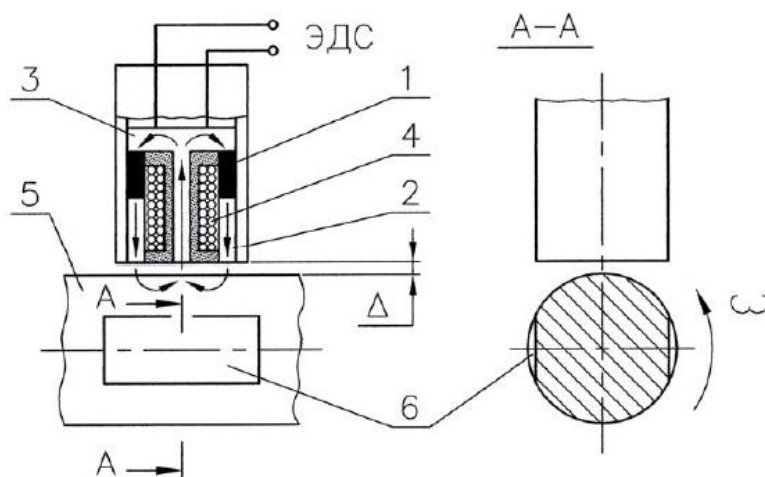


Рисунок 3.8. - Конструктивна схема індукційного датчика і пристрою для вимірювання числа обертів валу

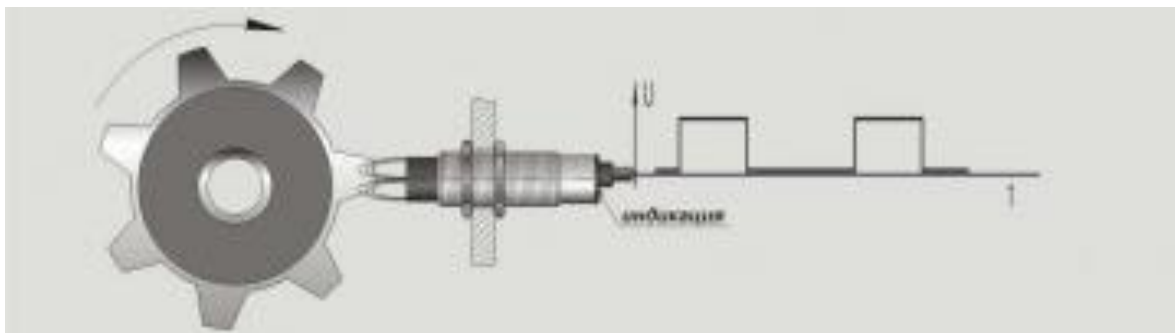


Рисунок 3.9. - Схема роботи індукційного датчика для вимірювання числа обертів валу

Цифровий прилад та пристосування для вимірювання крутного моменту.

Необхідність вимірювання потужності, яка передається валом, що обертається, привела до необхідності застосування пристроїв для вимірювання крутного моменту і частоти обертання валів. Збільшення точності вимірювання ефективної потужності на валу дозволяє більш точно виявити ККД установок, покращує якість експерименту і цим самим дозволяє виявляти вплив малопомітних факторів на економічність силових установок.

Забезпечення стійкої і тривалої роботи в деяких механізмах потребує підтримки їхнього навантаження на заданому рівні. В системах автоматичного регулювання для виявлення навантаження застосовуються торсиометричні прилади [8]. Для вимірювання крутного моменту, діючого на торсіонний вал, використовувався тензометричний метод.

Для визначення і реєстрації значення крутного моменту розроблений прилад, який складається з торсіона і розміщених в ньому тензорезисторів, мікропроцесорів, Wi-Fi передавача і акумулятора. Прилад дозволить передавати показання бездротовим методом.

Для визначення залежності між крутним моментом та показаннями приладу виконують повірку (тарування). Тарування проводилося на токарному верстаті рис. 3.10 за допомогою набору мірних мас та плеча визначеної довжини.

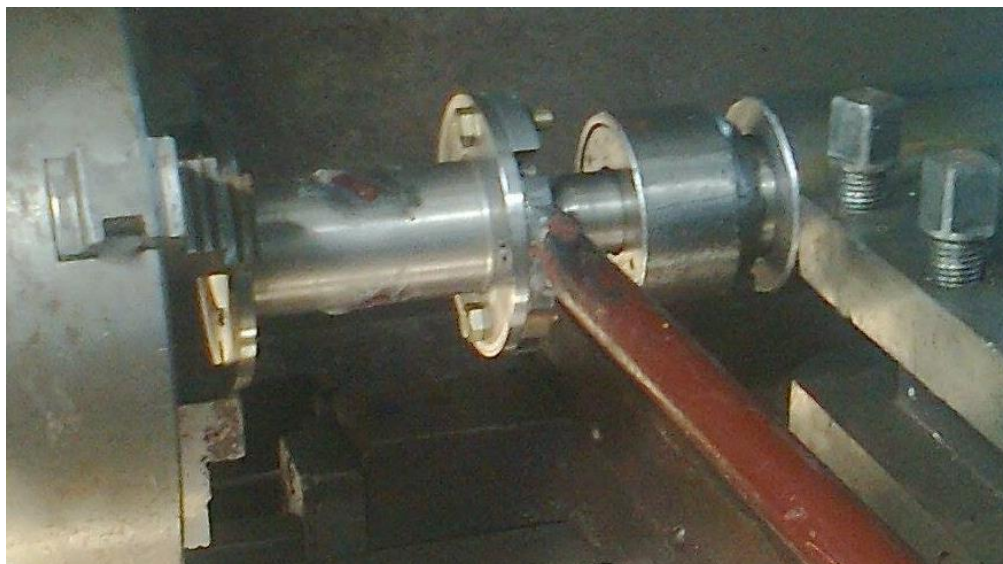


Рис. 3.10 –Тарування приладу для вимірювання крутного моменту

В процесі тарування на плече надівалися мірні маси та реєструвались показання приладу. Таким чином була отримана тарувальна крива (рис. 3.11) і рівняння залежності показаний від крутного моменту. На рис. 3.12. представлена зміна крутного моменту, який реєстрував прилад під час процесу тарування.

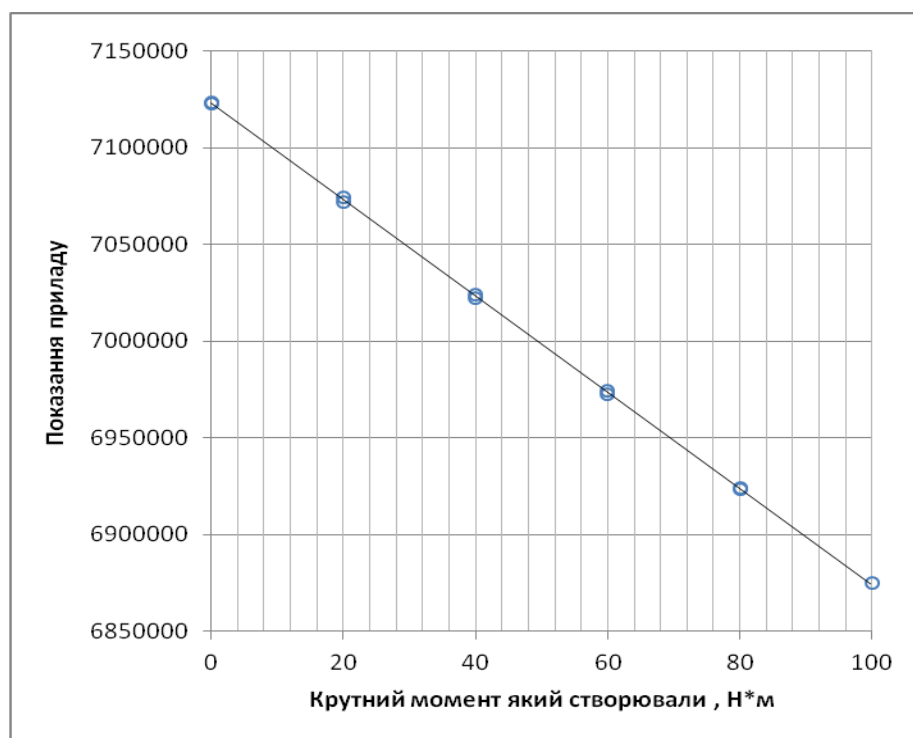


Рис. 3.11 – Тарувальна крива

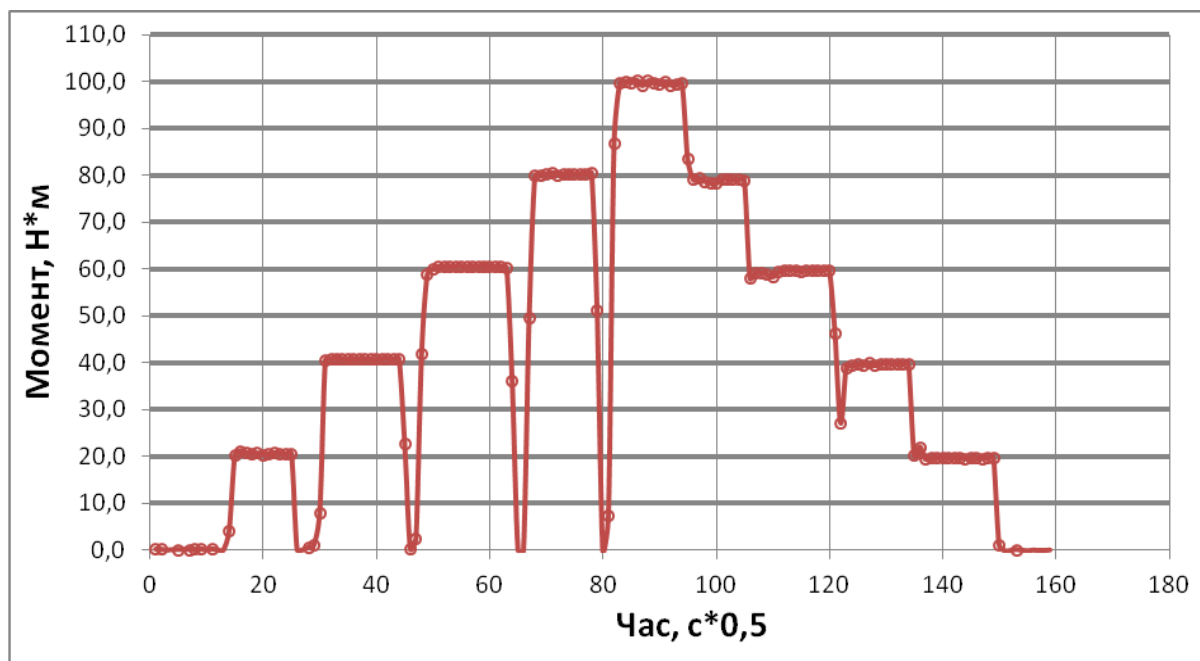


Рис. 3.12 – Зміна крутного моменту під час процесу тарування

Прилад було відроблено в динаміці на стенді дослідження струминно-реактивних розширювальних машин кафедри ТТФ СумДУ (рис. 3.13). Під час динамічних випробувань прилад вимірював крутний момент при змінній частоті обертання ротору від 500 до 8000 об/хв.



Рисунок 3.13 – Динамічні випробування приладу для вимірювання крутного моменту

4 МЕТОДИКА ОБРОБКИ ДОСЛІДНИХ ДАНИХ ВИПРОБУВАНЬ ВИХРОВОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА

1. Масова витрата повітря визначається за допомогою стандартної камерної діафрагми і диференційного манометра

$$G = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{дф}}^2}{4} \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho},$$

де G – масова витрата повітря через діафрагму, кг/с;

α – коефіцієнт витрати діафрагми;

ε – коефіцієнт розширення;

$d_{\text{дф}}$ – діаметр отвору діафрагми, м;

Δp – перепад тиску на діафрагмі по диференціальному манометру, Па;

$\rho_{\text{дф}}$ – густина повітря перед діафрагмою, кг/м³

$$\rho_{\text{дф}} = \rho_{\text{нор}} \frac{p_{\text{дф}} \cdot T_{\text{нор}}}{p_{\text{нор}} \cdot T_{\text{дф}} \cdot Z} = \rho_{\text{нор}} \frac{(p_{\text{дф}}^{\text{изб}} + p_{\text{бар}}) \cdot T_{\text{нор}}}{p_{\text{нор}} \cdot T_{\text{дф}} \cdot Z},$$

де $\rho_{\text{нор}}$ – густина повітря при нормальних фізичних умовах, кг/м³;

$p_{\text{нор}}$ – тиск повітря при нормальних фізичних умовах, Па;

$T_{\text{нор}}$ – температура повітря при нормальних фізичних умовах, К;

$p_{\text{дф}}$ – тиск повітря перед діафрагмою, Па;

$p_{\text{бар}}$ – барометричний тиск, Па;

$T_{\text{дф}}$ – температура повітря перед діафрагмою, К;

Z – коефіцієнт стисливості, $Z \cong 1$.

2. Ступінь зниження тиску (відношення тисків) в вихровій розширювальній машині (далі – турбіні)

$$\pi_T = \frac{p_n}{p_k}$$

3. Питома ізентропна робота розширення повітря в проточній частині ступеня

$$h_s = \frac{k}{k-1} R \cdot T_n \left[1 - \left(\frac{p_k}{p_n} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], \text{ Дж/кг,}$$

де k – показник ізентропи, $k = 1,4$;

T_n – температура повітря на вході в турбіну, К;

p_n – тиск повітря на вході в турбіну, Па;

p_k – тиск повітря на виході з турбіни, Па;

R – питома газова стала, для повітря $R = 287$ Дж/(кг·К).

4. Потужність на клеммах електрогенератора

$$N_{EG} = U \cdot I$$

де U – напруга на клеммах електрогенератора;

I – сила струму в ланцюгах навантаження електрогенератора.

5. Потужність на валу турбіни

$$N_{\epsilon} = \frac{N_{EG}}{\eta_{EG}},$$

де η_{EG} – ККД електрогенератора.

6. Ізоентропний ККД турбіни.

6.1 Ізоентропний ККД турбіни, який визначається по потужності, що виробляється електрогенератором

$$\eta_s = \frac{N_{\epsilon}}{N_s} = \frac{N_{\epsilon}}{h_s \cdot G}.$$

6.2 Ізоентропний ККД турбіни, який визначається по температурам

$$\eta'_s = \frac{i_n - i_k}{i_n - i_{k_s}} = \frac{c_{pn} \cdot T_n - c_{pk} \cdot T_k}{c_{pn} \cdot T_n - c_{pk_s} \cdot T_{k_s}},$$

де i_n – питома ентальпія повітря на вході в турбіну, Дж/кг;

i_k – питома ентальпія повітря на виході з турбіни, Дж/кг;

i_{k_s} – питома ентальпія повітря на виході з турбіни в ізоентропному процесі розширення, Дж/кг;

c_{pn} – масова ізобарна теплоємність повітря на вході в турбіну, Дж/(кг·К);

c_{pk} – масова ізобарна теплоємність повітря на виході з турбіни, Дж/(кг·К);

c_{pk_s} – масова ізобарна теплоємність повітря на виході з турбіни в ізоентропному процесі розширення, Дж/(кг·К);

7. Колова швидкість робочого колеса на зовнішньому діаметрі

$$u = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60}.$$

8. Коефіцієнт швидкості в коловому напрямку

$$\lambda_u = \frac{u}{\sqrt{\frac{2k}{k+1} R \cdot T_n}}.$$

9. Наведена колова швидкість робочого колеса

$$\bar{u} = \frac{u}{\sqrt{2h_s}} = \frac{u}{C_s},$$

де C_s – ізоентропна швидкість витікання, що характеризує наявну питому роботу розширювальної машини, м/с;

ВИСНОВКИ

1. Створений дослідний зразок енергозберігаючого турбогенератора на основі вихрової розширювальної машини на параметри:

- номінальна потужність на клеммах електрогенератора - 3 кВт;
- тиск газу на вході - 0,3-0,6 МПа (абс.);
- тиск газу на виході - 0,1-0,3 МПа (абс.);
- температура газу на вході - 283-313 К;
- номінальна частота обертання ротора турбогенератора - 3000 об/хв;
- витрата газу - не більше 500 нм³/год.;
- ККД – не нижче 40%.

Номінальна потужність на клеммах електрогенератора може становити 10 кВт при збільшенні тиску на вході до 0,8 МПа (абс.) і витрати газу до 1500 нм³/год.

Основними складовими дослідного зразка енергозберігаючого турбогенератора є:

- вихрова розширювальна турбомашина;
- електрогенератор постійного струму з блоком керування вихідною напругою для проведення випробувань з метою визначення характеристик турбогенератора в широкому діапазоні зміни навантаження за допомогою перетворювача струму (синхронного інвертора);
- електрогенератор трифазного змінного струму (асинхронний генератор) з перетворювачем частоти змінного струму для визначення можливості використання його в промислових зразках, як більш дешевого і економічного;
- система силового підключення, контролю та регулювання електроенергії, що виробляється;
- арматура запирання і регулювання тиску газу.

Конструкція турбогенератора дозволяє досліджувати вплив основних геометричних параметрів проточної частини на ефективність вихровий розширювальної турбомашини і генератора в цілому.

2. Створений експериментальний стенд для проведення випробувань дослідного зразка турбогенератора на основі вихрової розширювальної машини.

Прилади та обладнання стенду дозволяють плавно змінювати електричне навантаження і отримувати необхідні параметри і характеристики турбогенератора і вихрової розширювальної машини.

У складі стенду створена інформаційно-вимірювальна система, яка забезпечує контроль стану обладнання; здійснює реєстрацію інформації і обробку даних вимірювань з представленням результатів в табличному і графічному вигляді; забезпечує надійне зберігання отриманої інформації тощо.

3. Розроблена програма і методика проведення випробувань дослідного зразка турбогенератора.

4. Розроблена методика обробки дослідних даних випробувань вихрового турбогенератора.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ванеев С.М. Разработка и исследование вихревого пневмопривода с внешним периферийным каналом и сопловым аппаратом: Дис. канд. техн. наук: 05.04.06 / Сергей Михайлович Ванеев – М., 1986. - 183с.
2. Ванеев С.М. Мирошниченко Д.В. Исследование вихревой расширительной машины с внешним периферийным каналом с помощью виртуального стенда // Журнал инженерных наук. - 2015. - Т.2; №2. - С.В1-В12.
3. Ванеев С.М. Мирошниченко Д.В. Исследование и оптимизация конструкции проточной части вихревой расширительной машины с внешним периферийным каналом // Компрессорное и энергетическое машиностроение: научно технический и производственный журнал. – 2015. – №4(42). – С. 9-14.
4. Сергеев В.Н. Разработка пневмопривода вихревого типа с внутренним периферийным каналом и исследование влияния газодинамических и геометрических параметров на его эффективность: Дис. канд. техн. наук: 05.04.06 / Владимир Николаевич Сергеев - М., 1983. - 127с.
5. Староверов К.В. Совершенствование и исследование вихревой машины с периферийным каналом в режиме пневмопривода: Дис... канд. техн. наук.: 05.04.06 / Константин Владимирович Староверов –М., 1990. – 128 с.
6. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. 3-е изд., перераб. и доп. / П.П. Кремлевский. – Л.: Машиностроение, 1975. – 776 с.
7. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. 3-е изд., перераб. / В.П. Преображенский. – М.: Энергия, 1978. – 704 с.
8. Фролов Л. Б. Измерение крутящего момента / Фролов Л. Б. -М., «Энергия», 1967 - 120 с.