

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет авіаційних двигунів

Кафедра теорії авіаційних двигунів

Пояснювальна записка

ДО ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

магістра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Дослідження можливостей використання 3D методів моделювання потоку при проектуванні системи охолодження гідротурбіни»

Виконав: студент 6 курсу групи 261м
спеціальності

142 «Енергетичне машинобудування»

(шифр і назва напрямку підготовки (спеціальності))

Трибушної М.В.

(прізвище й ініціали студента)

Керівник: Фесенко К.В.

(прізвище й ініціали)

Рецензент: Росинська А.В.

(прізвище й ініціали)

Харків – 2020

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет авіаційних двигунів
Кафедра теорії авіаційних двигунів
Освітньо-кваліфікаційний рівень – магістр
Спеціальність – 142 «Енергетичне машинобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Завідувач кафедри 201
_____ професор, д. т. н.
(вчене звання, посада)
_____ Л. Г. Бойко
(підпис) (прізвище та ініціали)
“ _____ ” _____ 2020 р.

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ МАГІСТРА

студенту гр. 261м 2019/2020 н. р.

Трибушному Микиті Віталійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема: Дослідження можливостей використання 3D методів моделювання потоку при проектуванні системи охолодження гідротурбіни

Керівник: Фесенко Ксенія Володимирівна, к.т.н., доцент кафедри 201

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання, посада)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 19 листопада 2020 року
№ 1855–уч.

2. Строк подання закінченої роботи: 14.12.2020 р.

3. Вихідні дані до роботи: основні параметри відцентрового компресора, програмні пакети для проектувальних та перевірочних розрахунків течії

4. Короткий зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1) аналіз сучасного стану гідроенергетики України; опис конструкції Канівської ГЕС та характеристик генератора СГК3 538/160-70; аналіз різних конструктивних рішень вентиляції на гідрогенераторах;

2) опис конструкції та принципів роботи базового варіанту досліджуваного вентилятора; проведення його аналітичного розрахунку; створення тривимірної моделі вентилятора; розрахункове дослідження базової конструкції вентилятора, верифікація розрахунку та аналіз результатів;

3) опис конструкції та принципів роботи модифікованого варіанту досліджуваного вентилятора; доповнення тривимірної моделі вентилятора; його розрахункове дослідження; розрахункове дослідження на міцність конструкції вентилятора; аналіз результатів розрахунків;

4) розрахунок собівартості виготовлення і складання вентилятора.

5. Перелік графічного матеріалу (у вигляді сторінок файлу презентації)

аркуш №1 – Актуальний стан гідроенергетики України

аркуш №2 – Опис конструкції гідрогенератора СГК3 538/160-70 Канівської ГЕС

аркуш №3 – Типи систем вентиляції, що застосовуються у гідрогенераторах

аркуш №4 – Об'єкт дослідження

аркуш №5 – Постановка завдання дослідження

аркуш №6 – Аналітичний розрахунок відцентрового вентилятора

аркуш №7 – Напірна характеристика відцентрового вентилятора

аркуш №8 – Відтворення досліджуваної моделі вентилятору у програмному комплексі Solid Works

аркуш №9 – Проведення тривимірного дослідження базової конструкції відцентрового вентилятора у середовищі Solid Works Flow Simulation

аркуш №10 – Верифікація розрахунку

аркуш №11 – Розрахунок ефективності повітрообміну в середині гідрогенератору

аркуш №12 – Дослідження модифікованого відцентрового вентилятора та модернізованої системи вентиляції

аркуш №13 – Результати дослідження

аркуш №14 – Тепловий розрахунок модернізованої системи вентиляції

аркуш №15 – Розрахунок на міцність відцентрового вентилятора

аркуш №16 – Результати розрахунків на міцність

аркуш №17 – Висновки

6. Керівник та консультанти розділів роботи:

| Розділи | Прізвища, ініціали та посади керівника та консультантів | Підпис, дата | |
|---------------------------------|---|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Розрахунково-теоретична частина | Фесенко К.В., доцент каф. 201 | | |
| Економічна частина | Фесенко К.В., доцент каф. 201 | | |
| Нормоконтролер | Череповська І.В., інженер каф. 201 | | |

7. Дата видачі завдання: 28 вересня 2020 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломного проекту | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|--|-------------------------------|----------|
| 1 | Аналіз завдання на виконання роботи, формулювання цілей і задач роботи | 1-й тиждень | |
| 2 | Опис конструкції Канівської ГЕС та характеристик генератора СГКЗ 538/160-70. Аналіз різних конструктивних рішень вентиляції на гідрогенераторах. | 2-й тиждень | |
| 3 | Ознайомлення з конструкцією та принципом роботи досліджуваного вентилятора. Аналітичний розрахунок | 3-й тиждень | |
| 4 | Створення тривимірної моделі вентилятора | 4-й тиждень | |
| 5 | Розрахункове дослідження базової конструкції вентилятора | 5-й тиждень | |
| 6 | Верифікація розрахунку та аналіз результатів | 6-й тиждень | |
| 7 | Розрахункове дослідження модифікованої моделі вентилятора | 7-й тиждень | |
| 8 | Розрахункове дослідження на міцність конструкції вентилятора | 8-й тиждень | |
| 9 | Аналіз результатів дослідження | 9-й тиждень | |
| 10 | Проведення розрахункового економічного дослідження | 10-й тиждень | |
| 11 | Остаточне оформлення пояснювальної записки | 11-й тиждень | |

Студент _____ **Трибушной М.В.**
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ **Фесенко К. В.**
 (підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Звіт з дипломного проекту магістра містить 75 стор., 43 рис., 19 табл., 25 посилань.

Об'єкт дослідження – відцентровий вентилятор системи охолодження капсульного гідрогенератору СГКЗ 538/160-70 Канівської ГЕС.

Ціль проекту – проведення вентиляційного, теплового, міцнісного та економічного розрахунків відцентрового вентилятору відповідно до завдання з модернізації системи охолодження капсульного гідрогенератора задля підвищення його потужності до 22 МВт.

Методи дослідження – розрахунково–теоретичні, комп'ютерне моделювання відцентрового вентилятору та течії в ньому.

Дипломний проект магістра складається з чотирьох основних розділів, в яких розглянуто наступні питання:

- аналіз сучасного стану гідроенергетики України; опис конструкції Канівської ГЕС та характеристик генератора СГКЗ 538/160-70; аналіз різних конструктивних рішень вентиляції на гідрогенераторах;

- опис конструкції та принципів роботи базового варіанту досліджуваного вентилятора; проведення його аналітичного розрахунку; створення тривимірної моделі вентилятора; розрахункове дослідження базової конструкції вентилятора, верифікація розрахунку та аналіз результатів;

- опис конструкції та принципів роботи модифікованого варіанту досліджуваного вентилятора; доповнення тривимірної моделі вентилятора; його розрахункове дослідження; розрахункове дослідження на міцність конструкції вентилятора; аналіз результатів розрахунків;

- розрахунок собівартості виготовлення і складання вентилятора.

Ключові слова: система охолодження, відцентровий вентилятор, капсульний гідрогенератор, розрахункове дослідження

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП..... | 8 |
| 1 ЗАВДАННЯ ТА ЦІЛІ МОДЕРНІЗАЦІЇ | 10 |
| 1.1. Актуальний стан гідроенергетики України..... | 10 |
| 1.2 Загальна мета реконструкції..... | 10 |
| 1.3 Основні характеристики Канівської ГЕС..... | 12 |
| 1.4 Системи охолодження гідрогенераторів на ГЕС..... | 15 |
| 1.5 Система охолодження гідрогенераторів Канівської ГЕС..... | 18 |
| 1.6 Задачі модернізації системи охолодження..... | 20 |
| 1.7 Висновки по розділу..... | 20 |
| 2 ПЕРШИЙ ЕТАП МОДЕРНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ГІДРОГЕНЕРАТОРУ..... | 22 |
| 2.1 Конструктивні особливості систем охолодження капсульних гідрогенераторів..... | 22 |
| 2.2 Конструкція та принцип роботи спроектованого вентилятора..... | 26 |
| 2.3 Аналітичний розрахунок відцентрового вентилятора..... | 27 |
| 2.4 Розробка тривимірної моделі базової конструкції відцентрового вентилятора..... | 29 |
| 2.4.1 Нижнє кільце..... | 29 |
| 2.4.2 Робоча лопатка..... | 30 |
| 2.4.3 Покривне кільце..... | 31 |
| 2.4.4 Складання відцентрового вентилятора..... | 32 |
| 2.5 Математичне уявлення основних фізичних процесів розрахункової моделі..... | 33 |
| 2.6 Розрахункове дослідження системи охолодження..... | 37 |
| 2.7 Верифікація розрахунку за допомогою методу розгорнутих еквівалентних схем (метод схем заміщення)..... | 44 |
| 2.8 Розрахунок ефективності повітрообміну всередині гідрогенератору..... | 46 |
| 2.9 Висновки по розділу..... | 48 |
| 3 ДРУГИЙ ЕТАП МОДЕРНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ГІДРОГЕНЕРАТОРУ..... | 49 |
| 3.1 Опис конструкції модифікованого відцентрового вентилятора та системи вентиляції..... | 50 |
| 3.2 Побудова тривимірної моделі модифікованого вентилятору..... | 50 |
| 3.2.1 Кільце опорне..... | 51 |

| | |
|---|----|
| 3.2.2 Робоча лопатка другого ступеня..... | 51 |
| 3.2.3 Складання відцентрового вентилятора..... | 52 |
| 3.3 Розрахункове дослідження системи охолодження..... | 53 |
| 3.4 Розрахунок ефективності повітрообміну всередині гідрогенератору..... | 57 |
| 3.5 Розрахунок на міцність модифікованого відцентрового вентилятора..... | 58 |
| 3.6 Результати модифікації системи охолодження..... | 63 |
| 3.7 Висновок по розділу..... | 65 |
| 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА..... | 66 |
| 4.1 Розрахунок собівартості і ціни допоміжного вентилятора системи охолодження..... | 66 |
| 4.2 Висновок по розділу..... | 71 |
| ВИСНОВКИ..... | 72 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ..... | 74 |

ВСТУП

Енергія води не забруднює атмосферу. Гідроенергетика становить лише 8% від загальної встановленої потужності електрогенеруючих об'єктів України. Сумарна потужність Дніпровського каскаду гідроелектростанцій, який є однією з найбільших гідросистем в світі, становить 4683,6 МВт, а вироблення первинної електроенергії в середньорічному розмірі – 10,093 млрд кВт год.

Середній вік гідроенергетичної інфраструктури України на даний час перевищує 35 років. Щоб гарантувати безпечну експлуатацію, довгострокову надійність і генеруючу потужність, основні об'єкти гідроенергетичної галузі повинні проходити комплексну своєчасну модернізацію.

На прикладі реконструкції гідрогенераторів Канівської ГЕС в даному дипломному проекті магістра показано поступовий процес модернізації відцентрового вентилятора системи охолодження в умовах сучасного підприємства з використанням розрахунків різного рівня складності.

Електромашини, до складу яких належать і гідрогенератори, є досить досконалими перетворювачами енергії з відносно високим ККД. Наприклад, в найбільш потужних електричних машинах ККД дорівнює 98-99,5%. Але перетворення енергії в електромашині неминуче пов'язане з її втратами, викликаними перемагнічуванням феромагнітних сердечників, перетворенням струму через провідники, тертям в підшипниках. Втрачена в електромашині енергія перетворюється в тепло і викликає нагрівання окремих її частин. Найбільш чутливими до нагрівання є електроізоляційні матеріали, якість яких визначає допустимий рівень нагріву електричних машин.

Втрати енергії, а отже, і нагрів збільшуються пропорційно зі збільшенням навантаження. Тому найбільша потужність навантаження, що допускається для даної електромашини, визначається головним чином допустимим рівнем нагрівання, а також механічної міцності її частин.

Для надійності роботи і досягнення прийняттого терміну служби, нагрівання частин електромашини повинно бути обмежене. Велике значення має спосіб відведення тепла і охолодження. Тим самим саме система охолодження багато в чому визначає майбутній вигляд електричної машини.

Метою даного дипломного проекту магістра є розробка ефективної системи вентиляції, а саме однієї з її основних складових частин – відцентрового вентилятора. Даний вентилятор повинен забезпечувати ефективну циркуляцію та напір охолоджуючого повітря в робочій порожнині гідрогенератора SGK3 538/160-70 Канівської ГЕС.

Для досягнення поставленої мети потрібно провести вентиляційні, теплові, міцнісні та економічні розрахунки відцентрового вентилятору відповідно до

завдання з модернізації системи охолодження капсульного гідрогенератора задля підвищення його потужності до 22 МВт.

1 ЗАВДАННЯ ТА ЦІЛІ МОДЕРНІЗАЦІЇ

1.1. Актуальний стан гідроенергетики України

Каскад гідроелектростанцій, дамб і водосховищ, існуючий на р. Дніпро в Україні, є однією з найбільших гідросистем в світі. Створення цієї складної та багаторівневої системи почалося на початку 30-х років ХХ століття, з введення до ладу Дніпровської ГЕС-1 у м. Запоріжжя у 1934 році та завершилося у 1980-у введенням Дніпровської ГЕС-2. Наразі іде планова модернізація та переоснащення усього наявного обладнання на таке, що буде відповідати сучасним світовим стандартам енергетики та безпеки.

ПАТ «Укргідроенерго» (УГЕ) є основною гідроенергетичною компанією України, що покриває пікову частину навантажень, забезпечує регулювання частоти і потужності, а також становить аварійний резерв для Об'єднаної енергосистеми України.

Загальна встановлена потужність дев'яти гідроелектростанцій УГЕ становить 4683,6 МВт (100 гідроагрегатів) (таблиця 1.1). Середньорічне виробництво компанії складає 10-11 млрд кВт/год.

Таблиця 1.1 – Загальні відомості про встановлену потужність УГЕ

| Назва ГЕС | Кількість агрегатів | Потужність |
|-----------------------|----------------------------|-------------------|
| Київська ГАЕС | 6 агрегатів (3 зворотних) | 235,5 МВт |
| Київська ГЕС | 20 агрегатів | 429,5 МВт |
| Канівська ГЕС | 24 агрегати | 472 МВт |
| Кременчуцька ГЕС | 12 агрегатів | 632,9 МВт |
| Дніпродзержинська ГЕС | 8 агрегатів | 369,6 МВт |
| Дніпровська ГЕС-1 | 10 агрегатів | 629 МВт |
| Дніпровська ГЕС-2 | 8 агрегатів | 841,1 МВт |
| Каховська ГЕС | 6 агрегатів | 329 МВт |
| Дністровська ГАЕС | 6 агрегатів | 702 МВт |
| Разом: | 100 агрегатів | 4683,6 МВт |

1.2 Загальна мета реконструкції

Середній вік енергетичної інфраструктури України на даний момент перевищує 35 років. Щоб гарантувати безпечну експлуатацію, довгострокову надійність і генеруючу потужність, основні об'єкти повинні пройти комплексну реконструкцію. Додатковим ефектом від здійснення цих робіт є зменшення

кількості незапланованих простоїв та зниження витрат на технічне обслуговування.

Основні цілі реконструкції – це збільшення терміну служби ГЕС, підвищення її потужності, вироблення, надійності і безпеки устаткування і споруд, виконання вимог щодо захисту навколишнього середовища, поліпшення якості вироблюваної електроенергії за рахунок реконструкції системи управління, і створення сучасних умов роботи.

УГЕ протягом декількох років реалізує програму реконструкції деяких гідроагрегатів Канівської ГЕС (турбіни, генератори, системи збудження, регулятори швидкості, системи управління і захисту і т.п.).

Поточний, третій етап програми реконструкції Канівської ГЕС включає реконструкцію 2 блоків, до яких входять 7 турбін та 7 генераторів; допоміжних систем для 8 гідроагрегатів, а також системи управління і захисту для 8 агрегатів і двох блоків.

Проблема хвилястості і вібрацій в магнітному осерді статора спостерігається на діючих агрегатах станції. Обмотки статорів вже добігають свого нормативного терміну експлуатації – термін експлуатації деяких зразків вже перевищує сорок років, системи охолодження статора не відповідають зростанню рівня втрат і не забезпечують належного рівня охолодження.

Загальні цілі проекту реконструкції:

- 1) підвищення експлуатаційної надійності і терміну служби;
- 2) підвищення ККД і потужності агрегатів;
- 3) підвищення екологічної безпеки;
- 4) зміна вихідної напруги з 3,15 кВ на даний момент на 6,3 кВ після реконструкції;

Обсяг робіт по реконструкції генератора по кожному з гідроагрегатів в основному включає:

- 1) перевірку, ремонт і посилення корпусу статора з заміною призм і їх кріплення;
- 2) посилення корпусу статора (якщо необхідно);
- 3) заміну магнітного сердечника і обмотки статора;
- 4) заміну теплообмінників і повну заміну контуру охолодження генератора (для 8 агрегатів);
- 5) зміну полюсів ротора (нові сердечники полюса і зміна котушок);
- 6) модернізацію вихідних (нейтральних і головних) шин генератора до першого болтового з'єднання за межами шахти капсули (приблизно на 1 метр вище кришки капсули), в тому числі заміну 6 прохідних ізоляторів між внутрішньою і зовнішньою частинами капсули;
- 7) перевірку і ремонт ободу ротора;

- 8) посилення ободу ротора (якщо необхідно);
- 9) заміну струмознімальних кілець, щіток, щіткотримачів і установку мішку;
- 10) модернізацію системи гальмування;
- 11) монтаж всього реконструйованого генератора;
- 12) остаточні випробування і введення в експлуатацію.

Обсяг робіт по кожному блоку включає повну заміну частини системи водяного охолодження, яка є спільною для чотирьох гідроагрегатів.

1.3 Основні характеристики Канівської ГЕС

Канівська гідроелектростанція (Канівська ГЕС) розташована на річці Дніпро поблизу міста Канів (рисунок 1.1).

Перший агрегат в Каневі був введений в експлуатацію в 1972 р, вся станція була завершена до кінця 1975 р. Середньорічне виробництво станції становить 823 ГВт/год.



Рисунок 1.1 – Канівська ГЕС

Основні характеристики Канівської ГЕС:

- 1) Бетонна гребля загальною довжиною близько 344 м (рисунок 1.2).
- 2) Гребля розділена на 24 прольоту.

3) У кожному прольоті розташовано один капсульний агрегат потужністю 18,5 МВт.

4) На кожному прольоті також встановлено один основний впускний затвор роликового типу, одна знімна змінна сміттєстримна решітка і один водозливний затвор роликового типу.



Рисунок 1.2 – Бетонна гребля Канівської ГЕС

У таблиці 1.2 наведено основні характеристики діючих гідроагрегатів Канівської ГЕС.

Таблиця 1.2 – Характеристики діючих гідроагрегатів

| Основні характеристики діючих гідроагрегатів Канівської ГЕС | |
|--|---------------------------|
| ЗАГАЛЬНІ | |
| Тип і компоновка агрегатів | горизонтальний капсульний |
| Кількість агрегатів | 24 |
| Кількість реконструйованих агрегатів | 7 |
| Максимальний напір нетто, (м) | 14,8 |
| Розрахунковий напір нетто, (м) | 7,2 |
| Мінімальний напір нетто, (м) | 4,7 |

Продовження таблиці 1.2

| | |
|--|--------------------------|
| Максимальна потужність турбіни, (кВт) | 23 000 |
| Проектна потужність турбіни, (кВт) | 19 200 |
| Витрата через турбіни при проектній потужності і розрахунковому напорі нетто, м ³ / с | 320 |
| Номінальна частота обертання (об / хв) | 85,7 |
| Напрямок обертання | За годинниковою стрілкою |
| Розгінна частота обертання при збереженні комбінаторної залежності (об / хв) | 200 |
| Розгінна частота обертання при роз'єднанні комбінаторної залежності (об / хв) | 255 |
| Чи можлива робота в режимі синхронного компенсатора? | Ні |
| Чи можлива робота в режимі «підвищеної витрати»? | Ні |
| Розворот «з нуля» для видачі напруги в мережу | Так |

Всі агрегати на Канівській ГЕС використовуються тільки в генераторному режимі. Агрегати не розраховані на роботу в режимі синхронного компенсатора або режимі «підвищеної витрати».

Середня кількість годин роботи кожного агрегату при встановленій потужності – близько 3002 годин на рік, 8 годин на день.

Середня кількість пусків/зупинок агрегату на рік: 1460.

Загальну електричну схему Канівської ГЕС можна описати так:

1) Кожні чотири послідовно розташованих генератора підключені безпосередньо до загального підвищуючого трансформатора 3,15 кВ/110 кВ, утворюючи один блок.

2) 24 капсульних агрегати об'єднані в 6 блоків по 4 агрегати кожен (рисунок 1.3)

3) Шість блокових трансформаторів підключені до підстанції 110 кВ, обладнаної 8 вихідними лініями електропередачі.

4) Підстанція 110 кВ також підключена до прилеглої підстанції 330 кВ через два автотрансформатори 110 кВ/330 кВ. Тут є дві вихідні лінії 330 кВ.

5) Кожен блоковий трансформатор підключений до підстанції 110 кВ через високовольтний (блоковий) вимикач. Зараз у кожного агрегату немає свого генераторного вимикача, тільки один блоковий вимикач, загальний для чотирьох агрегатів.



Рисунок 1.3 – Машинний зал (блок)

1.4 Системи охолодження гідрогенераторів на ГЕС

Система охолодження гідрогенераторів на гідроелектростанціях залежить від конструктивного типу гідротурбіни. Гідрогенератор може бути вертикального (рисунок 1.4) або горизонтального виконання, а також існує капсульний тип гідрогенераторів (рисунок 1.5), про який піде мова у даній роботі. В капсульному гідрогенераторі турбіна і гідрогенератор об'єднані в одному корпусі, що знаходиться в проточній частині гідроелектростанції.

Капсульні гідрогенератори знайшли широке застосування для низьконапірних, а також приливних ГЕС. Вони характеризуються відносно невеликими частотами обертання і зменшеними радіальними розмірами, що досягається завдяки використанню більш ефективних, примусових систем охолодження. Одиначна потужність капсульних гідроагрегатів зазвичай не перевищує 50 МВт, проте при необхідності вона може бути значно підвищена. Для даного типу електричних машин отримали розвиток дві принципово відмінні системи охолодження великих капсульних машин: аксіальна – повітрям нормального або підвищеного тиску і безпосереднє водяне охолодження [1].

У капсульних гідрогенераторах застосовується примусове охолодження. Це перш за все рідинні системи безпосереднього охолодження обмоток і сердечників. Впровадження цих систем, що характеризуються більшою ефективністю і економічністю, дозволило підвищити питомі електромагнітні та теплові навантаження машин і її одиначну потужність. При цьому в гідрогенераторах як

холодильний агент використовується вода. Обмотки і шини обмотки статора охолоджуються безпосередньо водою, обмотки збудження виконані з форсованим повітряним охолодженням, причому форсування охолодження досягається виконанням поперечних каналів у витках котушок полюсів, а інші елементи конструкції мають традиційне непряме повітряне охолодження.

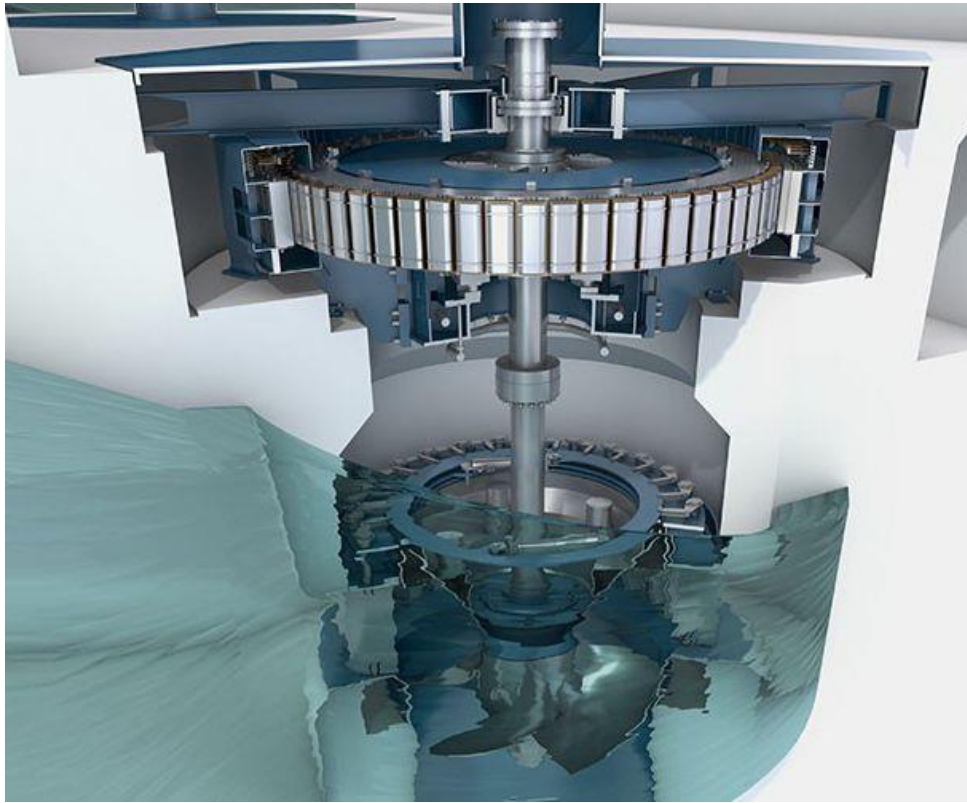


Рисунок 1.4 – Вертикальний гідрогенератор

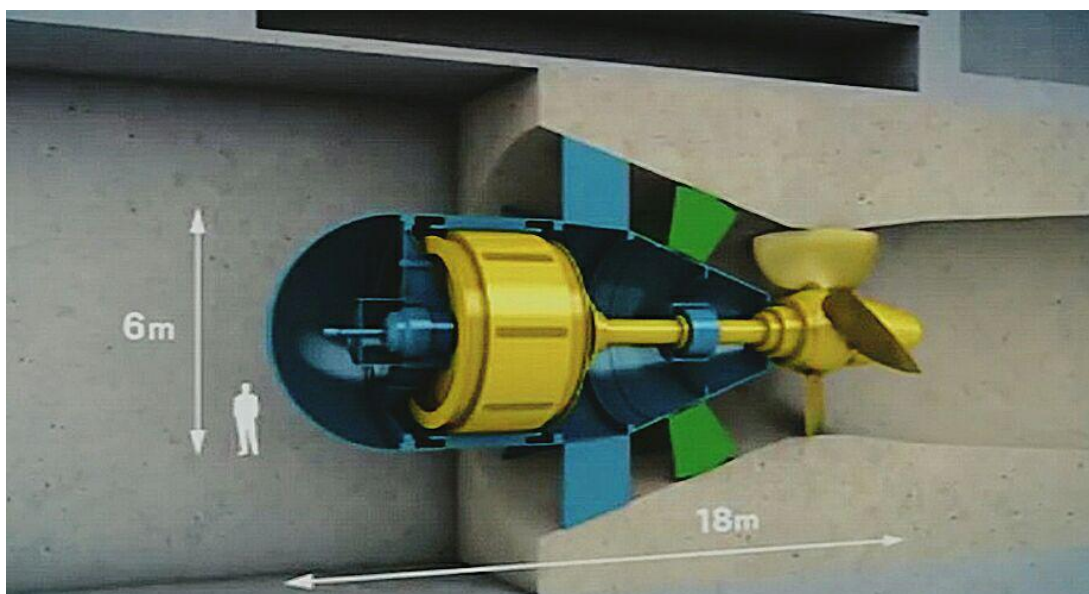


Рисунок 1.5 – Капсульний гідрогенератор (загальний вид)

Практично реалізовані конструктивні схеми безпосереднього водяного охолодження всіх основних елементів гідрогенераторів в яких мають місце значні втрати (обмотки статора та збудження, шинопроводи, сердечники статора і полюси ротора, демпферна обмотка, нажимні гребінки статора).

У багатьох випадках виконуються системи охолодження змішаного типу, в котрих для одних, найбільш напружених в тепловому відношенні елементів використовується безпосереднє водяне охолодження, для інших - повітряне.

При застосуванні аксіальної примусової вентиляції з циркуляцією повітря за замкнутим циклом для забезпечення необхідної інтенсивності теплос'єму зі статора в зубцях сердечника виконуються поздовжні щілиноподібні канали, які дозволяють в кілька разів збільшити охолоджуючу поверхню. Таким чином, повітря проходить декількома паралельними шляхами: крізь повітряний зазор між статором і ротором, по каналах в зубцях сердечника статора, між спинкою сердечника і корпусом статора і в міжполюсних проміжках ротора. Відомі також конструкції з продувкою повітря крізь спеціальні канали в обмотці і спинці сердечника статора.

При аксіальній повітряній системі охолодження потужність, що витрачається на вентиляцію генератора, стає досить значною і ККД різко знижується. Саме ця обставина змушує в великих капсульних генераторах підвищувати тиск повітря; при цьому втрати на вентиляцію знижуються пропорційно абсолютному тиску. Однак таке рішення призводить до значного ускладнення конструкції статора і його ущільнень, системи маслопостачання підшипників, системи дренажу з капсули, появи важкої діафрагми між камерами генератора і турбіни. Крім того, різко ускладняється експлуатація генератора і виключається його обслуговування, під час роботи. Все це разом узятє, а також прагнення отримати більш компактну, легку, доступну і зручну в експлуатації машину змусили продовжити пошуки оптимальної для цього типу гідрогенераторів системи охолодження.

Використання безпосереднього водяного охолодження обмоток статора і ротора, а також сердечників полюсів усуває всі зазначені вище труднощі, повністю виключає необхідність штучної циркуляції повітря в генераторі, так як при належному виборі матеріалів і розмірів капсульних машин втрати в осерді статора відводяться водою, що протікає по каналах в провідниках обмотки статора.

Крім отримання звичайних переваг (зниження габаритів і маси), водяне охолодження стосовно капсульних гідрогенераторів великої потужності дозволяє також значно спростити конструкцію ряду вузлів і підвищити надійність роботи обладнання.

1.5 Система охолодження гідрогенераторів Канівської ГЕС

На Канівській ГЕС використовуються капсульні гідрогенератори з виключно аксіальною системою охолодження виробництва ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ» потужністю 18,5 МВт.

Розробка перших зразків даних гідрогенераторів на заводі ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ» проводилася ще в 50-х роках минулого століття (рисунок 1.6) [2].

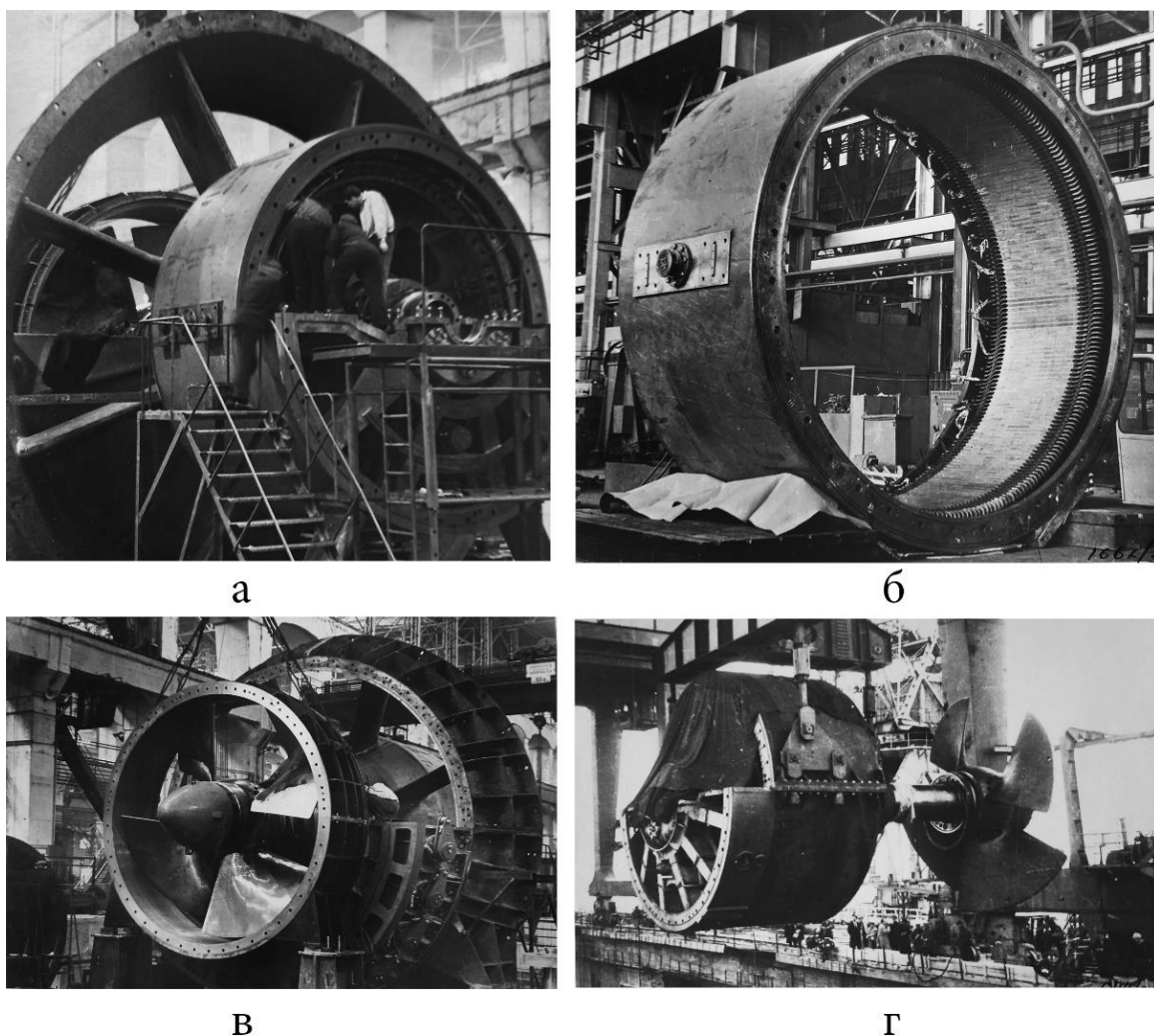


Рисунок 1.6 – Контрольна збірка гідрогенератору на виробництві (а),(б),(в) та великоблочний монтаж гідрогенератору на ГЕС (г)

Перший агрегат в Каневі був введений в експлуатацію в 1972 році, а вся станція була завершена до кінця 1975 року. У той час було проведено безліч основоположних випробувань і вироблено безліч методик розрахунку під даний тип гідрогенератора. Інженери Готтер, Данько, Стоун, Алексєєв, Тітко та Мілих зробили безцінний внесок у розвиток гідроагрегатів та електромашинобудування в цілому. Минуло понад 40 років і кілька модернізацій гідроагрегатів з початку

роботи першої «Канівської машини», але кожна наступна модернізація потребує доопрацювання базових (в певному сенсі «застарілих») методик та впровадження сучасних технологій розрахунку та принципово нових конструкцій.

Система охолодження гідрогенераторів Канівської ГЕС призначена для відводу теплових втрат статора і ротора. В даних агрегатах застосовується система непрямого повітряно-водяного охолодження з замкнутим циклом вентиляції. Охолоджуюче повітря, що циркулює через статор і ротор відбирає тепло, яке виділяється в активних частинах в результаті втрат. Повітря нагрівається і спрямовується в повітряно-водяні охолоджувачі, де охолоджується холодною водою і далі направляєтся в статор і ротор. Циркуляцію повітря за замкнутим контуром при номінальному режимі роботи з номінальними параметрами забезпечують два осьові вентилятори з електроприводом, кожен потужністю 115 кВт і напругою живлення 0,4 кВ.

Кожен вентилятор пускається від свого пристрою плавного пуску (ППП), тобто для двох вентиляторів передбачено два ППП.

Пристрій плавного пуску працює від трансформатора 6,3/0,4 кВ, номінальною потужністю 500 кВА.

Для запобігання перетіканню повітря при роботі одного електричного вентилятора і простою іншого, на вході повітря в вентилятори встановлюються автоматичні повітряні заслінки дискового типу з електроприводом.

Для забезпечення роботи системи охолодження одного гідрогенератора використовуються два осьові вентилятора MFLD 900.

Вентилятори повинні забезпечувати надійність і простоту експлуатації. Розміщення робочого колеса вентилятора безпосередньо на валу двигуна виключає необхідність періодичного центрування і балансування. Контроль вібрації виконується двома трикомпонентними датчиками, які встановлюються на корпусі двигуна в зонах підшипникових щитів. Застосування асинхронних двигунів з системою плавного пуску також підвищує надійність гідроагрегату. Застосовувані двигуни серійні, загальнопромислового виконання, доступні на ринку України.

Для системи охолодження гідрогенератора поставляються:

- два повітроохолоджувача;
- осьовий двоступеневий компресор з електроприводом 6,3 кВ;
- шафа управління компресором.

Система охолодження гідрогенератора з аксіальною схемою вентиляції включаючи аварійні режими роботи:

- повинна забезпечувати відведення тепла активних частин до 680 кВт;
- розрахункові значення температур активних частин не повинні перевищувати гранично допустимих значень за ГОСТ 5616-89 для класу ізоляції

F, при максимальній температурі охолоджуючої води на вході в повітроохолоджувачі 30 °С;

- при відключенні одного вентилятора, забезпечується робота гідрогенератора 60 хвилин з номінальними параметрами, при максимальній температурі охолоджуючої води на вході в повітроохолоджувачі 30 °С, з температурами активних частин, що не повинно перевищувати гранично допустимих значень для класу ізоляції F по ГОСТ 5616-89;

- при відключенні всіх вентиляторів забезпечується робота гідрогенератора 30 хвилин з номінальними параметрами, при максимальній температурі охолоджуючої води на вході в повітроохолоджувачі 30 °С, з температурами активних частин, що не повинно перевищувати гранично допустимих значень для класу ізоляції F по ГОСТ 5616-89.

1.6 Задачі модернізації системи охолодження

Одна з основних цілей реконструкції та модернізації Канівської ГЕС є збільшення потужності капсульних гідрогенераторів СГКЗ 538/160-70 з 18,5 МВт до 22 МВт. Це призведе до збільшення теплових втрат в активних частинах генератора. Для забезпечення їх належного охолодження необхідно забезпечити достатній рівень циркуляції охолоджуючого повітря всередині гідротурбіни та крізь її активні частини. Існуюча система охолодження з двома осьовими вентиляторами не забезпечуватиме належний відвід теплових втрат статора і ротора гідрогенератору.

Тому потрібно спроектувати додатковий відцентровий вентилятор, який є одним з елементів системи охолодження гідротурбін Канівської ГЕС і забезпечує необхідний рівень охолодження циркулюючого у середині повітря.

Перед проектуванням необхідно вивчити систему вентиляції і ряд цілей реконструкції, а також ряд цілком нових вимог стосовно роботи гідрогенератору на аварійному режимі.

1.7 Висновки по розділу

В даному розділі проведено аналіз сучасного стану гідроенергетики України, поставлені цілі її реконструкції – це збільшення терміну служби ГЕС, підвищення її потужності, вироблення, надійності і безпеки устаткування і споруд, виконання вимог щодо захисту навколишнього середовища, тощо.

На прикладі Канівської ГЕС розглянуто загальний состав ГЕС та типове устаткування, що використовується для виробництва електроенергії.

Проведено аналіз систем охолодження гідрогенераторів різних схем на

гідроелектростанціях. Описано систему охолодження гідрогенераторів Канівської ГЕС.

Наведені шляхи модернізації системи охолодження капсульних гідрогенераторів СГК3 538/160-70 Канівської ГЕС при збільшення їх потужності з 18,5 МВт до 22 МВт. Для забезпечення належного охолодження активних частин генератора при збільшенні теплових втрат необхідно забезпечити достатній рівень циркуляції охолоджуючого повітря всередині гідротурбіни.

Тому потрібно спроектувати додатковий відцентровий вентилятор, який є одним з елементів системи охолодження гідротурбін Канівської ГЕС і забезпечує необхідний рівень охолодження циркулюючого у середині повітря.

2 ПЕРШИЙ ЕТАП МОДЕРНИЗАЦІЇ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ГІДРОГЕНЕРАТОРУ

2.1 Конструктивні особливості систем охолодження капсульних гідрогенераторів

В повільно працюючій електричній машині, такій як гідрогенератор капсульного типу, циркуляція повітря для охолодження забезпечується вентиляторами із зовнішнім приводом. Охолоджувальний пристрій монтується на стороні тиску або всмоктування вентилятора, а ротор і статор встановлені з боку всмоктування вентилятора.

У патенті США №2012025641 [3] розглянута така схема циркуляції повітря (рисунок 2.1).

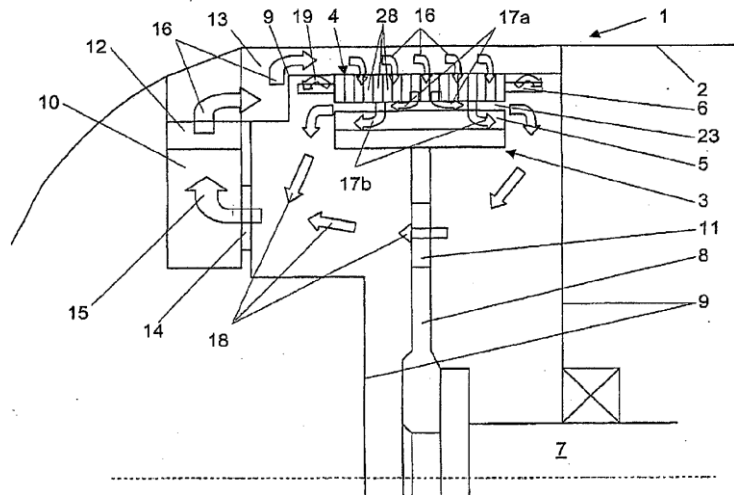


Рисунок 2.1 – Схема вентиляції в перетині ротору

У патенті Китаю №203368236 [4] корисна модель відноситься до системи охолодження і вентиляції гідрогенератора і, зокрема, відноситься до охолоджувальної і вентиляційної структури гідрогенератора капсульного типу з використанням пластикового вітрового скла, армованого скловолокном (рисунок 2.2).

Конструкція охолодження і вентиляції водяного турбінного типу включає в себе опору ротора, ротор, з'єднаний з опорою ротора, котушку статора, розташовану поза ротором, повітряний охолоджувач, розташований на зовнішній кінцевій частині, верхній вітрозахисний екран на стороні вище за потік і нижній вітрозахисний екран на стороні нижче за потік і відрізняється тим, що верхній вітрозахисний екран утворений шляхом з'єднання пластикового вітрозахисного

екрану, армованого скловолокном, і пластини кріплення вентилятора, частина зовнішнього діаметра верхньої вітрозахисної панелі виконана в конічній поверхні, і конічна поверхня в комплекті з ущільнювальними стрічками EPDM через териленові (лавсанові) втулки. Охолоджуюча та вентиляційна структура гідрогенератора модифікована для досягнення високої швидкості використання холодного повітря, підвищення ефективності теплового випромінювання, зниження втрат при вентиляції і підвищення загальної ефективності генератора.

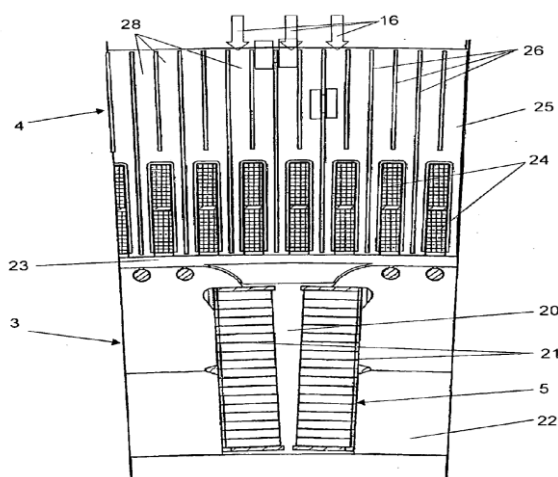


Fig. 2

Рисунок 2.2 – Загальний вид схеми вентиляції та активних частин в розрізі

У патенті Російської Федерації №2309512 [5], суть винаходу полягає в наступному. Електрична машина, що включає корпус, розміщені в ньому охолоджувачі, статор, що має в торцевих зонах сердечника радіальні канали, ротор, що встановлений в статорі з повітряним зазором і має вентиляційні канали з входами і виходами на різних радіусах обертання, вентилятори, розміщені по обидва боки бочки ротора, і камери (рисунок 2.3).

Спосіб охолодження цієї електричної машини здійснюють наступним шляхом (рисунок 2.4). Охолоджуюче повітря від охолоджувачів статора через камеру збору холодного повітря статора, організовану між охолоджувачами статора і зовнішньою поверхнею сердечника статора, і від охолоджувачів ротора направляють за допомогою напірних елементів, а саме вентиляторів, розміщених по обидва боки бочки ротора, і каналів ротора різними шляхами в канали ротора і сердечника статора, а підігріте в цих каналах повітря направляють через камеру збору підігрітого повітря, організовану в зонах розташування лобових частин обмотки статора, на входи охолоджувачів ротора і на входи вентиляторів і далі - на охолоджувачі статора, при цьому один шлях організують від охолоджувачів статора, з виходів яких охолоджуюче повітря направляють з боку зовнішньої поверхні сердечника статора в радіальні канали торцевої зони сердечника статора,

інший шлях організують від охолоджувачів ротора, з виходів яких охолоджуюче повітря направляють в канали ротора. Ще один шлях, відповідно до винаходу, організують від охолоджувачів статора, з виходів яких охолоджуюче повітря направляють в канали натискних плит сердечника статора, при цьому охолодження обмотки статора і основного сердечника статора здійснюють водою, що циркулює в трубках охолоджувачів, які мають у своєму розпорядженні між пакетами основного сердечника статора.

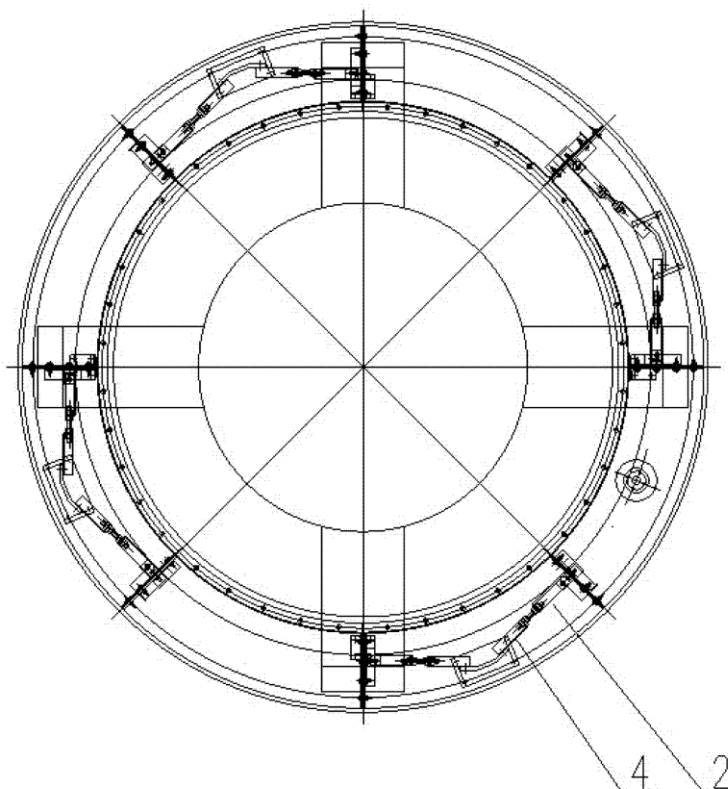


Рисунок 2.3 – Поперечний розріз корпусу статора

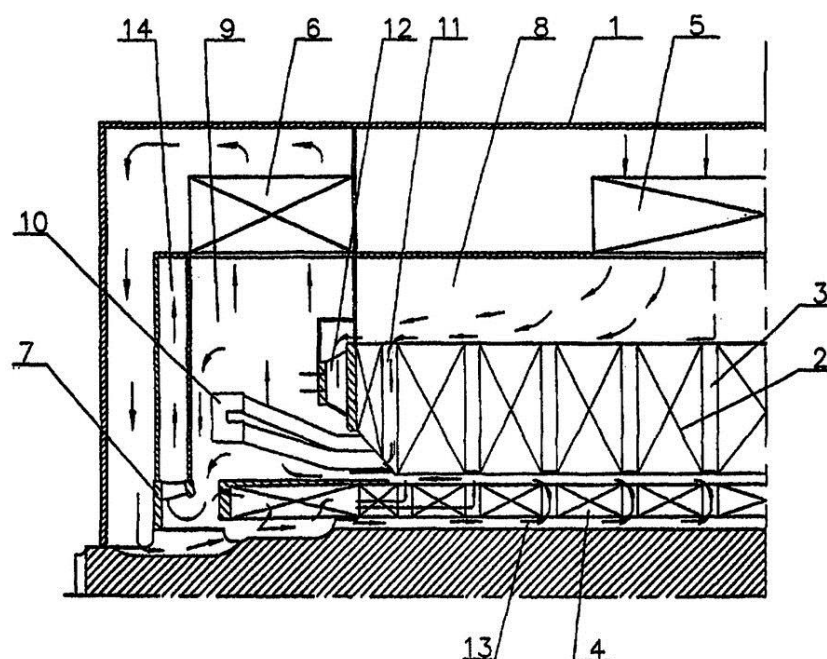


Рисунок 2.4 – Схема вентиляції активних частин

Рішення, що було запропоновано провідними інженерами і конструкторами ДП «ЗАВОД«ЕЛЕКТРОВАЖМАШ» полягає в тому, що для забезпечення ефективної циркуляції та напору охолоджуючого повітря в робочій порожнині та підвищення енергоефективності капсульних гідрогенераторів Канівської ГЕС необхідно спроектувати, виготовити та встановити допоміжний відцентровий вентилятор, що встановлюється на вал турбіни та матиме привод від ротору гідрогенератора.

Встановлення цього вентилятора забезпечує ефективний розподіл охолоджуючого повітря, що надходить від двох електричних осьових вентиляторів, встановлених в передній частині гідрогенератора. Приблизний вид реалізації модернізованої системи вентиляції та теоретичну схему руху повітря наведено на рисунку 2.5.

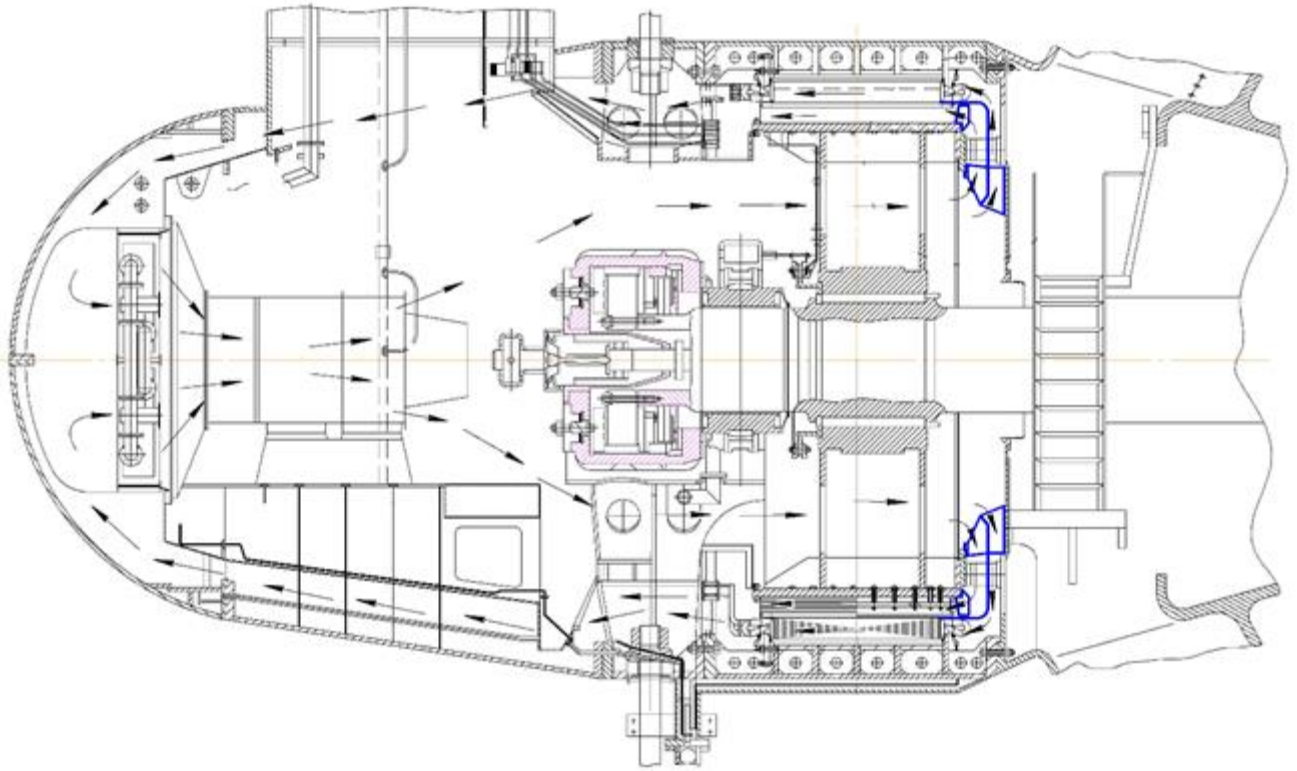


Рисунок 2.5 – Схема руху повітря при використанні допоміжного вентилятора

2.2 Конструкція та принцип роботи спроектованого вентилятора

Відцентровий вентилятор складається з:

- робочого кільця;
- лопаток;
- покривного кільця;

Геометричні характеристики відцентрового вентилятора горизонтального гідрогенератора СГКЗ 538 / 160-70 наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Геометричні параметри вентилятору

| Найменування | Величина, мм |
|--------------------|--------------|
| Зовнішній діаметр | 4530 |
| Внутрішній діаметр | 3780 |
| Кількість лопаток | 54 |
| Товщина лопаток | 10 |
| Кут входу | 120° |
| Кут виходу | 90° |

Слід зазначити, що такі геометричні параметри, як зовнішній та внутрішній діаметри, мають обмеження, що пов'язані з геометричними властивостями гідрогенератора СГКЗ 538/160-70, а саме діаметром ротору, на який монтується відцентровий вентилятор, та діаметром статору, відстань до якого повинна, в купі з відцентровим вентилятором, створювати вентиляційний канал, який буде сприяти ефективному проходженню крізь нього повітря.

Даний вентилятор забезпечує рівномірний розподіл охолодженого повітря, що поступає від двох осьових електровентиляторів MFLD 900 – повітря засмоктується вентилятором крізь канали у роторі та викидається у спеціально спроектовані вентиляційні канали гідрогенератора, по яких воно рухається уздовж перетину гідрогенератора, виходячи в «носовій частині» генератора, де обладнано спеціальну повітряну камеру. З камери повітря, що засмоктується парою проточних електровентиляторів MFLD 900, проходить крізь систему газоохолоджувачів та повітряних фільтрів, далі крізь вищеназвані вентилятори до робочої порожнини звідки знову засмоктується відцентровим вентилятором.

2.3 Аналітичний розрахунок відцентрового вентилятора

Для побудування тривимірної моделі вентилятора та її подальшого дослідження було проведено аналітичний розрахунок, в результаті якого було отримано геометричні параметри та параметри потоку в міжлопаткових каналах вентилятору. Розрахунок проводився згідно з методиками, що наведені у [6].

Зовнішній діаметр

$$D_n = 2265 \cdot 2 = 4530 \text{ мм};$$

Внутрішній діаметр розраховується як подвійний радіус ротору, на який встановлюється відцентровий вентилятор

$$D_e = 1890 \cdot 2 = 3780 \text{ мм};$$

Висота лопатки

$$H_l = \frac{D_n - D_e}{2} = 375 \text{ мм};$$

Кількість лопаток

$$N_{л} = \pi \cdot \frac{D_{н} + D_{в}}{D_{н} - D_{в}} = 34,809;$$

Приймаємо 54 лопатки, оскільки у разі прийняття меншої кількості лопаток під дією відцентрових навантажень зварні шви, що кріплять між собою лопатку та диски вентилятора, не витримують навантажень, тобто конструкція стає аварійно небезпечною.

Частота обертання відцентрового вентилятора обмежена частотою обертання ротору гідрогенератора СГК3 538/160-70 і становить:

$$n = 85,7 \text{ об / мин};$$

Визначення швидкостей повітря.

На вході до міжлопаткового каналу:

$$V_1 = \frac{\pi \cdot D_{н} \cdot n}{6000} = 20,327 \text{ м / с};$$

На виході з міжлопаткового каналу:

$$V_2 = \frac{\pi \cdot D_{в} \cdot n}{6000} = 16,962 \text{ м / с};$$

Визначення напірних характеристик

$$H_0 = 0,5 \cdot 1,1 \cdot (V_1^2 - V_2^2) = 69,021 \text{ Па};$$

Визначаємо витрату повітря

$$S_2 = 0,92 \cdot \pi \cdot D_{н} \cdot 0,15 \cdot D_{н} \cdot 10^{-4} = 8,897 \text{ м}^3;$$

$$Q_{\max} = 0,42 \cdot S_2 \cdot V_1 = 75,954 \text{ м}^3 / \text{с};$$

На рисунку 2.6 зображено напірну характеристику відцентрового вентилятора, що було побудовано на підставі результатів аналітичного розрахунку. Червоною лінією на графіку зображено гідравлічний супротив системи вентиляції в цілому.

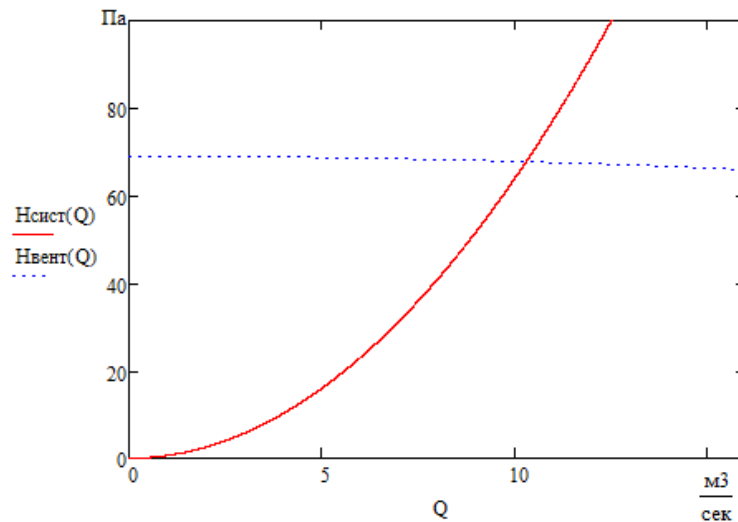


Рисунок 2.6 – Напірна характеристика відцентрового вентилятора

2.4 Розробка тривимірної моделі базової конструкції відцентрового вентилятора

Розробка 3D моделей складових частин вентилятора, а також їх остаточне складання проводилися за допомогою програмного комплексу *SolidWorks*. В якості вихідних матеріалів для моделювання були використані креслення, розроблені конструкторським відділом ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ».

2.4.1 Нижнє кільце

Нижня частина відцентрового охолоджуючого вентилятора є каналотворюючою частиною в конструкції. До нього зварюванням прикріплюються робочі лопатки. Матеріал – сталь 3сп ГОСТ 14637-89. Його геометричні розміри жорстко пов'язані з геометричними розмірами ротору гідрогенератора. Під час роботи сприймає дію відцентрових сил, тому задля того, щоб виключити руйнування як самого вентилятора, так і елементів конструкції гідрогенератора необхідно забезпечити високу точність виготовлення.

При побудові були використані такі основні команди:

- ... «Ескіз»;
- ... «Бобишка» - «Витягнути».

Твердотільну модель нижнього кільця відцентрового вентилятору наведено на рисунку 2.7.

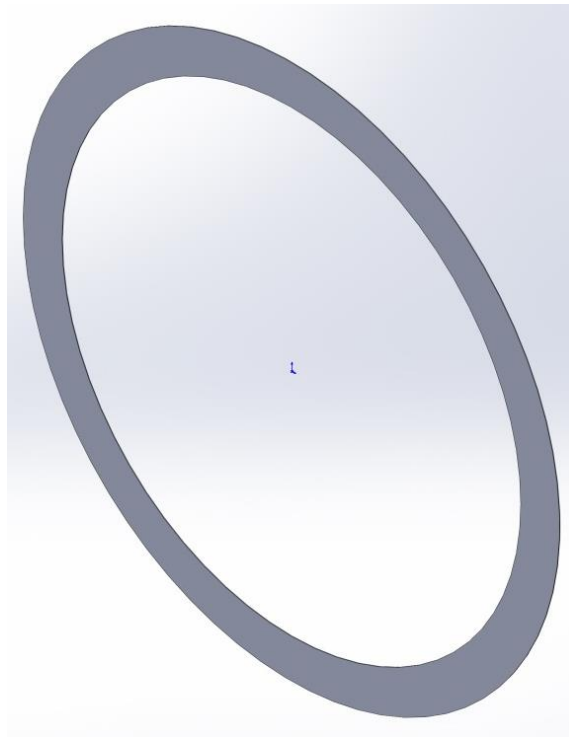


Рисунок 2.7 – Нижнє кільце

2.4.2 Робоча лопатка

Робоча лопатка – це один з основних елементів даної конструкції, вона утворює канал та моделює напрямок потоку. Профіль лопатки забезпечує максимально ефективне проходження повітряного потоку міжлопатковим каналом та переводить направлення повітряного потоку з осьового напрямку в радіальний. Вимогами до виготовлення цього елемента є легкість і збалансованість конструкції, врівноваженість лопаток між собою, достатня одноманітність форм згинальних коливань і частот власних коливань – вимоги балансування всього вентилятора в цілому. У конструкції передбачено 54 робочих лопатки. Виготовляються з матеріалу – сталь 3сп ГОСТ 14637-89.

При побудові твердотільної моделі були використані такі основні команди:

- ... «Ескіз»;
- ... «Бобишка» - «Витягнути»;
- ... «Виріз» - «Витягнути».

Твердотільну модель робочої лопатки відцентрового вентилятору наведено на рисунку 2.8.

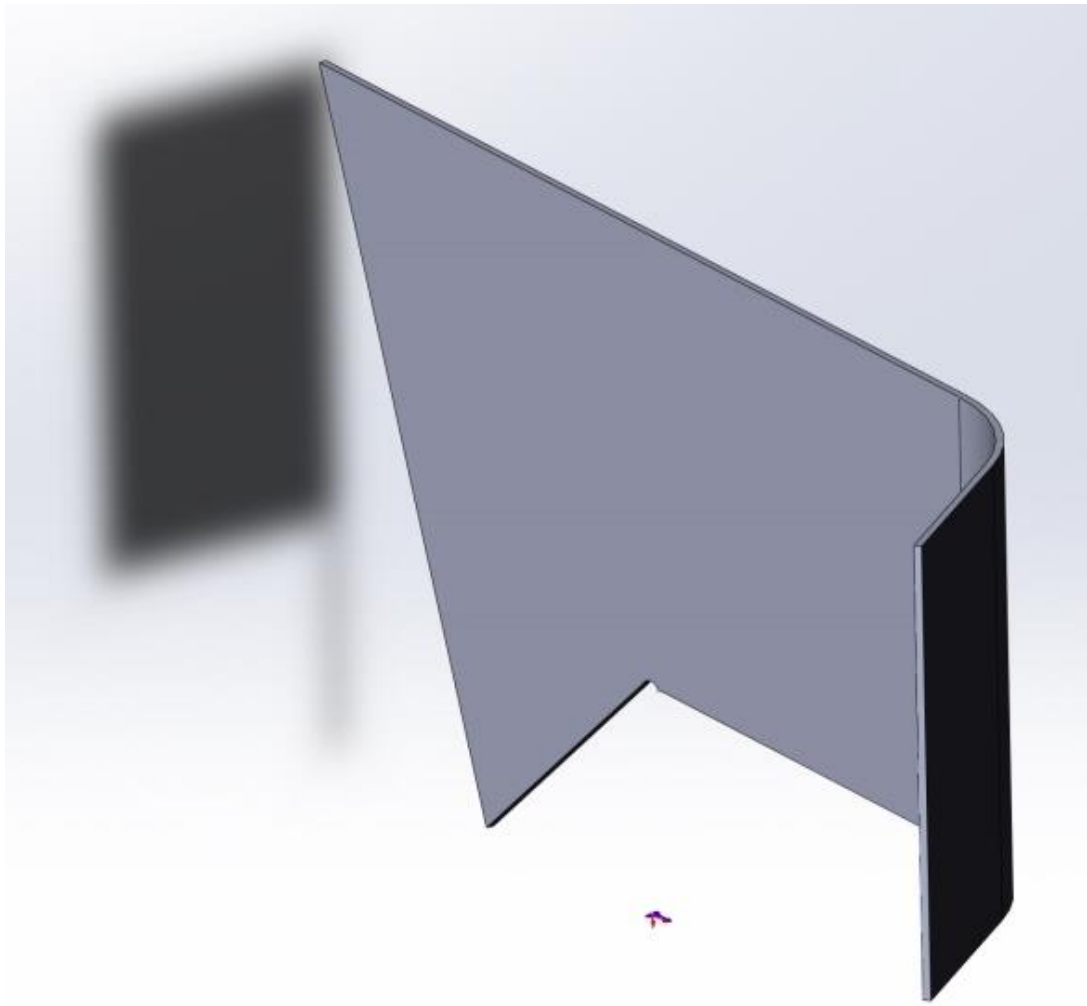


Рисунок 2.8 – Робоча лопатка

2.4.3 Покривне кільце

Разом з робочими лопатками і нижнім колесом покривне кільце утворює канали, якими повітряний потік потрапляє в робочу площину гідрогенератора. Внутрішнім своїм діаметром покривне кільце сідає на вал ротору гідрогенератора. Під час роботи воно сприймає відцентрові навантаження, тому як і нижнє кільце потребує підвищеної точності виготовлення.

При побудові 3D моделі покривного кільця були використані такі основні команди:

- ... «Ескіз»;
- ... «Бобишка» - «Витягнути».

Твердотільну модель покривного кільця відцентрового вентилятору наведено на рисунку 2.9.

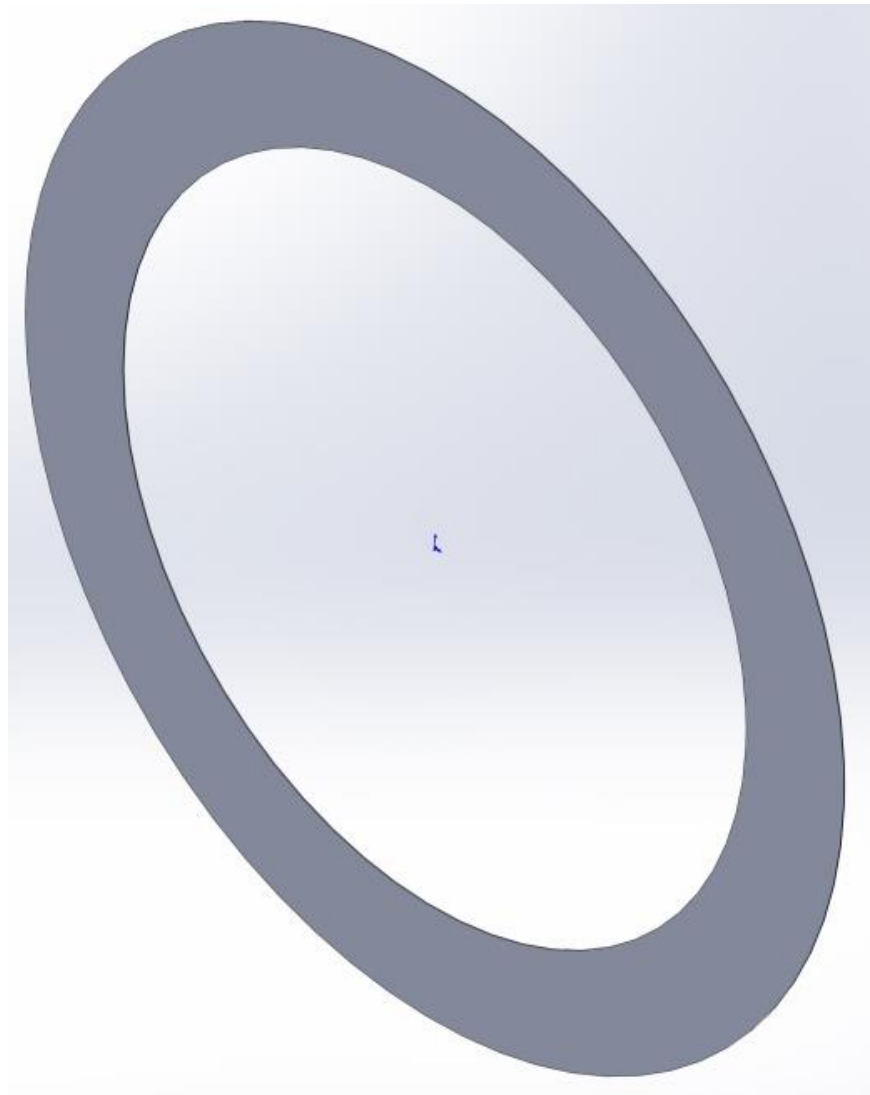


Рисунок 2.9 – Покривне кільце

2.4.4 Складання відцентрового вентилятора

При складанні вентилятора використовувалися такі основні команди:

- ... «Створити» - «Збірка»;
- ... «Вставити компоненти».

Між собою частини вентилятора пов'язані системою сполучень, яка є однією з переваг у використанні програмного комплексу *SolidWorks* – простота їх використання забезпечує значну економію часу та ресурсів комп'ютера. Використовувалися такі основні групи сполучень:

- «Збіг»;
- «Концентрично».

Для розміщення лопаток по колу в конструкції робочого колеса була використана команда:

- «Місцевий круговий масив».

В результаті виконання даних операцій була отримана конструкція, показана на рисунку 2.10.

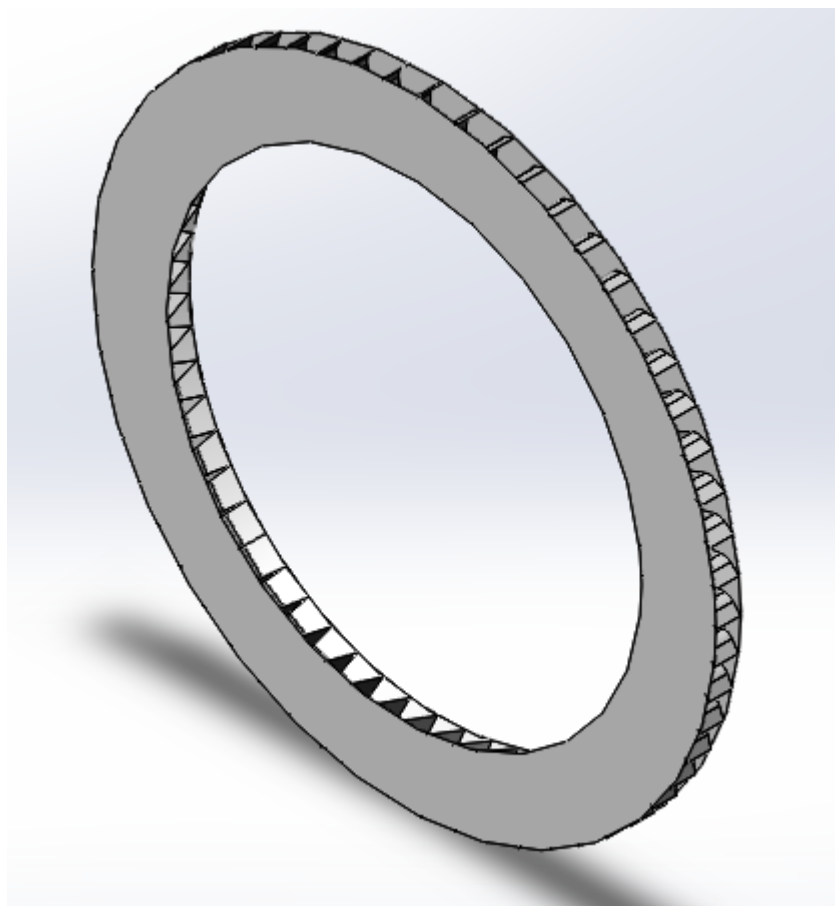


Рисунок 2.10 – Вентилятор в зборі

2.5 Математичне уявлення основних фізичних процесів розрахункової моделі

В якості засобу моделювання використаний прикладний програмний пакет *SolidWorks* та зокрема його модуль для моделювання течії рідин та газів – *Flow Simulation*.

Flow Simulation – програмне забезпечення, повністю інтегроване в *SolidWorks* для розрахунку рідинних і газових потоків всередині і зовні моделі, а також розраховує теплопередачу між цими моделями конвекцією, випромінюванням і теплопровідністю за допомогою технологій обчислювальної гідрогазодинаміки (CFD).

Flow Simulation моделює рух потоку, на основі рішення рівнянь Нав'є-Стокса, які є інтерпретацією законів збереження маси, імпульсу і енергії для потоку рідини. Рівняння доповнені виразами стану рідини, які визначають природу рідини та емпіричними залежностями щільності, в'язкості та теплопровідності рідини від температури. Нестискувані неньютонівські рідини

розглядаються за залежністю їх динамічної в'язкості від швидкості деформації зсуву і температури, а стискувані рідини розглядаються за залежністю їх щільності від тиску. Ще одна частина рівнянь відповідає за геометрію потоку, граничні і початкові умови.

Рівняння Нав'є-Стокса мають вигляд:

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = -(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} - \frac{1}{\rho} \nabla \vec{p} + \nu \Delta \vec{u} + \vec{f}; \quad (2.1)$$

де u - швидкість течії;

p – тиск;

ρ – щільність рідини;

ν – кінематична в'язкість;

f – зовнішня сила, що діє на рідину.

Рівняння Нав'є-Стокса доповнюються рівнянням нерозривності:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0; \quad (2.2)$$

Таким чином, для ламінарної рідини ми отримуємо систему з чотирьох рівнянь: три рівняння Нав'є – Стокса в проекціях на осі і рівняння нерозривності для чотирьох невідомих: три компоненти вектору швидкості і гідродинамічного тиску.

Для опису турбулентного режиму використовується декомпозиція Рейнольдса, згідно з якою довільну величину x можна записати як суму її середнього значення \bar{x}_i і відхилення x_i' :

$$x_i = \bar{x}_i + x_i'; \quad (2.3)$$

В результаті отримуємо усереднені по Рейнольдсу рівняння Нав'є - Стокса, які також називаються рівняннями Рейнольдса, а також усереднене рівняння нерозривності.

Рівняння нерозривності (2.1) для нестисливої рідини має вигляд:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \quad (2.4)$$

Тоді для усередненої швидкості \bar{u}_i :

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0; \quad (2.5)$$

Якщо відняти рівняння (2.5) з (2.4), отримаємо рівняння нерозривності для відхилення:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0; \quad (2.6)$$

Використовуючи (2.4), можна записати рівняння (2.1) в компонентах наступним чином:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \rho g_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}; \quad (2.7)$$

де σ_{ij} – напруження в рідині, що визначаються по формулі:

$$\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \quad (2.8)$$

де δ_{ij} – дельта функція Кронкера, що визначається як:

$$\begin{cases} \delta_{ij} = 1, i = j \\ \delta_{ij} = 0, i \neq j \end{cases}; \quad (2.9)$$

Використовуючи декомпозицію Рейнольдса, рівняння (2.7) можна записати у наступному вигляді:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\sigma}_{ij} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j); \quad (2.10)$$

Це рівняння відоме як рівняння Рейнольдса. Дане рівняння досить схоже на рівняння (2.1) і відрізняється лише додатковою складовою в правій частині $\rho \bar{u}_i \bar{u}_j$. Ця складова називається напруженням Рейнольдса і являє собою симетричний

тензор другого порядку, що складається з шести незалежних компонент. Таким чином, для турбулентної рідини є все ті ж чотири рівняння і вже десять невідомих: три компонента швидкості, гідродинамічний тиск і шість напружень Рейнольдса.

Для замикання системи рівнянь застосовується стандартна модель турбулентності $k - \varepsilon$. Для замикання системи необхідно визначити зв'язок між напруженнями по Рейнольдсу і параметрами усередненої течії. Цей зв'язок визначають за допомогою різних моделей турбулентності.

Введемо турбулентну в'язкість аналогічно до моделі Буссінеска:

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \quad (2.11)$$

Далі перейдемо безпосередньо до отримання стандартної моделі $k - \varepsilon$ з двох рівнянь, яка сьогодні розглядається як стандартна модель для опису турбулентності і рішення інженерних задач. У даній моделі вводяться два важливих поняття – генерація P і дисипація ε . Фізичний сенс генерації турбулентності P полягає в породженні нових вихорів і пульсацій, які і утворюють турбулентність. Дисипація ε , навпаки, являє собою розсіювання великих вихорів на менші, призводить до усереднення течії і зменшення турбулентності. Два рівняння переносу дозволяють розглядати турбулентність в просторі і часі. Дана модель є напівемпіричною і спирається на феноменологічний похід і результати, отримані дослідним шляхом.

Помноживши (2.10) на u_j та виконавши нескладні алгебраїчні перетворення отримаємо:

$$\begin{aligned} \partial_t \overline{u_i u_j} + \overline{u_k} \partial_k \overline{u_i u_j} = & -\frac{1}{\rho} (\overline{u_j} \partial_i p + \overline{u_i} \partial_j p) - 2\nu \partial_k \overline{u_i} \partial_k \overline{u_j} - \\ & - \partial_k \overline{u_k u_i u_j} - \overline{u_j u_k} \partial_k u_i - \overline{u_i u_k} \partial_k u_j + \nu \nabla^2 \overline{u_i u_j}; \end{aligned} \quad (2.12)$$

Визначимо кінетичну енергію турбулентності як $k = 0,5 \overline{u_i u_i}$ і підставимо її в (2.12), приймаючи $i=j$:

$$\partial_t k + \overline{u_k} \partial_k k = -\frac{1}{\rho} \partial_i \overline{u_i p} - \nu \partial_k \overline{u_i} \partial_k \overline{u_i} - \frac{1}{2} \partial_k \overline{u_k u_i u_i} - \overline{u_i u_k} \partial_k u_i + \nu; \quad (2.13)$$

Другий доданок правої частини (2.13) відповідає за дисипацію енергії:

$$\varepsilon = \overline{v \partial_k u_i \partial_k u_i}; \quad (2.14)$$

тоді як четвертий доданок правої частини (2.13) є генерацією P:

$$P = -\overline{u_i u_k \partial_k u_i}; \quad (2.15)$$

Далі робимо допущення, що:

$$-\partial_j \left(\frac{1}{2} \overline{u_j u_i u_i} - \frac{1}{\rho} \overline{u_j p} \right) \approx \partial_j (v_T \partial_j k); \quad (2.16)$$

Враховуючи (2.14)-(2.16), рівняння (2.13) можливо записати наступним видом:

$$\partial_t k + \overline{u_j} \partial_j k = P - \varepsilon + \partial_j \left(\left(v + \frac{v_T}{\sigma_k} \right) \partial_j k \right); \quad (2.17)$$

Рівняння (2.17) є рівнянням для кінетичної енергії k. σ_k – параметр, що забезпечує потрібну розмірність для доданка с v_T . Зазвичай приймається $\sigma_k = 1$. Рівняння для дисипації ε записується за аналогією з (2.17):

$$\partial_t \varepsilon + \overline{u_j} \partial_j \varepsilon = \frac{C_{1\varepsilon} P - C_{2\varepsilon} P}{T} + \partial_j \left(\left(v + \frac{v_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \partial_j \varepsilon \right); \quad (2.18)$$

де $T=k/\varepsilon$ забезпечує потрібну розмірність, а константи $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_ε вводяться, оскільки форма рівняння лише припускається, але не виводиться аналітично.

Константи $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_ε визначаються експериментально і мають наступні значення: $C_{1\varepsilon} = 1,44$, $C_{2\varepsilon} = 1,92$, $C_\mu = 0,09$, $\sigma_k = 1,44$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

2.6 Розрахункове дослідження системи охолодження

Проведено розрахункове дослідження системи охолодження з примусовою системою вентиляції аксіального типу, що включає в себе основні та допоміжний (відцентровий) вентилятори (базову конструкцію).

Задачею розрахунку є визначення швидкостей течії повітря у каналах капсульного гідрогенератора та температур активних частин гідрогенератора

СГКЗ 538/160-70 з аксіальною системою вентиляції за умови відключення двох осьових вентиляторів MFLD 900.

У якості розрахункової геометрії було побудовано тривимірну модель гідрогенератора СГКЗ 538/160-70 у програмному комплексі *SolidWorks*. Під час моделювання було уточнено геометричні особливості стрижнів обмотки статора та ротору (рисунок 2.11).

Охолоджуюча середа всередині гідрогенератора СГКЗ 538/160-70 – повітря за нормальних атмосферних умов.

Температура охолоджуючої води у охолоджувачі – 30 °С.

Для забезпечення роботи системи охолодження гідрогенератора СГКЗ 538/160-70 застосований подвійний вентилятор. Система охолодження розділена на два контури, охолодження ротора забезпечується осьовим вентилятором, охолодження статора відцентровим вентилятором.

Розрахунок вентилятору виконаний по заводській методиці ОТХ.214.684 [7].

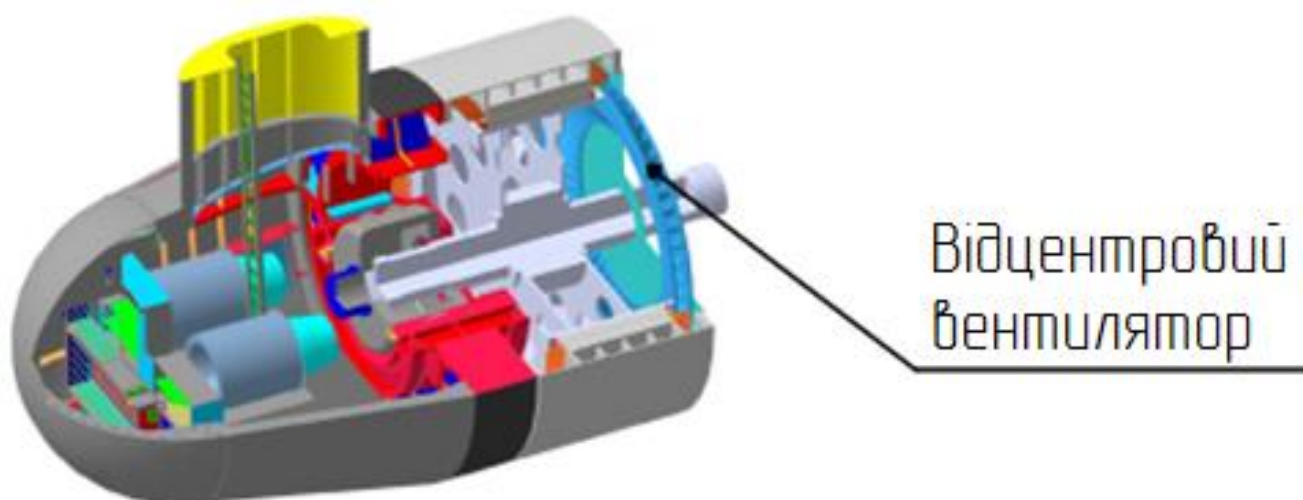


Рисунок 2.11 – Загальна схема з допоміжним вентилятором

Геометричні характеристики каналу, яким проходить охолоджуюче повітря, наведено на виді А рисунку 2.12. Цей вид збільшено на рисунку 2.13.

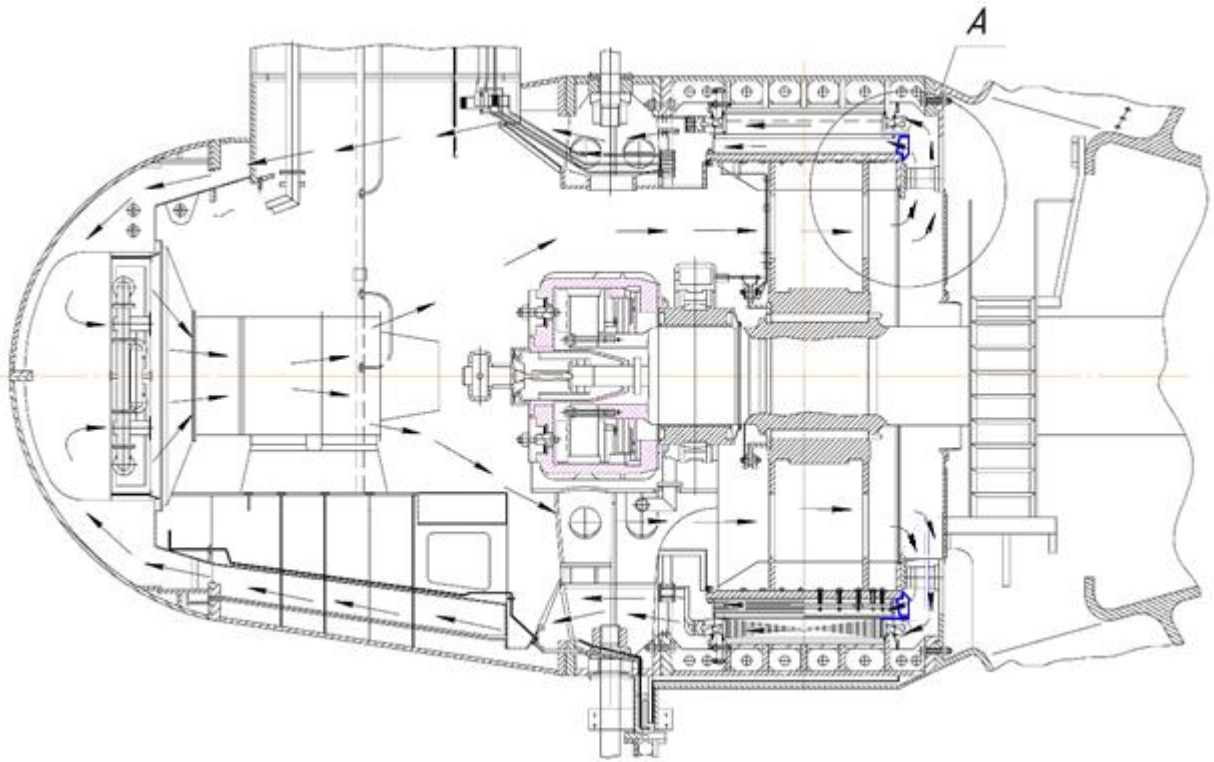


Рисунок 2.12 – Загальний вид системи вентиляції з допоміжний відцентровим вентилятором

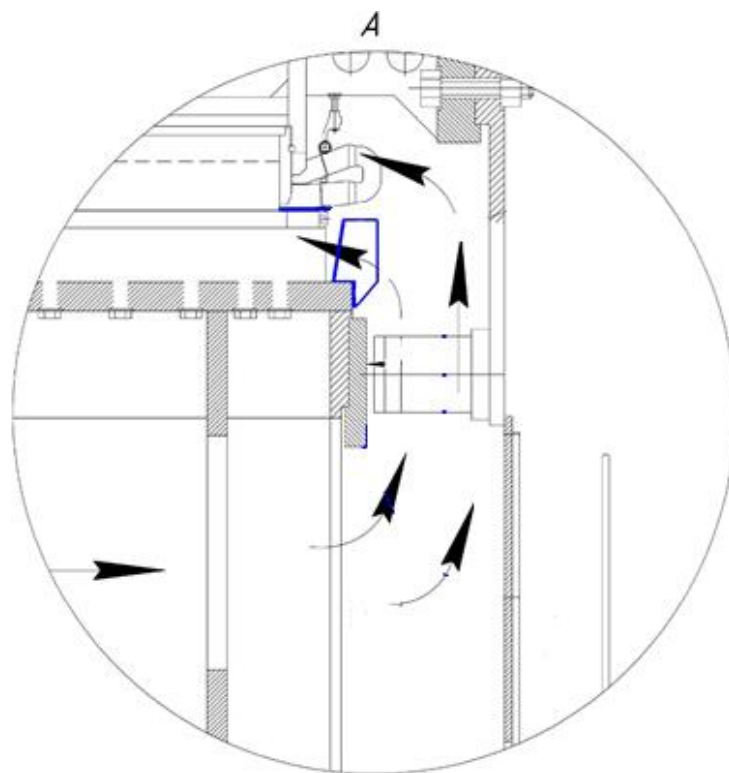


Рисунок 2.13 – Загальний вид системи вентиляції з допоміжний відцентровим вентилятором (Вид А)

Розрахункові характеристики відцентрового вентилятора наведено на рисунку 2.14.

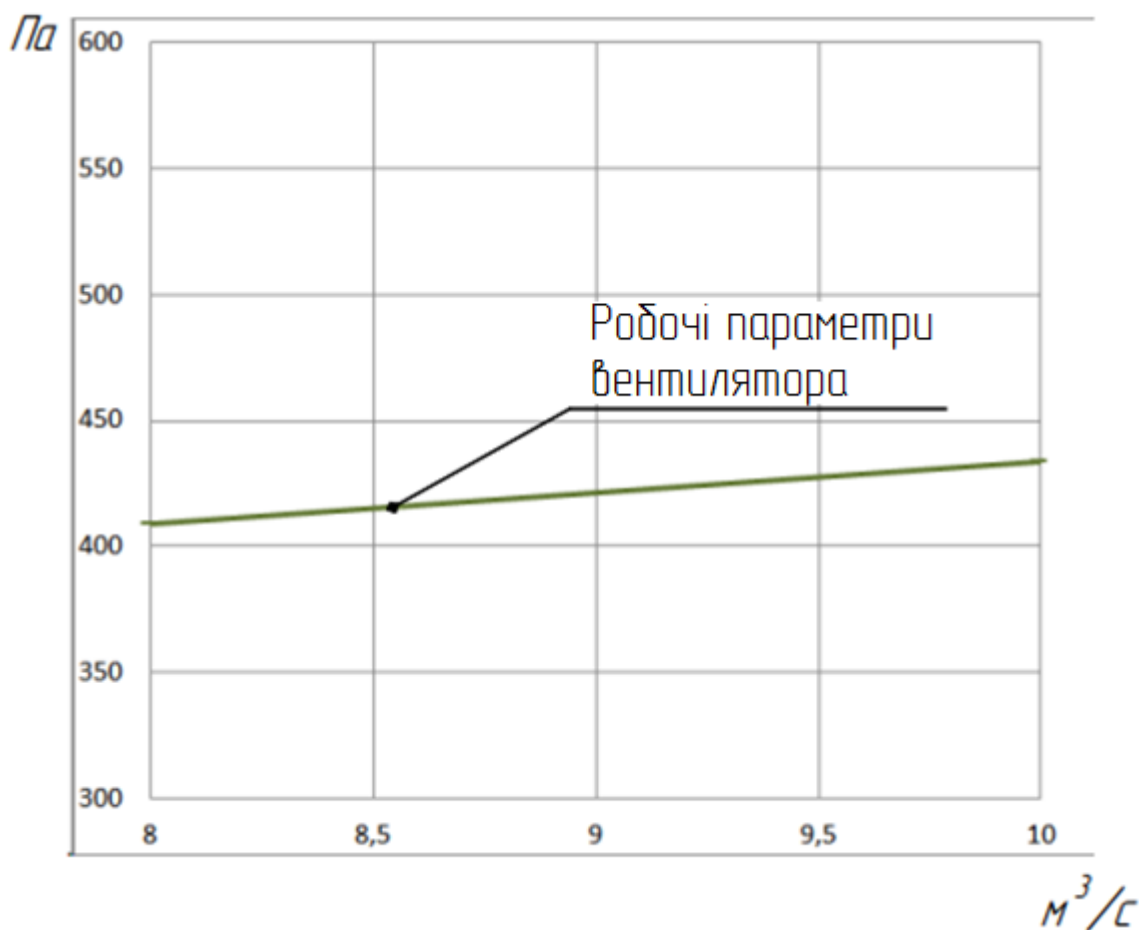


Рисунок 2.14 – Розрахункові характеристики відцентрового вентилятора

Розрахунок вентиляції капсульного гідрогенератора СГКЗ 538/160-70 з відцентровим вентилятором виконано у програмному комплексі *SolidWorks Flow Simulation*.

Результати розрахунку представлено на рисунку 2.15 у вигляді епюри швидкостей гідрогенератора СГКЗ 538/160-70 (косий перетин відносно вентиляційного каналу статора). Крім того на рисунку 2.16 показано ту ж саму епюру швидкостей у меридіональному перетині гідрогенератора СГКЗ 538/160-70, а на рисунках 2.17 та 2.18 наведені епюри швидкостей для двох перерізів А та Б у вигляді косоного перетину відносно міжполюсного каналу ротора.

На рисунку 2.19 представлено напірну характеристику гідрогенератора СГКЗ 538/160-70 у середовищі *SolidWorks Flow Simulation*, а на рисунку 2.20 – цю ж характеристику за схемою заміщення.

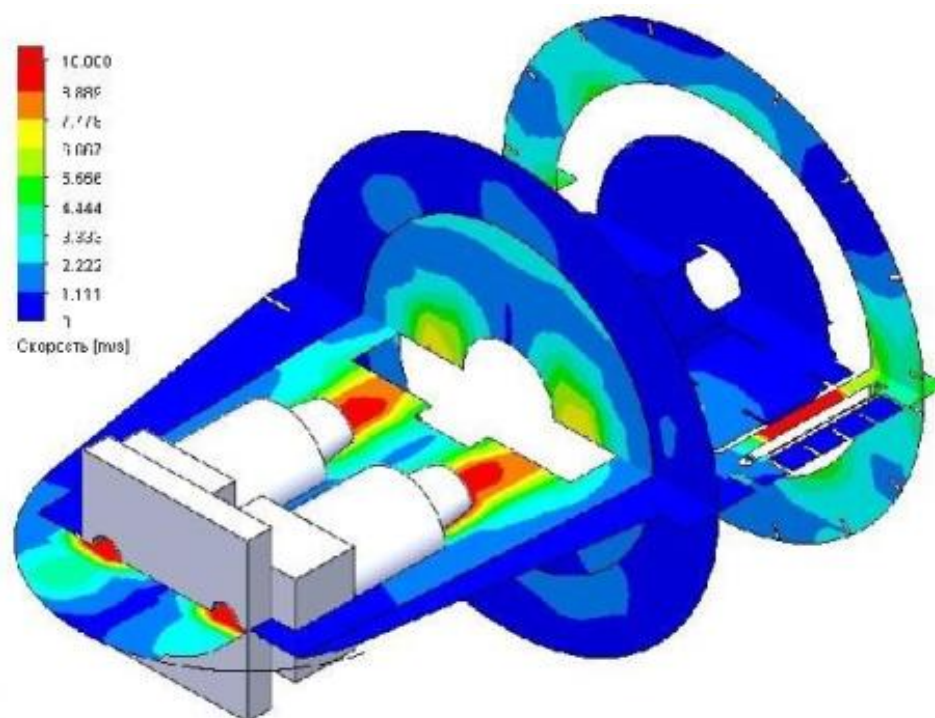


Рисунок 2.15 – Епюра швидкостей гідрогенератора СГКЗ 538/160-70
(косий перетин відносно вентиляційного каналу статора)

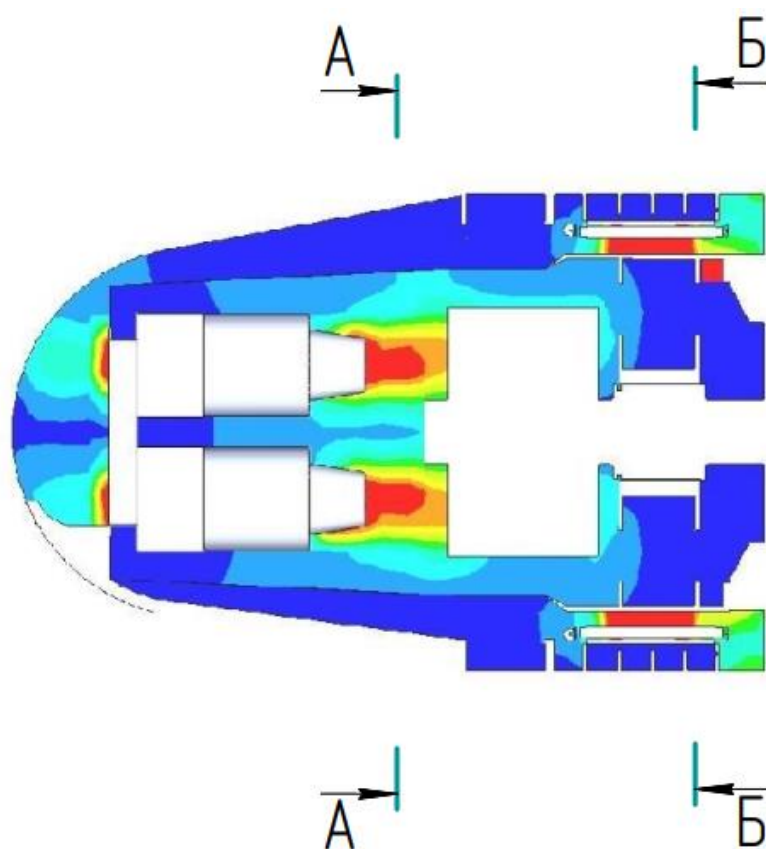


Рисунок 2.16 – Епюра швидкостей у меридіональному перетині
гідрогенератора СГКЗ 538/160-70



Рисунок 2.17 – Епюра швидкостей гідрогенератора СГКЗ 538/160-70 (косий перетин відносно міжполюсного каналу ротора (перетин А-А))

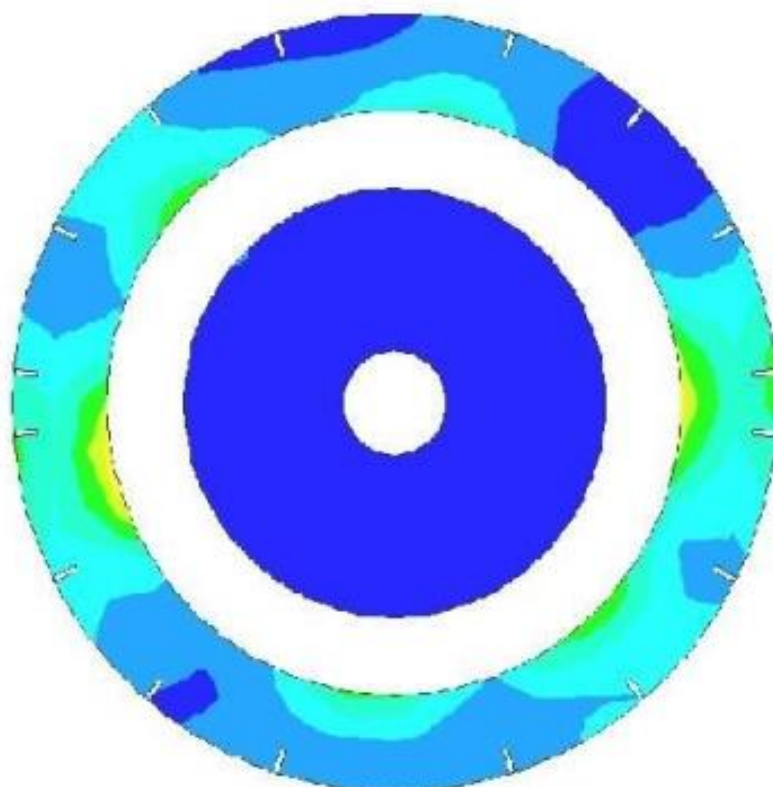


Рисунок 2.18 – Епюра швидкостей гідрогенератора СГКЗ 538/160-70 (косий перетин відносно міжполюсного каналу ротора (перетин Б-Б))

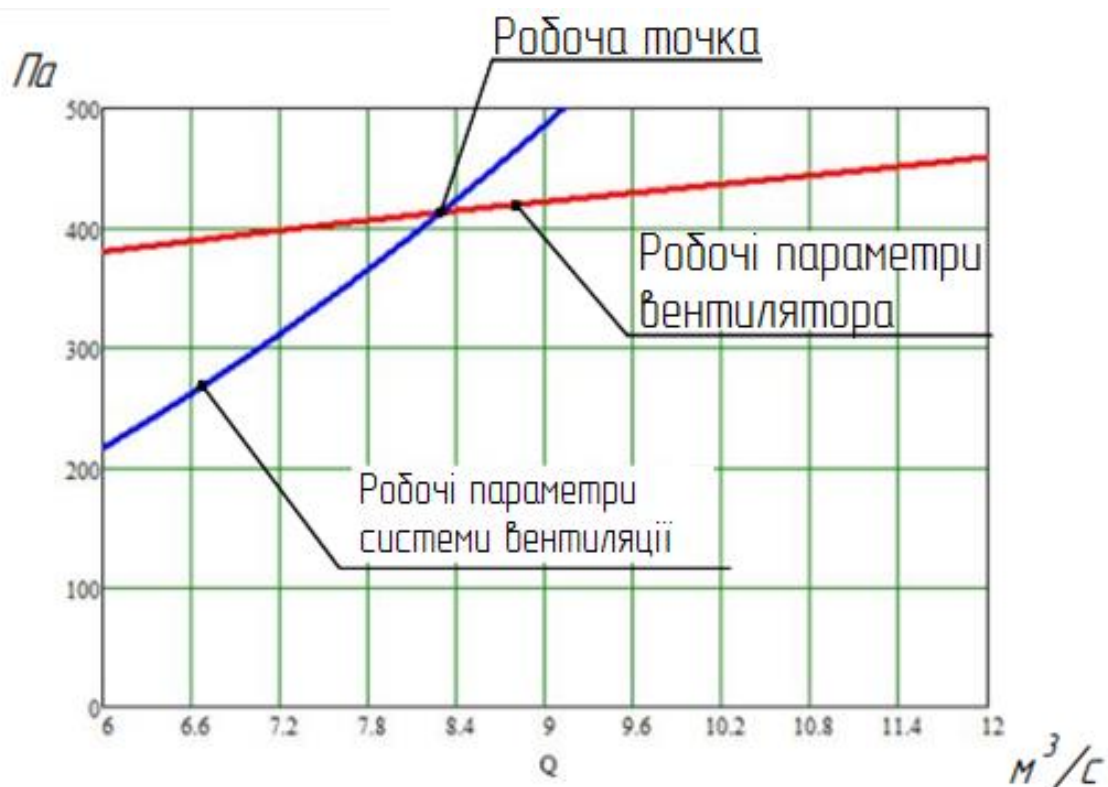


Рисунок 2.19 – Напірна характеристика гідрогенератора СГКЗ 538/160-70 (в середовищі *SolidWorks Flow Simulation*)

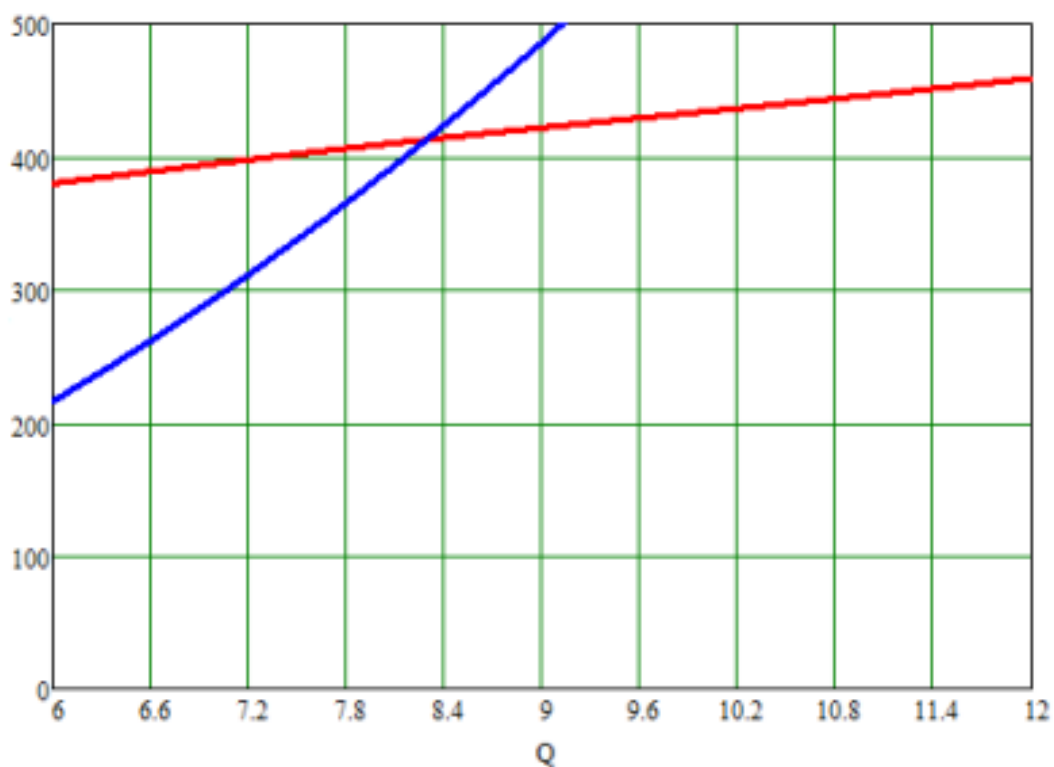


Рисунок 2.20 – Напірна характеристика гідрогенератора СГКЗ 538/160-70 (за схемою заміщення)

2.7 Верифікація розрахунку за допомогою методу розгорнутих еквівалентних схем (метод схем заміщення)

Для оцінки якості отриманих результатів шляхом моделювання у середовищі *SolidWorks Flow Simulation* було виконано перевірочний розрахунок методом схем заміщення.

Метод розгорнутих еквівалентних схем заміщення (ЕСЗ), заснований на представленні електричної машини у вигляді системи однорідних тіл. Зв'язки між ними визначаються відповідними процесами теплообміну. Згідно методу ЕСЗ модель умовно розбивають на тіла простої геометричної форми, в межах яких температура, теплофізичні властивості (щільність, теплопровідність, теплоємність), тепловиділення, умови охолодження залишаються постійними.

На рисунку 2.21 наведено теоретичну схему течії повітря всередині гідрогенератора СГКЗ 538/160-70, а на рисунку 2.22 представлено схему заміщення, за якою виконувався перевірочний розрахунок.

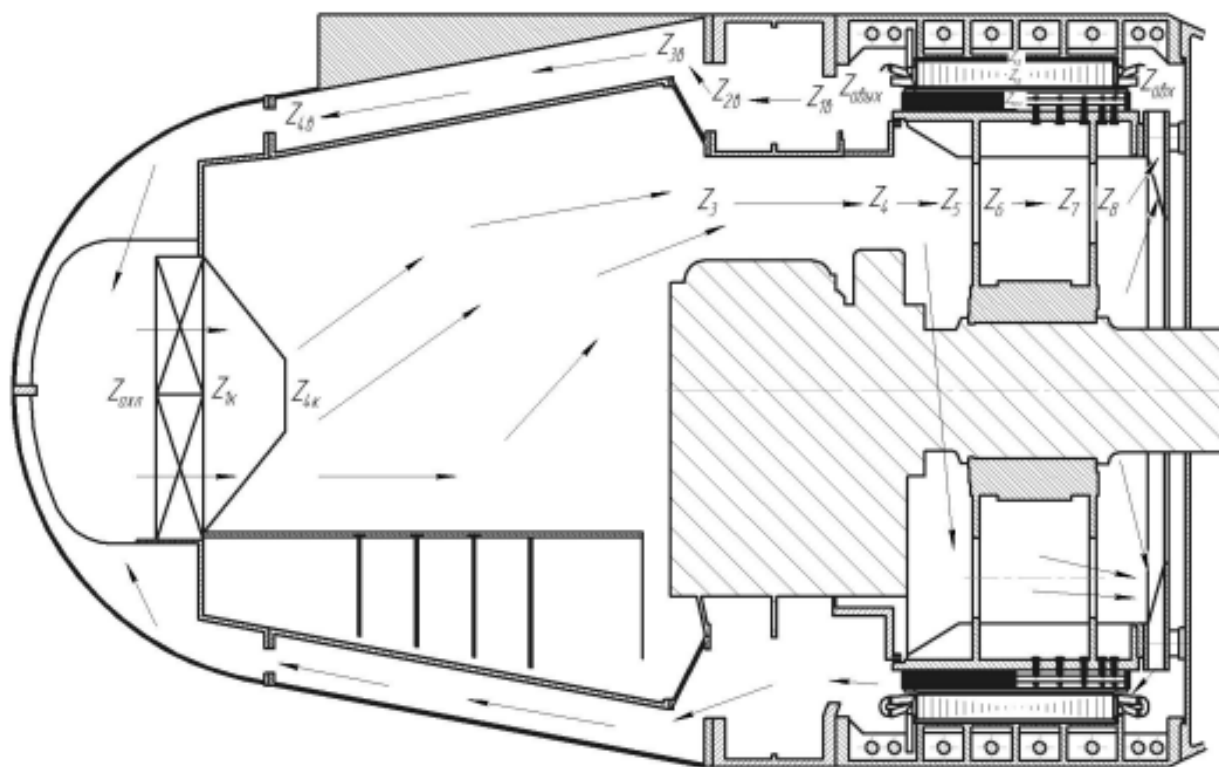


Рисунок 2.21 – Схема течії повітря у гідрогенераторі СГКЗ 538/160-70 з працюючим відцентровим вентилятором

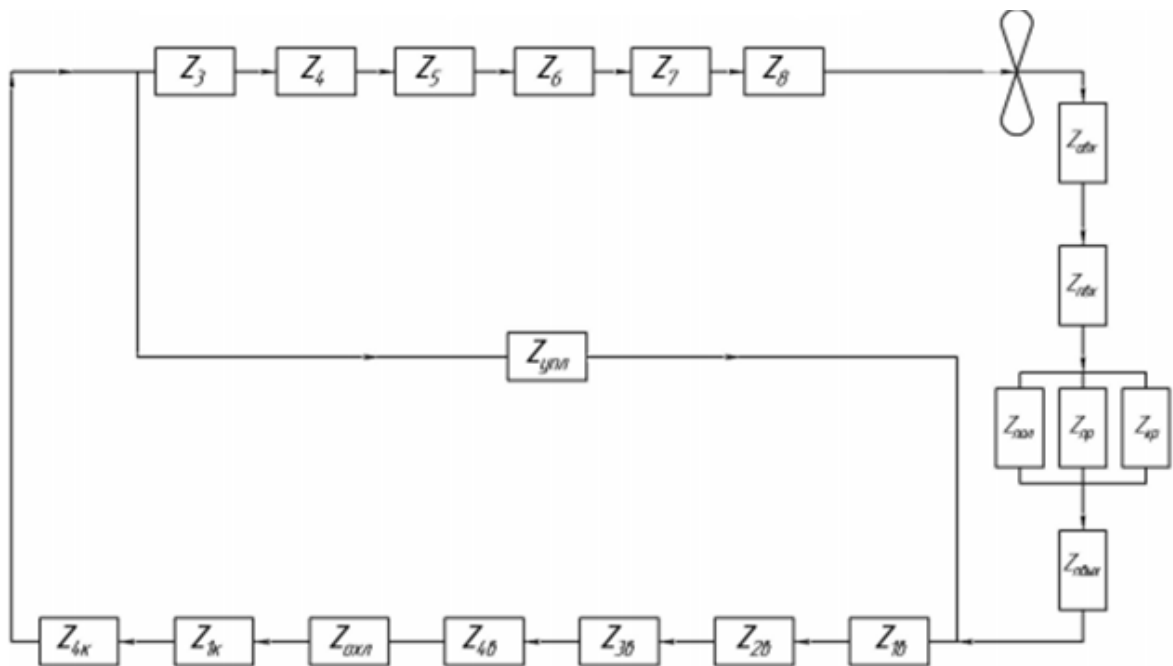


Рисунок 2.22 – Схема заміщення гідрогенератора SGK3 538/160-70 з відцентровим вентилятором

Для верифікаційного розрахунку за методом розгорнутих еквівалентних схем [8] заміщення потрібні значення швидкостей та витрат повітря у аксіальних каналах гідрогенератора, що були отримані експериментальним шляхом та наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Швидкості та витрати у аксіальних каналах гідрогенератора

| Назва повітряного каналу | Витрата повітря, м ³ /с | Швидкість повітря, м/с |
|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| Міжполюсний простір | 3,9 | 8,8 |
| Аксіальні канали у зубцях статору | 3,4 | 9,1 |
| Аксіальні канали у спинці статору | 0,7 | 8,9 |

Проведений вентиляційний розрахунок у середовищі *SolidWorks Flow Simulation* показав, що застосований відцентровий вентилятор забезпечує витрату повітря на рівні 8 м³/с. Після верифікації цього розрахунку розбіжність у значеннях швидкостей та витрат повітря склала не більше 1,5%.

2.8 Розрахунок ефективності повітрообміну всередині гідрогенератору

Розрахунок ефективності повітрообміну всередині гідрогенератору виконано на підставі результатів вентиляційного розрахунку та даних про витрати у гідрогенераторі за номінального навантаження у 22000 кВт. Розрахунок проведено згідно галузевої методики ОАА.682.005-69 [10].

У таблиці 2.3 наведено складові витрат гідрогенератору, а у таблиці 2.4 – температуру холодного повітря та активних частин гідрогенератору при номінальному навантаженні 22000 кВт та витраті повітря 8 м³/с.

Таблиця 2.3 – Складові витрат гідрогенератору при номінальному навантаженні 22000 кВт та витраті повітря 8 м³/с

| Найменування | Позначення | Значення | Розмірність |
|--|------------|----------|-------------|
| Витрати у спинці статору | P_a | 47 | кВт |
| Витрати у зубцях статору | P_z | 47 | кВт |
| Витрати у зубцях статору від 3-ї гармоніки | P_t | 53 | кВт |
| Витрати у торцях статору | P_T | 6 | кВт |
| Витрати у міді статору | P_m | 225* | кВт |
| Витрати на поверхні полюсу від зубчастості статору | P_{p0} | 9 | кВт |
| Витрати у міді ротору | P_e | 272 | кВт |
| Додаткові витрати на поверхні полюсу та в демпферній обмотці | P_{pz} | 8 | кВт |

*Вказані загальні витрати в обмотці статору. З них 64 кВт виділяється у лобовій частині та 161 кВт у пазовій.

Таблиця 2.4 – Температура холодного повітря та активних частин гідрогенератору при навантаженні 22000 кВт та витраті повітря 8 м³/с

| Найменування | Температура | Розмірність |
|---|-------------|-------------|
| Холодне повітря на вході у аксіальні канали | 48 | °C |
| Мідь статору | 181 | °C |
| Сталь статору | 161 | °C |
| Мідь ротору | 219 | °C |

Відповідно ІЕС 60034-1 допускаються наступні температури:

- сердечник та обмотка статору ≤ 140 °С;
- обмотка ротору ≤ 145 °С.

Час виходу на гранично допустимі значення температур активних частин – 5 хвилин.

У таблиці 2.5 наведено складові витрат гідрогенератору с, а у таблиці 2.6 – температуру холодного повітря та активних частин гідрогенератору при номінальному навантаженні 12700 кВт та витраті повітря 8 м³/с.

Таблиця 2.5 – Складові витрат гідрогенератору при номінальному навантаженні 12700 кВт та витраті повітря 8 м³/с.

| Найменування | Позначення | Значення | Розмірність |
|--|------------|----------|-------------|
| Витрати у спинці статору | P_a | 47 | кВт |
| Витрати у зубцях статору | P_z | 47 | кВт |
| Витрати у зубцях статору від 3-ї гармоніки | P_t | 27 | кВт |
| Витрати у торцях статору | P_T | 6 | кВт |
| Витрати у міді статору | P_m | 75* | кВт |
| Витрати на поверхні полюсу від зубчастості статору | P_{p0} | 9 | кВт |
| Витрати у міді ротору | P_e | 137 | кВт |
| Додаткові витрати на поверхні полюсу та в демпферній обмотці | P_{pz} | 3 | кВт |

*Вказані загальні витрати в обмотці статору. З них 21 кВт виділяється у лобовій частині та 54 кВт у пазовій.

Таблиця 2.6 – Температура холодного повітря та активних частин гідрогенератору при навантаженні 12700 кВт та витраті повітря 8 м³/с

| Найменування | Температура | Розмірність |
|---|-------------|-------------|
| Холодне повітря на вході у аксіальні канали | 48 | °С |
| Мідь статору | 151 | °С |
| Сталь статору | 108 | °С |
| Мідь ротору | 137 | °С |

Відповідно ІЕС 60034-1 [11] допускаються наступні температури

- сердечник та обмотка статору ≤ 140 °С;
- обмотка ротору ≤ 145 °С.

Час виходу на гранично допустимі значення температур активних частин – 30 хвилин.

Проведені розрахунки спроектованого відцентрового вентилятора показали, що максимально допустима витрата повітря, що створюється відцентровим вентилятором у аксіальній системі вентиляції гідрогенератора СГКЗ 538/150-70, складає $8 \text{ м}^3/\text{с}$.

Режим роботи гідрогенератору з номінальним навантаженням та відключеними осьовими вентиляторами MFLD 900 (напір створюється відцентровим вентилятором на валу гідрогенератору) не задовольняє вимогам, що повинні забезпечуватися на сучасних гідрогенераторах (робота протягом 30 хвилин з відключеними вентиляторами). Температури активних частин гідрогенератору з номінальним навантаженням перевищують граничнодопустимі значення для класу ізоляції F.

При відключенні усіх вентиляторів робота гідрогенератору забезпечується при максимальній температурі охолоджуючої води на вході в повітроохолоджувачі $30 \text{ }^\circ\text{C}$, з температурами активних частин, що не перевищують граничнодопустимих значень для класу ізоляції F за ГОСТ 5616-89:

- до 5-ти хвилин з номінальними параметрами;
- до 30 хвилин з навантаженням до 12,7 МВт.

Виходячи з результатів розрахунків можна зробити висновки, що наявна система вентиляції, яка складається з двох осьових вентиляторів та спроектованого відцентрового, не забезпечує належного рівня охолодження та циркуляції повітря, а отже необхідно проводити подальшу модернізацію системи вентиляції гідрогенератора СГКЗ 538/150-70, зокрема відцентрового вентилятора.

2.9 Висновки по розділу

У даному розділі розглянуто конструктивні особливості систем охолодження капсульних гідрогенераторів різних схем. Рішення, що було запропоновано для забезпечення ефективної циркуляції та напору охолоджуючого повітря в робочій порожнині та підвищення енергоефективності капсульних гідрогенераторів Канівської ГЕС, полягало в проектуванні допоміжного відцентрового вентилятору, що встановлюється на вал та матиме привод від ротору гідрогенератора.

Встановлення цього вентилятора забезпечує ефективний розподіл охолоджуючого повітря, що надходить від двох електричних осьових вентиляторів, встановлених в передній частині гідрогенератора.

Для побудування тривимірної моделі вентилятора та її подальшого дослідження було проведено аналітичний розрахунок, в результаті якого було

отримано геометричні параметри та параметри потоку в міжлопаткових каналах вентилятору.

За допомогою програмного комплексу *SolidWorks* проведено розробку 3D моделей складових частин вентилятора, а також їх остаточне складання.

Проведено розрахункове дослідження системи охолодження капсульного гідрогенератора СГКЗ 538/160-70 з відцентровим вентилятором у програмному комплексі *SolidWorks Flow Simulation* та отримано результати у вигляді розподілу швидкостей. Для оцінки якості отриманих результатів виконано перевірочний розрахунок методом схем заміщення. Розбіжність у значеннях швидкостей та витрат повітря склала не більше 1,5%.

Також проведено розрахунок ефективності повітрообміну всередині гідрогенератору. Максимально допустима витрата повітря, що створюється відцентровим вентилятором, дорівнює $8 \text{ м}^3/\text{с}$.

Наявна система вентиляції, яка складається з двох осьових вентиляторів та спроектованого відцентрового, не забезпечує належного рівня охолодження та циркуляції повітря, а отже необхідно проводити подальшу модернізацію системи вентиляції гідрогенератора СГКЗ 538/150-70, зокрема відцентрового вентилятора.

3 ДРУГИЙ ЕТАП МОДЕРНИЗАЦІЇ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ГІДРОГЕНЕРАТОРУ

3.1 Опис конструкції модифікованого відцентрового вентилятора та системи вентиляції

У зв'язку з тим, що базова конструкція відцентрового вентилятора не забезпечує необхідного рівня циркуляції повітря та охолодження запропоновано провести подальшу модернізацію системи вентиляції гідрогенератора шляхом зміни конструкції відцентрового вентилятора.

Модифікація відцентрового вентилятора полягає в додаванні другого контуру. Базова конструкція була одноконтурною, тобто вона забезпечувала вентиляцію повітря як на роторну частину генератора, так і на статорну. В зв'язку з цим, забезпечення належного рівня охолодження та вентиляції не підтримувалося – різниця температур у статорній та роторній частинах генератора та значна відмінність геометричних параметрів вентиляційних каналів цьому сприяли. В модифікованій версії вентилятора додається ще один ступінь – таким чином кожна з частин відцентрового вентилятора починає працювати на свій контур. Перший ступінь (базовий) сприяє належному рівню вентиляції у роторній частині генератора, а другий ступінь (той, що додається в ході модернізації) працює на статорну частину.

Також для ефективного розподілу повітря між статорною та роторною частинами гідрогенератору СГКЗ 538/160-70 необхідно додати перегородку, яка буде розділяти повітря, що виходить з відцентрового вентилятора, та направляти його у необхідні зони гідрогенератору.

Для того, щоб з'ясувати наскільки ефективним є дане рішення, спочатку побудовано тривимірну модель модифікованого відцентрового вентилятора, а потім було проведено вентиляційний розрахунок у програмному комплексі *SolidWorks Flow Simulation*.

3.2 Побудова тривимірної моделі модифікованого вентилятора

Основою для модифікації вентилятора є базова конструкція. До неї додається ще один ряд лопаток та кільце. Таким чином модифікований відцентровий вентилятор складається з двох ступенів, кожен з яких працює на свій контур.

3.2.1 Кільце опорне

В конструкції вентилятора опорне кільце є елементом, що утворює канал. Його несуча частина сприймає поздовжньо-поперечні навантаження, а також дію відцентрових сил. До нього за допомогою робочих лопаток другого ступеня кріпиться робоче кільце вентилятора. Виготовляється з матеріалу сталь 3сп ГОСТ 14637-89.

При побудові були використані такі основні команди:

- ... «Ескіз»;
- ... «Бобишка» - «Витягнути».

Твердотільну модель опорного кільця відцентрового вентилятору наведено на рисунку 3.1.

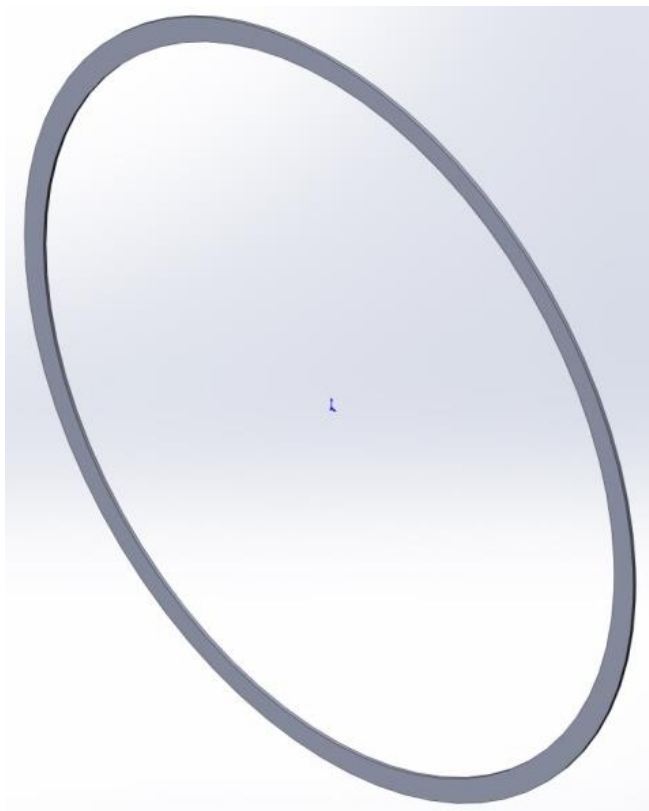


Рисунок 3.1 – Кільце опорне

3.2.2 Робоча лопатка другого ступеня

Робоча лопатка другого ступеня є частиною несучої конструкції вентилятора гідрогенератора та забезпечує належний рівень циркуляції повітря на «статорному» контурі гідрогенератору. Однією своєю основою приварюється до кільця опорного, а другою – до робочого кільця. У конструкції передбачено 27 лопаток, що обумовлено необхідністю як достатньої міцності і жорсткості

конструкції, так і тим, що статорна частина гідрогенератору СГКЗ 538/160-70 на 15 °С холодніша від роторної, тому необхідний рівень витрати повітря менший. Виготовляються робочі лопатки зі сталі 3сп ГОСТ 14637-89.

При побудові були використані такі основні команди:

- ... «Ескіз»;
- ... «Бобишка» - «Витягнути».

Твердотільну модель робочої лопатки другого ступеня відцентрового вентилятора наведено на рис. 3.2.

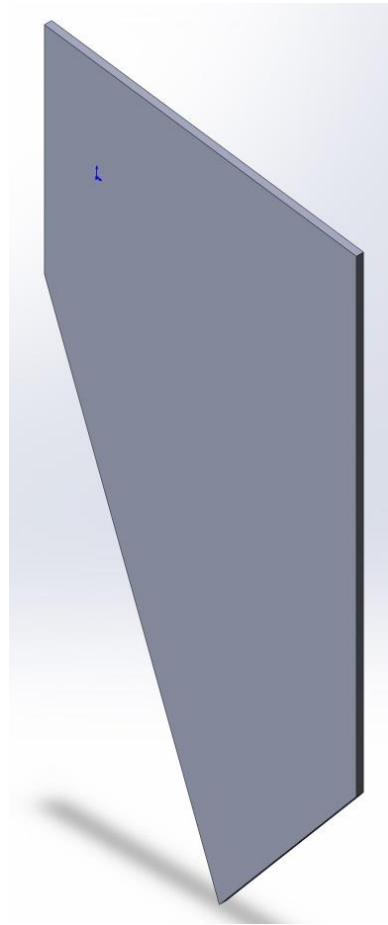


Рисунок 3.2 – Робоча лопатка другого ступеня

3.2.3 Складання відцентрового вентилятора

Складання вентилятора проводилося аналогічно базовій конструкції з використанням тих самих команд та операцій. Результатом стала конструкція, що представлена на рис. 3.3.

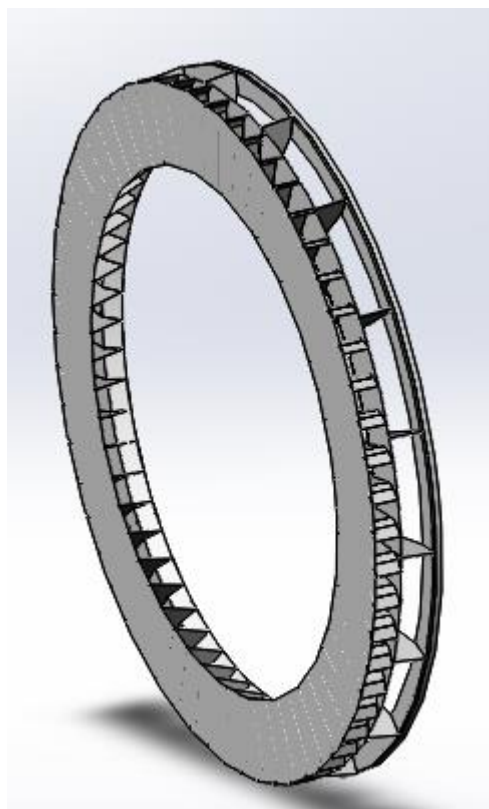


Рисунок 3.3 – Модифікований двоконтурний відцентровий вентилятор

3.3 Розрахункове дослідження системи охолодження

Проведено розрахункове дослідження системи охолодження з примусовою системою вентиляції аксіального типу, що включає в себе основні та допоміжний (відцентровий) вентилятори (модифіковану конструкцію).

Задачею розрахунку є визначення швидкостей течії повітря у каналах капсульного гідрогенератора та температур активних за умови використання двоконтурної аксіальної системи вентиляції в разі відключення двох осьових вентиляторів MFLD 900.

В якості розрахункової геометрії було використано побудовану тривимірну модель гідрогенератора СГКЗ 538/160-70 у програмному комплексі *SolidWorks*. Під час моделювання було враховано геометричні особливості стрижнів обмотки статора та конструкції вентиляційних каналів статора та ротору.

Охолоджуюча середа всередині гідрогенератору – повітря при нормальних атмосферних умовах. Температура охолоджуючої води у охолоджувачі – 30 °С.

Для забезпечення роботи системи охолодження гідрогенератору застосовано два вентилятори. Система охолодження розділена на два контури, охолодження ротору забезпечується осьовим вентилятором, охолодження статора – відцентровим вентилятором. Обоє вентилятори розміщено на роторі

гідрогенератору.

Досліджувана геометрія модифікованого відцентрового вентилятора та системи вентиляції представлено на рисунку 3.4 та 3.5.

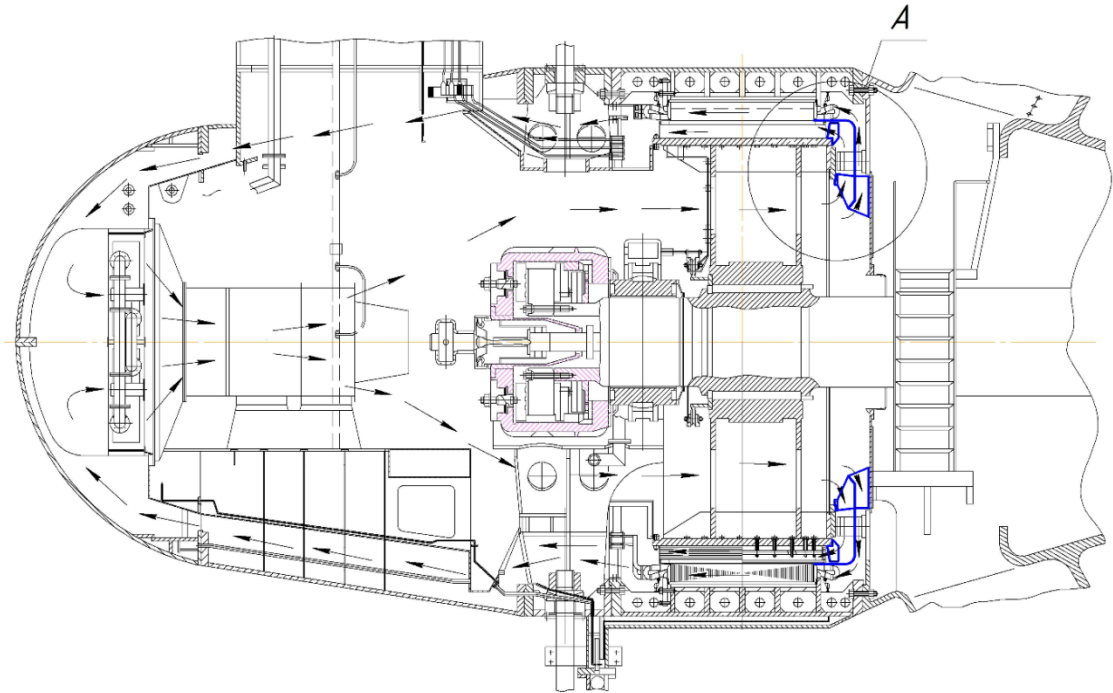


Рисунок 3.4 – Теоретична схема руху повітря при використанні модифікованого допоміжного вентилятора

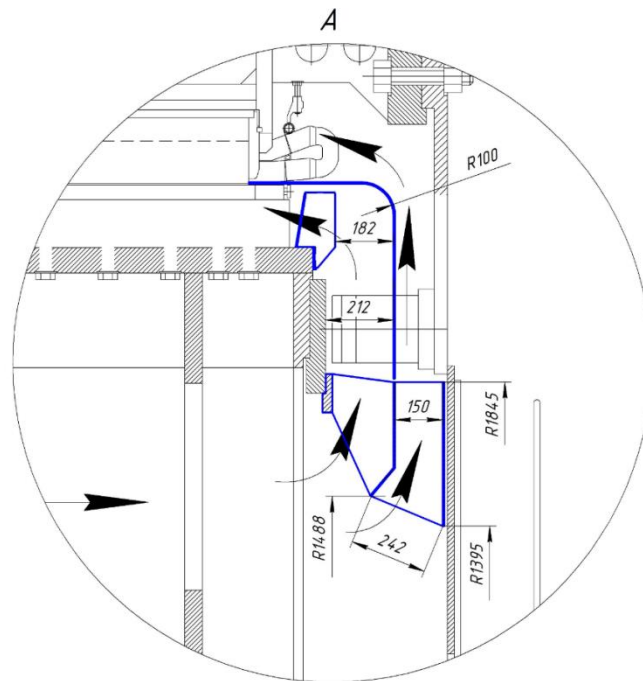


Рисунок 3.5 – Теоретична схема руху повітря при використанні модифікованого допоміжного вентилятора (Вид А)

Розрахунок вентиляції капсульного гідрогенератора SGK3 538/160-70 з модифікованим відцентровим вентилятором виконано у програмному комплексі *SolidWorks Flow Simulation*.

Результати розрахунку представлено на рисунку 3.6 у вигляді епюри швидкостей гідрогенератора SGK3 538/160-70. Крім того на рисунку 3.7 показано епюру швидкостей в області вентиляційних каналів та відцентрового вентилятора.

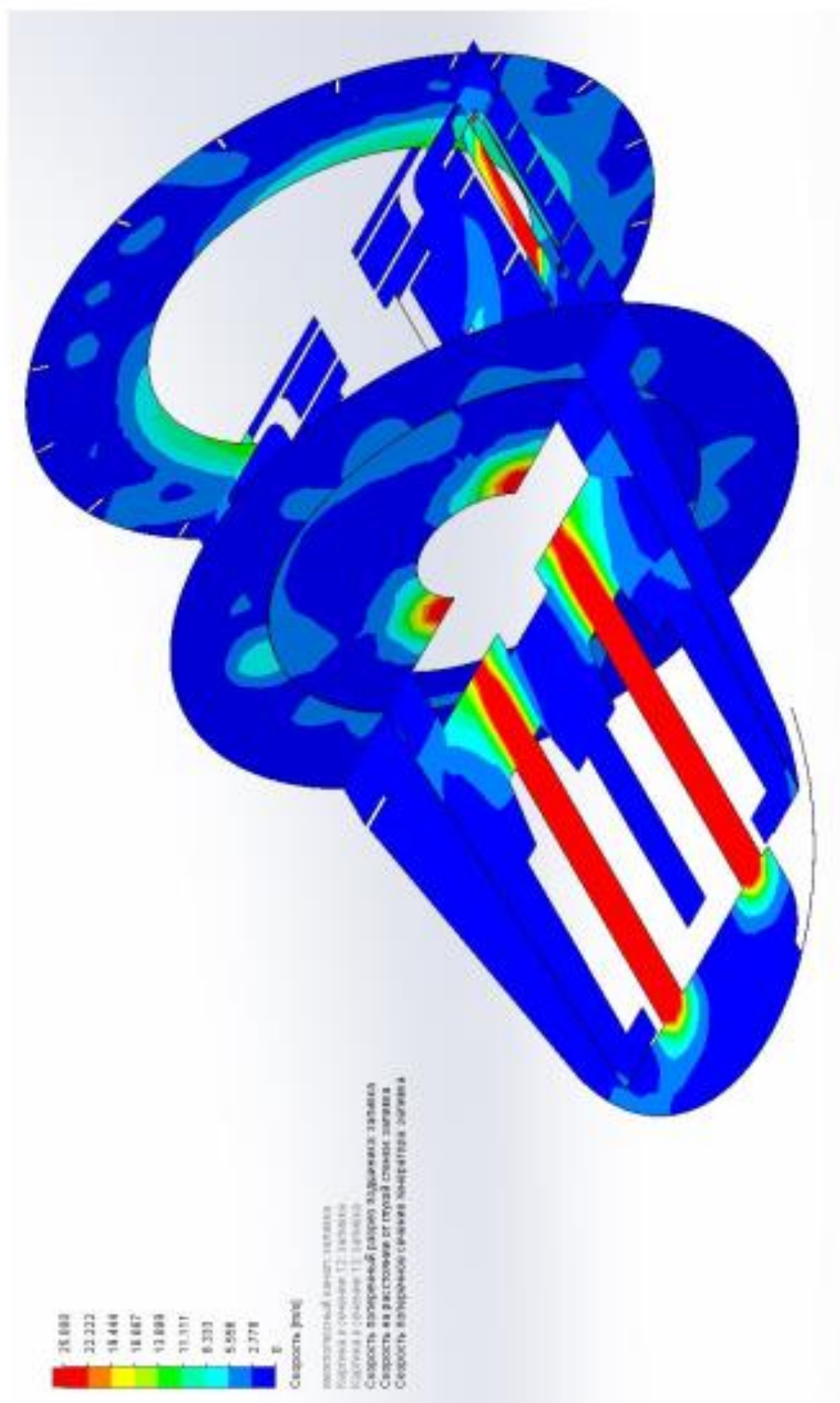


Рисунок 3.6 – Епюра швидкостей

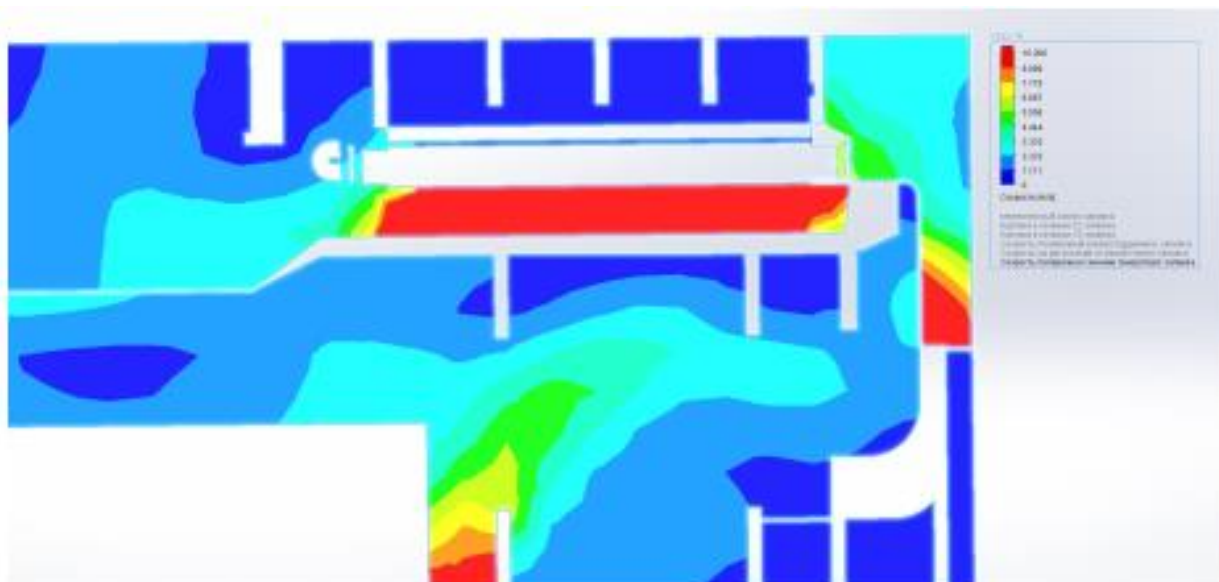


Рисунок 3.7 – Епюра швидкостей в області вентиляційних каналів та відцентрового вентилятора

У таблиці 3.1. наведені швидкості та витрати у аксіальних каналах гідрогенератору, які отримані в процесі розрахунку.

Таблиця 3.1 – Швидкості та витрати у аксіальних каналах гідрогенератору

| Найменування повітряного каналу | Витрата повітря, м ³ /с | Швидкість повітря, м/с |
|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| Міжполюсний простір | 10 | ~25 |
| Аксиальні канали в зубцях статору | 7 | ~15 |
| Аксиальні канали у спинці статору | | |

Максимальна швидкість повітря, згідно з результатами розрахунку, знаходиться у міжполюсному просторі (каналі). Це пов'язано з конструктивними рішеннями для максимального теплозйому з поверхні мідних провідників котушок ротору для забезпечення найвищого коефіцієнта тепловіддачі по поверхні провідників котушок ротору, на яких створено додаткове оребріння.

Необхідна швидкість руху повітря забезпечується завдяки розташуванню додаткового відцентрового вентилятора.

3.4 Розрахунок ефективності повітрообміну всередині гідрогенератору

Розрахунок ефективності повітрообміну всередині гідрогенератору з

модифікованим вентилятором виконано на підставі результатів вентиляційного розрахунку та даних про витрати у гідрогенераторі за номінального навантаження у 22000 кВт. Тепловий розрахунок проведено згідно галузевої методики ОАА.682.005-69 [10].

У таблиці 3.2 наведено теплові витрати гідрогенератору, а у таблиці 3.3 – температуру холодного повітря та активних частин гідрогенератору при номінальному навантаженні 22000 кВт та витраті повітря 17 м³/с.

Таблиця 3.2 – Теплові витрати у активних елементах гідрогенератору при номінальному режимі 22000 кВт.

| Найменування | Позначення | Значення | Розмірність |
|--|------------|----------|-------------|
| Втрати у спинці статору | P_a | 47 | кВт |
| Втрати у зубцях статору | P_z | 47 | кВт |
| Втрати в зубцях статору від 3-й гармоніки | P_t | 50 | кВт |
| Втрати в торцях статору | P_T | 6 | кВт |
| Втрати у міді статору | P_m | 225* | кВт |
| Втрати на поверхні полюсу від зубчастості статору | P_{p0} | 7 | кВт |
| Втрати в міді ротору | P_e | 272 | кВт |
| Додаткові витрати на поверхні полюсу та в демпферній обмотці | P_{pz} | 7 | кВт |
| Вентиляційні витрати | P_V | 12 | кВт |

*Вказані загальні витрати в обмотці статору. З них 64 кВт виділяється у лобовій частині та 161 кВт у пазовій частині.

Таблиця 3.3 – Температура холодного повітря у активних частинах гідрогенератору

| Найменування | Температура |
|---|-------------|
| Холодне повітря на вході в аксіальні канали | 48 °С |
| Мідь статору | 140 °С |
| Сталь статору | 120 °С |
| Мідь ротору | 140 °С |

Проведені розрахунки показали, що максимальна витрата повітря, що створюється двома вентиляторами в аксіальній двоконтурній системі вентиляції гідрогенератору СГКЗ 538/160-70, складає 17 м³/с.

Режим роботи гідрогенератору з номінальним навантаженням та відключеними осьовими вентиляторами задовольняє вимогам до роботи сучасних гідрогенераторів (робота протягом 30 хвилин з відключеними двома вентиляторами).

Розрахункові значення температур активних частин не перевищують граничнодопустимих значень по ГОСТ 5616-89 [12] для класу ізоляції F, при максимальній температурі охолоджуючої води на вході у повітроохолоджувачі 30 °С.

3.5 Розрахунок на міцність модифікованого відцентрового вентилятора

Метою розрахунку є визначення напружень, діючих на зварні з'єднання елементів модифікованого відцентрового вентилятора.

Вихідні дані:

Угонна частота обертання ротора

$n=255$ об/хв;

Матеріал дисків та лопаток

Ст3сп ГОСТ14637-89

В таблиці 3.4 наведено параметри використаної розрахункової сітки для статичного аналізу, вид якої представлено на рис. 3.8.

Таблиця 3.4 – Параметри розрахункової сітки

| Тип сітки | Сітка на твердому тілі |
|-----------------------|------------------------|
| Використане розбиття | Стандартна схема |
| Точки Якобіана | 4 точки |
| Розмір елемента | 14 мм |
| Допуск | 0.7 мм |
| Якість сітки | Висока |
| Всього вузлів | 56033 |
| Всього елементів | 28436 |
| Співвідношення сторін | 1378.6 |

Після проведеного статичного дослідження вентилятора були отримані результати розрахунку у вигляді епюри еквівалентних напружень по Мізесу (рисунок 3.9). Проведено зондування вздовж диску (рисунок 3.10) та побудовано розподіл напружень по довжині диску (рисунок 3.11). Також проведено зондування вздовж робочої лопатки (рисунок 3.12) та побудовано розподіл напружень по лопатці вентилятора (рисунок 3.13).

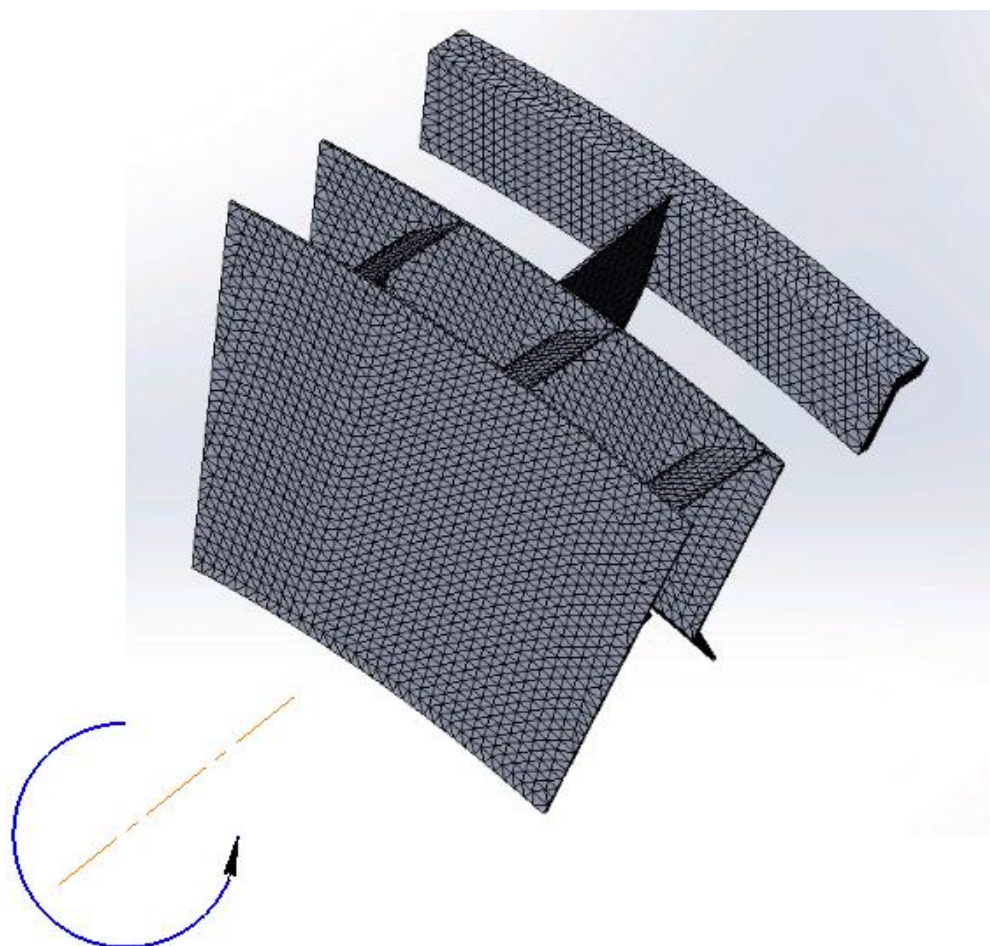


Рисунок 3.8 – Розрахункова сітка для статичного аналізу

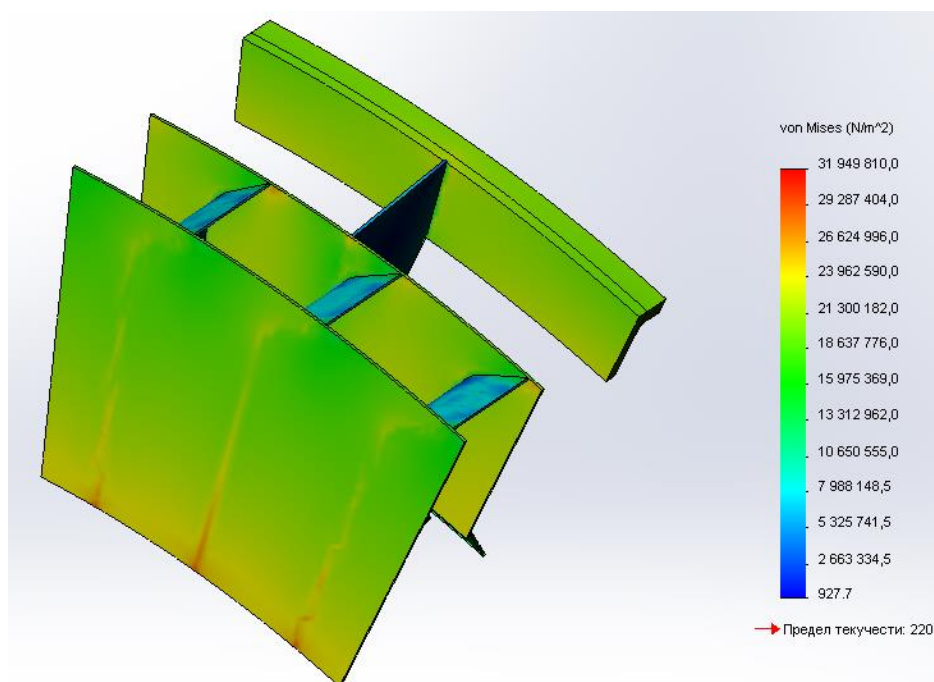


Рисунок 3.9 – Епюра еквівалентних напружень по Мізесу

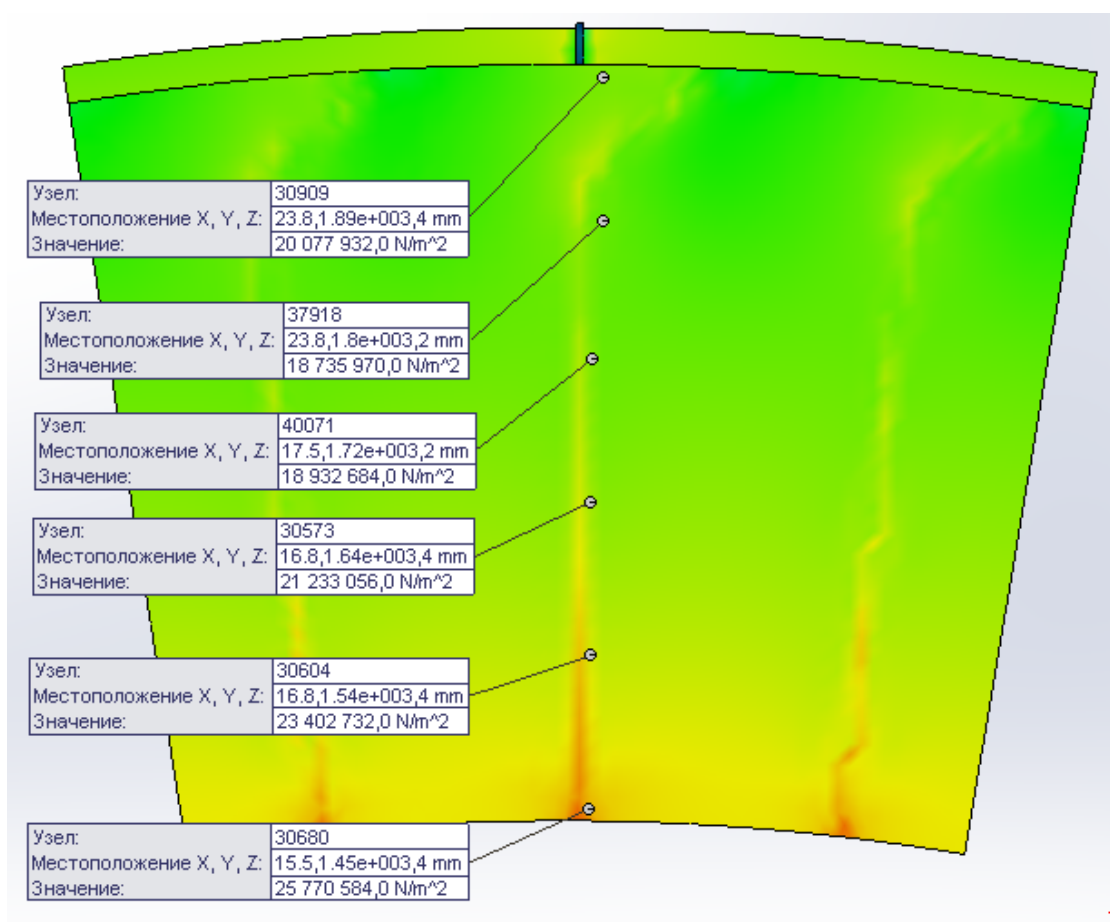


Рисунок 3.10 – Зондування вздовж диску

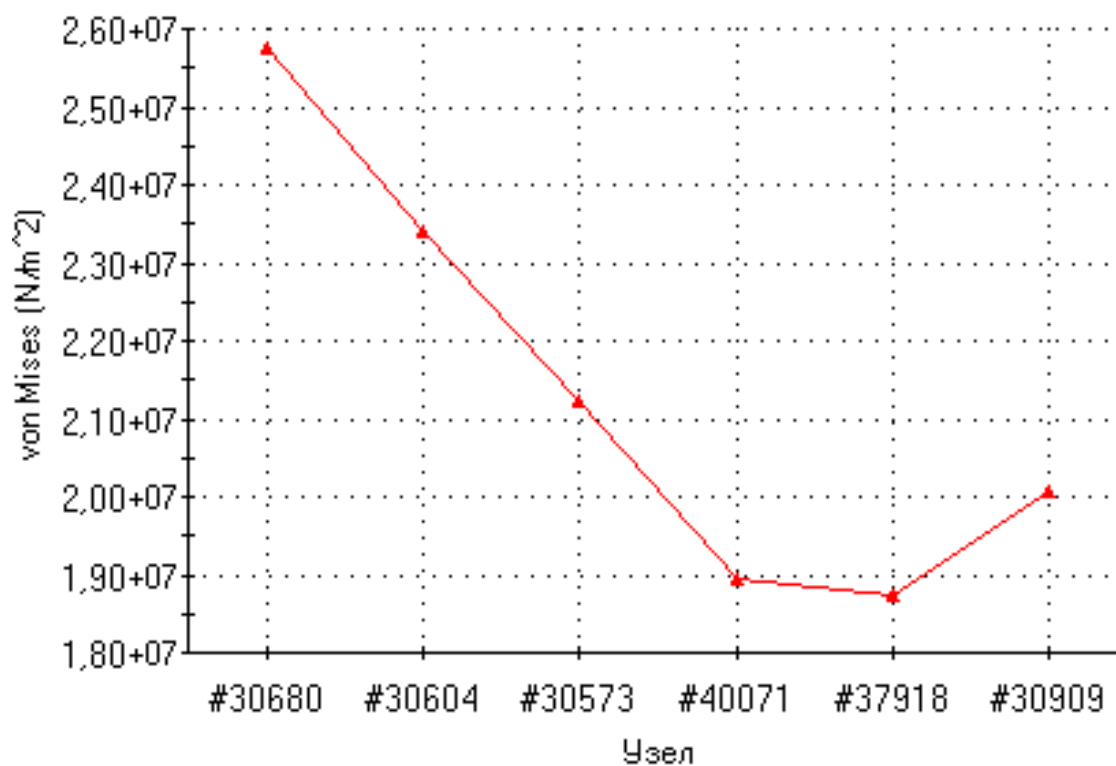


Рисунок 3.11 – Розподіл напружень по довжині диску

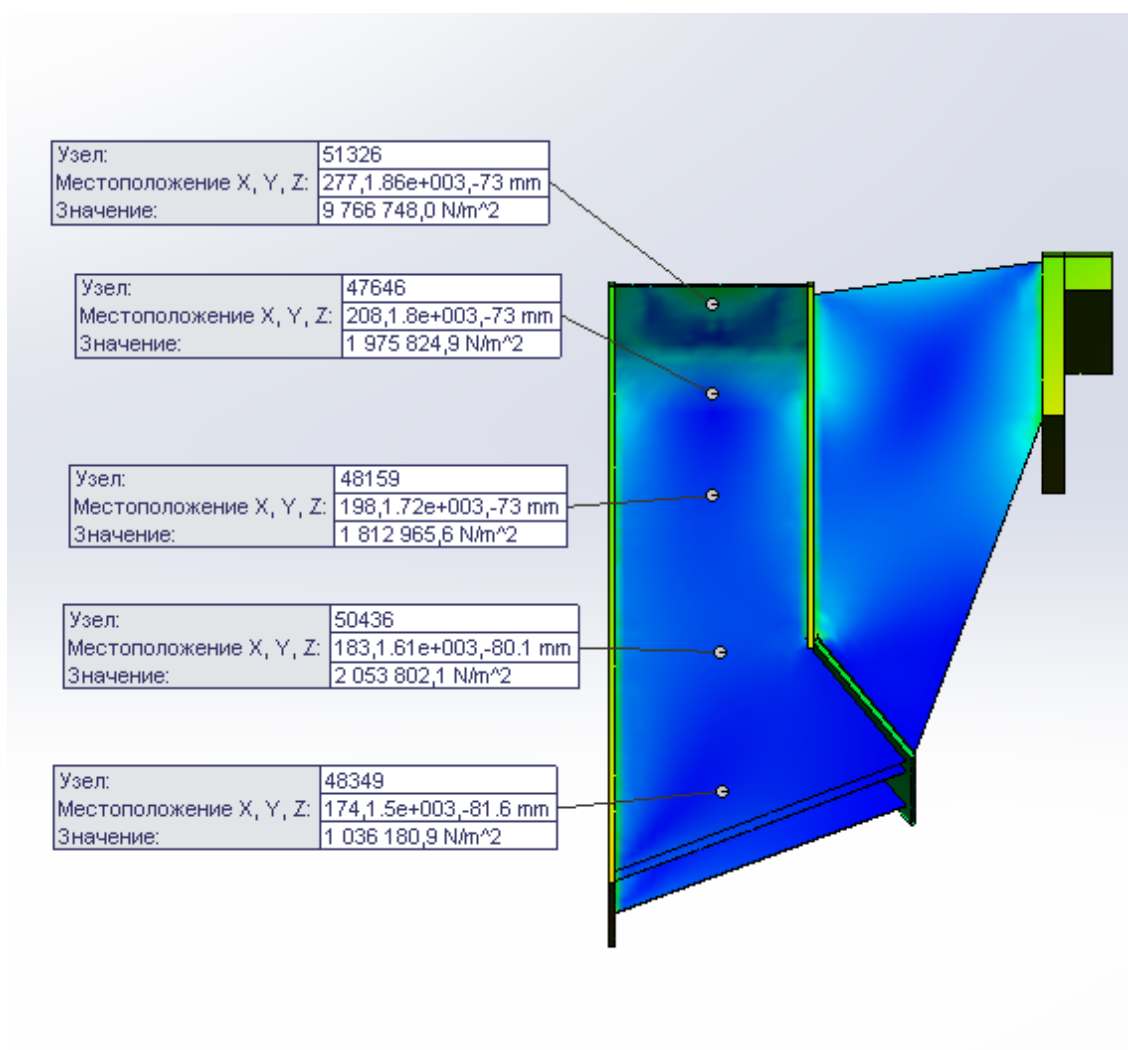


Рисунок 3.12 – Зондування вздовж робочої лопатки

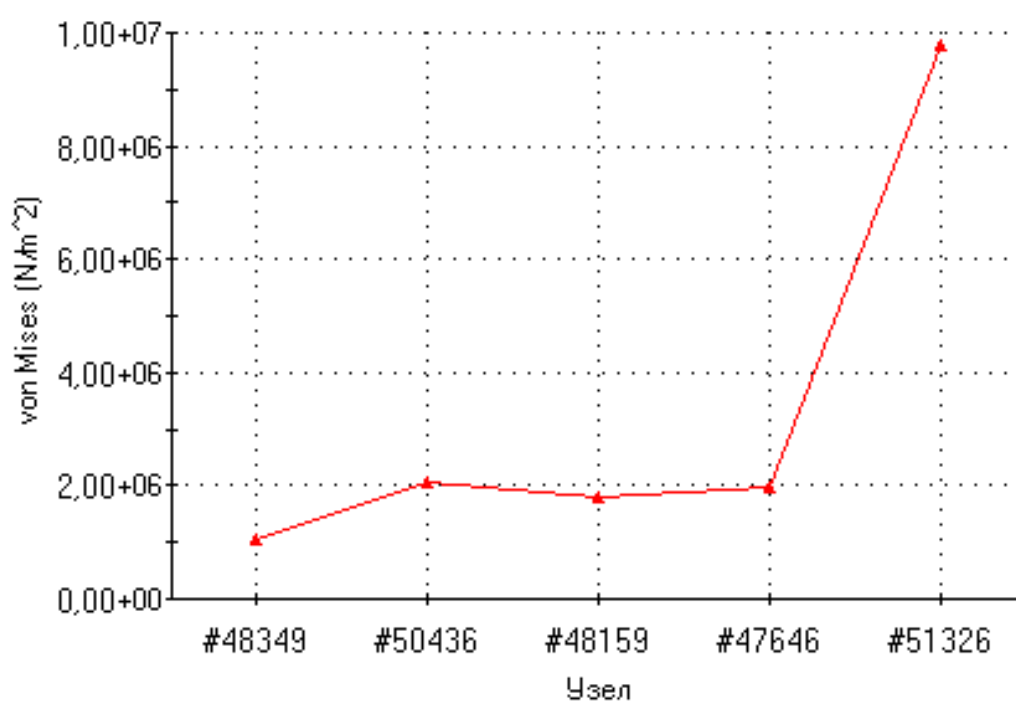


Рисунок 3.13 – Розподіл напружень по лопатці вентилятора

Також результати розрахунку представлено в вигляді епюри переміщень (рисунок 3.14).

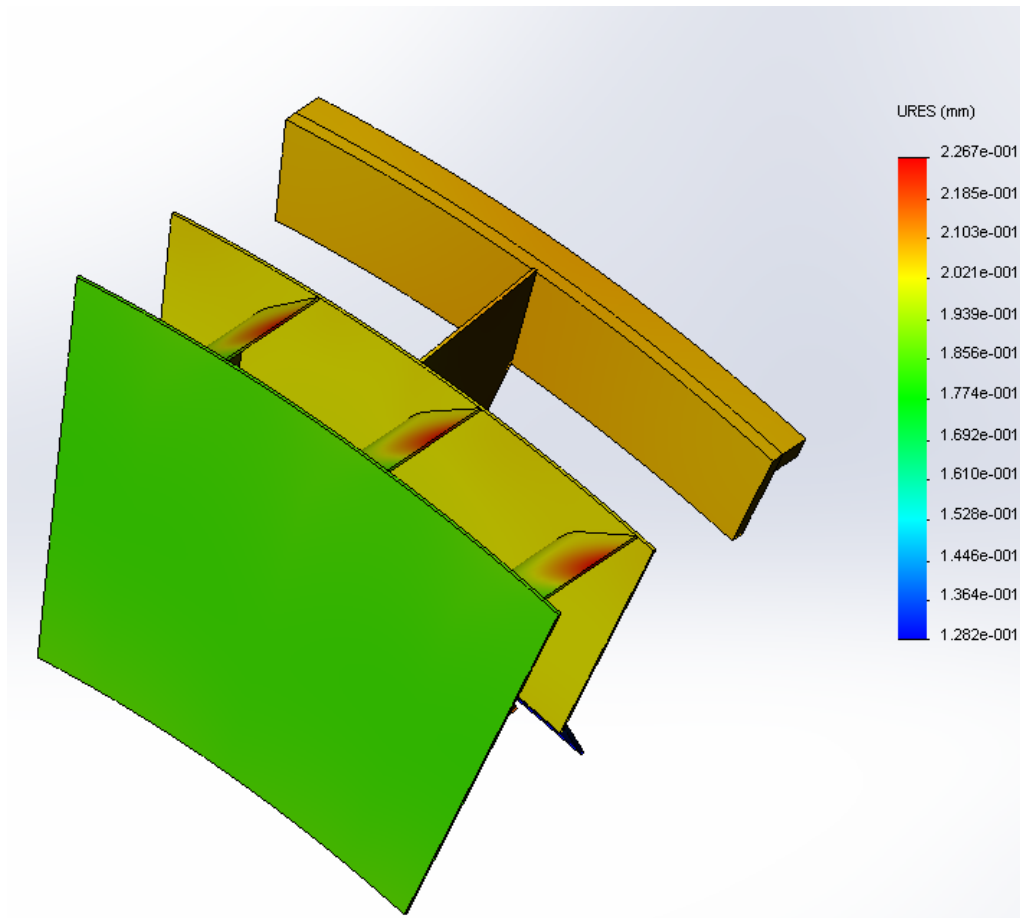


Рисунок 3.14 – Епюра переміщень

Максимальні отримані напруження в вентиляторі складають $\sigma=32$ МПа. Межа плинності для Ст3сп ГОСТ14637-89 становить $\sigma_{0.2}=220$ МПа. Тому коефіцієнт запасу міцності можна розрахувати у вигляді [13]:

$$K = \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma} = \frac{220}{32} = 6.85.$$

Згідно проведеного розрахунку середні напруження становлять 22 МПа, мінімальні 18 МПа. Слід зазначити, що конструкція є рівноміцнісною, а мінімальні переміщення, що складають 0,2 мм не перевищують технологічного зазору при складанні. На рисунку 3.9 червоним кольором зазначені напруження у кореневій частині лопатки. Напруження в вентиляторі допустимі, запас міцності становить $K = 6,9$ за межею текучості.

3.6 Результати модифікації системи охолодження

На основі проведених розрахунків встановлено, що для забезпечення напору і циркуляції охолоджуючого повітря при аксіальній схемі вентиляції, в разі аварійного відключення двох осьових вентиляторів з електроприводом, на роторі встановлюється відцентровий вентилятор, який забезпечує поділ потоків повітря для охолодження ротора і статора (риунок 3.15). Вентилятор складається з 70 елементів, які встановлюються на вході в міжполюсний простір. Відцентровий вентилятор встановлюється на роторі і складається з окремих секторів для можливості демонтажу при обслуговуванні генератора. Вентилятор спроектовано так, що його установка не перешкоджає переміщенню обслуговуючого персоналу із зони турбіни в зону підшипника через ротор.

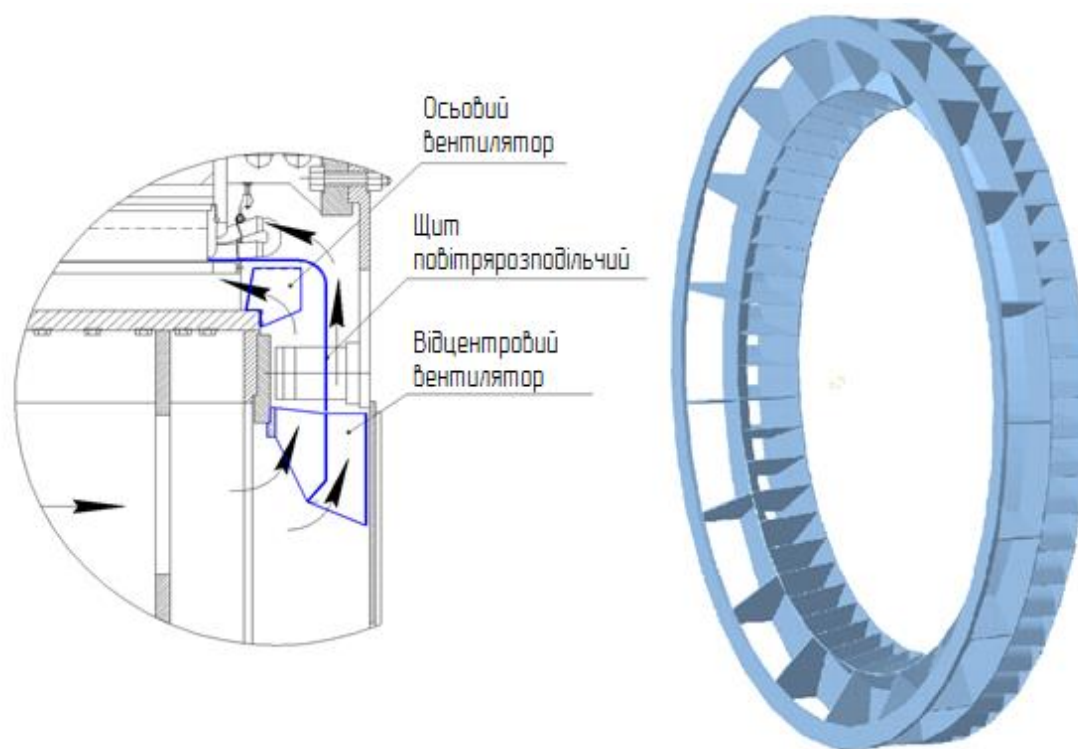


Рисунок 3.15 — Схема та модель відцентрового вентилятора ротора

Завдяки цьому рішення вдалося виконати одну з вимог, що висуваються до роботи сучасних гідрогенераторів – тепер гідрогенератор допускає роботу при відключенні основних охолоджуючих осьових вентиляторів MFLD 900 та охолодженні тільки за рахунок модифікованого відцентрового вентилятора.

Робота гідрогенератора з номінальними параметрами при аварійному відключенні двох електричних вентиляторів продовжується 30 хвилин або до досягнення температури статора і ротора наступних значень (таблиця 3.6) (в

залежності, що настане раніше). В цьому режимі гідрогенератор працює в режимі самовентиляції. Повітряні заслінки вентиляторів відкриті.

В таблиці 3.5 наведено технічні характеристики базового і модернізованого капсульного гідрогенератора Канівської ГЕС

Таблиця 3.5 – Технічні характеристики базового і модернізованого капсульного гідрогенератора Канівської ГЕС

| Найменування параметра | Базовий | Модернізований |
|--|-----------------------------|--------------------|
| Повна потужність, кВ-А | 19900 | 22450 |
| Активна потужність, кВт | 18500 | 22000 |
| Лінійна напруга, В | 3150 | 6300 |
| Фазний струм, А | 3650 | 2057 |
| Коефіцієнт потужності (той, що відстає) | 0,93 | 0,98 |
| Номінальний струм збудження, А | 940 | 912 |
| Напруга на кільцях ротора при номінальному навантаженні і гарячої машини (при температурі обмотки 130 °С), В | 340 | 329 |
| Складові втрат гідрогенератора | | |
| Втрати в сталі сердечника статора, кВт | 185 | 100 |
| Втрати в міді обмотки збудження, кВт | 288 (приведено до 95 °С) | 272 (при 95 °С) |
| Втрати в міді обмотки статора, кВт | 184 (приведено до 95 °С) | 225 (при 95 °С) |
| Вентиляційні втрати, кВт | 12 | 12 |
| Додаткові втрати, кВт | 175 | 64 |
| Сумарні втрати гідрогенератора, що відводяться газоохолоджувачами, кВт | 817 | 673 (-15%) |
| Клас ізоляції обмотки статора і ротора | В (130 °С) | Р (155 °С) |

Таблиця 3.6 – Установки температур статора і ротора на сигналізацію і відключення в аварійному режимі

| Найменування параметра | Значення |
|--------------------------------|----------|
| Температура обмотки статора | 140 °С |
| Температура сердечника статора | 140 °С |
| Температура обмотки ротора | 145 °С |

3.7 Висновок по розділу

У даному розділі запропонована подальша модернізація системи вентиляції гідрогенератора шляхом зміни конструкції відцентрового вентилятора.

Базова конструкція була одноконтурною, тобто вона забезпечувала вентиляцію повітря як на роторну частину генератора, так і на статорну. В модифікованій версії вентилятора додається ще один ступінь – таким чином кожна з частин відцентрового вентилятора починає працювати на свій контур. Перший ступінь (базовий) сприяє належному рівню вентиляції у роторній частині генератора, а другий ступінь (той, що додається в ході модернізації) працює на статорну частину.

Для з'ясування ефективності даного рішення спочатку побудовано тривимірну модель модифікованого відцентрового вентилятора у програмному комплексі *SolidWorks*, а потім проведено вентиляційний розрахунок у програмному комплексі *SolidWorks Flow Simulation*.

Також проведені розрахунок ефективності повітрообміну всередині гідрогенератору та розрахунок на міцність модифікованого відцентрового вентилятора. Напруження в вентиляторі допустимі, середні напруження становлять 22 МПа, мінімальні 18 МПа, запас міцності становить $K=6,9$. Конструкція вентилятору є рівноміцнісною, а мінімальні переміщення, що складають 0,2 мм, не перевищують технологічного зазору при складанні.

Максимально допустима витрата повітря, що створюється модифікованим відцентровим вентилятором, дорівнює $17 \text{ м}^3/\text{с}$. Тепер гідрогенератор допускає роботу при відключенні основних охолоджуючих осьових вентиляторів MFLD 900 та охолодженні тільки за рахунок модифікованого відцентрового вентилятора. Крім того вентилятор спроектовано так, що його установка не перешкоджає переміщенню обслуговуючого персоналу із зони турбіни в зону підшипника через ротор.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Розрахунок собівартості і ціни допоміжного вентилятора системи охолодження

В даному розділі проведено розрахунок собівартості і ціни основних складових частин спроектованого допоміжного відцентрового вентилятора.

Собівартість продукції – це виражені в грошовій формі витрати підприємства на її випуск і реалізацію. Собівартість є одним з найважливіших узагальнюючих показників діяльності підприємства, який відображає ефективність використання трудових, матеріальних і фінансових ресурсів.

В процесі виробництва допоміжного вентилятора використовується багато найменувань інструментів, напівфабрикатів, комплектуючих виробів; застосовується праця різних категорій працюючих. Для планування, обліку і аналізу собівартості ці різноманітні витрати класифікуються в грошовій формі.

Залежно від виробничого призначення витрати поділяються за економічними елементами і статтями калькуляції. При класифікації витрат за економічними елементами в них включаються витрати однорідного призначення: матеріальні витрати, витрати на оплату праці, амортизація та ін. За статтями калькуляції за такою класифікацією виробляється калькуляція собівартості одиниці продукції і складається кошторис витрат на її виробництво.

При розрахунку собівартості продукції здійснюються розрахунки кошторису витрат на виробництво підприємства по калькуляційних статтях витрат виробу, які групуються в такий спосіб:

- 1) основні матеріали покупних комплектуючих виробів і напівфабрикатів;
- 2) зменшення або збільшення витрат;
- 3) основна заробітна плата виробничих робітників;
- 4) додаткова заробітна плата виробничих робітників;
- 5) відрахування на соціальне страхування;
- 6) витрати на утримання та експлуатацію устаткування;
- 7) цехові витрати;
- 8) відшкодування зносу інструментів і пристосувань цехового призначення;
- 9) витрати на освоєння виробництва нових видів виробу;
- 10) загальнозаводські витрати;
- 11) відрахування до фонду зайнятості;
- 12) відрахування на медичне страхування;
- 13) позавиробничі витрати.

Розрахунок проводиться по перерахованим вище статтями калькуляції.

Вартість основних матеріалів, покупних виробів і напівфабрикатів, з яких

виготовлений додатковий вентилятор, наведено в таблиці 4.1. Вихідні дані до розрахунку наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.1 – Розрахунок вартості основних матеріалів додаткового вентилятора

| Вартість основних матеріалів додаткового вентилятора | | | | | |
|--|-----------------------------------|----------|----------|--------------|---------------|
| № | Найменування | Матеріал | Маса, кг | Ціна, грн/кг | Вартість, грн |
| 1 | Листовий метал | Ст3сп | 912 | 40 | 36480 |
| 4 | Кріплення (Болти / гайки / шайби) | Ст3сп | 13 | 120 | 1560 |
| Разом | | | | | 38040 |

Таблиця 4.2 – Вихідні дані

| Вихідні дані | |
|---|----------|
| Найменування | Величина |
| Трудомісткість, годин | 40 |
| Середня ставка робітників, грн/год | 36,3 |
| Середній коефіцієнт кваліфікації робітників | 1,5 |
| Коефіцієнт доплат | 0,25 |
| Норматив соц. відрахувань | 0,22 |
| Коефіцієнт витрати на освоєння вир-ва | 0,05 |
| Коефіцієнт загальноновир-чих витрат | 1,15 |
| Коефіцієнт адмін. витрат | 0,5 |
| Коефіцієнт витрат на збут | 0,03 |
| Коефіцієнт прибутку | 0,18 |
| ПДВ | 0,2 |

Кошторис витрат на виробництво відображає всі витрати підприємства і складається в двох розділах: по експлуатаційним елементам і за калькуляційними статтями витрат. Кошторис витрат по експлуатаційних елементів застосовується для взаємозв'язку бюджету підприємства з бюджетом вищих інстанцій.

У таблиці 4.3. наведено кількість робочих, які зайняті на виробництві допоміжного вентилятора.

Таблиця 4.3 – Кількість робочих

| Кількість робочих | |
|--------------------|---|
| Слюсар-складальник | 4 |
| Зварювальник | 1 |
| Кранівник | 1 |

Основна заробітна плата основних робітників:

$$\text{ОЗП} = T \cdot e \cdot (1 + k/100),$$

де T – трудомісткість. Монтаж і збірка обладнання задіюються 6 робочими з розрахунку 40 нормо-годин на кожного;

e – середня годинна ставка на відрядні або почасові роботи з виготовлення виробу, грн / нормо-год.

$$e = R \cdot K_T,$$

де R – вартість однієї нормо-години, $R = 25$ грн;

K_T – коефіцієнт, що залежить від кваліфікації робітника. $K_T = 1,5$;

k – коефіцієнт, що включає доплати за умови та інтенсивність праці, до 20%.

$$\text{ОЗП} = (40 \cdot 6) \cdot (36,3 \cdot 1,5) \cdot (1 + 20/100) = 13068 \text{ грн.}$$

Додаткова заробітна плата основних робітників:

$$\text{ДЗП} = \text{ОЗП} \cdot (k/100)$$

де k – коефіцієнт, що враховує часові, денні, місячні доплати, приймаємо $k = 25\%$.

$$\text{ДЗП} = 13068 \cdot (25/100) = 3267 \text{ грн.}$$

Відрахування на соціальні заходи:

$$\text{ОСМ} = (\text{ОЗП} + \text{ДЗП}) \cdot H/100,$$

де H – норматив обов'язкових відрахувань на соціальні заходи, $H = 22\%$ (53 клас професійного ризику),

$$\text{ОСМ} = (13068 + 3267) \cdot 22/100 = 3593,7 \text{ грн.}$$

Витрати на підготовку і освоєння випуску продукції, не призначеної для серійного або масового виробництва, витрати, пов'язані з наладкою обладнання:

$$\text{РОП} = (\text{ОМ} + \text{ОЗП}) \cdot 5/100,$$

Визначаються у відсотковому відношенні від суми статей 1 і 3 множенням на 5%.

$$\text{РОП} = (38040 + 13068) \cdot 5/100 = 2555,4 \text{ грн.}$$

Загальновиробничі витрати:

Сюди входять витрати на утримання будівель, споруд та інвентарю загальновиробничого призначення.

Приймаються в процентному відношенні від ОЗП – 115%

$$\text{ОР} = \text{ОЗП} \cdot 115/100$$

$$\text{ОР} = 13068 \cdot 115/100 = 15028,2 \text{ грн}$$

Виробнича собівартість становить суму всіх статей і дорівнює:

$$\text{ПС} = \text{ОМ} + \text{ОЗП} + \text{ДЗП} + \text{ОСМ} + \text{РОП} + \text{ОР},$$

$$\text{ПС} = 38040 + 13068 + 3267 + 3593,7 + 2555,4 + 15028,2 = 75552,3 \text{ грн.}$$

Адміністративні витрати:

Сюди входять витрати на утримання будівель, споруд та інвентарю загальнозаводського призначення:

Приймаються в процентному відношенні від ОЗП - 50%

$$\text{АР} = \text{ОЗП} \cdot 50/100,$$

$$\text{АР} = 13068 \cdot 50/100 = 6534 \text{ грн.}$$

Витрати на збут:

Витрати на збут складають 3% від виробничої собівартості:

$$\text{РС} = \text{ПС} \cdot 3/100$$

$$\text{РС} = 75552,3 \cdot 3/100 = 2266,56 \text{ грн.}$$

Сума всіх статей і буде повною собівартістю виробу. Результати розрахунку занесемо в таблицю 4.4.

Статті калькуляції повної собівартості:

Повна собівартість виробу:

$$\text{ПСИ} = \text{ПС} + \text{АР} + \text{РС}$$

$$\text{ПСИ} = 75552,3 + 6534 + 2266,56 = 84352,86 \text{ грн.}$$

Прибуток від повної собівартості (18%):

$$\text{П} = \text{ПСИ} \cdot 18/100;$$

$$\text{П} = 9975,8 \cdot 18/100 = 15183,51 \text{ грн.}$$

Оптова ціна допоміжного вентилятора:

$$\text{ОЦТ} = \text{П} + \text{ПСИ}$$

$$\text{ОЦТ} = 84352,86 + 15183,51 = 99536,38 \text{ грн.}$$

ПДВ беремо 20% від оптової ціни:

$$\text{НДС} = \text{ОЦТ} \cdot 20/100$$

$$\text{НДС} = 99536,38 \cdot 20/100 = 19907,27 \text{ грн.}$$

Ціна з урахуванням ПДВ:

$$\text{Ц} = \text{НДС} + \text{ОЦТ}$$

$$\text{Ц} = 99536,38 + 19907,27 = 119443,66 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.4 – Таблиця результатів

| Підсумковий результат | | |
|-----------------------|---------------------------------|---------|
| 1 | Матеріали, покупні вироби | 38040 |
| 2 | Основна заробітна плата | 13068 |
| 3 | Додаткова заробітна плата | 3267 |
| 4 | Соціальні відрахування | 3593,7 |
| 5 | Витрати на освоєння виробництва | 2555,4 |
| 6 | Загальновиробничі витрати | 15028,2 |
| 7 | Виробнича собівартість | 75552,3 |
| 8 | Адміністративні витрати | 6534 |

Продовження таблиці 4.4

| | | |
|----|--|-----------|
| 9 | Витрати на збут | 2266,56 |
| 10 | Повна собівартість додаткового вентилятора | 84352,86 |
| 11 | Оптова ціна | 99536,38 |
| 12 | ПДВ | 19907,27 |
| 13 | Ціна додаткового вентилятора | 119443,66 |

Для проведення подальшого економічного аналізу вдалось дізнатися на заводі ДП «ЗАВОД «ЕЛКТРОВАЖМАШ» приблизну ціну всього гідрогенератора (1 900 000 євро при курсі 31.85 грн/євро дорівнює 60 515 000 грн) та точну ціну основних вентиляторів фірми Howden (Франція) (44700 євро/шт при курсі 31.85 грн/євро 1 423 695 грн). Результати розрахунків та отримані дані представлені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Порівняння ціни основних комплектуючих системи охолодження

| Найменування | Ціна, грн |
|---|-----------|
| Додатковий вентилятор | 119444 |
| Основний вентилятор 1 | 1 423 695 |
| Основний вентилятор 2 | 1 423 695 |
| Повна ціна гідрогенератору за виключенням турбінної частини | 60 132339 |

4.2 Висновок по розділу

В ході економічного розрахунку була визначена собівартість виготовлення і складання додаткового вентилятора.

ВИСНОВКИ

У зв'язку з тим, що йде поступова інтеграція енергосистеми України у загальноєвропейську і з тим, що вимоги до роботи енергогенеруючих об'єктів посилюються, необхідно проводити своєчасну модернізацію та актуалізацію всього наявного обладнання. Відцентровий вентилятор, що було розроблено та модифіковано в рамках модернізації гідрогенераторів Канівської ГЕС, є одним з рішень, що наблизять українську енергетику до стандартів ЄС.

Метою даного дипломного проекту магістра була розробка ефективної системи вентиляції, а саме однієї з її основних складових частин – відцентрового вентилятора. Даний вентилятор несе на собі основний тягар з забезпечення ефективної циркуляції та напору охолоджуючого повітря в робочій порожнині гідрогенератора СГКЗ 538/160-70 Канівської ГЕС.

На першому етапі модернізації системи охолодження гідрогенератору розглянуто конструктивні особливості систем охолодження капсульних гідрогенераторів різних схем. Рішення, що запропоноване інженерами і конструкторами ДП «ЗАВОД«ЕЛЕКТРОВАЖМАШ», полягало в проектуванні допоміжного відцентрового вентилятору, що встановлюється на вал та матиме привід від ротору гідрогенератора. Цей захід забезпечує ефективний розподіл охолоджуючого повітря, що надходить від двох електричних осьових вентиляторів, встановлених в передній частині гідрогенератора.

Для побудування тривимірної моделі вентилятора та її подальшого дослідження було проведено аналітичний розрахунок, в результаті якого було отримано геометричні параметри та параметри потоку в міжлопаткових каналах вентилятору. За допомогою програмного комплексу *SolidWorks* проведено розробку 3D моделей складових частин вентилятора, а також їх остаточне складання.

Проведено розрахункове дослідження системи охолодження капсульного гідрогенератора СГКЗ 538/160-70 з відцентровим вентилятором у програмному комплексі *SolidWorks Flow Simulation* та отримано результати у вигляді розподілу швидкостей. Для оцінки якості отриманих результатів виконано перевірочний розрахунок методом схем заміщення. Розбіжність у значеннях швидкостей та витрат повітря склала не більше 1,5%.

Також проведено розрахунок ефективності повітрообміну всередині гідрогенератору. Максимально допустима витрата повітря, що створюється відцентровим вентилятором, дорівнює 8 м³/с. За цим показником система вентиляції, яка складалася з двох осьових вентиляторів та спроектованого відцентрового, не забезпечувала належного рівня охолодження та циркуляції повітря.

На другому етапі модернізації системи охолодження гідрогенератора запропонована подальша модернізація системи вентиляції гідрогенератора шляхом зміни конструкції відцентрового вентилятора.

Базова конструкція була одноконтурною, тобто вона забезпечувала вентиляцію повітря як на роторну частину генератора, так і на статорну. В модифікованій версії вентилятора додається ще один ступінь – таким чином кожна з частин відцентрового вентилятора починає працювати на свій контур. Перший ступінь (базовий) сприяє належному рівню вентиляції у роторній частині генератора, а другий ступінь (той, що додається в ході модернізації) працює на статорну частину.

Для з'ясування ефективності даного рішення спочатку побудовано тривимірну модель модифікованого відцентрового вентилятора у програмному комплексі *SolidWorks*, а потім проведено вентиляційний розрахунок у програмному комплексі *SolidWorks Flow Simulation*.

Також проведені розрахунок ефективності повітрообміну всередині гідрогенератора та розрахунок на міцність модифікованого відцентрового вентилятора. Напруження в вентиляторі допустимі, середні напруження становлять 22 МПа, мінімальні 18 МПа, запас міцності становить $K = 6,9$. Конструкція вентилятора є рівноміцнісною, а мінімальні переміщення, що складають 0,2 мм, не перевищують технологічного зазору при складанні.

Максимально допустима витрата повітря, що створюється модифікованим відцентровим вентилятором, дорівнює $17 \text{ м}^3/\text{с}$. Тепер гідрогенератор допускає роботу при відключенні основних охолоджуючих осьових вентиляторів MFLD 900 та охолодженні тільки за рахунок модифікованого відцентрового вентилятора. Крім того вентилятор спроектовано так, що його установка не перешкоджає переміщенню обслуговуючого персоналу із зони турбіни в зону підшипника через ротор.

Дані, що були отримані під час стендових випробувань підтвердили результати тривимірного дослідження вентилятора у програмному комплексі *SolidWorks*. Розбіжність в результатах склала не більше 1...2%.

В економічній частині проведено розрахунок собівартості вентилятора та вартості всього генератора в цілому.

Ефектом від впровадження відцентрового вентилятора у систему вентиляції гідрогенератора СГКЗ 538/160-70 є підвищення КПД на 0,1% від його номінальної потужності, що в перерахунку на середньорічний видобуток електроенергії додатково складе 2 МВт/рік, що складає 3 млн. гривень на рік для одного генератора, за умови нинішньої вартості електроенергії. У разі її подорожчання економічний ефект зросте.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К. и др. Проектирование электрических машин. Москва: 1980 – 757 с.
2. Кирьянов А.Н. Вентиляционный расчет гидрогенератора типа SGK 538/160-70. Каневская ГЭС. Харьков – 1969.
3. Walter Harb, Johannes Erhard, Ernst Farnleitner, пат. 2012025641 США, Method and device for cooling an electric machine; published Feb.2, 2012. – 9 с.
4. Пат. 203368236 Китай, Bulb type water turbine cooling and ventilating structure employing glass fiber reinforced plastic wind shield; published 2013. – 12 с.
5. Кади И.А., Шаров В.И., Карташова Т.Н, пат. 2309512 Российская Федерация, Способ охлаждения электрической машины.; опубл. 2016. – 9 с.
6. Домбровский В.В., Еремеев А.С., Иванов Н.П., Ипатов П.М., Каплан М.Я., Пинский Г.Б. Проектирование гидрогенераторов. Москва.: «Энергия», 1965 – 258 с.
7. «Расчёт центробежного вентилятора», ОТХ.214.684, ГП «ЭЛЕКТРОТЯЖМАШ» – 2012 г.
8. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Москва.: «Наука»,1977 – 720 с.
9. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям», Москва.: Машиностроение, 1992 – 672 с.
10. Отраслевая методика «ОАА.682.005-69».
11. ГОСТ IEC 60034-1-2014 «Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики» УДК 621.313:006.354 – 53 с.
12. ГОСТ 5616-89 «ГЕНЕРАТОРЫ И ГЕНЕРАТОРЫ-ДВИГАТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГИДРОТУРБИННЫЕ. Общие технические условия» - 18 с.
13. «Расчет на прочность деталей машин», И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич.
14. Дудко А.В., Стрекаловская А.Д. Патентный поиск как инструмент повышения умений студентов эффективно заниматься научной работой. Оренбург.: Оренбургский государственный университет, 2015 г. - 5 с.
15. ДСТУ 3008-95. Документація. Звіти в сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення. – Чинний з 01.01.96. – К.: Держстандарт України, 1995. – 37 с.
16. Павленко В.Н., Набатов А.С., Сысоев Ю.А., Тараненко И. М. Требования и порядок оформления учебных и научно-исследовательских документов: учебное пособие / В.Н. Павленко, А.С. Набатов, Ю.А. Сысоев, И.М. Тараненко.-Х : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. ав. ин-т», 2013. – 76 с.