

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ВИКОНАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАВДАННЯ
ТА САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ
З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
«ТЕПЛОВІ, ГІДРАВЛІЧНІ ТА АЕРОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ
В ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИНАХ»

для студентів, що навчаються за спеціальністю
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Харків – 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ВИКОНАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАВДАННЯ
ТА САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ
З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
«ТЕПЛОВІ, ГІДРАВЛІЧНІ ТА АЕРОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ
В ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИНАХ»

для студентів, що навчаються за спеціальністю
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № __ від _____ 2024р.

Методичні вказівки до виконання індивідуального завдання та самостійної роботи з навчальної дисципліни «Теплові, гідравлічні та аеродинамічні процеси в електричних машинах» для студентів, що навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / укладач: А.В. Єгоров. – Харків : НТУ «ХП», 2024. – 28 с.

Укладач: А.В. Єгоров

Рецензент: Л.В. Шилкова

Кафедра електричних машин

ВСТУП

Методичне видання присвячено виконанню індивідуального завдання з навчальної дисципліни «Теплові, гідравлічні та аеродинамічні процеси в електричних машинах» для студентів спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка» за профільним блоком «Електричні машини». Метою викладання навчальної дисципліни є отримання майбутніми спеціалістами теоретичних та практичних знань питань теплообміну, теплопередачі в електричних машинах, пов'язаних із роботою систем охолодження, проектуванням прогресивних систем охолодження електричних машин.

В результаті виконання завдань та вивчення навчальної дисципліни студенти вивчають особливості охолодження електричних машин з властивості й характеристики вентиляційних трактів, способи охолодження, конструкцію різних типів вентиляторів, причини нагріву і методи охолодження електричних машин.

Вивчення навчальної дисципліни базується на освітній програмі підготовки бакалаврів. Навчальним планом навчальної дисципліни передбачені лекційні заняття, практичні заняття та самостійна робота студентів з виконання індивідуального завдання. При виконанні індивідуального завдання з навчальної дисципліни «Теплові, гідравлічні та аеродинамічні процеси в електричних машинах» потрібно в письмовому вигляді виконати завдання відповідно до номеру варіанту, який студентам слід вибрати за номером у списку в журналі академічної групи.

Методичне видання містить програму курсу «Теплові, гідравлічні та аеродинамічні процеси в електричних машинах», контрольні питання за розділами курсу, індивідуальне завдання та методичні вказівки для виконання цього завдання, а також перелік джерел інформації, необхідних для вивчення навчальної дисципліни і виконання індивідуального завдання.

1 ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ

Завданнями вивчення дисципліни є оволодіння методами вентиляційних, гідравлічних та теплових розрахунків електричних машин, придбання навичок рішення проблем охолодження електричних машин.

У результаті вивчення курсу студенти повинні знати:

- способи охолодження електричних машин;
- системи охолодження електричних машин;
- нові напрямки в області охолодження;
- методи вентиляційні, гідравлічних і теплових розрахунків електричних машин.

У результаті вивчення курсу студенти повинні вміти:

- оцінювати ефективність систем охолодження;
- виконувати проектний і перевірочний розрахунки вентиляторів електричних машин;
- розраховувати теплообмінники в електричних машини.

Відповідно до навчального плану курс викладається у 7-му семестрі. Заплановано 32 годин лекцій, 16 годин практичних занять, іспит.

Якщо при вивченні матеріалу дисципліни або виконанні контрольної роботи виникають проблеми, слід звертатися на кафедру електричних машин для отримання необхідної консультації.

2 ТИПОВА ПРОГРАМА І ВКАЗІВКИ ПО ТЕМАМ КУРСА

2.1 Вступ. Загальні питання теплообміну

Значення охолодження електричних машин. Джерела тепловиділення в електричних машинах. Термін служби ізоляції. Температурні індекси ізоляції матеріалів. Граничні перевищення температури, що допускаються. Загальна характеристика фізичних процесів тепловиділення та теплопередачі у електричних машинах. Коротка інформація з теорії подоби.

2.1.2 Методичні вказівки

Джерела тепла в електричних машинах – втрати у активних частинах. Поділ втрат на основні та додаткові. Формули розрахунку втрат. Втрати визначаються під час електромагнітного розрахунку під час проектування машини і при тепловому розрахунку передбачаються заданими.

Максимальна температура за прийнятого класу ізоляції лімітує потужність машини. Від температури залежить термін служби ізоляції. Математичне вираження залежності терміну служби ізоляції від температури, класифікація ізоляційних матеріалів за температурними індексами.

Передача тепла від гарячого тіла до холодного називається теплообміном і може здійснюватися трьома способами: теплопровідністю, конвекцією та випромінюванням. Механізм кожного виду теплопередачі, його математичний опис. Теплообмін між поверхнею твердого тіла і потоком рідини (або газу), що обтікає його, завжди відбувається конвекцією і називається тепловіддачею. На практиці дуже часто зустрічається теплообмін між двома потоками, розділеними твердою перегородкою, так що тепло двічі передається конвекцією. Такий теплообмін називається теплопередачею. У ряді випадків передача тепла відбувається одночасно усіма трьома методами. Такі режими називаються складним теплообміном.

Сутність теорії фізичної подоби та мети, що досягаються при її використанні. Два фізичні явища подібні, якщо відносини подібних фізичних

величин однакові у подібні моменти часу во всіх подібних точках простору. Застосування теорії подоби дозволяє правильно спланувати досвід, вивчити складні фізичні явища та процеси на моделях та, обробивши результати досвіду у вигляді чисел подібності, скласти рівняння подоби, придатне до розрахунку всієї групи явищ, подібних до вивченого явища. Три теореми подібності. Критерії гідродинамічної та теплової подоби, критеріальні рівняння конвективної тепловіддачі.

Література: (2, с. 92–98, с. 144–166; 3, с. 7–13, 62–70, 252-255).

2.1 3 Запитання для самоперевірки

Як залежить величина втрат в активних елементах електричних машин від навантаження, потужності, габаритів та властивостей матеріалів?

Довговічність яких елементів електричної машини найбільш сильно залежить від теплового стану?

Як класифікуються ізоляційні матеріали по температурним індексам?

Що таке теплообмін? Назвати три основних виду теплообміну.

Пояснити механізм теплопровідності. Закон Фур'є.

Коефіцієнт теплопровідності, від чого він залежить?

Математичне опис процесу тепловіддачі законом Ньютона- Ріхмана .

Коефіцієнт тепловіддачі, від чого він залежить?

Пояснити механізм процесу передачі тепла випромінюванням.

Які явища називають подібними?

Сформулювати три теореми подоби.

Що називається критерієм подоби?

Пояснити зміст критеріїв гідромеханічного та теплового побиття.

2.2 Способи і системи охолодження електричних машин

Способи охолодження електричних машин. Класифікація систем охолодження електричних машин Оцінка систем охолодження. Безпосереднє та непряме охолодження електричних машин.

2.2 2 Методичні вказівки

Спосіб охолодження визначається охолоджувальним середовищем та видом теплознімання. Класифікація методів охолодження. Розрізняють способи охолодження в залежності від застосовуваної охолоджувальної речовини (повітряна, воднева, масляна, водяна), залежно від наявності або відсутності теплової ізоляції між охолоджуючим середовищем і джерелом тепловиділення (непряме та безпосереднє). Нові напрямки в області охолодження електричних машин (випарне охолодження, застосування теплових труб, явище надпровідності).

Класифікація електричних машин в залежності від способу їх охолодження (машини з природним охолодженням, самовентильовані машини, машини із зовнішньою вентиляцією, машини із незалежним охолодженням). Умовне буквено-цифрове позначення способів охолодження електричних машин згідно ДСТУ 20459-87 (МЕК 34-6).

Система охолодження є сукупністю охолоджуючих середовищ, каналів охолоджуючого тракту та нагнітальних елементів. В електричних машинах застосовуються такі системи вентиляції: витяжна, нагнітальна, протяжна та замкнута, радіальна та аксіальна. Переваги та недоліки перерахованих вище систем для різних типів електричних машин. Оцінка ефективності та економічності систем охолодження.

Замкнута система вентиляції допускає застосування для охолодження машини як повітря, а й водню. Переваги водню по порівняно з повітрям і переваги водневого, що впливають звідси охолодження.

Суть безпосереднього охолодження. Види каналів в обмотках статора та ротора при водяному та водневому охолодженні. Вибір довжини та перерізу каналів.

Література: (1, с. 7–12, 83–86, 100-111; 3, с. 13-22).

2.2.3 Запитання для самоперевірки

Які існують способи охолодження електричних машин?

Від чого залежить вибір того або іншого способу охолодження електричних машин?

Порівняти охолодні властивості таких речовин, як повітря, водень, олія, вода.

Які способи охолодження застосовуються в турбогенераторів?

Перерахувати і пояснити переваги і недоліки водневого охолодження.

Коли застосовується водяне охолодження?

Переваги і недоліки безпосереднього охолодження по порівнянні з непрямым.

Коли застосовується осьова, радіальна і змішана системи вентиляції?

У чим складається відмінність систем з витяжний і нагнітальної вентиляцією?

Коли застосовується замкнута система вентиляції?

Який критерій застосовується для оцінки ефективності систем охолодження?

Який критерій застосовується для оцінки економічності систем охолодження?

З яких міркувань вибираються довжина і переріз каналу при безпосередньому охолодженні?

2.3 Основи теорії гідравлічних та аеродинамічних розрахунків

Основні поняття і закони аеродинаміки і гідравліки. Концепція о краплинних і газоподібних рідин. Фізичні властивості рідин. Обґрунтування застосування методів гідравліки для розрахунків вентиляцій електричних машин. Лінії та трубки струму. "Живий" переріз і гідравлічний діаметр потоку рідини. Режими течії рідини. Ціль гідравлічних та аеродинамічних розрахунків. Кількісні характеристики аеродинамічних і гідравлічних ланцюгів. Види гідравлічних опорів. Методика гідравлічного розрахунку.

Вентилятори для електричних машин. Пристрій та принцип дії відцентрового та осьового вентиляторів.

2.3 2 Методичні вказівки

Як охолоджуючі середовища в електричних машинах застосовуються рідини та гази. Основні фізичні властивості рідин та газів: щільність, температурне розширення, стисливість, в'язкість. Краплинні рідини характеризуються великим опором стиску та малим опором розтягуючим і дотичним зусиллям, зумовленим незначністю сил зчеплення та тертя між частинками. Газоподібні рідини (гази) мають велику стисливість, не чинять опору розтягуючим зусиллям.

Під ідеальною рідиною мають на увазі умовну рідину, що володіє абсолютною несжимаемістю, абсолютною рухливістю частинок, у якій відсутні сили зчеплення між ними. Рівняння гідростатики та гідродинаміки. При перебігу рідин можливі два режими: ламінарний та турбулентний. Умови виникнення турбулентного потоку. Частинки рідини або газу, що знаходяться в безпосередній близькості від поверхні як би "прилипають" до неї і швидкість потоку в точці, що знаходиться на поверхні стінки, дорівнює нулю. Зона гальмування потоку називається динамічним прикордонним шаром. Властивості прикордонного шару та його роль в конвективний теплообмін.

Методика проведення гідравлічних та аеродинамічних розрахунків однакова. Відмінність полягає у кількісних характеристиках (швидкість руху охолоджуючого середовища, втрати тиску) гідравлічних та аеродинамічних ланцюгів, обумовлених різними фізичними властивостями рідин та газів. Метою вентиляційних та гідравлічних розрахунків є вибір нагнітальних елементів, що забезпечують циркуляцію необхідної кількості охолоджуючого середовища в одиницю часу (необхідна витрата середовища). Втрати тиску в машині рівні тиску, що розвивається нагнітальними елементами (рівняння рівноваги). Будь-яка ділянка гідравлічного тракту має опір. У гідравлічному

розрахунку електричної машини має бути визначено її гідравлічне опір, вирішено рівняння рівноваги, обчислено розподіл витрат за окремими гілками схеми. Природа виникнення опору течії рідин, залежність гідравлічного опору від умов течії, від шорсткості стінок каналів. Види місцевих опорів. Робота відцентрових і осьових вентиляторів.

Література: (1, с. 112–116, 121–124, 148–181; 2, с. 10–58, 74–81).

2.3.3 Запитання для самоперевірки

Які основні властивості рідини і чим відрізняється краплинна рідина від газоподібної?

Що таке в'язкість середовища?

Як змінюється в'язкість при зміні температури рідини і газу?

Основне рівняння гідростатики.

Дати визначення поняттям "Суцільна середовище", "Лінія струму", "трубка струму" в поле швидкостей поточної рідини.

Як визначити режим течії рідини?

Які особливості ламінарного і турбулентного режимів течії рідини?

Сформулювати рівняння Бернуллі.

Які причини виникнення втрат тиску при русі рідини в каналах?

Як залежить опір гладких каналів від характеру течії рідини та газу?

Як залежить опір каналу від шорсткості стінок?

Чим викликано місцеве гідравлічне опір?

Як визначити сумарне гідравлічне опір при послідовному та паралельному з'єднанні опорів?

Принцип дії відцентрового вентилятора.

Принцип дії осьового вентилятора.

Як величина напору вентилятора залежить від його витрати, відносного радіуса лопаток та кута лопатки на виході колеса?

У чим складається завдання вентиляційного і гідравлічного розрахунків електричних машин?

2.4 Нестационарні теплові процеси в електричних машинах

Класична теорія нестационарного нагріву, її основні припущення. Нагрівання та охолодження електричної машини як однорідного тіла. Термічна постійна часу нагрівання, її геометричний та фізичний. сенс. Графічне визначення встановленого перевищення температури. Залежність електричного опору температури. Короткочасні навантаження. Нестационарні теплові процеси у стандартних режимах роботи електричних машин (короткочасний, повторно- короткочасний режими та інші).

2.4.2 Методичні вказівки

Нестационарні експлуатаційні режими є типовими для електричних машин. В основі розрахунку нестационарного режиму лежить класична теорія нагрівання однорідного тіла, до якого за певних припущень можна привести електричну машину. На підставі рівняння теплового балансу виводиться аналітичний вираз зміни температури при нагріві і охолодженні однорідного тіла.

Інтенсивність нестационарного теплообміну характеризує термічна постійна часу, геометричний зміст якої є подкасательно в довільній точці кривої нагрівання. Фізичний зміст постійного часу встановлюється з рівняння теплового балансу за відсутності теплообміну з довкіллям.

Іноді в умовах досвіду відсутня можливість визначення перевищення температури, що встановилося, тоді останнє графічно визначається за початковому ділянці кривий нагрівання.

Для підвищення точності теплових розрахунків необхідно враховувати залежність електричного опору провідникових матеріалів від температури.

Вплив динамічних теплових процесів проявляється у температурних деформаціях та напругах, температурному старінні ізоляційних та інших матеріалів. Особливо це виражено при короткому замиканні. Існує аналітична залежність перевищення температури від щільності струму та часу при короткому замиканні. При вивченні короткочасних і повторно-

короткочасних режимів роботи визначається допустима корисна потужність, до якої можна, можливо навантажити двигун в цих режими.

Література: (1, с. 75–79; 2, с. 215-224).

2.4.3 Запитання для самоперевірки

Які режими роботи електричних машин супроводжуються нестационарними тепловими процесами?

Перерахувати основні припущення класичною теорії нестационарного нагріву.

Пояснити структуру рівняння теплового балансу.

Рівняння нагрівання однорідного тіла.

Рівняння охолодження однорідного тіла.

Фізичний сенс термічною постійною часу.

Який геометричний сенс має термічна постійна часу?

Від чого залежить термічна постійна часу?

Як графічно визначити що встановився нагрівання?

Як залежить електричне опір від температури?

Залежність перегріву обмотки при короткому замиканні від щільності струму та часу.

Охарактеризувати процес нагріву при короткочасному і повторно-короткочасний режим роботи.

2.5 Теплові розрахунки електричних машин в стаціонарному режимі

Завдання теплового розрахунку. Огляд сучасних методів теплового розрахунку електричних машин. Метод еквівалентних теплових схем заміщення (ЕТС). Розрахунок теплових опорів. Еквівалентні теплові схеми різних типів електричних машин. Метод температурного поля. Аналітичні і чисельні методи розрахунку температурного поля. Метод кінцевих елементів і сучасні пакети прикладних програм для розрахунку температурного поля.

2.5.2 Методичні вказівки

У завдання теплого розрахунку входить визначення активних температур частин машини та порівняння її з допустимими температурами, вказаними ДСТУ 183-74. Вихідними даними для теплого розрахунку є втрати енергії в активних частинах електричної машини, значення коефіцієнтів теплопровідності та умови охолодження на граничних поверхнях. Існує два основні методи теплових розрахунків: метод температурного поля та метод ЕТС.

В даний час метод ЕТС набув найширшого поширення. Метод ЕТС базується на таких припущеннях. Дійсні розподілені джерела тепла та розподілені теплові опори замінюються зосередженими джерелами тепла та зосередженими еквівалентними тепловими опорами та тепловими ємностями. Теплові опори передбачаються не залежними від величини теплового потоку. Це дає змогу звести метод ЕТС до лінійних теплових ланцюгів. Реальний елемент із розподіленими втратами в ЕТС замінюється еквівалентним елементом із зосередженими втратами. Така еквівалентна заміна припускає перетворення лінійного розміру. Товщина еквівалентної пластини залежатиме від того, яку температуру (середню або максимальну) зберігають під час перетворення. Розрахунок теплового опору при двомірному перебігу тепла ведеться за правилами паралельного складання опорів електричного лінійного ланцюга. Теплові опори ЕТС повинні відповідати характеру теплообміну. Вони бувають кондукційні та конвективні.

Температури у вузлах ЕТС заміщення визначаються шляхом рішення системи рівнянь теплового балансу на основі принципу електротеплової аналогії з використанням законів Кірхгофа (аналогічно електричним ланцюгам) ЕТС електричних машин складається на підставі аналізу картини розподілу теплових потоків та попередніх оцінок величин окремих теплових опорів.

Література: (1, с. 68–71; 2, с. 167-215; 3, с. 255–262, 277–290 299–366, 447-460).

2.5.3 Запитання для самоперевірки

У чим складається мета теплового розрахунку електричної машини?

Які існують методи теплових розрахунків електричних машин?

Як розраховується перегрів обмотки статора по методом теплових параметрів?

Коли застосовується метод температурного поля і на чому він оснований?

Які припущення лежать в основі методу ЕТС?

Яку товщину повинна мати еквівалентна пластина без внутрішніх джерел тепла, що має середню температуру таку ж, як і реальна пластина з внутрішніми джерелами тепла?

Які види теплових опорів трапляються в ЕТС? Як вони розраховуються?

Якими рівняннями описується ЕТС?

Послідовність теплового розрахунку за методом ЕТС?

Скласти ЕТС головних та додаткових полюсів вентильованої машини постійного струму.

Скласти ЕТС якоря вентильованої машини постійного струму.

Скласти ЕТС асинхронного двигуна захищеного виконання з аксіальною вентиляцією.

2.6 Оребрення електричних машин

Завдання ребра. Теплопередача вздовж стрижня. Розрахунок ребра довільного профілю.

2.6.2 Методичні вказівки

У конструкціях електричних машин є деталі як стрижнів і ребер, якими здійснюється відведення тепла. Завдання розрахунку таких елементів зводиться до знаходження розподілу температури, величини теплового потоку, що відводиться, і оптимальних геометричних розмірів. Температурне

поле ребра знаходиться шляхом рішення рівняння теплопровідності ребра. Якщо б теплопровідність ребра була ідеальною, то вся поверхня ребра мала б однакову температуру, рівну температурі біля основи ребра, і потік, що відводиться, досягав би максимально можливого значення. Для оцінки погіршення тепловідведення порівняно з ідеальним випадком застосовується коефіцієнт ефективності ребра.

На практиці з технологічних міркувань використовуються ребра непрямокутного профілю. Розрахунок ребер довільного профілю складний, тому розроблено спрощені методики, наведені до методики розрахунку прямого ребра прямокутного профілю.

Порівняння різних прямих ребер.

Література: (2, с. 120-124; 3, с. 156-65).

2.6.3 Запитання для самоперевірки

З який метою виконується ребра?

Температурне поле ребра прямокутного профілю.

Як виражається повний тепловий потік, відведений ребром?

Що таке коефіцієнт ефективності ребра і від яких факторів він залежить?

Що таке коефіцієнт оребрення?

2.7 Теплообмінники в електричних машинах

Класифікація теплообмінних апаратів по принципом дії. Конструкція рекуперативних теплообмінників. Рівняння теплопередачі та теплового балансу для теплообмінників. Схеми руху теплоносіїв у теплообмінниках. Характер зміни температур теплоносіїв вздовж поверхні теплообміну. Середня різниця температур теплоносіїв та методи її обчислення. Завдання проектних та перевірочних розрахунків теплообмінників. Розрахунок кінцевої температури робітників рідин.

2.7.2 Методичні вказівки

За принципом дії теплообмінні апарати поділяються на рекуперативні, регенеративні та змішувальні. В електричних машинах використовуються рекуперативні теплообмінники. Механізм теплообміну в них зводиться до передачі теплоти від гарячого теплоносія до холодному через стінку. Конструкція рекуперативних теплообмінників та їх типи в залежності від роду охолоджуючого середовища (повітро- та газоохолоджувачі, водоводяні теплообмінники і т.д. д.).

Процес теплообміну в теплообміннику описується двома основними співвідношеннями: рівнянням теплового балансу та рівнянням теплопередачі. З рівняння теплового балансу виводиться співвідношення між еквівалентами і змінами температур гарячою і холодною рідин.

Характер зміни температур рідин по поверхні теплообмінного апарату залежить від схеми їх руху та водяних еквівалентів. Найбільш простими схемами руху є: прямоток, протитечій і перехресний струм.

Методи визначення середнього температурного напору. Розрізняють середню логарифмічну різницю температур та середню арифметичну різницю температур теплоносіїв в теплообміннику. Середній температурний напір визначається як середнє арифметичне із крайніх напорів, якщо температури теплоносіїв змінюються на поверхні незначно.

Розрахунки теплообмінників діляться на проектні та перевірочні. При перевірочному розрахунку визначаються продуктивність теплообмінника та кінцеві температури робітників рідин.

Література: (1, с. 80–82; 4, с. 187-202).

2.7.3 Запитання для самоперевірки

Що називається теплообмінним апаратом?

Як класифікуються теплообмінники по принципом дії?

Принцип дії рекуперативного теплообмінника.

Описати конструкцію теплообмінних апаратів.

Якими рівняннями описується процес теплообміну в теплообміннику?

Від чого залежить коефіцієнт теплопередачі?

Що таке водяний еквівалент і його вплив на перепад температури теплоносія?

Від чого залежить характер зміни температури рідин по поверхні теплообмінника?

Які існують методи визначення середнього температурного натиску?

Які існують типи теплообмінників в залежності від виду охолодного середовища?

Сформулювати завдання проектних і перевірочних розрахунків теплообмінників.

Як розраховуються кінцеві температури робітників серед в теплообміннику?

3.КОНТРОЛЬНА РОБОТА

Вказівки до виконання та оформлення контрольної роботи кожному студенту необхідно виконати по вивчається дисципліні контрольну роботу, номер варіанта обирається відповідно до номеру, який студентам слід вибрати за номером у списку в журналі академічної групи.

Контрольна робота є рішенням завдання вентиляційного розрахунку електричної машини з аксіальною системою вентиляції. Її мета - практичне освоєння методики вентиляційного розрахунку. Виконання контрольної роботи починають з викладу завдання та вихідних даних. Потім наводять рішення задачі відповідно до запропонованого нижче за планом. Рішення слід проводити у загальному вигляді та в отримані формули підставляти цифрові значення величин, вказуючи розмірність одержаного результату. Необхідно обґрунтовувати обраний шлях рішення: кожен пункт розрахунку має супроводжуватися короткими, але достатніми поясненнями. Наприкінці роботи слід навести перелік використаної Літератури.

Контрольну роботу виконують у окремому зошиті. Текст розміщують так, щоб праворуч залишалися поля шириною 4 см для нотаток викладача. Текст супроводжують малюнками, що пояснюють розв'язання задачі. Позначення одиниць фізичних величин, умовні літерні позначення електромагнітних, теплових та інших величин, умовних графічних позначень, малюнків, таблиць, посилання на літературу, оформлення списку літератури мають відповідати встановленим стандартам. Термінологія та визначення повинні бути єдиними та відповідати загальноприйнятим у науково-технічна література.

При виправленні контрольної роботи по зауваженням рецензента прати або заклеювати зауваження не дозволяється. Разом із виправленою роботою необхідно представляти для повторної перевірки початковий варіант роботи із зауваженнями рецензента. У разі виправлення по окремим зауваженням можна вклеювати листи з новим (виправленим) текстом.

3.2 Зміст контрольної роботи

Виконати перевірочний вентиляційний розрахунок двигуна постійного струму захищеного виконання із самовентиляцією; система вентиляції – аксіальна. Вентилятор – відцентровий з радіальними лопатками (рис. 3.1).

Задано:

- питома теплоємність повітря $c = 1010 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$;
- щільність повітря $\rho = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$;
- підігрів повітря $\theta = 25^\circ\text{C}$;
- коефіцієнт тертя в каналах $\lambda = 0,08$.

Інші вихідні дані до завдання наведено в таблиці 3.1.

Потрібно:

1. Описати схему вентиляції заданого двигуна.
2. Скласти схему заміщення системи вентиляції заданого двигуна.
3. Визначити потрібна витрата повітря.
4. Розрахувати гідравлічні опору вентиляційного тракту.
5. Розрахувати і побудувати характеристику тиску вентиляційного тракту двигуна.
6. Розрахувати характеристику тиску вентилятора.
7. Визначити робітник витрата і робітник натиск вентилятора.
8. Визначити витрати повітря в паралельних гілках вентиляційного тракту.
9. Визначити витрати потужності на вентиляцію.

3.3 Методичні вказівки

При описі схеми вентиляції заданого двигуна схематично зобразити пристрій машини, показавши на малюнку стрілками напрямки руху повітря та перерахувавши конструктивні елементи, через які проходить повітря (див. рис. 3.1). Описати, які гідравлічні опори зустрічає своєму шляху

охолоджуючий потік повітря.

При визначенні аеродинамічної характеристики системи охолодження остання представляється в вигляді схеми заміщення, містить зосереджені гідравлічні опору, що замінюють дорожні і місцеві опору, що насправді розподілені на деяких ділянках тракту. Схема заміщення аналізованої задачі системи вентиляції наведено на рис. 3.2.

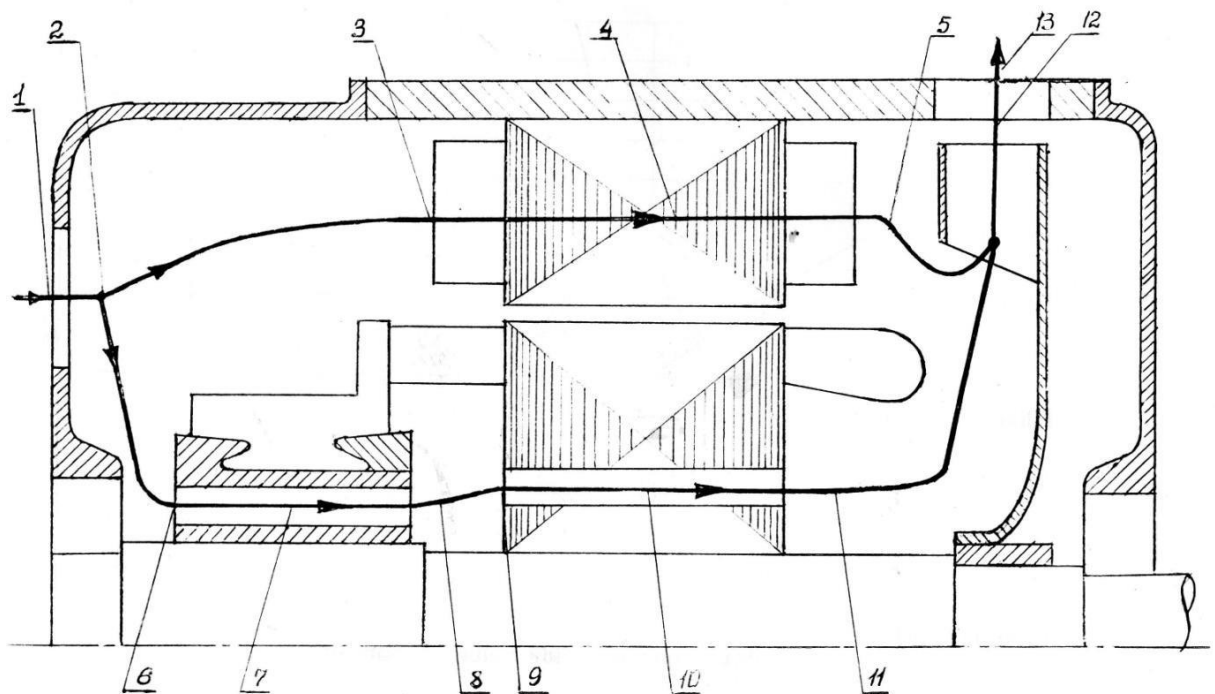


Рисунок 3.1 – Схема вентиляції двигуна постійного струму

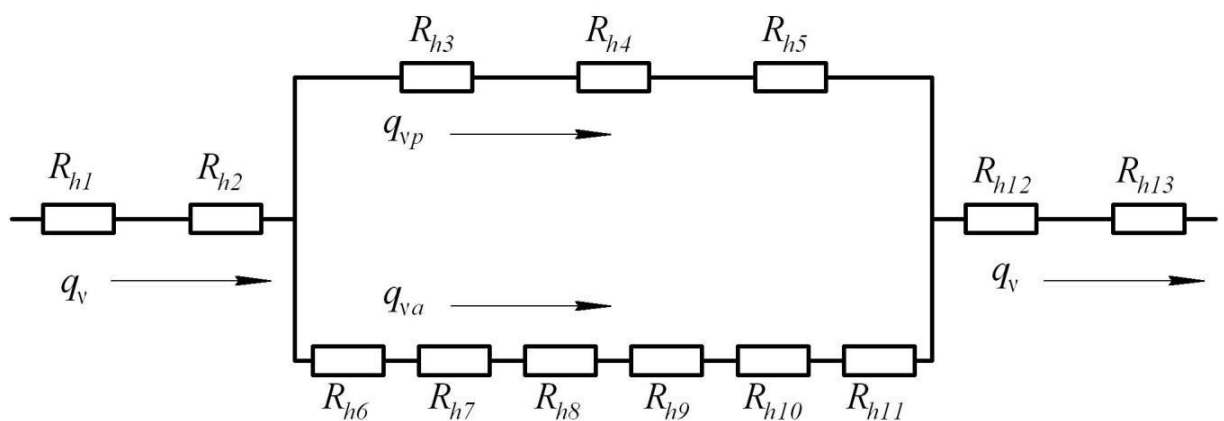


Рисунок 3.2 – Схема заміщення системи вентиляції двигуна постійного струму

Необхідна витрата визначається по формулі:

$$q_v = \frac{\Delta p}{c \cdot \rho \cdot \Delta \theta}.$$

Рухаючись у каналі, повітря долає гідравлічні опори різного виду: дорожні та місцеві. Дорожні гідравлічні опори обумовлені силами тертя, а місцеві гідравлічні опори обумовлені конструктивними елементами та місцевими перешкодами в потоці (Поворот потоку, звуження, розширення і т.п.).

Шляхове опір розраховується за формулою:

$$R_{hfr} = \frac{\lambda \cdot \rho \cdot l}{2 \cdot S^2 \cdot d_h},$$

де λ – коефіцієнт тертя;

ρ – щільність середовища;

l – довжина каналу;

d_h – гідравлічний діаметр каналу;

S – площа прохідного перетину каналу.

Місцевий опір розраховується по формулі:

$$R_{hpl} = \frac{\xi \rho}{2 \cdot S^2},$$

де ξ – коефіцієнт місцевого опору.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для розрахунку

Найменування даних	Варіант								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Втрати двигуна ΔP , Вт	3424	3838	6434	10255	16894	4826	5825	8248	11644
Частота обертання n , об/хв	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Діаметр якоря d_{ae} , м	0,21	0,21	0,294	0,327	0,368	0,245	0,245	0,294	0,327
Довжина якоря l_a , м	0,125	0,165	0,15	0,19	0,265	0,135	0,175	0,205	0,24
Число аксіальних каналів n_v	15	15	21	24	27	18	18	21	24
Діаметр аксіального каналу якоря d_v , м	0,017	0,017	0,022	0,022	0,024	0,02	0,02	0,022	0,022
Діаметр обмоткотримача d_8 , м	0,15	0,15	0,21	0,235	0,265	0,178	0,178	0,21	0,235
Внутрішній діаметр якоря d_{ai} , м	0,065	0,065	0,085	0,10	0,115	0,075	0,075	0,085	0,10
Довжина каналу міжполюсного вікна l_4 , м	0,165	0,218	0,197	0,25	0,348	0,178	0,23	0,27	0,316
Еквів. діаметр каналу міжполюсного вікна d_{eq4} , м	0,0152	0,0147	0,0187	0,022	0,021	0,0173	0,0178	0,0187	0,02
Довжина каналу втулки колектора l_7 , м	0,09	0,12	0,15	0,22	0,26	0,12	0,15	0,18	0,22
Еквів. діаметр каналу втулки колектора d_{eq7} , м	0,008	0,008	0,015	0,02	0,03	0,01	0,01	0,015	0,02

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для розрахунку

Найменування даних	Варіант								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Площа поперечного перерізу каналів втулки колектора S_7 , м ²	0,0032	0,0032	0,006	0,008	0,012	0,004	0,004	0,006	0,008
Площа вхідних вікон підшипникового щита S_1 , м ²	0,032	0,032	0,045	0,05	0,055	0,0377	0,0377	0,045	0,05
Площа поперечного перерізу про подорожі над колектором S_2 , м ²	0,105	0,105	0,145	0,16	0,18	0,12	0,12	0,145	0,16
Площа поперечного перерізу міжполюсних вікон S_4 , м ²	0,014	0,013	0,0215	0,024	0,027	0,018	0,019	0,0215	0,024
Площа простору над лобовими частинами зі сторони заднього підшипникового щита S_5 , м ²	0,096	0,096	0,135	0,15	0,169	0,112	0,112	0,112	0,135
Площа поперечного перерізу вихідний грати S_{12} , м ²	0,0322	0,0322	0,0455	0,05	0,0565	0,0375	0,0375	0,0455	0,05
Зовнішній діаметр вентилятора d_2 , м	0,31	0,32	0,42	0,45	0,56	0,33	0,39	0,41	0,5
Внутрішній діаметр вентилятора d_1 , м	0,23	0,23	0,3	0,32	0,36	0,25	0,26	0,31	0,33
Ширина лопаток вентилятора b_{bl} , м	0,025	0,024	0,03	0,04	0,045	0,028	0,032	0,032	0,045

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для розрахунку

Найменування даних	Варіант								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Втрати двигуна ΔP , Вт	14890	2038	3480	4210	4415	5525	5839	7642	15120
Частота обертання n , об/хв	1500	600	600	800	800	1000	1000	1200	1500
Діаметр якоря d_{ae} , м	0,368	0,245	0,245	0,245	0,294	0,294	0,294	0,294	0,368
Довжина якоря l_a , м	0,215	0,17	0,285	0,255	0,18	0,175	0,205	0,23	0,23
Число аксіальних каналів n_v	27	18	18	18	21	21	21	21	27
Діаметр аксіального каналу якоря d_v , м	0,024	0,02	0,02	0,02	0,022	0,022	0,022	0,022	0,024
Діаметр обмоткотримача d_8 , м	0,265	0,178	0,178	0,178	0,21	0,21	0,21	0,21	0,265
Внутрішній діаметр якоря d_{ai} , м	0,115	0,075	0,075	0,075	0,085	0,085	0,085	0,085	0,125
Довжина каналу міжполюсного вікна l_4 , м	0,283	0,224	0,375	0,336	0,236	0,23	0,27	0,3	0,285
Еквів. діаметр каналу міжполюсного вікна d_{eq4} , м	0,0212	0,0168	0,0173	0,0178	0,0163	0,0175	0,0178	0,0187	0,0231
Довжина каналу втулки колектора l_7 , м	0,26	0,09	0,12	0,12	0,15	0,15	0,15	0,22	0,27
Еквів. діаметр каналу втулки колектора d_{eq7} , м	0,03	0,01	0,01	0,01	0,015	0,015	0,015	0,015	0,035

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для розрахунку

Найменування даних	Варіант								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Площа поперечного перерізу каналів втулки колектора S_7 , м ²	0,012	0,004	0,004	0,004	0,006	0,006	0,006	0,006	0,013
Площа вхідних вікон підшипникового щита S_1 , м ²	0,055	0,0377	0,0377	0,0377	0,045	0,045	0,045	0,045	0,065
Площа поперечного перерізу простору над колектором S_2 , м ²	0,18	0,12	0,12	0,12	0,145	0,145	0,145	0,145	0,21
Площа поперечного перерізу міжполюсних вікон S_4 , м ²	0,027	0,017	0,018	0,019	0,016	0,0185	0,019	0,021	0,028
Площа простору над лобовими частинами зі сторони заднього підшипникового щита S_5 , м ²	0,15	0,169	0,112	0,112	0,135	0,135	0,135	0,135	0,17
Площа поперечного перерізу вихідний грати S_{12} , м ²	0,0565	0,0375	0,0375	0,0375	0,0455	0,0455	0,0455	0,0455	0,0565
Зовнішній діаметр вентилятора d_2 , м	0,5	0,39	0,39	0,39	0,47	0,47	0,47	0,47	0,5
Внутрішній діаметр вентилятора d_1 , м	0,37	0,25	0,26	0,27	0,31	0,31	0,32	0,33	0,35
Ширина лопаток вентилятора b_{bl} , м	0,05	0,031	0,032	0,033	0,038	0,037	0,036	0,035	0,05

Розрахунок характеристики вентиляційного тракту двигуна

Зазвичай основну частку гідравлічного опору електричних машин становлять місцеві опори. Розрахунок дорожніх та місцевих опорів ведеться з використанням досвідчених значень коефіцієнтів λ і ξ , які виражають у вигляді емпіричних формул, графіків або таблиць.

При підрахунку гідравлічних опорів необхідно звертати увагу на визначення характерного перерізу, площу якого необхідно підставляти у формули. Зазвичай як характерне приймають переріз з меншою площею. Розрахунок гідравлічних опорів зведений в таблицю 3.2.

Площа перерізу каналів обмоткоутримувача

$$S_8 = S_{10} = \frac{\pi(d_8^2 - d_{ai}^2)}{4}.$$

Площа перерізу аксіальних вентиляційних каналів якоря

$$S_{10} = \frac{n_v \cdot \pi \cdot d_v^2}{4}.$$

Довжина аксіальних вентиляційних каналів якоря

$$l_{10} = l_a.$$

Гідравлічний опір на вході в машину

$$R_{hin} = R_{h1} + R_{h2}.$$

Гідравлічний опір між полюсними котушками

$$R_{hp} = R_{h3} + R_{h4} + R_{h5}.$$

Гідравлічний опір вентиляційних каналів якоря

$$R_{ha} = R_{h6} + R_{h7} + R_{h8} + R_{h9} + R_{h10} + R_{h11}.$$

Еквівалентний гідравлічний опір всередині машини

$$R_{heq} = \frac{R_{hp} \cdot R_{ha}}{(\sqrt{R_{hp}} + \sqrt{R_{ha}})^2}.$$

Таблиця 3.2 – Розрахунок гідравлічних опорів

Позначення опору	Номер та найменування ділянки	Причина виникнення опору	Розрахункова формула	Значення ξ_i, λ
Вхід в машину				
R_{h1}	1. Вхід через жалюзі підшипникового щита	Вхід в отвір з товстими стінками	$\frac{\rho \cdot \xi_1}{2 \cdot S_1^2}$	$\xi_1 = 0,5$
R_{h2}	2. Вхід в камеру під колектором	Раптове розширення	$\frac{\rho \cdot \xi_2}{2 \cdot S_1^2}$	$\xi_2 = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2$
Прохід повітря між полюсними котушками				
R_{h3}	3. Вхід у простір між полюсними котушками	Раптове звуження	$\frac{\rho \cdot \xi_3}{2 \cdot S_4^2}$	$\xi_3 = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{S_4}{S_2}\right)$
R_{h4}	4. Міжполюсні канали	Гідродинамічне тертя	$\frac{\lambda \cdot \rho \cdot l_4}{2 \cdot d_{eq4} \cdot S_4^2}$	$\lambda = 0,08$
R_{h5}	5. Вихід з міжполюсних вікон	Раптове розширення	$\frac{\rho \cdot \xi_5}{2 \cdot S_4^2}$	$\xi_5 = \left(1 - \frac{S_4}{S_5}\right)^2$
Прохід повітря через вентиляційні канали якоря				
R_{h6}	6. Вхід у вентиляційні канали колекторної втулки	Раптове звуження	$\frac{\rho \cdot \xi_6}{2 \cdot S_7^2}$	$\xi_6 = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{S_7}{S_2}\right)$

Таблиця 3.2 – Розрахунок гідравлічних опорів

Позначення опору	Номер та найменування ділянки	Причина виникнення опору	Розрахункова формула	Значення ξ_i, λ
R_{h7}	7. Канали колекторної втулки	Гідродинамічне тертя	$\frac{\lambda \cdot \rho \cdot l_7}{2 \cdot d_{eq7} \cdot S_7^2}$	$\lambda = 0,08$
R_{h8}	8. Вихід із каналів колектора	Раптове розширення	$\frac{\rho \cdot \xi_8}{2 \cdot S_7^2}$	$\xi_8 = \left(1 - \frac{S_7}{S_8}\right)^2$
R_{h9}	9. Вхід в аксіальні вентиляційні канали якоря	Раптове звуження	$\frac{\rho \cdot \xi_9}{2 \cdot S_{10}^2}$	$\xi_9 = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{S_{10}}{S_8}\right)$
R_{h10}	10. Вентиляційні канали	Гідродинамічний тертя	$\frac{\lambda \cdot \rho \cdot l_a}{2 \cdot d_v \cdot S_{10}^2}$	$\lambda = 0,08$
R_{h11}	11. Вихід із вентиляційних каналів	Раптове розширення	$\frac{\rho \cdot \xi_{11}}{2 \cdot S_{10}^2}$	$\xi_{11} = \left(1 - \frac{S_{10}}{S_{11}}\right)^2$
Вихід з машини				
R_{h12}	12. Прохід через вихідну ґрати	Прохід через отвір з товстими стінками	$\frac{\rho \cdot \xi_{12}}{2 \cdot S_{12}^2}$	$\xi_{12} = 0,5$
R_{h13}	13. Вихід повітря в атмосферу	Вихід у відкритий канал готів	$\frac{\rho \cdot \xi_{13}}{2 \cdot S_{12}^2}$	$\xi_{13} = 1$

Гідравлічний опір на виході з машини

$$R_{h\ out} = R_{h12} + R_{h13}.$$

Сумарний гідравлічний опір охолоджуючого тракту

$$R_{h\Sigma} = R_{h\ in} + R_{h\ eq} + R_{h\ out}.$$

Характеристика тиску вентиляційного тракту розраховується за формулою:

$$\Delta p = R_{h\Sigma} \cdot q_v^2. \quad (1)$$

Задаючись рядом значень q_v , розраховують і будують характеристику вентиляційного тракту двигуна $\Delta p(q_v)$. (рис. 3.3).

Розрахунок характеристики вентилятора

Окружна швидкість по внутрішньому діаметру лопаток

$$v_1 = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot n}{60}.$$

Окружна швидкість по зовнішньому діаметру лопаток

$$v_2 = \frac{\pi \cdot d_2 \cdot n}{60}.$$

Площа вихідного перерізу робочого колеса вентилятора

$$S_2 = 0,92 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot b_{bl}.$$

Тиск вентилятора при неробочому ході

$$\Delta p = \eta_0 \cdot \rho \cdot (v_2^2 - v_1^2),$$

де η_0 – гідравлічний ККД вентилятора в режимі неробочого ходу, для вентиляторів з радіальними лопатками $\eta_0 = 0,6$.

Максимальні витрата вентилятора

$$q_{v\ max} = 0,42 \cdot S_2 \cdot v_2.$$

Характеристику тиску вентилятора розраховують по формулі:

$$\Delta p = \Delta p_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{q_v}{q_{v\ max}} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

Задаючись рядом значень q_v розраховують і будують характеристику вентилятора на том ж графіку, де побудована характеристика повітропроводу машини. Знаходять точку перетину показників. Ця точка визначає істинні витрати повітря q_{vw} і натиск вентилятора Δp_w . (рис. 3.3).

Часткові витрати в паралельних гілках визначають виходячи з положення, що при паралельному з'єднанні опорів падіння тисків на них рівні:

$$R_{hp} \cdot q_{vp}^2 = R_{ha} \cdot q_{va}^2. \quad (3)$$

На підставі першого закону Кірхгофа

$$q_{vw} = q_{va} + q_{vp}. \quad (4)$$

Вирішуючи спільно рівняння (3) і (4), знаходять часткові витрати в паралельних гілках.

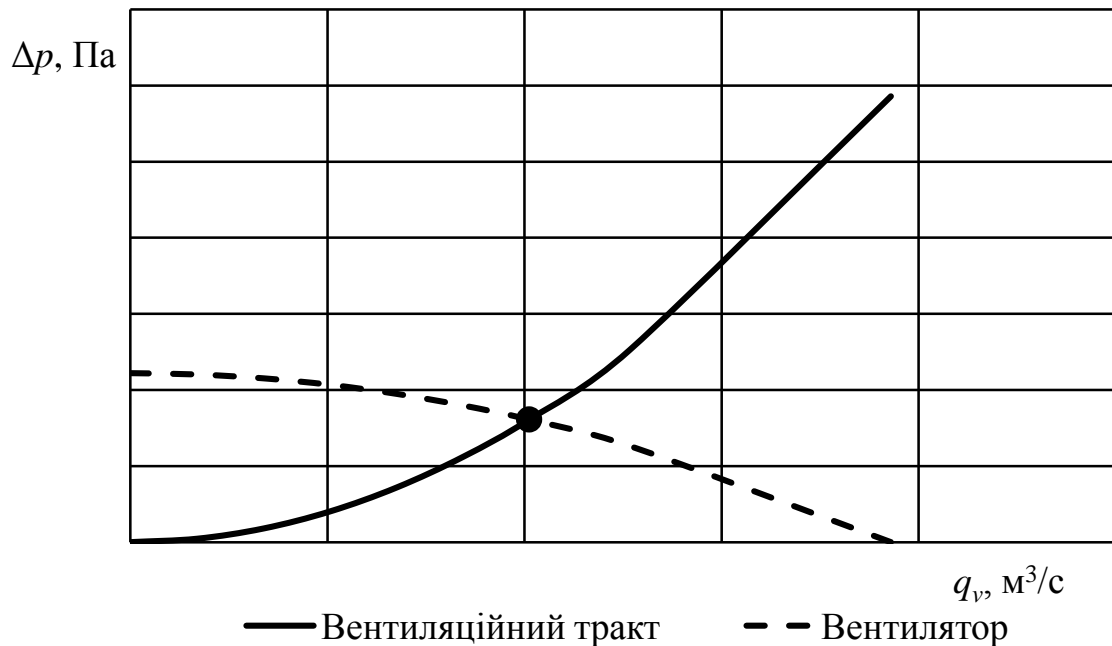


Рисунок 3.3 – Характеристики вентиляційного тракту і вентилятора

Вентиляційні втрати

$$\Delta p_{vent} = \frac{\Delta p_w \cdot q_{vw}}{\eta_e},$$

де η_e – енергетичний ККД вентилятора, для вентилятора з радіальними лопатками $\eta_e = 0,15-0,2$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1 Осташевський М. О., Петренко О. М. , Юр'єва О. Ю. Теплові розрахунки електричних машин : навч. посібник / М. О. Осташевський, О. М. Петренко, О. Ю. Юр'єва – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2020. – 450 с.

2 Цуркан О. В. Основи теплотехніки і гідравліки. Навчальний посібник / О. В. Цуркан, Н. А. Прокопенко, Ю. А. Полєвода, О. В. Маньківський – Вінниця : ТОВ «Друк», 2021. – 132 с.

3 Осташевський М. О. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. В. І. Мілих. – Харків : ФОП Панов А. М., 2017. – 452 с.

4 Черняк О.В. Основи теплотехніки і гідравліки / О.В. Черняк, Г.Б. Рибчинська. – Київ, 1982. – 221 с.

5 Шварцер Б.В. Основи теплотехніки і гідравліки. Збірник задач. Київ, – 1974. – 116 с.

ЗМІСТ

Вступ	
1 Загальні вказівки.....	
2 Типова програма і вказівки до темам курсу.....	
2.1 Вступ. Загальні питання теплообміну.....	
2.2 Способи і системи охолодження електричних машин.....	
2.3 Основи теорії гідравлічних і аеродинамічних розрахунків.....	
2.4 Нестационарні теплові процеси в електричних машинах.....	
2.5 Теплові розрахунки електричних машин у стаціонарному режимі...	
2.6 Срібло електричних машин.....	
2.7 Теплообмінники в електричних машинах.....	
3.Контрольна робота.....	
Вказівки до виконання та оформлення контрольний робіт.....	
Зміст контрольної роботи.....	
Список використаних джерел	

ДОДАТОК А

Приклад оформлення титульного листа індивідуального завдання

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Кафедра електричних машин

ЗВІТ **про виконання індивідуального завдання**

за навчальною дисципліною

ТЕПЛОВІ, ГІДРАВЛІЧНІ ТА АЕРОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ **В ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИНАХ**

Студент _____ гр. _____

(підпис) (Ім'я та прізвище)

Викладач _____

(оцінка) (підпис) (посада, ім'я та прізвище)

Харків
20__ р.

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ВИКОНАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАВДАННЯ
ТА САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ
З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
«ТЕПЛОВІ, ГІДРАВЛІЧНІ ТА АЕРОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ
В ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИНАХ»

для студентів, що навчаються за спеціальністю
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Укладач:
ЄГОРОВ Андрій Володимирович

Відповідальний за випуск МІЛИХ Володимир
Роботу рекомендував до друку МІЛИХ Володимир
Комп'ютерна верстка ЄГОРОВ Андрій
В авторській редакції

План 2024 р., поз. _____

Підп. до друку _____. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура TimesNewRoman. Ум. друк. арк.0,92.
Наклад 50 прим. Зам. № _____. Ціна договірна

Видавничий центр НТУ «ХП».
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2
