

НУБІП України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРТЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 621.3:519.8

НУБІП України

ПОГОДЖЕНО
Директор ІНІ енергетики,
автоматики і енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
В.о. завідувача кафедри
електротехніки, електромеханіки та
електротехнологій

НУБІП України

Каплун В.В. (підпис) Окушко О.В. (підпис)

« » 2023 р. « » 2023 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

НУБІП України

на тему: «Дослідження магнітних полів в котушках електромагнітних контакторів»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

НУБІП України

Гарант освітньої програми
К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

Усенко С.М.
(підпис) (ПІБ)

НУБІП України

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи
К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

Березюк А.О.
(підпис) (ПІБ)

Виконав
Петренко О.В.
(підпис) (ПІБ)

НУБІП України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
НАПРЯМКИ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри
електротехніки, електромеханіки та
електротехнологій

К.Т.Н., доцент
(ступінь, звання)

(підпис)

Окушко О.В.
(ПІБ)

2023р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Петренку Олександр Валдимовичу
(прізвище, ім'я, по батьові)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи «Дослідження магнітних полів в котушках електромагнітних контакторів»

затверджена наказом ректора Національного університету біоресурсів і природокористування України від 06.03.2023 р. № 324 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 2023.11.13.

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи каталоги фірм з електромагнітними контакторами, методичні рекомендації

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

- 1) Аналіз електромагнітних систем сучасних низьковольтних контакторів.
- 2) Розрахунок складових електромагнітних контакторів.
- 3) Моделювання електромагнітних полів в середині електромагнітної системи контакторів.
- 4) Особливості розподілу електромагнітного поля в котушках електромагнітних контакторів.
- 5) Правила техніки безпеки при монтажі електромагнітних контакторів

Дата видачі завдання 06.03.2023 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

К.Т.Н., доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

Березюк А.О.

(підпис)

(ПІБ)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Петренко О.В.

(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Петренко О.В. «Дослідження магнітних полів в котушках електромагнітних контакторів» (магістерська кваліфікаційна робота, Київ, Національний університет біоресурсів і природокористування України, 2023 р.).

Пояснювальна записка: 60 сторінок, 2 таблиці, 33 рисунки, 10 використаних джерел.

В магістерській кваліфікаційній роботі розглянуто питання актуальності застосування електромагнітних контакторів, їх основних схем підключення та особливостей розподілу електромагнітного поля у котушках електромагнітних

контакторів. В роботі написано вступ, обґрунтовано актуальність теми, подано мету, об'єкт, предмет та завдання дослідження. В розділі 1 проведено аналіз компаній із виробництва сучасних електромагнітних контакторів, описано їх особливості застосування та основні схеми підключення. В розділі 2 проведено

основні умови вибору магнітних пускачів (контакторів) та проведено розрахунок основних складових: розрахунок струмоведучого контуру, температури нагріву

с
т

р

у
м
о

п

р

о Результати досліджень обговорювались на 76-й науково-практичній конференції студентів «Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК»

д Ключові слова: ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ КОНТАКТОР, МАГНІТНА ІНДУКЦІЯ, ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ, КОТУШКА.

х

н

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ СУЧАСНИХ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ КОНТАКТОРІВ.....	9
1.1. Основні види та типи сучасних низьковольтних контакторів.....	9
1.1.1. Основні характеристики контакторів компанії АВВ.....	11
1.2. Основні схеми підключення контакторів.....	13
РОЗДІЛ 2 УМОВИ ВИБОРУ ТА РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОНТАКТОРІВ.....	21
2.1. Основні умови вибору електромагнітного пускача (контактора).....	21
2.1.1. Вибір електромагнітного пускача (контактора) для керування асинхронним електродвигуном.....	21
2.1.2. Вибір кнопок (кнопкового поста керування) до електромагнітного пускача.....	23
2.1.3. Вибір запобіжника для захисту кола керування електромагнітного пускача(контактора).....	23
2.1.4. Вибір автоматичного вимикача для захисту кола керування електромагнітного пускача (контактора).....	24
2.2. Розрахунок основних складових електромагнітних контакторів.....	25
2.2.1. Розрахунок струмоведучого контуру.....	25
2.2.2. Розрахунок розмірів струмовідних частин.....	25
2.2.3. Розрахунок температури нагріву струмопровідних частин у номінальному режимі.....	26
2.2.4. Розрахунок термічної стійкості.....	26
2.2.5. Розрахунок розмірів гнучкого з'єднання.....	27
2.2.6. Визначення щільності струму.....	28
2.2.7. Розрахунок сили контактного натискання.....	28
2.2.8. Перехідний опір контактуючих поверхонь.....	29
2.2.9. Омичний опір контакту.....	29

2.3. Розрахунок комутуючих контактів.....	30
2.3.1. Розрахунок перевищення температури контактної з'єднання.....	30
2.3.2. Розрахунок значення перехідного опору.....	30
2.3.3. Розрахунок нагріву контактів у номінальному режимі.....	31
2.3.4. Розрахунок зносу контактів.....	31
2.4. Розрахунок параметрів короткого замикання.....	32
РОЗДІЛ 3 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ КОТУШКИ КОНТАКТОРА З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО СЕРЕДОВИЩА ELCUT.....	34
3.1. ELCUT. Основні відомості.....	34
3.2. Постановка задачі моделювання.....	35
3.3. Побудова геометричної моделі.....	39
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ В КОТУШКАХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОНТАКТОРІВ.....	41
4.1. Розрахунок статичного магнітного поля.....	41
4.2. Результати моделювання багатовиткової котушки електромагнітного контактора.....	42
4.2.1. Побудова геометричної моделі.....	42
4.2.2. Особливості розподілу електромагнітного поля в котушці контактора.....	43
РОЗДІЛ 5 ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПРИ МОНТАЖІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОНТАКТОРІВ.....	55
ВИСНОВОК.....	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	59

НУБІП України

НУБІП України

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

НУБІП України

АВ – автоматичний вимикач

АД – асинхронний двигун

КМ – контактор модульний

НУБІП України

КМП – котушка магнітного пускача

КТР – контакт теплового реле

КУ – котушка управління

МП – магнітний пускач

НУБІП України

ПК – персональний комп'ютер

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ВСТУП

У системах та пристроях управління та захисту споживачів електричної енергії широко використовуються низьковольтні електромагнітні контактори, які кріпляться пружинними клямками на DIN-рейки [4]. Їх встановлюють, як правило, усередині щитів та комплектних пристроїв модульної конструкції та умовно прийнято називати модульними. Основними перевагами пристроїв на базі модульних апаратів, що визначають їх поширеність та перспективу, є простота монтажу та заміни та можливість реалізувати практично всі затребувані функції управління, захисту та автоматики для різних систем.

Контактор входить до складу електромагнітного пускача, що має той же принцип дії, але доповнений тепловим реле та наділений функціями захисту й керування. За правильного підбору модульних контакторів з урахуванням навантажень і кількості запусків — відключень, термін експлуатації мереж та під'єданого до них обладнання значно збільшується. Вони можуть обслуговувати як побутові, так і промислові потреби [8].

Залежно від їх типів та технічних характеристик, можна виділити наступні сфери застосування: освітлення — системне та аварійне; системи опалення; системи захисту та керування електроприладами й електронним замком у житловому та офісному приміщенні; обслуговування одно- та трифазних електродвигунів в системах вентиляції, ліфтах тощо; сонячна енергетика — захисне обладнання, перетворювачі; електромобілі — станції підзарядки; електромагнітні пускачі.

Контактори можуть застосовуватися в інших мережах і приладах, залежно від вимог стандартизації та їх характеристик граничного навантаження. Вони працюють на струмах 50-250 А, а електромагнітні пускачі в межах 40 А.

Безпечність і легка інтегрованість контакторів до електромережі дозволяє ефективно комутувати роботу пристроїв та груп обладнання. Вони добре поєднуються з іншими модульними пристроями у розподільних шафах і

створюють дієву систему керування внутрішніми електричними мережами цілих будівель та окремих приміщень.

До складу контактора входять: контакти (закритий і відкритий), котушка, пружини, якір, корпус.

Модульні контактори забезпечують дистанційне вмикання і вимикання електричних кіл та проведення струмів як в умовах поточних значень кола, так і в умовах помірних перенавантажень. Доповнені тепловим реле, вони набувають функцій захисту та керування.

Напруга, що подається до котушки контактора, спричиняє утворення магнітного поля. Далі рухома частина притягується до нерухомої, в результаті чого струм проходить обома колами. Коли напруга з котушки знімається, усе повертається до початкових значень.

Високий ступінь захисту сучасних модульних контакторів робить їх безпечними в експлуатації. Компактні корпуси сучасний дизайн і дозволяють заощаджувати достатньо місця в розподільних шафах.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є дослідження впливу магнітного поля, яке виникає в котушці електромагнітних контакторів.

Об'єктом дослідження є електромагнітна система сучасних низьковольтних контакторів.

Предметом дослідження є особливості функціонування електромагнітної системи сучасних низьковольтних контакторів.

Задачі дослідження

- 1) Аналіз електромагнітних систем сучасних низьковольтних контакторів.
- 2) Розрахунок складових електромагнітних контакторів.
- 3) Моделювання електромагнітних полів в середині електромагнітної системи контакторів.
- 4) Особливості розподілу електромагнітного поля в котушках електромагнітних контакторів.
- 5) Правила техніки безпеки при монтажі електромагнітних контакторів.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ СУЧАСНИХ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ
КОНТАКТОРІВ**1.1. Основні види та типи сучасних низьковольтних контакторів**

Контактор - двопозиційний електромагнітний апарат, призначений для частих дистанційних включень силових електричних ланцюгів в нормальному режимі роботи. Контактор є електричним апаратом, призначеним для комутації силових електричних кіл. Замикання або розмикання контактів контактора здійснюється найчастіше під впливом електромагнітного приводу.

Для виконання різних умов роботи, завдань та управління різними видами електричних систем та обладнання існують контактори з різноманітним функціоналом [1].

За типом електричного струму комутуючі пристрої бувають:

- постійного струму – призначені комутації мереж постійного струму;
- змінного струму – виконують своє завдання у мережах змінного струму.

За типами конструкції контактори різняться за кількістю полюсів. Найбільш широко застосовуються однополюсні та двополюсні пристрої, рідше – триполюсні. Триполюсні прилади застосовуються в трифазних електричних мережах змінного струму для керування потужними електродвигунами та іншими пристроями. У промисловості виробляють та використовують багатопольсні контактори, але такі механізми використовуються вкрай рідко та виконують специфічні завдання.

За наявності додаткових систем:

- без дугогасної системи;
- мають дугогасну систему.

Наявність дугогасної системи, про яку було сказано вище, не є обов'язковим конструктивом для мереж 220 В, але обов'язково застосовується в пристроях та

мережах з високою напругою (380 В, 600 В). Така система гасить електричну дугу, що незмінно виникає при високій нарузі, за допомогою поперечного електромагнітного поля в спеціальних камерах.

За типом управління контактором:

ручне (механічне) - оператор сам вмикає або відключає пристрій;

за допомогою живлячої лінії – комутація відбувається дистанційно;

За типом приводу комуючі пристрої бувають електромагнітні та пневматичні. Найпоширеніші та найефективніші – механізми, що працюють за допомогою електромагнітної індукції. Пневматичні переважно застосовуються на

залізничному транспорті (наприклад, у локомотивах поїздів), де є системи стисненого повітря.

За типом монтажу застосовують безкорпусні та корпусні контактори. Перші - монтуються в електричних щитах або всередині електроустановок і не захищені від попадання вологи і пилу, а другі можуть монтуватися в будь-якому місці і дуже часто мають хороший волого-пилезахист.

Основними технічними даними контакторів є номінальний струм головних контактів, граничний струм, що відключається, номінальна напруга комуюваного ланцюга, механічна і комутаційна зносостійкість, допустима кількість включень в годину, власний час включення і відключення. Здатність контактора, як і будь-якого комутаційного апарату, забезпечити роботу за великої кількості операцій характеризується зносостійкістю.

Контактор має такі основні вузли: контактну систему, дугогасний пристрій, електромагніт та систему допоміжних контактів. При подачі напруги на обмотку електромагніта контактора його якір притягується. Рухомий контакт, пов'язаний з якорем електромагніта, замикає чи розмикає головний ланцюг. Дугогасний пристрій забезпечує швидке гасіння дуги, завдяки чому досягається малий знос контактів. Система допоміжних контактів призначена для узгодження роботи контактора з іншими пристроями.

В даний час частота комутації у схемах електроприводу досягає 3600 за годину. Цей режим роботи є найважчим. При кожному увімкненні та вимкненні відбувається знос контактів. Тому вживаються заходи щодо скорочення тривалості горіння дуги при відключенні та зменшення вібрацій контактів. Як правило, контактори застосовуються для комутації електричних ланцюгів при напрузі до 660 В і струмах до 630 А.

1.1.1. Основні характеристики контакторів компанії ABB.

Найпопулярніші бренди контакторів у 2023 році це контактори компаній ABB, Hager, Schneider Electric.

Контактор ABB є пристроєм, контакти якого замикаються або розмикаються котушкою (електромагнітом) [4]. Подали напругу на котушку (електромагніт), і контакти самого контактора залежно від виконання або замкнулися або розімкнулися. Котушки контактора розраховані на напругу як змінного струму (AC), так і постійного (DC), тому при виборі контактора звертайте увагу на цей параметр. Напруга можна підключати від 12 до 415 В, цього теж обов'язково треба звернути увагу, т.к. модульний контактор, розрахований на напругу 12В при подачі на нього 220 просто згорить.

Модульні контактори ABB поділяються на дві серії: ESB та EN. Відмінність в тому, що контактори ESB керуються лише подачею або відключенням напруги і розраховані на струми 20, 24, 40 і 63А, а контактори EN мають додаткове ручне керування (ввімкнення/вимкнення) та розраховані на струми до 40А.

У контакторів два види контактів. Одні контакти – це силові контакти, які розмикають чи замикають силові ланцюги, інші – контакти управління самим контактором, тобто. безпосередньо дають команду на замикання/розмикання силових.

Контакти керування А1-А2 позначаються однаково у всіх контакторах. Саме до них треба подати чи зняти напругу щоб силові контакти розмикалися чи замикалися.

Силові контакти, які включають або відключають навантаження, підключене до контактора, завжди парні 1-2, 3-4, 5-6, 7-8 і т.д.

Кількість пар силових контактів у магнітних пускачів АВВ парна або два або чотири. Позначаються або ПЗ (нормально відкритий) або НЗ (нормально закритий). Тобто, за відсутності напруги на котушці АЛЕ - розімкнуті, при подачі напруги на котушку АЛЕ замикаються, а НЗ відповідно навпаки. Варіації бувають

різними 2НО (два відкритих контакти), 3НО-1НЗ (три відкритих + один закритий) і т.д., і позначаються на корпусі контактора цифрами 40 (чотири контакти АЛЕ), 20 (два контакти АЛЕ), 22 (два АЛЕ та два НЗ), 02 (два НЗ).

Наприклад, з назви контактора АВВ EN40-40N (рис. 1.1.) випливає, що цей модульний контактор розрахований на номінальний струм 40А і має чотири АЛЕ (нормально відкритих) контакту. Також зазначено, що котушка контактора розрахована на напругу 230В змінного чи постійного струму.

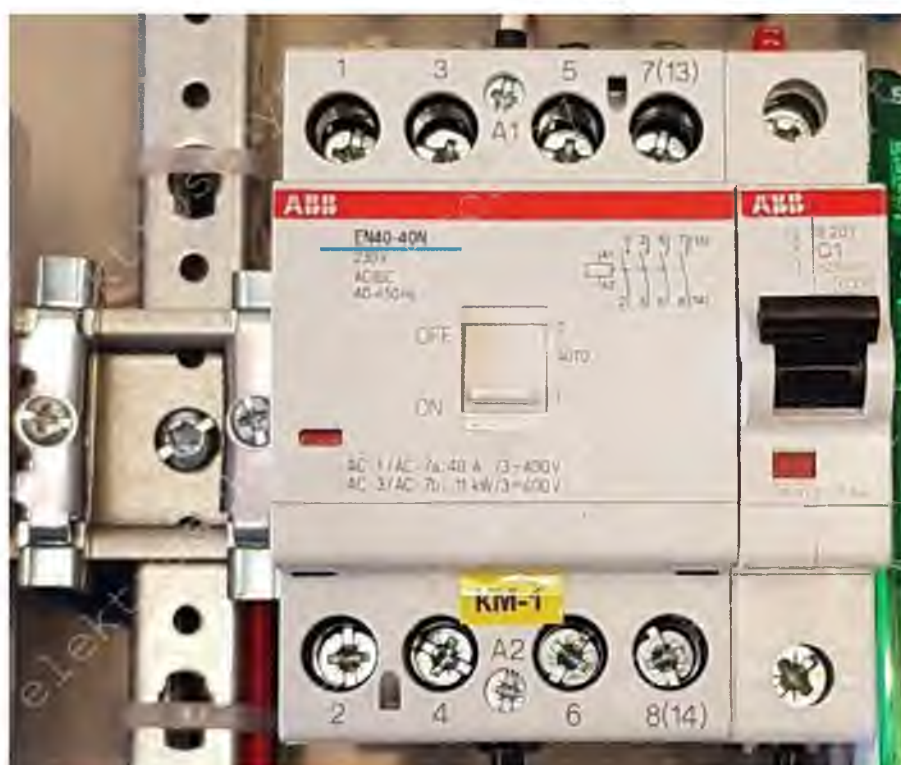


Рис. 1.1. Контактор компанії ABB [4].

Для захисту котушки управління контактора правильно ставити у її ланцюг автоматичний вимикач, і т.к. потужність споживана котушкою мізерна, то номінал автомата краще брати трохи більше 1А.

Контактор ESB 20А займає 1 модуль, 24А - 2 модулі, 40 і 63А - займають по 3 модулі на дин-рейці

Контактори бувають також з ручним управлінням, точніше з комбінованим.

Тобто. можна за допомогою перемикача вмикати та вимикати модульний контактор руками, пересуваючи важіль. На фото нижче показано контактор ABB EN-40-4НО з ручним керуванням.

До контакторів, як і до інших модульних приладів провідних серій ABB, Legrand, Шнейдер Електрик, Хагер, можна прикріплювати з боків додатковий контакт. Тільки слід враховувати, що це “не зовсім повноцінні” контакти, вони мають номінальний струм лише до 6А.

Управління контактором здійснюється за допомогою допоміжного кола оперативного струму, що проходить по котушках контактора. Контактор не має механічних засобів для утримання контактів у включеному положенні, за відсутності керуючої напруги на котушці контактора він розмикає свої контакти.

1.2. Основні схеми підключення контакторів

Контактори випускаються багатьма виробниками електротехнічної продукції та мають різні типи та виконання. При підключенні такого пристрою важливо суворо керуватися рекомендаціями заводу-виробника та нормативною електротехнічною документацією. В інструкції і на самому корпусі приладу обов'язково буде розташовуватися схема підключення даного механізму та його основні характеристики [9].

Класична схема підключення контактора наведена на рис.1.2.

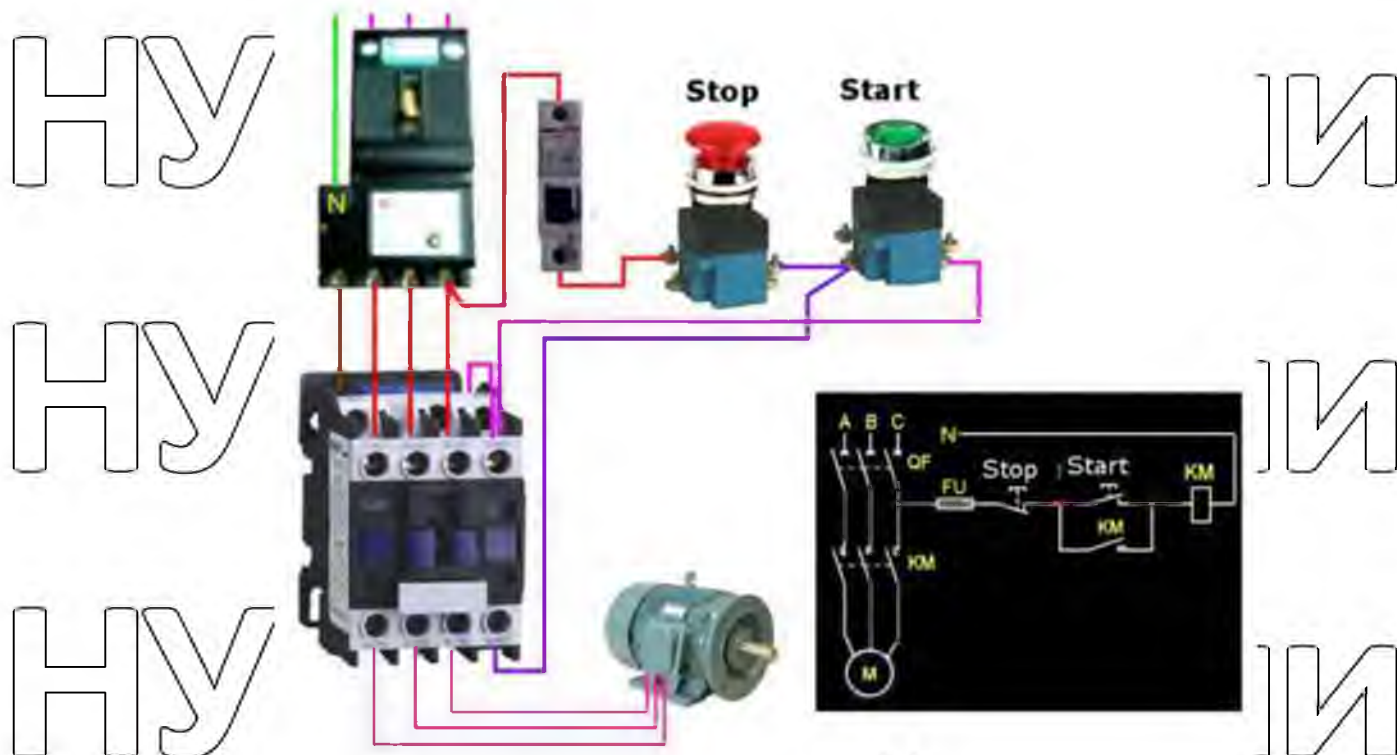


Рис. 1.2. Класична схема підключення контактора.

Залежно від способу керування роботу системи із контакторами можна 2 основними способами:

- підключення за допомогою кнопки. Вона знаходиться безпосередньо перед контактором. Зверніть увагу, що ці конструкції дуже часто потребують постійної напруги. Якщо кнопка розрахована на змінний струм, потрібно буде додатково використовувати випрямляч;

- із використанням теплового реле. Теплове реле може розмикати ланцюг залежно від температурного режиму. Встановлюють реле безпосередньо перед контактором.

Розглянемо схеми увімкнення контактора або магнітного пускача з кнопками «ПУСК» та «СТОП»

Магнітні пускачі (контактори) найчастіше ставлять для включення електродвигуна. Працювати в такому режимі зручніше за наявності кнопок «ПУСК» та «СТОП». Їх послідовно включають у ланцюг подачі фази на вихід магнітної котушки (рис. 1.3)



Рис. 1.3. Схема увімкнення магнітного пускача або контактора з кнопками «ПУСК» та «СТОП».

Зверніть увагу, що при такому способі включення пускач буде в роботі тільки той час, поки утримуватиметься кнопка «ПУСК», а це не те, що потрібно для тривалої роботи двигуна. Тому в схему додають так званій ланцюг самопідхоплення. Її реалізують за допомогою допоміжних контактів на пускачі NO 13 та NO 14, які підключаються паралельно до пускової кнопки (рис.1.4.)

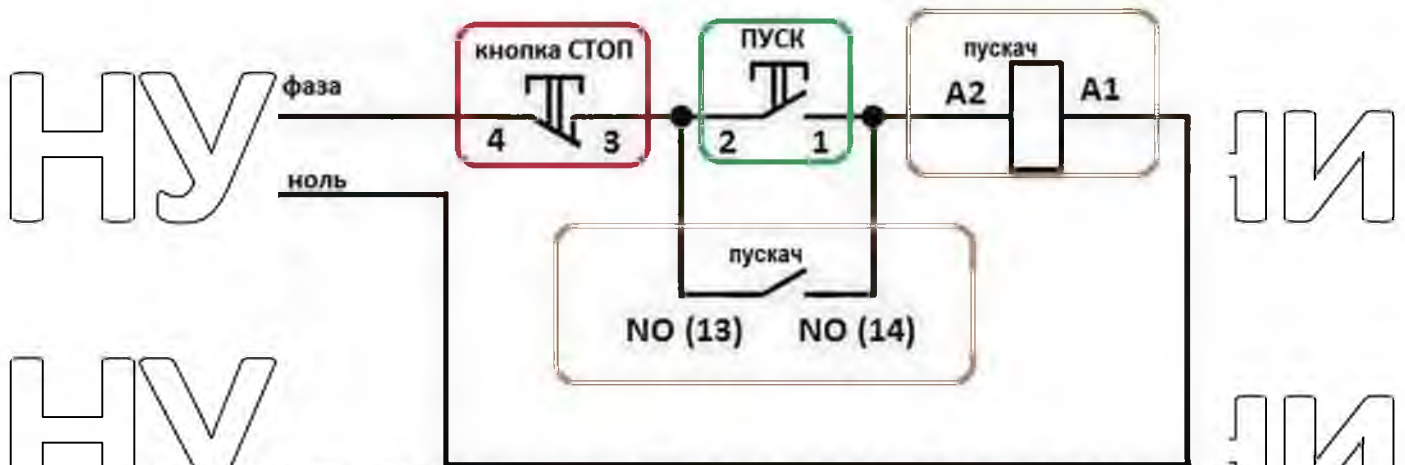


Рис. 1.4. Схема підключення магнітного пускача з котушкою на 220 В та функцією самопідхоплення.

У цьому випадку після повернення кнопки ПУСК у вихідний стан живлення продовжує надходити через ці замкнуті контакти, оскільки магніт вже притягнутий. І живлення надходить доти, доки ланцюг не буде розірвано натисканням кнопки «стоп» або спрацюванням теплового реле, якщо таке є у

схемі.

Живлення для двигуна або будь-якого іншого навантаження (фаза від 220 В) подається на будь-який з контактів, позначених буквою L, а знімається з розташованого під ним контакту в маркуванні T.

Незалежно від того яким чином підключається контактор у системі обов'язково використовується два види мережі: силова та сигнальна. Сигнальна лінія запускає сам контактор, а він, у свою чергу, замикає силову лінію.

Розглянемо основні схеми підключення модульних контакторів.

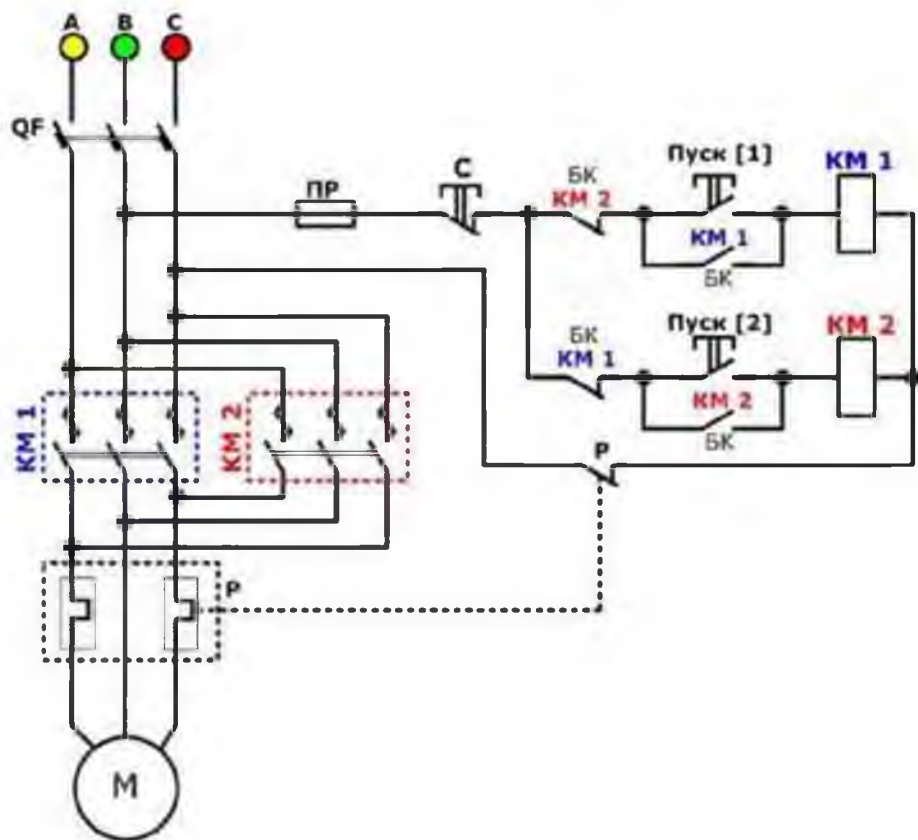


Рис. 1.5. Схема реверсивного вмикання асинхронного двигуна за допомогою контактора (реверсивного).

При підключенні до потужних асинхронних двигунів важливо послідовно підключати з контактором теплове реле, для захисту двигуна від перегріву і автомат для захисту від короткого замикання.

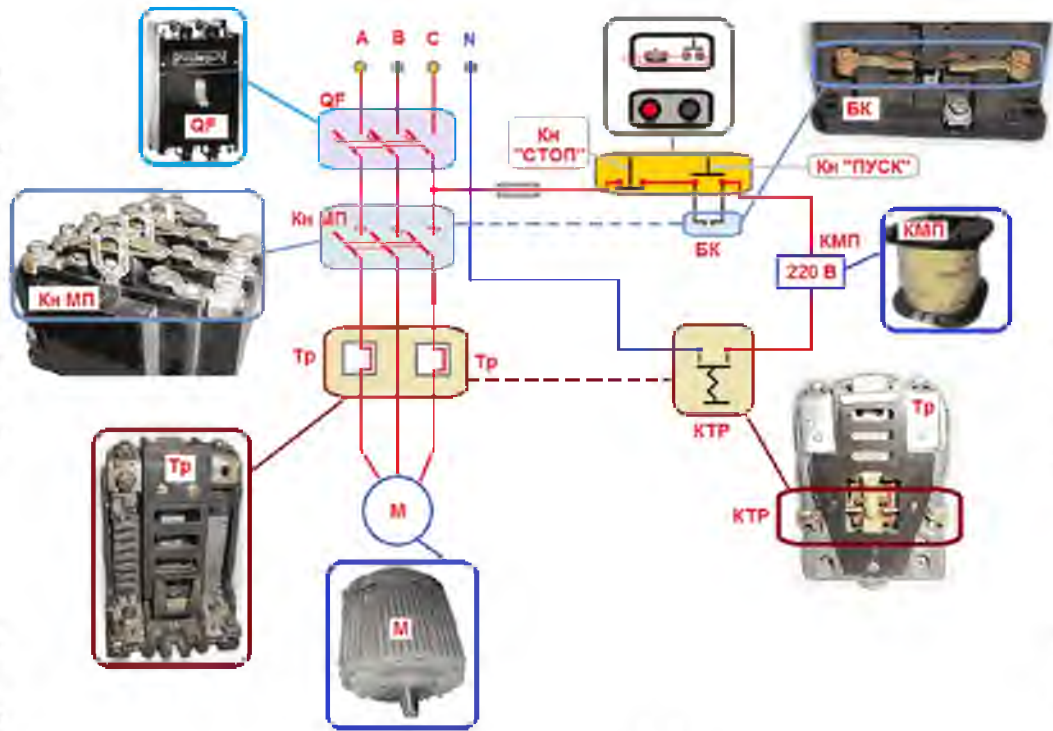


Рис. 1.6. Схеми підключення МП (або КМ) із котушкою на 220 В, де: "СТОП" - кнопка "Стоп"; "ПУСК" - кнопка "Пуск"; КМП - котушка МП (магнітного пускача); МП – силві контакти МП; БК – блок контакт МП; Тр – нагрівальний елемент теплового реле; КТР – контакт теплового реле; М – електродвигун.

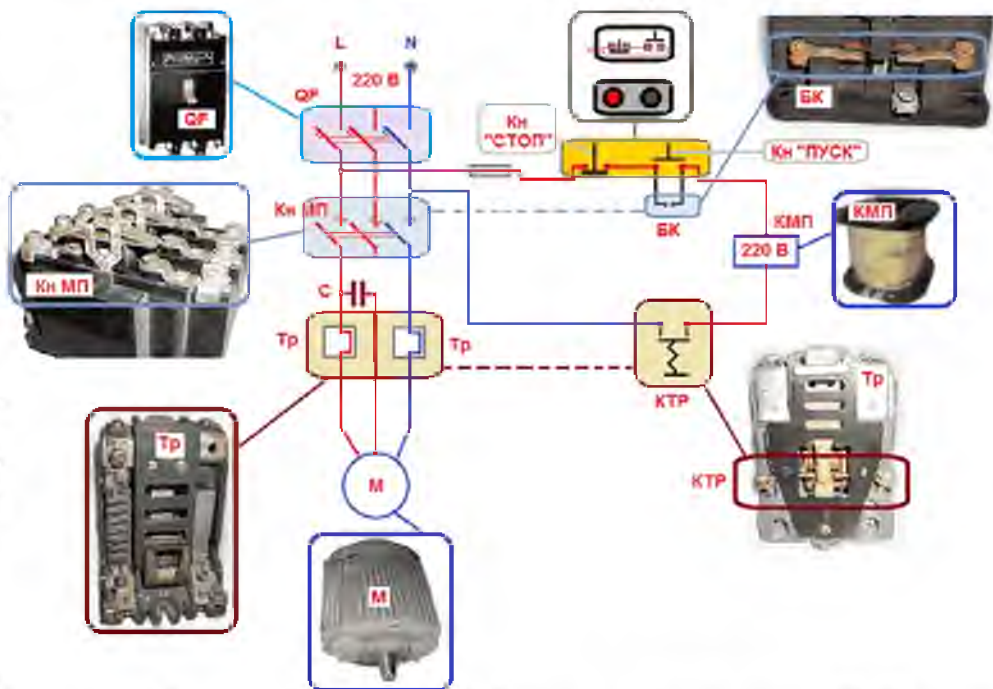


Рис. 1.7. Схема підключення електродвигуна (рекомендований тип підключення обмоток трикутник) на 220 В.

У даній схемі є теплове реле, яке через свій додатковий контакт (нормально замкнений) дублює функцію кнопки «СТОП».

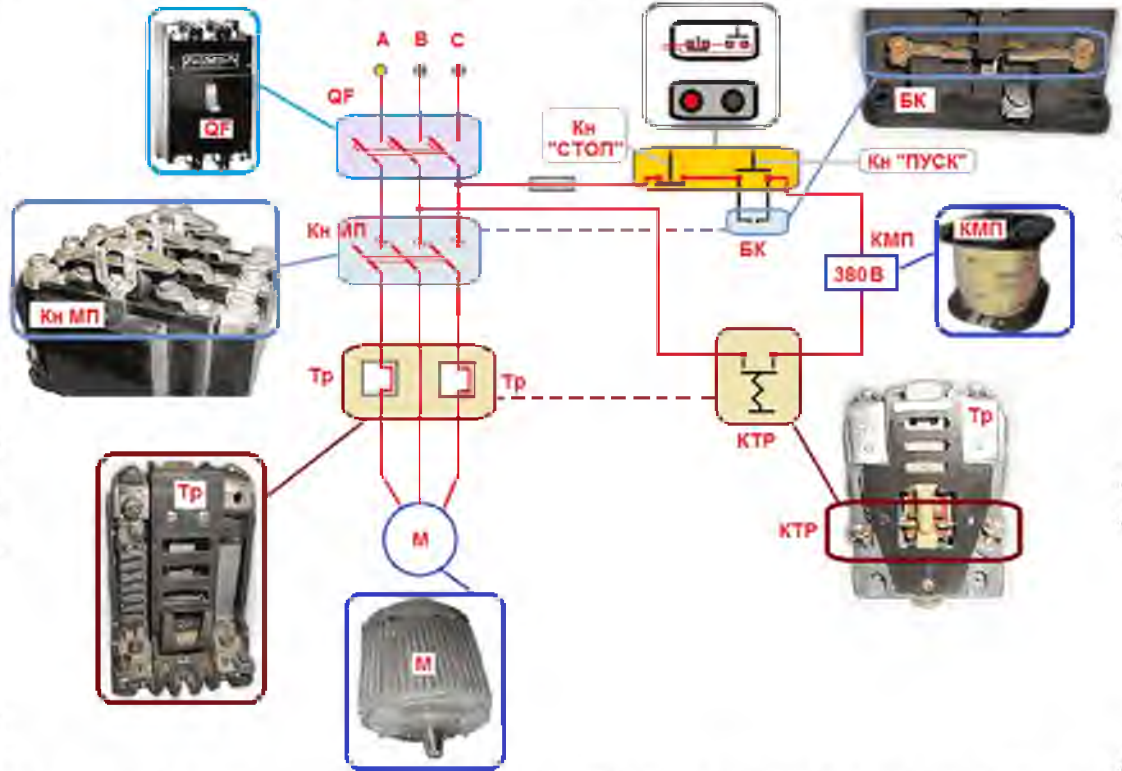


Рис. 1.8. Схема підключення МП (або КМ) із котушкою на 380 В.

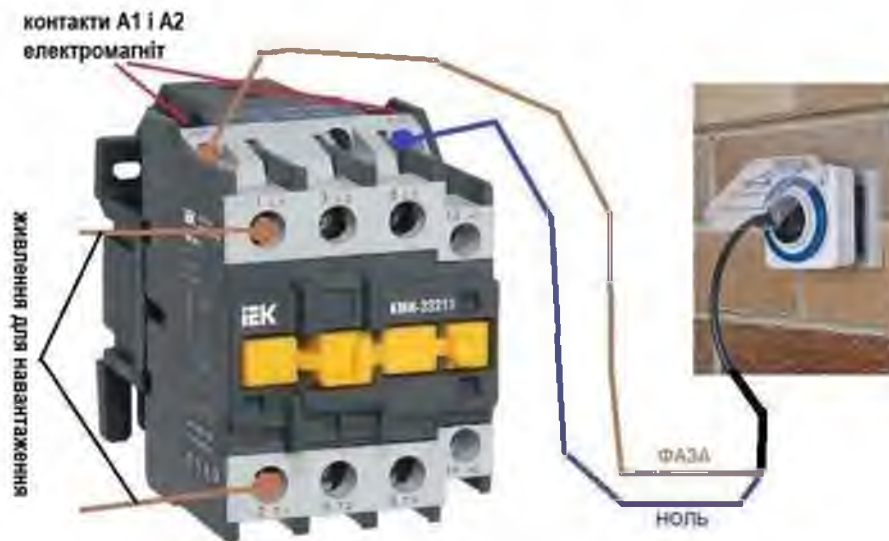


Рис. 1.9. Підключення контактора з котушкою на 220 В.

НУБІП України

При підключенні однофазного живлення до котушки неважливо на який вивід подавати нуль, а на який фазу. Найчастіше на контакт електромагніта А2 подають фазу, так як для зручності цей контакт виведений ще на нижній стороні корпусу. І в деяких випадках зручніше задіяти його, а "нуль" тоді підключити до контакту електромагніта А1 (рис. 1.9.).

Також можливий варіант подачі живлення на котушку через реле часу або датчик освітлення, а до контактів підключити лінію живлення вуличного освітлення. У цьому випадку фаза заводиться на контакт L1, а нуль можна взяти, підключившись до відповідного роз'єму виходу котушки А2 (рис. 1.9.).

Відповідно до типу використовуваного електроустаткування, у кожному випадку передбачена індивідуальна схема підключення модульного контактора.

Найбільшого поширення набув стандартний варіант, де використовується лише один прилад, а також схеми – реверсивна та з підключенням однофазних споживачів. Розглянемо кожну з них.

Найпоширеніша схема підключення трифазного електродвигуна через контактор модульний КМ (рис. 1.10.).



Рис. 1.10. Схема підключення трифазного електродвигуна через модульний контактор.

Для керування використовуються звичайні кнопки ПУСК та СТОП. Захист від перевантаження здійснюється за допомогою теплового реле. На випадок коротких замикань електричний ланцюг обладнання автоматичним вимикачем.

Інша схема – реверсивна (рис. 1.11.), вона застосовується під час підключення модульного контактора до електродвигуна, щоб з'явилася функція реверсу. Вона є необхідною у різних підйомних механізмах, верстатах та іншому обладнанні. У цьому випадку підключається ще один комутуючий пристрій. Він бере участь у зміні місць двох фаз, що призводить до зміни напрямку обертання валу. Ця схема також доповнена захисними засобами – тепловим реле та автоматичним

вимикачем.

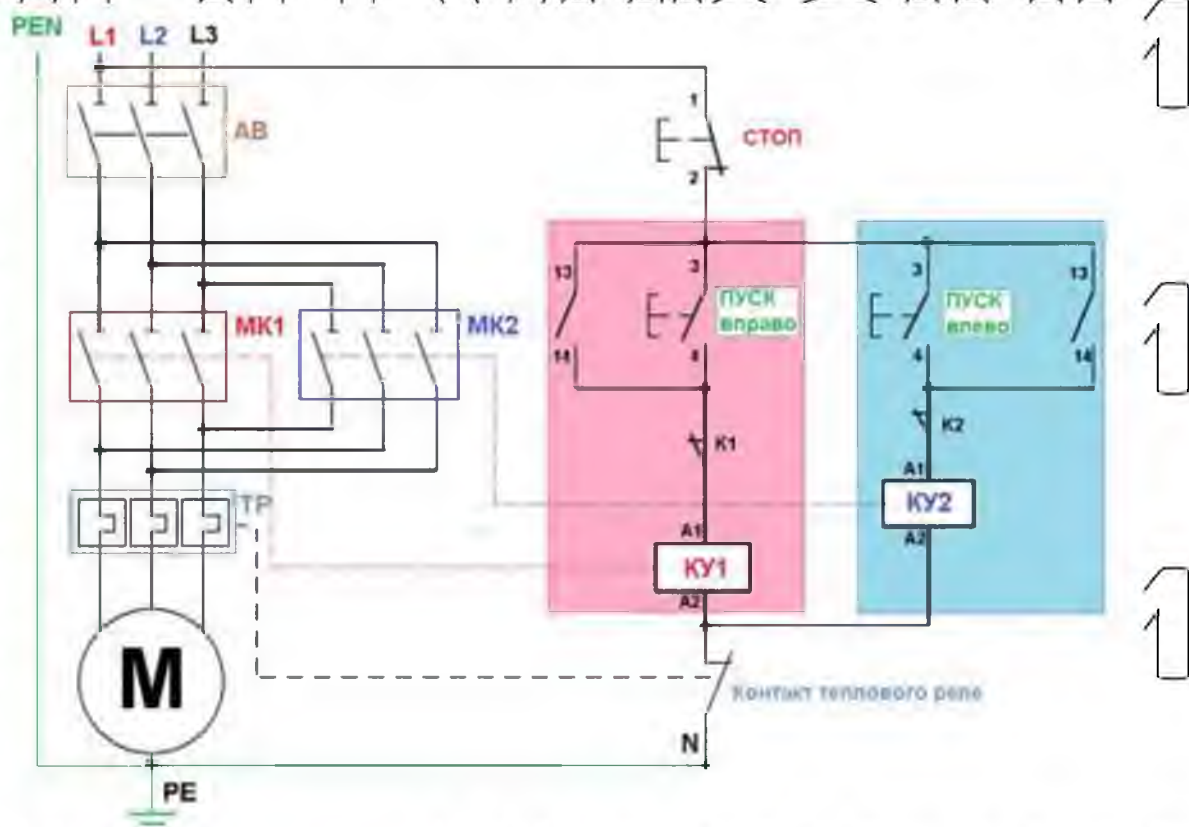


Рис. 1.11. Схема реверсивного вмикання модульного контактора до електродвигуна.

РОЗДІЛ 2

УМОВИ ВИБОРУ ТА РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОНТАКТОРІВ

2.1. Основні умови вибору електромагнітного пускача (контактора)

Важливо знати, що чим більші габарити контактора, тим з більшою потужністю навантаженням він може впоратися. Важливо звернути увагу на те, щоб напруга котушки дорівнювала керуючій напрузі, а контакти могли б витримати навантаження при підключенні всіх споживачів. Існує 3 класи комутаційної здатності таких приладів (А, Б і В). Краще вибирати виріб із невеликим запасом цього параметра [2].

Перед тим, як підібрати контактор, важливо мати уявлення про умови експлуатації. Виходячи з цього, підбирається оптимальний ступінь захисту.

Наприклад, якщо обладнання перебуватиме в електрошафі, достатньо придбати модель зі ступенем захисту IP20. Для запилених приміщень або об'єктів з підвищеною вологістю слід вибирати більш захищені корпуси (IP45 або 65). Від перевантажень може врятувати модуль захисту, що оснащений тепловим реле.

2.1.1. Вибір електромагнітного пускача (контактора) для керування асинхронним електродвигуном.

Вибір електромагнітного пускача (контактора) для керування асинхронним електродвигуном слід виконувати в послідовності, наведеній в табл. 2.1.

Вибраний електромагнітний пускач необхідно перевірити на можливість його роботи в категорії застосування АС-3 (додаток Л) [6].

У категорії застосування АС-3 магнітний пускач повинен включати в нормальному режимі комутації струм:

$$I_0 = 6I_{\text{ном.р}} \geq I_{\text{пуск дв}} \quad (2.1)$$

а в режимі рідких комутацій

$$I_0 = 10I_{\text{ном.р}} \geq I_{\text{пуск дв уд,}} \quad (2.2)$$

де $I_{\text{ном.р}}$ – номінальний робочий струм електромагнітного пускача (комутаційного апарата).

Таблиця 2.1

Вибір електромагнітного пускача для дистанційного вмикання і вимикання трифазного асинхронного електродвигуна

Умова вибору	Формули для розрахунків і перевірки правильності вибору
1. За номінальною напругою пускача	$U_{\text{нп}} \geq U_{\text{мережі}},$ де $U_{\text{нп}}$ – номінальна напруга електромагнітного пускача, В $U_{\text{мережі}}$ – номінальна напруга мережі живлення, В
2. За номінальним робочим струмом пускача	$I_{\text{нрп}} \geq I_{\text{н.дв}},$ де $I_{\text{нрп}}$ – номінальний робочий струм електромагнітного пускача, А $I_{\text{н.дв}}$ – номінальний струм керованого електродвигуна, А
3. За призначенням	Нереверсивний, реверсивний, для пуску електродвигунів з перемиканням обмоток із зірки на трикутник, з апаратом захисту (теплове реле, позисторний захист) чи без нього
4. За ступенем захисту від дії навколишнього середовища й наявністю кнопок «Пуск» і «Стоп» та сигнальних ламп	IP XX
5. За кліматичним виконанням і категорією розміщення	Див. додатки И – Л [6]
6. За родом струму й напругою котушки пускача	$U_{\text{кот.ном.}} = U_{\text{кер.}},$ де $U_{\text{кот.ном.}}$ – номінальна напруга котушки електромагнітного пускача, В; $U_{\text{кер}}$ – напруга кола керування, В
7. За стійкістю контактів головного кола проти комутаційних спрацювань залежно від частоти вмикань пускача, категорії застосування і необхідного строку його служби (6–10 років).	Під час застосування апаратів у категорії АС–3 і частоті вмикань за добу більше 400 приймають пускачі виконання А, за частоти вмикань від 120 до 400 циклів за добу – виконання Б та за частоти вмикань менше 120 циклів за добу – виконання В.

2.1.2. Вибір кнопок (кнопкового поста керування) до електромагнітного пускача.

Кнопковий пост керування слід вибирати, користуючись

додатками Н – М. [6]

2.1.3. Вибір запобіжника для захисту кола керування електромагнітного пускача(контактора).

Запобіжник для захисту кола керування електромагнітного пускача слід вибирати за такими умовами:

- за номінальною напругою запобіжника $U_{зп.ном.}$, яка повинна бути не меншою номінальної напруги мережі:

$$U_{зп.ном.} \geq U_{мер.ном.}; \quad (2.3)$$

- за номінальним струмом основи $I_{осн.ном.}$, який повинен бути не меншим номінального струму плавкої вставки $I_{пл вст.ном.}$, а останній – не меншим розрахункового струму $I_{пл вст.розрах.}$, тобто:

$$I_{осн.ном.} \geq I_{пл вст.ном.}; \quad (2.4)$$

$$I_{пл вст.ном.} \geq I_{пл вст.розрах.} \quad (2.5)$$

- за конструкційним виконанням,

- за кліматичним виконанням і категорією розміщення.

Розрахунковий струм плавкої вставки дорівнює струму, споживаному котушкою вибраного електромагнітного пускача(контактора), а за наявності додаткового активного (такого, що споживає струм) пристрою слід додати його споживаний струм, а також струм сигнальної лампи, якщо вона передбачена схемою керування.

2.1.4. Вибір автоматичного вимикача для захисту кола керування електромагнітного пускача (контактора).

Автоматичний вимикач для захисту кола керування електромагнітного пускача слід вибирати за умовами наведеними у табл. 2.2.:

Таблиця 2.2

Умови вибору автоматичного вимикача для захисту кола керування електромагнітного пускача (контактора)

Умова вибору	Формули для розрахунків і перевірки правильності вибору
1. За номінальною напругою автоматичного вимикача	$U_{на} \geq U_{мережі}$ де $U_{на}$ – номінальна напруга автоматичного вимикача, В $U_{мережі}$ – номінальна напруга мережі живлення, В
2. За номінальним струмом автоматичного вимикача	У разі захисту автоматичним вимикачем одного електродвигуна: $I_{на} \geq I_{н.кола}$ (Див. примітку)
3. За номінальним струмом розчіплювачів	У разі захисту автоматичним вимикачем одного електродвигуна: $I_{н.розч.} \geq I_{н.кола}$ де $I_{н.розч.}$ – номінальний струм розчіплювача (теплового, електромагнітного, комбінованого) автоматичного вимикача, А
4. За кратністю струму відсічки $K_{відс}$ і типом захисної характеристики	Див. додаток Р [6]
5. За конструкційним виконанням	Див. додаток Р [6]
6. За кліматичним виконанням і категорією розміщення	Див. додаток Р [6]

Примітка: Розрахунковий струм кола керування $I_{н.кола}$ дорівнює струму, споживаному котушкою вибраного електромагнітного пускача (контактора), а за наявності додаткового активного (такого, що споживає струм) пристрою, вибраного у розділі «Спеціальне завдання» курсового проекту слід додати його споживаний струм, а також струм сигнальної лампи, якщо вона передбачена схемою керування.

2.2. Розрахунок основних складових електромагнітних контакторів

2.2.1 Розрахунок струмоведучого контуру.

Розрахунок струмопровідних частин контактора в номінальному режимі роботи проводимо з урахуванням тривалого еквівалентного струму [5]. Під еквівалентним струмом розуміють постійний за величиною струм, який при тривалому протіканні по провіднику викликає такий же нагрівання, як і реальний струм, що змінюється в часі згідно з цим режимом роботи:

$$I_{\text{ЭКВ}} = I_{\text{Н}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}\%}{100} + \frac{Z}{600} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}\%}{100}}} = 160 \cdot \sqrt{\frac{60}{100} + \frac{1000}{600} \cdot \sqrt{\frac{60}{100}}} = 248 \text{ А.} \quad (2.6)$$

де: ПВ% - тривалість включення; Z – допустиме число циклів включення; $I_{\text{Н}}$ - номінальний струм головного ланцюга, А.

Порівнюючи $I_{\text{Н}}$ і $I_{\text{ЭКВ}}$ подальший розрахунок струмовідного контуру проводимо за більшим із цих значень. Т.к. $I_{\text{ЭКВ}} > I_{\text{Н}}$, то вибираємо $I = I_{\text{ЭКВ}} = 248 \text{ А.}$

2.2.2. Розрахунок розмірів струмовідних частин.

Розміри шин визначаються з умови задовільного теплового режиму, як і режимі штатного навантаження, і у режимі короткого замикання.

За вибраним значенням розрахункового струму таблиці 2 [5] вибираємо попередні розміри мідної шини $b \times a$ 20×3 і розраховуємо коефіцієнт геометрії:

$$b = a \cdot k_{\Gamma}, \quad k_{\Gamma} = \frac{b}{a} = \frac{20}{3} = 6,67. \quad (2.7)$$

Проводимо розрахунок розміру струмопровідної шини за формулою:

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{I^2 \cdot \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta_d)}{2 \cdot k_T \cdot (1 + k_T) \cdot k_I \cdot (\theta_d - \theta_0)}} = \sqrt[3]{\frac{248^2 \cdot 1,68 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 0,0043 \cdot 120)}{2 \cdot 10 \cdot (1 + 6,67) \cdot 6,67 \cdot (120 - 40)}} = 0,0026 \text{ м} \quad (2.8)$$

де: ρ_0 - питомий електричний опір матеріалу струмоведучої частини апарату для мідної шини $\rho_0 = 1,68 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; α - температурний коефіцієнт металу контактів

для міді $\alpha = 0,0043 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; θ_d - допустима температура нагріву струмопровідних частин для міді $\theta_d = 120 \text{ } ^\circ\text{C}$; θ_0 - температура навколишнього середовища

$\theta_0 = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$; k_T - коефіцієнт тепловіддачі, $k_T = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$.

Умова $a \leq a_{\text{таб}}$ - дотримується, шина обрана правильно.

2.2.3. Розрахунок температури нагріву струмопровідних частин у номінальному режимі.

Температуру нагрівання струмопровідних частин знаходимо з умови, що перехідний опір шинного з'єднання дорівнює нулю, тоді

$$\theta_k = \theta_0 + \frac{\rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta_d) \cdot I^2}{k \cdot q \cdot p} = 40 + \frac{1,68 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 0,0043 \cdot 120) \cdot 248^2}{10 \cdot 60 \cdot 10^{-9} \cdot 46} = 95,472 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.9)$$

де: $p = 2 \cdot (a + b) = 2 \cdot (0,003 + 0,02) = 0,046 \text{ м}$ і $q = a \cdot b = 0,003 \cdot 0,02 = 60 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ - периметр і площа поперечного перерізу відповідно.

Умова $\theta_k < \theta_d$ виконується.

2.2.4. Розрахунок термічної стійкості.

При короткому замиканні в ланцозі струмовідного контуру протікають надструми. Проте внаслідок їх короткочасної дії можна припустити значно вищі значення перевищення температури, ніж у номінальному режимі роботи. При

цьому апарат повинен мати термічну стійкість. Допустиму температуру нагрівання струмопровідних частин у режимі короткого замикання приймемо рівною $\theta_{\text{кз}} = 200 \dots 250 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Імпульс струму дорівнює:

$$I_{\text{кз}}^2 = \frac{\gamma \cdot c \cdot q^2}{\rho_0 \cdot \alpha} \cdot \ln \frac{1 + \alpha \cdot \theta_{\text{кз}}}{1 + \alpha \cdot \theta_{\text{д}}} = \frac{8900 \cdot 390 \cdot (60 \cdot 10^{-6})^2}{1,68 \cdot 10^{-8} \cdot 0,0043} \cdot \ln \frac{1 + 0,0043 \cdot 300}{1 + 0,0043 \cdot 120} = 73,554 \cdot 10^6 \quad (2.10)$$

де: γ – щільність матеріалу струмопровідної шини для міді, $8900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; c – теплоємність матеріалу струмопровідної шини для міді, $390 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$.

2.2.5. Розрахунок розмірів гнучкого з'єднання.

В апаратах управління, крім плоских контактних з'єднань, широко застосовуються контактні з'єднання з гнучкими зв'язками.

Ці з'єднання здійснюють струмовий зв'язок рухомого контакту апарату з струмопідвідними деталями. Гнучкі з'єднання, як правило, виконуються з еластичної мідної стрічки товщиною 0,1 мм і менше, або з багатожилкового плетеного провідника, що складається з мідних жил діаметром 0,08-0,1 мм. При роботі гнучкий зв'язок не повинен мати різких перегинів.

Перетин міді гнучкого з'єднання має бути близьким до перерізу шини

$$q_{\text{гс}} = q = 60 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Ширина шунта приблизно дорівнює ширині шини:

$$b_{\text{гс}} = b = 0,02 \text{ м}.$$

Товщина гнучкого шунту:

$$a_{\text{гс}} = \frac{q_{\text{гс}}}{b_{\text{гс}} \cdot k_3} = \frac{60 \cdot 10^{-6}}{0,02 \cdot 0,785} = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (2.11)$$

де: $k_3 = 0,785$ – коефіцієнт заповнення.

2.2.6. Визначення щільності струму.

Щільність струму визначається відношенням величини струму, що проходить через контактне з'єднання до повної поверхні контактування.

Для мідних шин при струмі $I = (200...2000)$ А щільність струму дорівнює

$$j_m = [0,31 - 1,05 \cdot 10^{-4} \cdot (I - 200)] = [0,31 - 1,05 \cdot 10^{-4} \cdot (248 - 200)] = 0,305 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2} \quad (2.12)$$

2.2.7. Розрахунок сили контактного натискання.

$$P_k = f_k \cdot S_1 = 9 \cdot 845,39 = 7608,51 \text{ Н}, \quad (2.13)$$

де: f_k - питомий тиск в контактуючих частинах за таблицею 3 [4] $f_k = 9 \text{ Н/мм}^2$

; S_1 - площа контакту, мм^2 .

$$S_1 = \frac{I}{j_m} = \frac{248}{0,304} = 813,39 \text{ мм}^2. \quad (2.14)$$

За величиною необхідного контактного натискання вибираємо болти М10 з перетином 50 мм^2 і силою затяжки $8,6 \text{ кН}$ за таблицею 4 [5].

При короткому замиканні ланцюга, що містить контактні з'єднання, виникають додаткові ефекти, обумовлені появою великих механічних напружень внаслідок неоднакового температурного коефіцієнта розширення болтів і струмопровідних частин. Це призводить до того, що в болтах з'являються залишкові деформації, які при охолодженні контактного з'єднання викликають

ослаблення натискання в контактах, а відтак підвищення перехідного опору і нагрівання контакту при нормальному режимі роботи.

Відстань між центрами болтів вибирається щонайменше $(2,2...2,4) \cdot d$, де d - діаметр болта, м.

Як показують досвідчені дані, перевищення температури нагріву болтів становить приблизно 25% від перевищення температури струмопровідних частин. Цю обставину необхідно враховувати при виборі зусиль натягу болтів.

Для зниження впливу залишкових деформацій рекомендується у болтових з'єднаннях використовувати пружинні шайби.

2.2.8. Перехідний опір контактуючих поверхонь.

Цей опір утворюється за допомогою струмопровідних частин, стягнутих кількома болтами, і визначається так:

$$R_K = \frac{k_{ПХ} \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \alpha \cdot \theta_{д}\right)}{m \cdot (0,102 \cdot P_{к.табл})^n} = \frac{0,24 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot 0,0043 \cdot 120\right)}{1 \cdot (0,102 \cdot 8,6 \cdot 10^3)^{0,6}} = 5,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}, \quad (2.15)$$

де: $k_{ПХ}$ - коефіцієнт, що залежить від матеріалу і стану поверхні контактуючих поверхонь таблиця 5 [5], Ом·кг⁻ⁿ; n – коефіцієнт дотику для лінійного контакту знаходиться в межах 0,5 ... 0,7; $P_{к.табл} = 8,6$ кН.

2.2.9. Омичний опір контакту.

Опір $R_{к1}$ відрізняється від опору прямої ділянки контактуючих частин за рахунок викривлення ліній струму в місці контактування. Це призводить до підвищення опору контактної сполуки, яка враховується поправним коефіцієнтом

$$R_{к1} = k_c \cdot \frac{\rho_0 \cdot l}{q} = 15,38 \cdot \frac{1,68 \cdot 10^{-3} \cdot 40}{0,06} = 16,61 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}, \quad (2.16)$$

де: k_c - поправочний коефіцієнт рис. 2 [5]; l – довжина контактного з'єднання:

$$l = \frac{S}{b} = \frac{813,39}{20} = 40 \text{ мм}, \quad (2.17)$$

$$k_c = f\left(\frac{l}{a}\right) = f\left(\frac{40}{6}\right) = 15,38 \quad (2.18)$$

Повний опір контактного з'єднання.

$$R_{к0} = R_K + R_{к1} = 5,5 \cdot 10^{-6} + 16,61 \cdot 10^{-5} = 17,16 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}. \quad (2.19)$$

2.3. Розрахунок комутуючих контактів

Комутуючі контакти, як один з основних елементів струмопровідного контуру, здійснюють електричне з'єднання двох або декількох струмопроводів для переходу струму з одного струмопроводу в інший.

Конструктивна форма, розміри та параметри контактних систем, в основному, визначаються двома факторами: струмом, що протікає по контактах, та напругою мережі, при якому контакти працюють.

Контактні системи апаратів управління працюють у номінальному режимі при струмах, що досягають сотень і тисяч ампер, а короточасних режимах – десятків і сотень кілоампер. Напруга комутованих мереж не перевищує 1140 В, а в перехідних режимах досягає кількох кіловольт.

2.3.1. Розрахунок перевищення температури контактного з'єднання.

При нормальному режимі температура контактного з'єднання не повинна перевищувати температуру нагрівання шин, що примикають до нього, більше ніж на 10 °С і бути більшою за допустиму.

$$\theta_{\text{с}} = \frac{I^2 \cdot R_{\text{к0}}}{k_{\text{т}} \cdot S_{\text{к}}} = \frac{248^2 \cdot 17,16 \cdot 10^{-5}}{10 \cdot 1,84 \cdot 10^{-3}} = 3,45204 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2.20)$$

де: $S_{\text{к}}$ – повна зовнішня поверхня контактного з'єднання;

$$S_{\text{к}} = 2 \cdot (a + b) \cdot l = 2 \cdot (0,02 + 0,003) \cdot 0,04 = 1,84 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \quad (2.21)$$

2.3.2. Розрахунок значення перехідного опору.

Визначення величини перехідного опору комутуючих контактів необхідне виявлення теплових втрат у контактній точці.

$$R_{\text{пх}} = \frac{k_{\text{пх}} \cdot (1 + \frac{2}{3} \cdot \alpha \cdot \theta_{\text{п}})}{m \cdot (0,102 \cdot P_{\text{к}})^{0,6}} = \frac{0,24 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + \frac{2}{3} \cdot 0,0043 \cdot 120)}{1 \cdot (0,102 \cdot 38,95)^{0,6}} = 1,4112 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}, \quad (2.22)$$

де: n – коефіцієнт форми контактної поверхні (0,5÷0,7); 2/3-коефіцієнт, що враховує зменшення температури в міру віддалення від майданчика торкання; $k_{\text{пх}}$ – коефіцієнт, що враховує матеріал та стан контактної поверхні таблиця 5 [5].

2.3.3. Розрахунок нагріву контактів у номінальному режимі.

Падіння напруги в струмоведучому контурі апарату при замкнутих комутуючих контактах дорівнює:

$$U_{\text{к}} = I \cdot R_{\text{пх}} = 248 \cdot 1,4112 \cdot 10^{-4} \approx 35 \text{ мВ}. \quad (2.23)$$

Перевищення температури контактного майданчика розраховується за формулою:

$$t_{\text{к.п.п}} = \frac{I^2 \cdot R_{\text{пх}}^2}{8 \cdot \rho_0 \cdot \lambda} = \frac{248^2 \cdot (1,4112 \cdot 10^{-4})^2}{8 \cdot 1,68 \cdot 10^8 \cdot 390} = 24,233 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.24)$$

За величиною $U_{\text{к}}$ таблиці 6 [5] визначаємо допустиме перевищення температури. Перевищення температури допускається.

2.3.4. Розрахунок зносу контактів.

Знос контактів відбувається як із замикання, і при розмикання ланцюга струму. Мірою зносу контактів є зменшення провалу, а також обсягу і маси металу, що видаляється з контактної поверхні.

Розрахунок питомого масового зносу виконаємо за формулою:

$$G_{\text{рз}} + G_{\text{зм}} = k_{\text{нер}} \cdot (k_{\text{рз}} \cdot I_{\text{от}}^2 + k_{\text{зм}} \cdot I_{\text{вк}}^2) \cdot 10^{-9} = \\ = 2 \cdot (0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1080^2 + 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 450^2) \cdot 10^{-9} = 547,56 \cdot 10^{-9} \text{ кг}, \quad (2.25)$$

де: $k_{\text{нер}}$ – коефіцієнт нерівномірності $k_{\text{нер}} = 1,1 \dots 2,5$; $k_{\text{рз}}, k_{\text{зм}}$ – коефіцієнти зносу
 $k_{\text{рз}} = k_{\text{зм}} = 0,2 \cdot 10^{-3}$ кг/А²; $I_{\text{от}}$ – струм відключення ($I_{\text{от}} = 6 \cdot I_{\text{н}}$), А;
 $I_{\text{вк}}$ – струм включення ($I_{\text{вк}} = 2,5 \cdot I_{\text{н}}$), А.

Розрахунок зношеної частини об'єму контакту

$$V_{\text{изн}} = \frac{N}{\gamma} \cdot (G_{\text{рз}} + G_{\text{зм}}) = \frac{0,05 \cdot 10^6}{8900} \cdot 0,55 \cdot 10^{-6} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3, \quad (2.26)$$

де: N – зносостійкість; γ – щільність матеріалу контакту (для міді 8900 кг/м³).

Розрахунок лінійного зносу

$$L_{\text{изн}} = \frac{V_{\text{изн}}}{S_1} = \frac{3 \cdot 10^{-6}}{813 \cdot 10^{-6}} = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (2.27)$$

Розрахунок провалу контакту

$$\sigma_{\text{п}} = 2 \cdot L_{\text{изн}} = 2 \cdot 3,7 \cdot 10^{-4} = 7,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}. \quad (2.28)$$

2.4. Розрахунок параметрів короткого замикання

У режимі короткого замикання по контактах апарата протікає надструм, що тривалістю не перевищує кількох секунд, але за величиною значно перевищує номінальний. В результаті цього, в місці контактування виділяється велика кількість тепла, в десятки та сотні разів більше, ніж за тривалого режиму роботи.

У точці контакту з'являються електродинамічні сили стягування, які прагнуть

відкинути один контакт від іншого і тим самим зменшити контактне натискання.

Крім електродинамічних сил стягування на контакти діють сили від струмоведучого контуру, які також збільшують електродинамічні сили стягування. Таким чином, на місці контактування збільшується перехідний опір і розігрів, і можливе зварювання, і як наслідок – вихід апарату з ладу.

Основним завданням розрахунку нагріву контактів у режимі короткого замикання є визначення стійкості замкнених контактів до струмів короткого замикання.

Розрахунок початкового струму зварювання

$$I_{н.св} = k_{св} \sqrt{P_K} = 2900 \cdot \sqrt{38,95} = 18098,9 \text{ А} \quad (2.29)$$

де: $k_{св}$ - коефіцієнт, вибирається з таблиці 7 [5] в залежності від конструкції контактів і форми їх поверхні вибираємо Г-подібний.

Розрахунок струму приварювання

$$I_{пр} = 10 \cdot I = 10 \cdot 248 = 2480 \text{ А} \quad (2.30)$$

Розрахунок сили електродинамічного відштовхування

$$P_{зду} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I_{пр}^2 \cdot \ln \frac{S_K}{S_0} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 2480^2 \cdot \ln \frac{1,84 \cdot 10^{-4}}{0,1 \cdot 10^{-6}} = 12,1 \text{ Н} \quad (2.31)$$

де: S_0 - переріз майданчика зминання в контактї:

$$S_0 = \frac{P_K}{\sigma_{см}} = \frac{38,95}{383 \cdot 10^6} = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (2.32)$$

де $\sigma_{см} = 383 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ – межа міцності матеріалу контактів на зминання.

Отже, умова $P_{зду} < P_K$ виконується.

РОЗДІЛ 3

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ КОТУШКИ
КОНТАКТОРА З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО СЕРЕДОВИЩА

ELCUT

3.1. ELCUT. Основні відомості

Існує кілька підходів до розрахунку і проектування об'єктів електротехніки.

Найбільш поширеним є аналітичний підхід, в якому на підставі теоретичного опису фізичних (електромагнітних, теплових та механічних) процесів і накопиченого досвіду здійснюється розрахунок головних геометричних розмірів та основних характеристик електричних машин, апаратів відповідно до технічного завдання. Другим етапом проектування електричної машини є створення дослідного зразка для проведення ряду експериментів щодо уточнення параметрів та характеристик машини в номінальному та перехідному режимах. У деяких випадках створення дослідного зразка можна замінити чисельним моделюванням МКЕ, яке значно підвищує точність рішення (в порівнянні з аналітичними методами) завдяки можливості обліку нелінійності фізичних властивостей матеріалів і міждисциплінарному аналізу проектного пристрою [7].

З точки зору точності розрахунків використання спеціалізованого програмного забезпечення, в основі якого лежить чисельне моделювання займає проміжне місце між аналітичним розрахунком та експериментом на дослідному зразку за умови коректного опису моделі.

Ринок програмного забезпечення, що спеціалізується на чисельному моделюванні, постійно розвивається, однак можна виділити продукти, що займають лідируючі позиції: Ansys, Fem - LAB, COMSOL Multiphysics, ELCUT.

ELCUT - це інтегрована діалогова система програм, яка дозволяє вирішувати плоскі і осесиметричні завдання наступних типів:

Магнітні задачі

- магнітне поле змінних струмів
- нестационарне магнітне поле.
- магнітостатичне поле

Електричні задачі

- електростатичне поле змінних струмів
- електростатичне поле постійних струмів.
- нестационарне електричне поле
- електростатика

Теплові та механічні задачі

- пружні напруди та деформації
- нестационарна теплопередача
- стаціонарна теплопередача

Дана програма дозволяє вирішувати питання інженерного моделювання електромагнітних, теплових, механічних задач методом кінцевих елементів.

3.2. Постановка задачі моделювання

Вирішення та аналіз результатів поставленого завдання включає в себе ряд послідовних кроків, представлених на рис 3.1. незалежно від типу поставленої задачі [7]. Після встановлення програмного забезпечення ELCUT Student необхідно розпочати створення завдання. Для цього в меню програми слід вибрати вкладку **Файл** → **Створити завдання**, потім у вікні, яке з'явилось необхідно ввести ім'я завдання та шлях, яким вона буде збережена, після чого натиснути кнопку «Далі»

Другий етап створення завдання – вибір типу завдання, класу моделі, одиниць довжини, координатної площини, необхідної точності розрахунку і для плоскої задачі – довжини моделі в напрямку, перпендикулярному площині креслення. Після чого у вказаній папці будуть створені файли завдання:

центрального файлу, який включає в себе загальний опис задачі та має розширення **.rbm**, файл геометрії задачі з розширенням **.mol** (це спільні файли для всіх типів завдань) та файл фізичних параметрів, які відрізняються розширенням залежно від предметної області завдання. У процесі розв'язання ELCUT створює ще один файл, що включає результати розв'язання задачі з розширенням **.Res** [7].



Рис. 3.1. Послідовність кроків для вирішення задачі моделювання.

У вкладці «Клас моделі» (рис. 3.2) потрібно вибрати одну з двох можливих постановок двовимірної задачі: плоску чи осесиметричну.

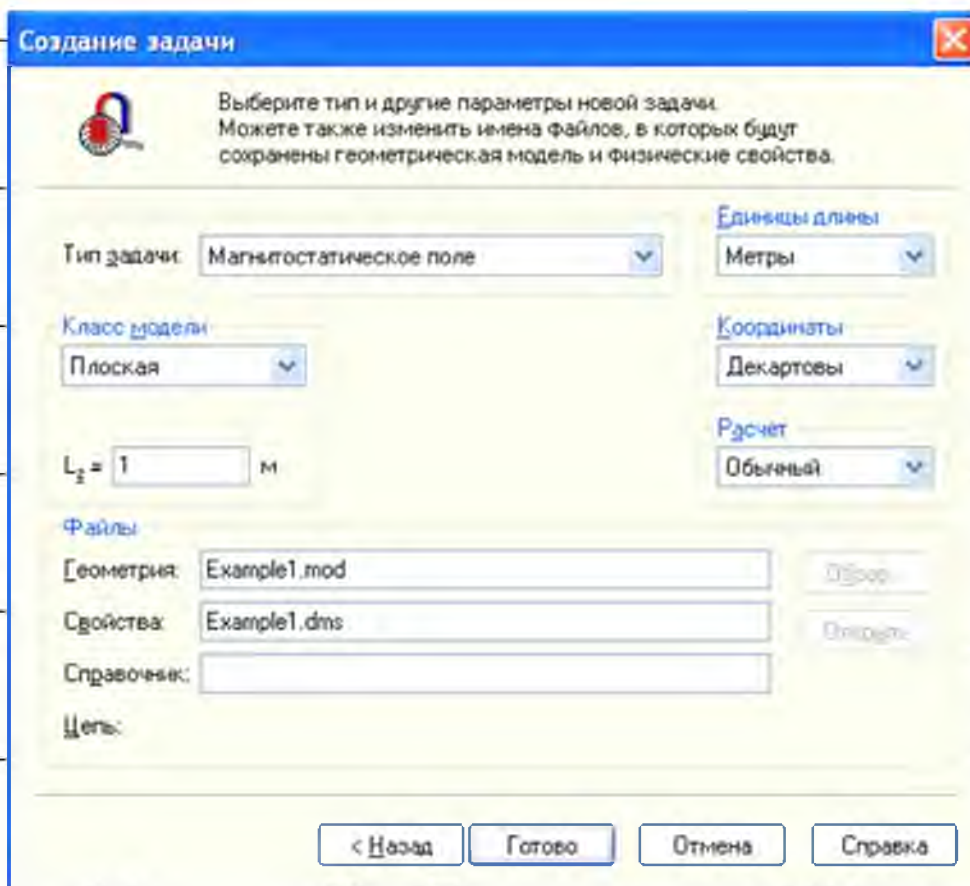


Рис. 3.2/ Створення задачі.

Плоскопаралельна постановка використовує декартову систему координат x y z , при цьому площина x y є робочою площиною креслення, а вісь z ортогональна їй. При такій постановці завдання істотним припущенням є ізотропність фізичних властивостей матеріалів, що використовуються в напрямку осі z . Це слід враховувати при моделюванні, наприклад, пристроїв із шихтованим у напрямку осі z сердечником, приймаючи його розрахункову довжину з урахуванням коефіцієнта заповнення пакета електротехнічною сталлю тощо. При виборі плоскопаралельної моделі необхідно задати її довжину в напрямку перпендикулярному площині креслення (в напрямі осі z), за умовчанням довжина моделі дорівнює 1 м.

Осесиметричні завдання вирішуються в циліндричній системі координат z r ϕ . Вісь симетрії осесиметричної задачі (z) збігається з віссю абсцис (горизонтальною віссю декартової системи координат). Основне припущення у

такому завданні – це ізотропність фізичних властивостей матеріалів у напрямку кутової координати Θ . Робота з геометричною моделлю здійснюється в напівплощині $z \geq r$ при $r > 0$. Слід мати на увазі, що частини моделі, розташовані в негативній напівплощині r мають негативну довжину і не мають фізичного змісту.

При натисканні кнопки «Готово» у вікні створення завдання відкриється робочий стіл ELCUT, представлений на рис. 3.3

ELCUT є багатодокументним додатком. На робочому столі рис. 3.3 показано основні вікна. Вікно, що містить основну інформацію, зазвичай прикріплене ліворуч у верхньому куті робочого столу. У вікні властивостей міститься прихована інформація активного вікна. Вікно документів призначене для редагування геометричної моделі та післяпроцесорного аналізу результатів рішення. Вікно інструментів містить необхідні інструменти для редагування геометричної моделі та післяпроцесорного аналізу.

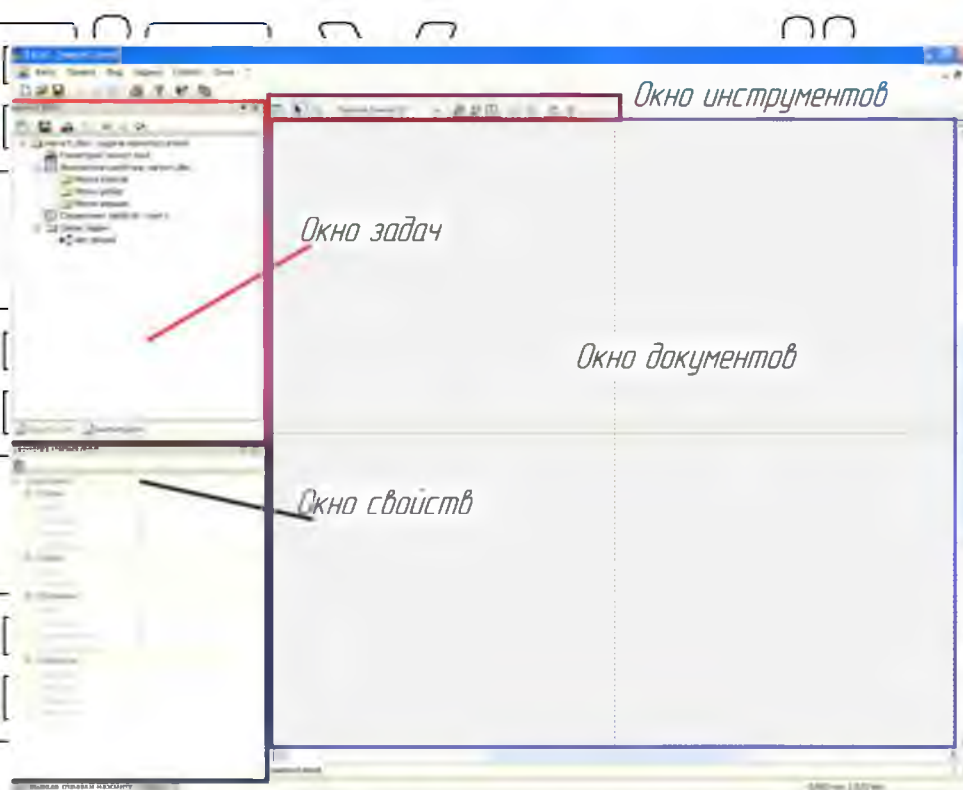




Рис. 3.3. Робочий стіл ELCUT.

3.3. Побудова геометричної моделі

Будь-яке завдання складається з геометричної моделі, яка представляє собою плоскопаралельний або осесиметричний опис досліджуваного пристрою (або його частини) з розбиттям на окремі блоки, які фізичними властивостями. Створення

геометричної моделі можливо двома методами. Перший - з допомогою вбудованого геометричного редактора, включає в себе інструменти для вставки ребер та вершин  і дозволяє додавати геометричні примітиви за допомогою

інструмента  «Додати фігуру», розташованого у вікні інструментів. Другий

спосіб – за допомогою імпорту зовнішньої геометричної моделі, що має розширення **.dxf**, створеної в AutoCad або Compas (необхідно зберегти креслення в форматі **.dxf**). Імпорт геометричної моделі здійснюється через вкладку **Файл**

→ **імпорт DXF** головного меню. При роботі у вікні документів для інформативності у правому нижньому кутку відображаються координати курсору мпші.

Геометрична модель має три основні типи геометричних об'єктів: вершина, ребро і блок (рис. 3.4).

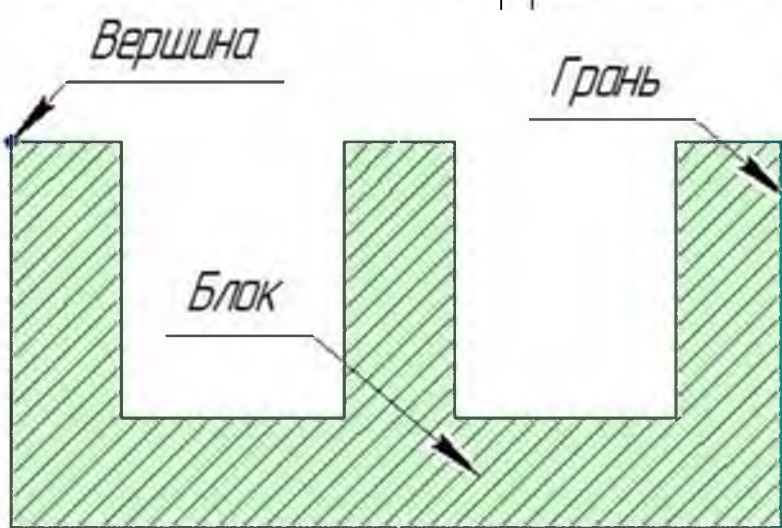


Рис. 3.4. Основні типи геометричних об'єктів ELCUT.

Вершина – це точка на площині креслення, яка введена користувачем або автоматично згенерована в результаті перегину двох або кількох ребер.

Натиснувши правою кнопкою миші на вершину в розділі «**Властивості**», можна задати мітку цієї вершини, після чого вона відобразатиметься у вікні завдань у розділі «**Мітки вершин**». Крім того, у властивостях вершини є

можливість редагування розмірів осередки в розділі «**Крок дискретизації**». У випадку мешер (від англ. *mesher* - Генератор сітки кінцевих елементів) FL/CUT буде сітку в автоматичному режимі без можливості редагування типів кінцевих елементів, згущаючи (зменшуючи розмір комірки) сітку слідом за зменшенням

геометричних розмірів розрахункових блоків моделі, що розбиваються. Однак деяких випадках, наприклад, у найбільш критичних з точки зору точності розрахунку місцях моделі є можливість згущувати сітку з допомогою зміни кроку дискретизації елементів. Після створення мітки вершини у вікні завдань потрібно

визначити властивості мітки вершини: граничне умова або зосереджений джерело поля.

Ребро геометричної моделі – відрізок прямий або дуга округлості між двома вершинами. Ребра служать в основному для завдання граничних умов завдання, для чого також необхідно створити мітку ребра.

Блок геометричної моделі - безперервний плоский простір, обмежений ребрами. Блоки геометричної моделі відповідають окремим частинам реальної моделі з необхідністю в розподіл властивостей мітки, що відповідають фізичним властивостям матеріалу .

Наступним етапом моделювання є етап завдання фізичних властивостей блоків геометричної моделі та джерел поля.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ В
КОТУШКАХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОНТАКТОРІВ

4.1. Розрахунок статичного електромагнітного поля

Розрахунок статичного магнітного поля актуальний при проєктуванні таких пристроїв, як соленоїди (багатовиткові котушки), постійні магніти, електричні машини, реактори тощо. Розглянемо розв'язання задачі магнітостатики на прикладі розрахунку тягових характеристик Ш-подібного магніта постійного струму. Подібна конструкція використовується, наприклад в електромагнітному контакторі (рис. 4.1.), де видно пристрій контактора, розташування котушки, сердечника та поворотної пружини. Контактори можуть бути виконані як на змінний, так і на постійний струм у ланцюгу управління та ланцюга основних контактів [7].



Рис. 4.1. Складові електромагнітного контактора.

Електромагніт контактора складається з магнітопроводу, котушки збудження і зворотної пружини. У свою чергу магнітопровід складається з рухомої (якоря) і нерухомий (статора) частини. Якір електромагніту контактора жорстко пов'язаний з рухливими контактами. У виключеному стані під дією зворотної пружини якір знаходиться в крайньому положенні, у якому головні контакти розімкнені. При подачі напруги на котушку управління електромагнітом якір, долаючи дію поворотної пружини, притягується до сердечника, при цьому відбувається

замикання головних контактів. Однією з основних характеристик електромагніту контактора є залежність сили тяжіння магніту від струму в силовій котушці і зазору між якорем та статором.

Для отримання цієї характеристики необхідно вирішити завдання стаціонарного магнітного поля.

4.2. Результати моделювання багатовиткової котушки електромагнітного контактора

4.2.1 Побудова геометричної моделі.

Геометрична Модель (рис. 4.2) є плоскопаралельним описом досліджуваного об'єкта і являє собою переріз магнітопроводу та обмоток електромагніту, оточене повітряним простором.

Як приклад, для розрахунку візьмемо багатовиткову котушку (соленоїд) і задамо певні геометричні параметри, а саме: кількість витків $N=7500$; довжина соленоїда $l = 300$ мм; внутрішній діаметр $d = 50$ мм; зовнішній діаметр $d = 100$ мм; струм катушки у одному витку $I = 1$ А.

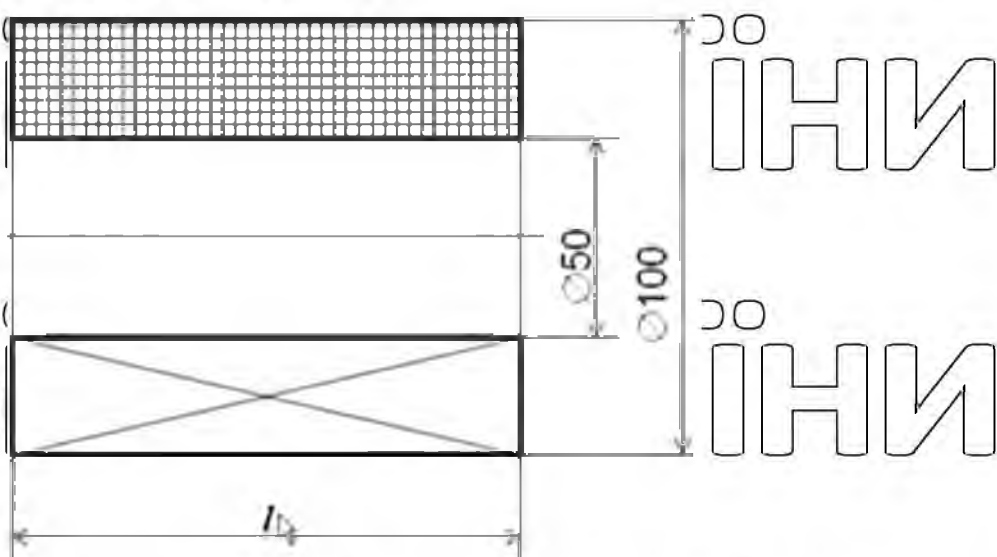


Рис. 4.2. Геометрична модель багатовиткової котушки контактора (соленоїда)

Про довгі котушки відомо що вони створюють у собі однорідне магнітне поле і відома формула, що дозволяє порахувати індукцію однорідного магнітного поля.

Магнітна індукція всередині соленоїда дорівнює:

$$B = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot N \cdot I}{l}$$

де: B - магнітна індукція; μ - відносна магнітна проникність; μ_0 - магнітна постійна; N - число витків; I - сила струму; l - довжина.

4.2.2. Особливості розподілу електромагнітного поля в котушці контактора.

Котушка намотана мідним проводом. Область площини моделі, зайнята котушкою, характеризується коефіцієнтом заповнення міддю k , що дорівнює відношенню сумарного перерізу всіх провідників котушки до площі вікна під обмотку.

Для початку створимо виток котушки електромагнітного контактора радіусом 2 мм (рис. 4.3).

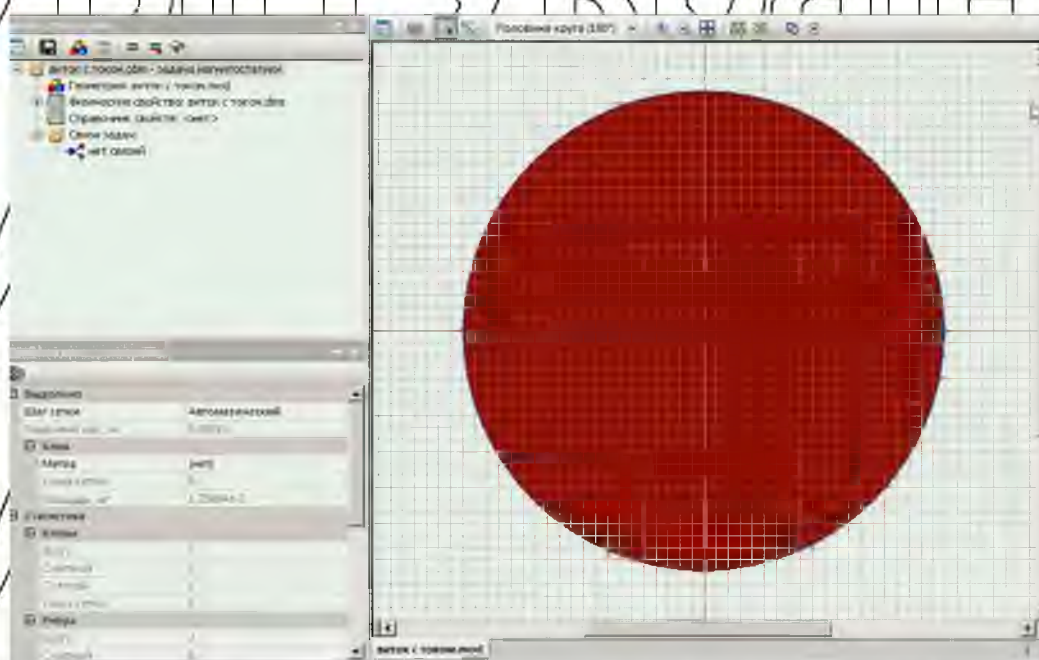


Рис. 4.3. Виток котушки електромагнітного контактора.

Оскільки область розрахунку повинна бути обмеженою, задаємо зовнішню границю. Також необхідно задати імена значимих об'єктів та їх фізичні властивості (рис. 4.4).

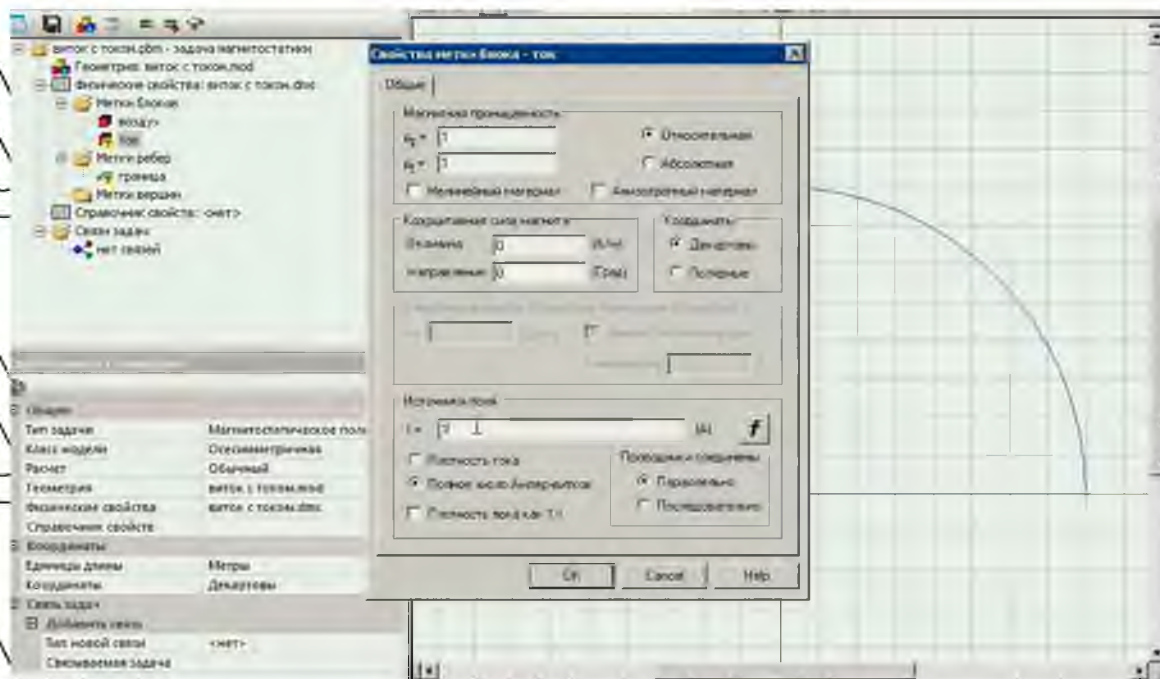


Рис. 4.4 Вікно властивостей заданої геометричної моделі (витка котушки).

Оскільки область розрахунку обмежена границею і у нас є виток із струмом, то у створеній нами геометричній моделі визначено 3 основні блоки, які характеризують об'єкти: повітря, струм та границя.

Задамо фізичні властивості для кожного об'єкту.

У властивостях блоку, що відповідає повітрю, необхідно задати постійну величину магнітної проникності, що дорівнює $\mu=1$. Магнітна проникність вказується у відносних одиницях.

Джерелом поля електромагніта є струм котушок. Матеріал з якого зроблено виток – мідь, тому, відкривши вікно властивості котушок, необхідно задати магнітну проникність для міді $\mu_{\text{к}}$, яка дорівнює $\mu_{\text{к}} = 1$, а також визначити, що є

джерелом поля щільність струму або повне число ампер витків котушки. У нашому випадку задаємо повний струм, який протікає по витку.

У заданій задачі як граничну умову беремо умову Діріхле з певним згасанням магнітного потоку на зовнішній межі розрахункової області. Це пояснюється тим, що границі розіположені далеко від джерела, а на такій відстані поле затухне до 0, тому на границі задамо магнітний потенціал, який дорівнює $A=0$.

Після того, як були задані властивості блоків та граничні умови, необхідно побудувати сітку кінцевих елементів, натиснувши на відповідну кнопку, розташовану у вікні інструментів, після чого в автоматичному режимі буде побудована сітка кінцевих елементів (рис.4.5)

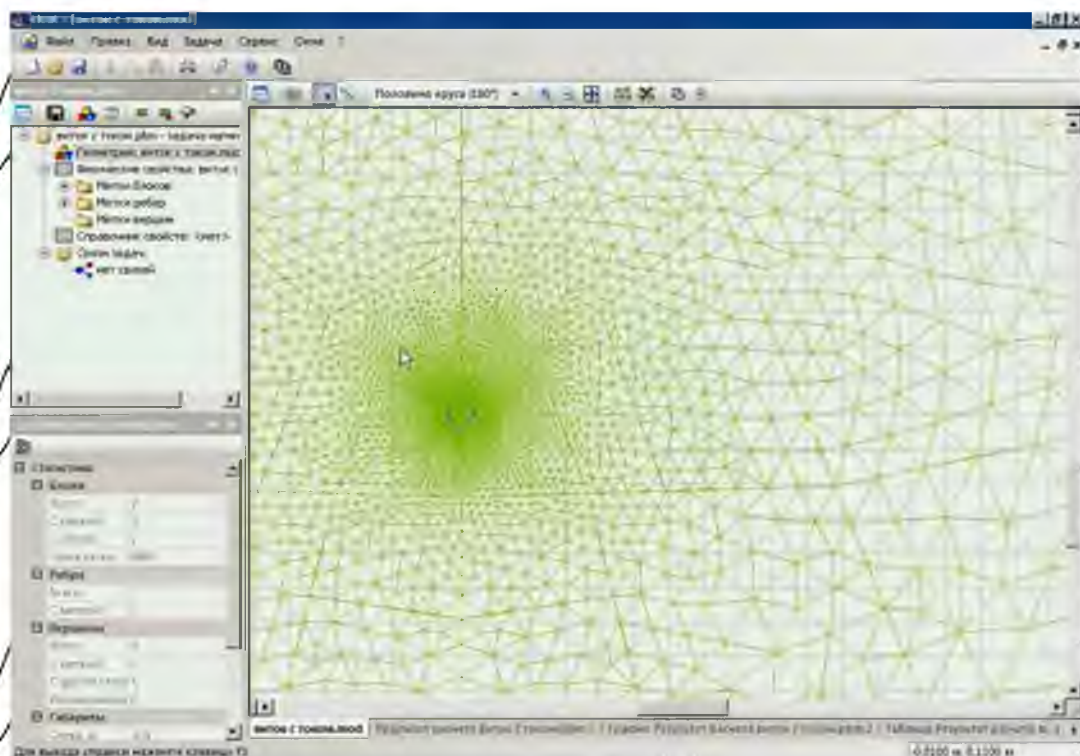


Рис. 4.5. Вікно сітки кінцевих елементів одного витка котушки електромагнітного контактора.

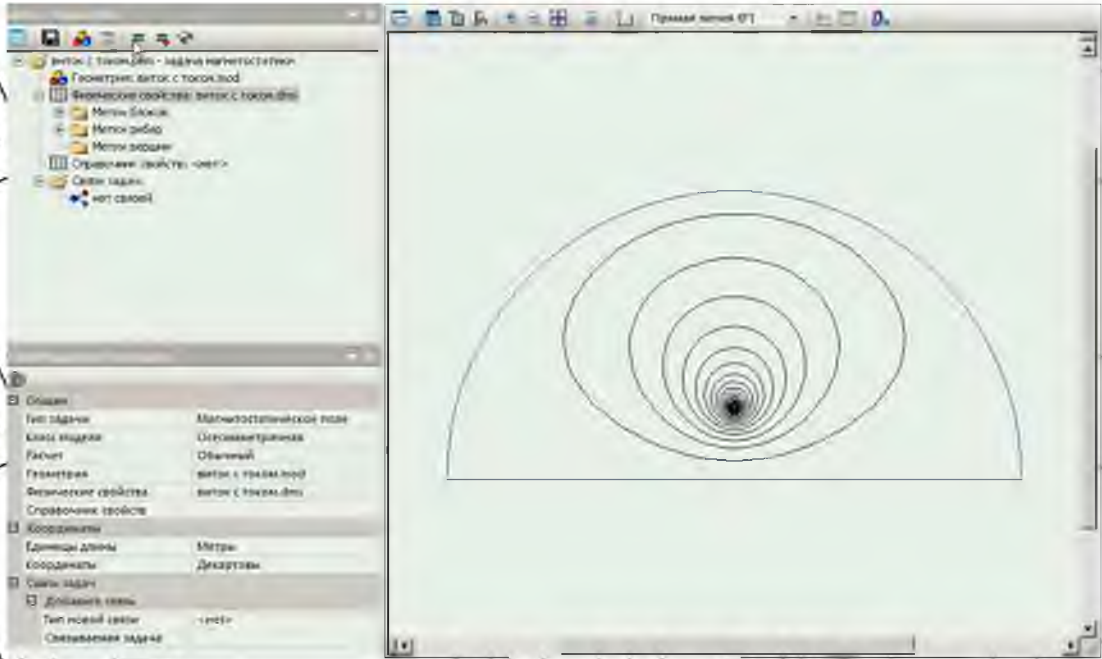


Рис. 4.6. Вікно розподілення електромагнітного поля одновиткової котушки

Для сітки елементів можемо задати візуальні параметри, а саме: заливку по індукції, лінії поля (силові лінії) та вектори індукції (рис.4.6) ○ ○

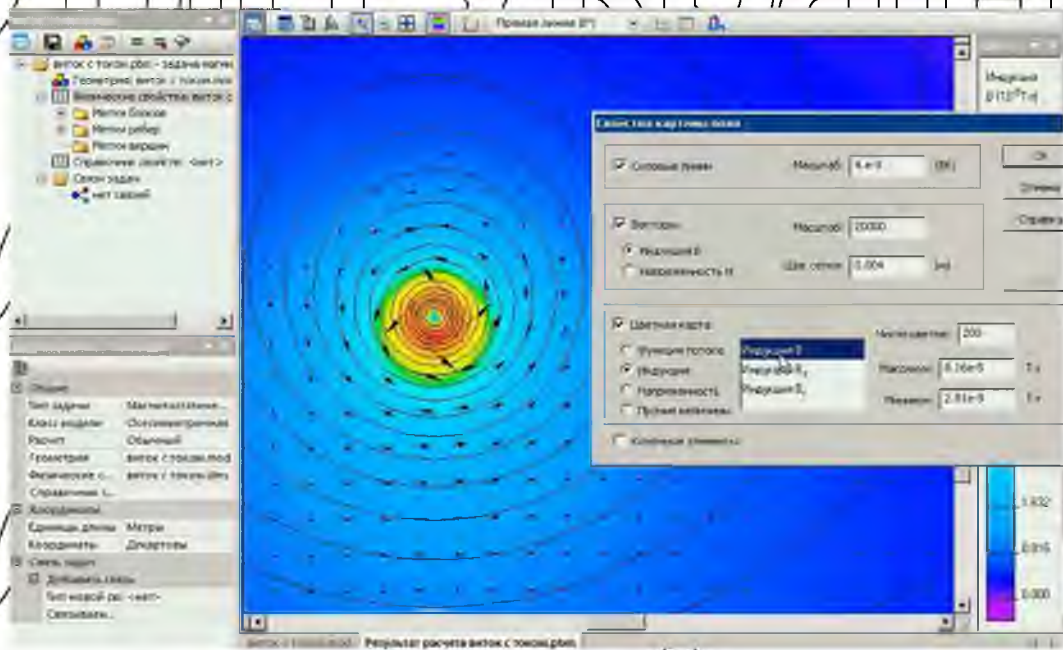


Рис. 4.6. Візуалізація електромагнітного поля одновиткової котушки.

Побудова багатовиткової котушки проводиться аналогічним чином. В програмі FLSUP є можливість копіювання. Для цього виділимо геометричний

об'єкт, у нашому випадку виток котушки електромагнітного контактора і вибираємо пункт «дублювати виділене» та задаємо необхідні параметри (рис 4.7.)

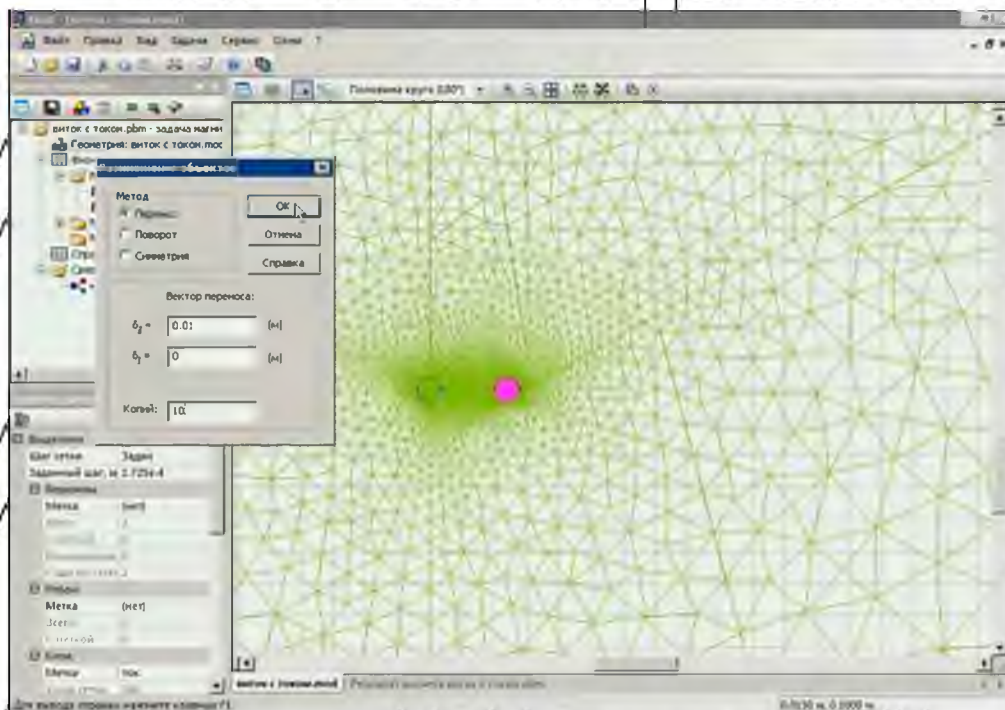


Рис. 4.7. Вікно задання параметрів для побудови багатовиткової котушки.

Для побудови моделі багатовиткової котушки (соленоїда) електромагнітного контактора із великою кількістю витків (у нашому випадку $N=7500$) у програмі ELCUT є готові задачі, де необхідно задати основні параметри

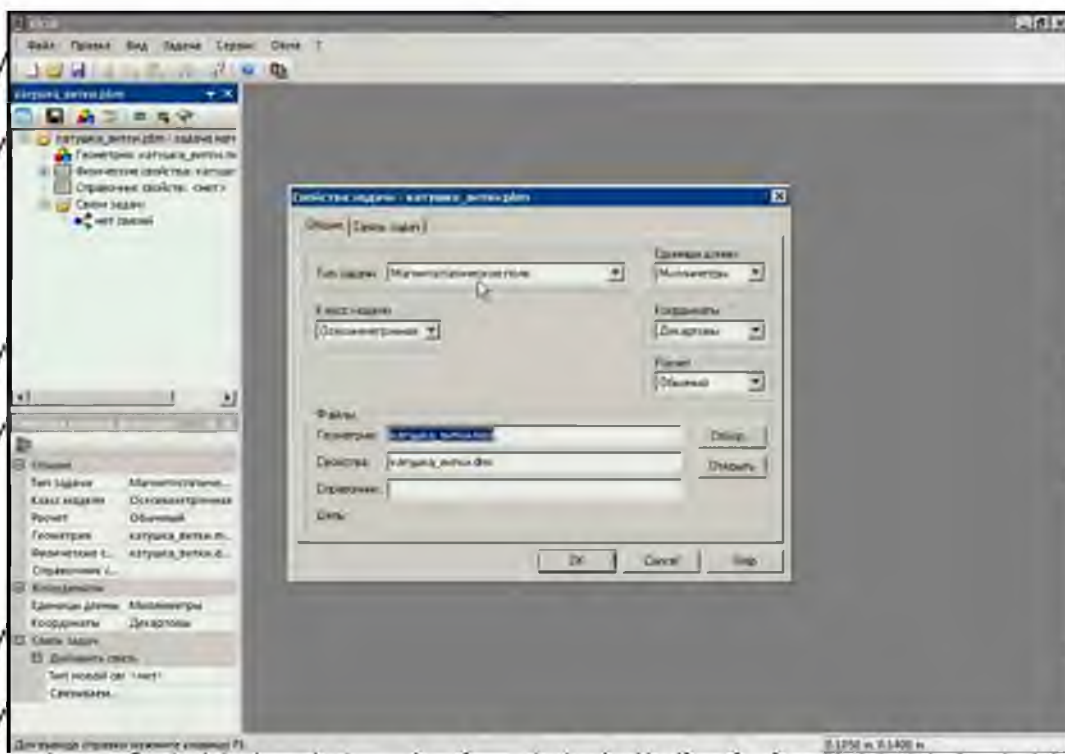


Рис. 4.8. Вікно постановки задачі для побудови моделі багатовиткової котушки (соленоїда) електромагнітного контактора із кількістю витків $N=7500$.

Так, як задана нами катушка має циліндричну форму і вісь розміщена горизонтально то побудуємо лише верхню частину котушки (див. рис. 4.2.), а у вікні параметрів (див. рис. 4.8.) задамо клас моделі – осесиметрична.

На рис. 4.9. показана побудована нами сітка кінцевих елементів багатовиткової котушки (соленоїда) електромагнітного контактора із кількістю витків $N=7500$.

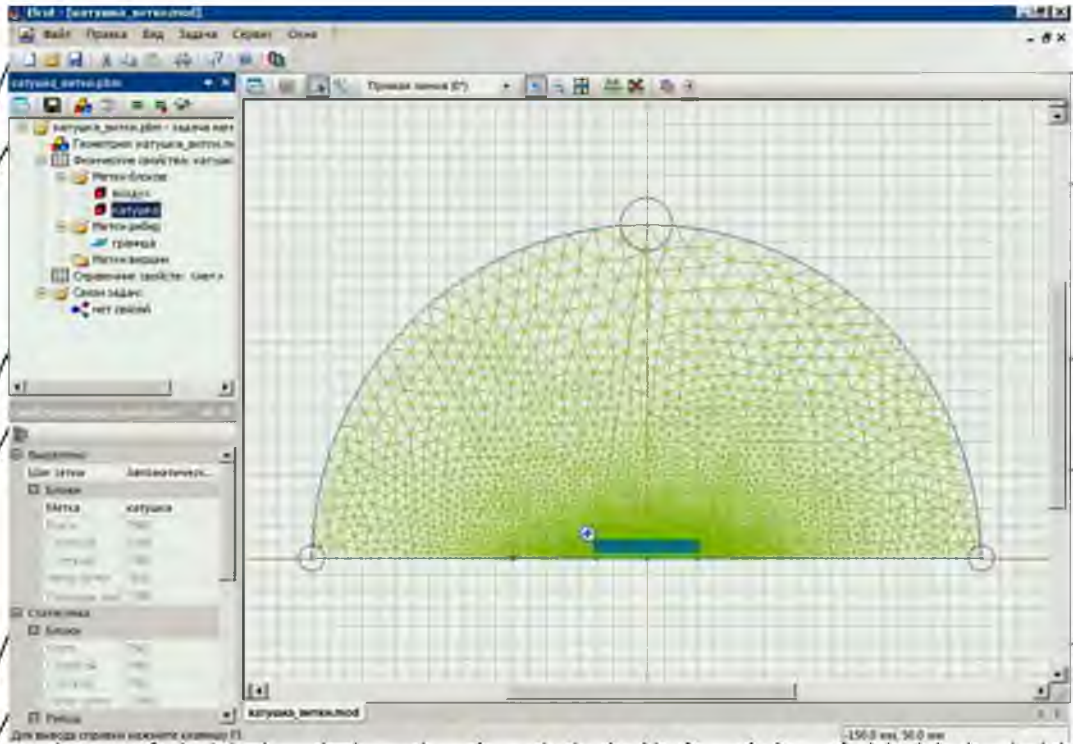


Рис. 4.9. показана побудована нами сітка кішцевих елементів багатовиткової котушки(соленоїда) електромагнітного контактора.

Задамо фізичні властивості для кожного блоку моделі

Для повітря, як нам відомо вже, задаємо магнітну проникність, що дорівнює

$$\mu=1.$$

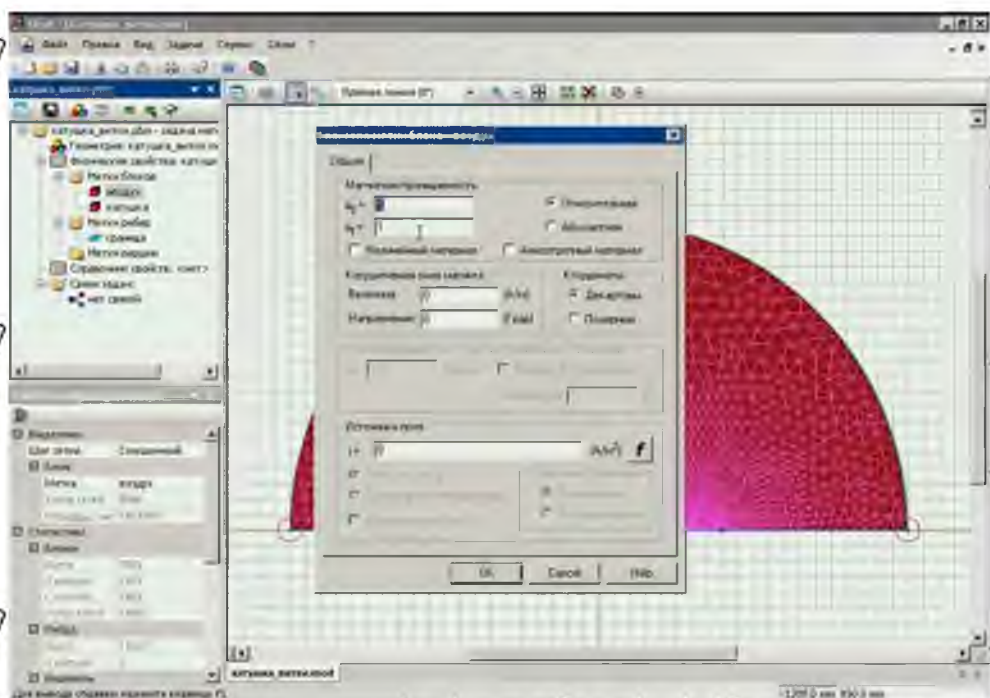


Рис. 4.11. Вікно параметрів блоку повітря

Для границі задаємо магнітний потенціал, який дорівнює 0, так як границя розположена далеко від об'єкта (рис. 4.12.)

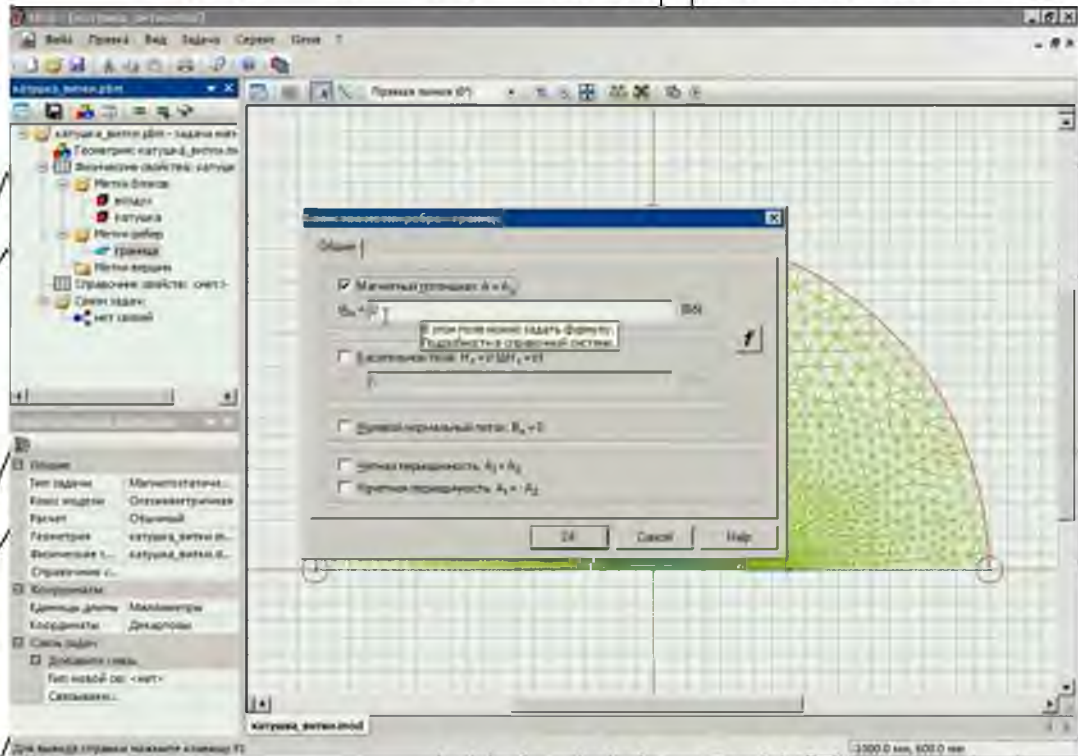


Рис. 4.12. Вікно параметрів блоку границя.

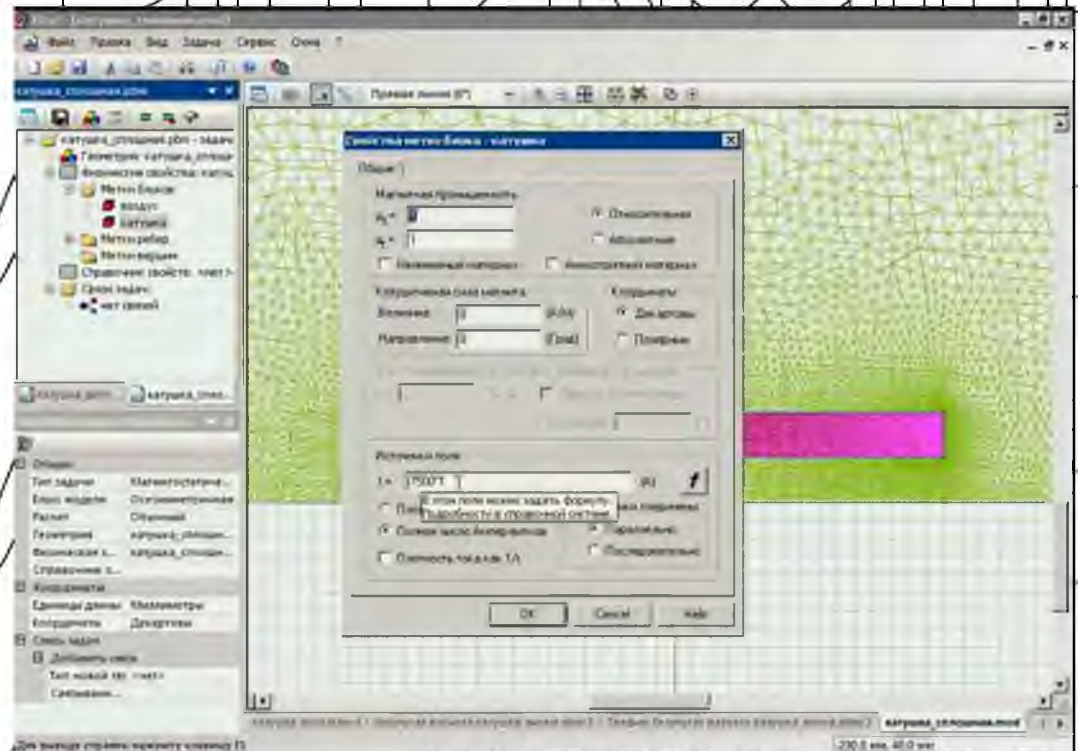


Рис. 4.13. Вікно параметрів блоку котушка.

Катушка у нас складається із 7500 витків, тому кожний виток представлений окремим блоком (рис. 4.13.). У властивостях катушки задано, що всі витки з'єднані послідовно і струм витка дорівнює $I=1\text{ A}$.

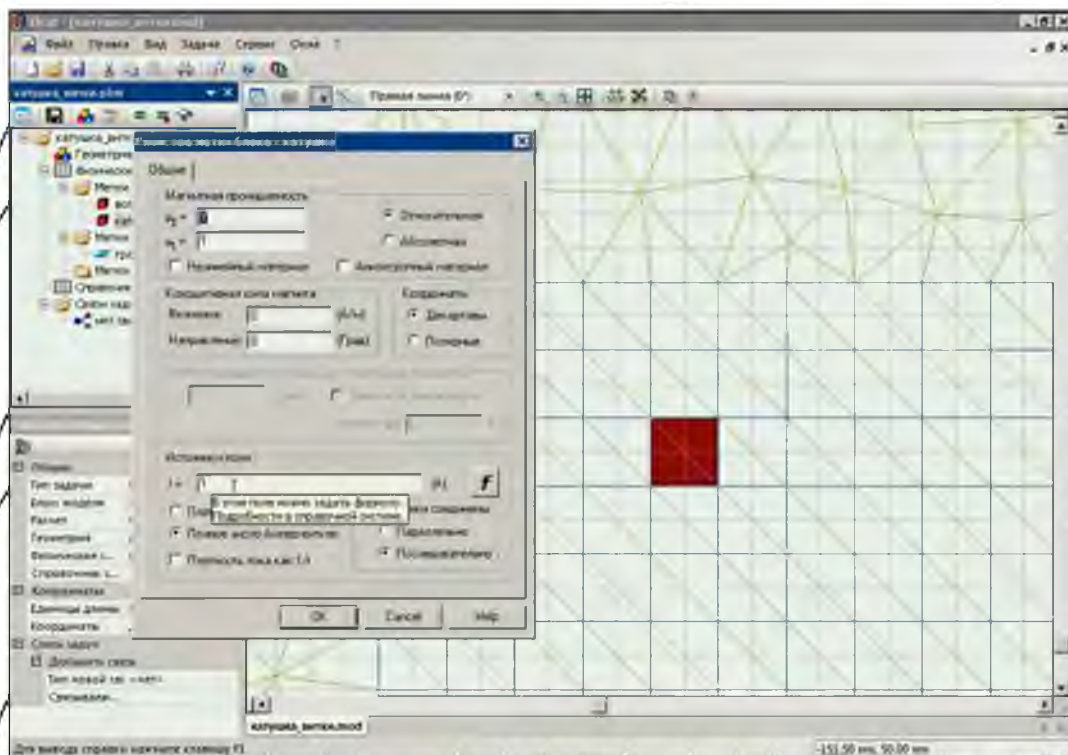


Рис. 4.14. Вікно параметрів одного витка катушки.

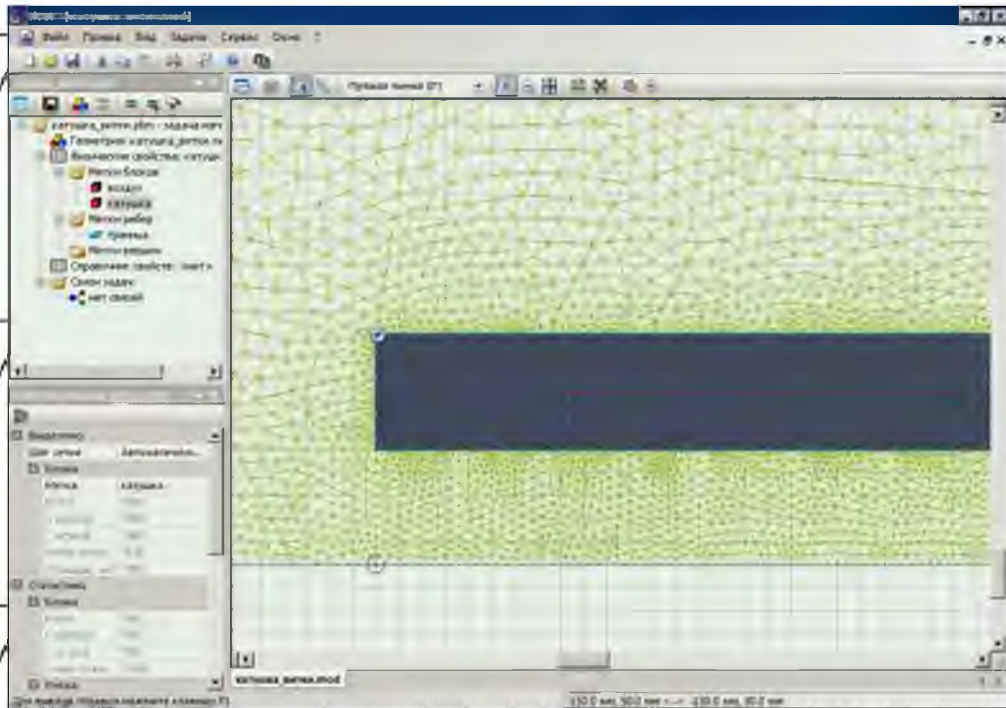


Рис. 4.14. Отримана модель сплюсненої багатовиткової котушки (соленоїда).

Результатами розрахунку магнітостатичного завдання є магнітний потенціал, магнітна індукція, напруженість магнітного поля, сили, моменти, енергія магнітного поля, потокозчеплення, власні та взаємні індуктивності.

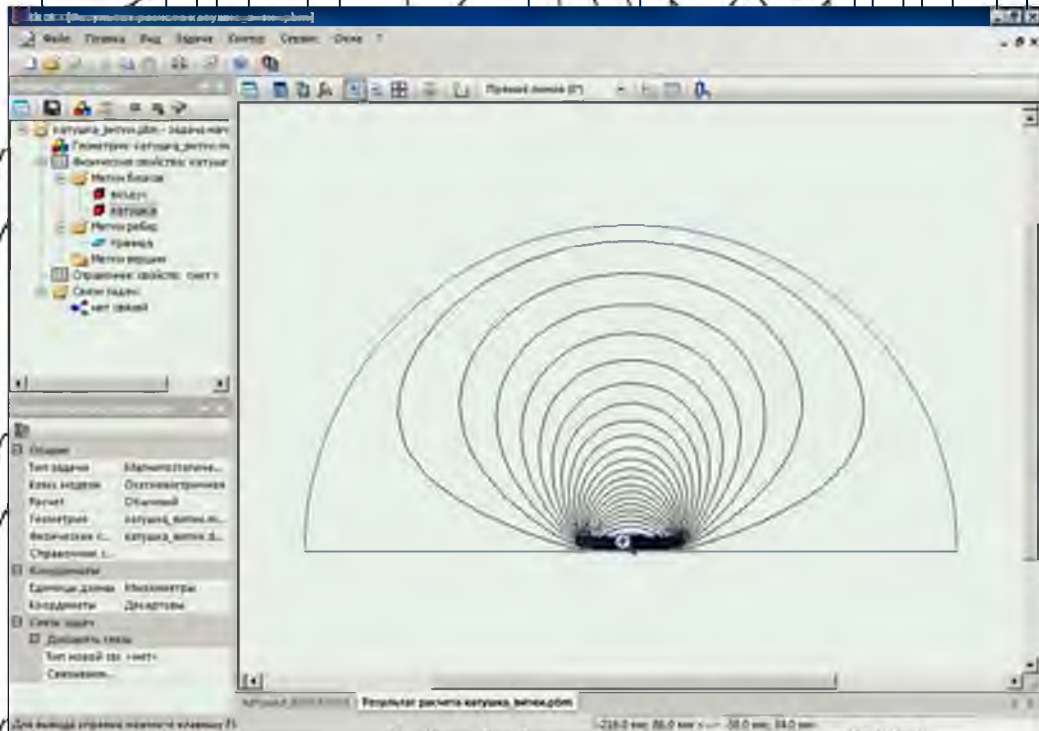


Рис. 4.15. Вкiно розподiлу лiнii електромагнiтної iндукцiї багатовиткової котушки (соленоїда).

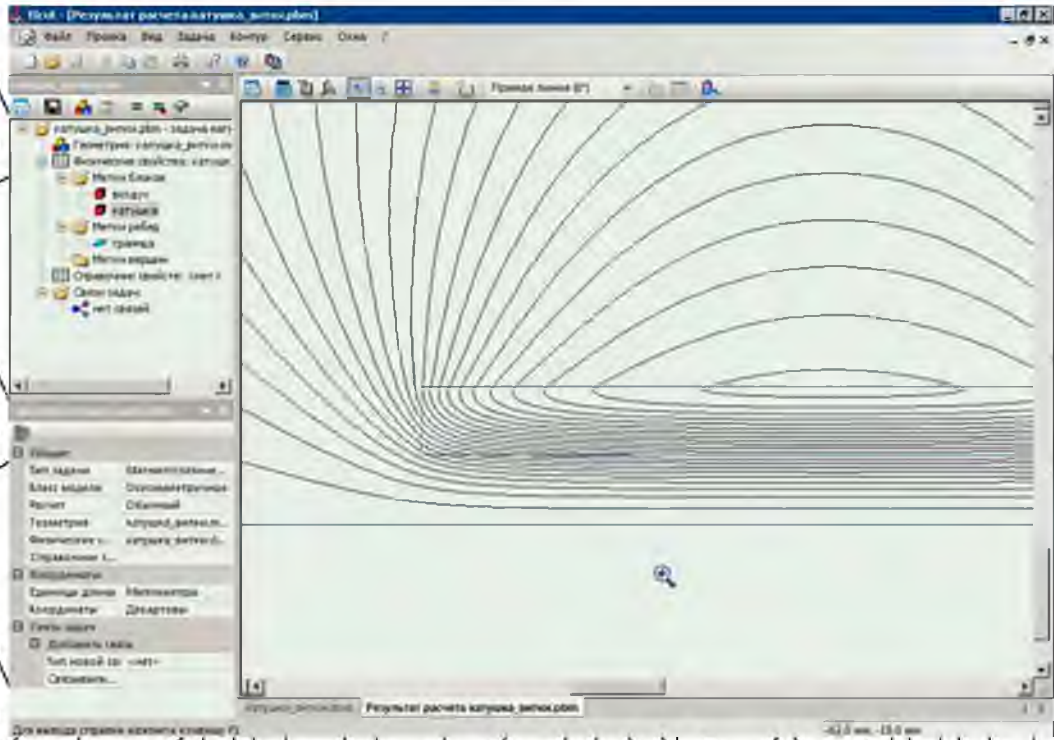


Рис. 4.16. Розподіл ліній електромагнітної індукції багатовиткової котушки (соленоїда).

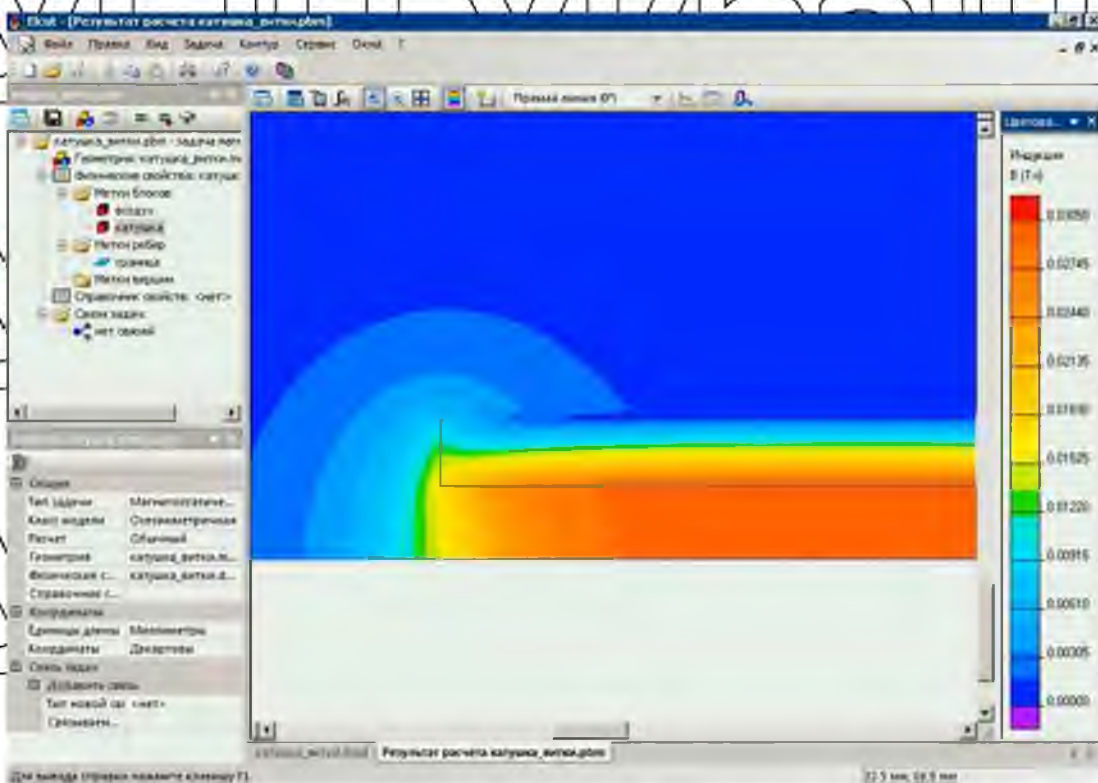


Рис. 4.17. Результат моделювання багатовиткової котушки (соленоїда) із показниками електромагнітної індукції.

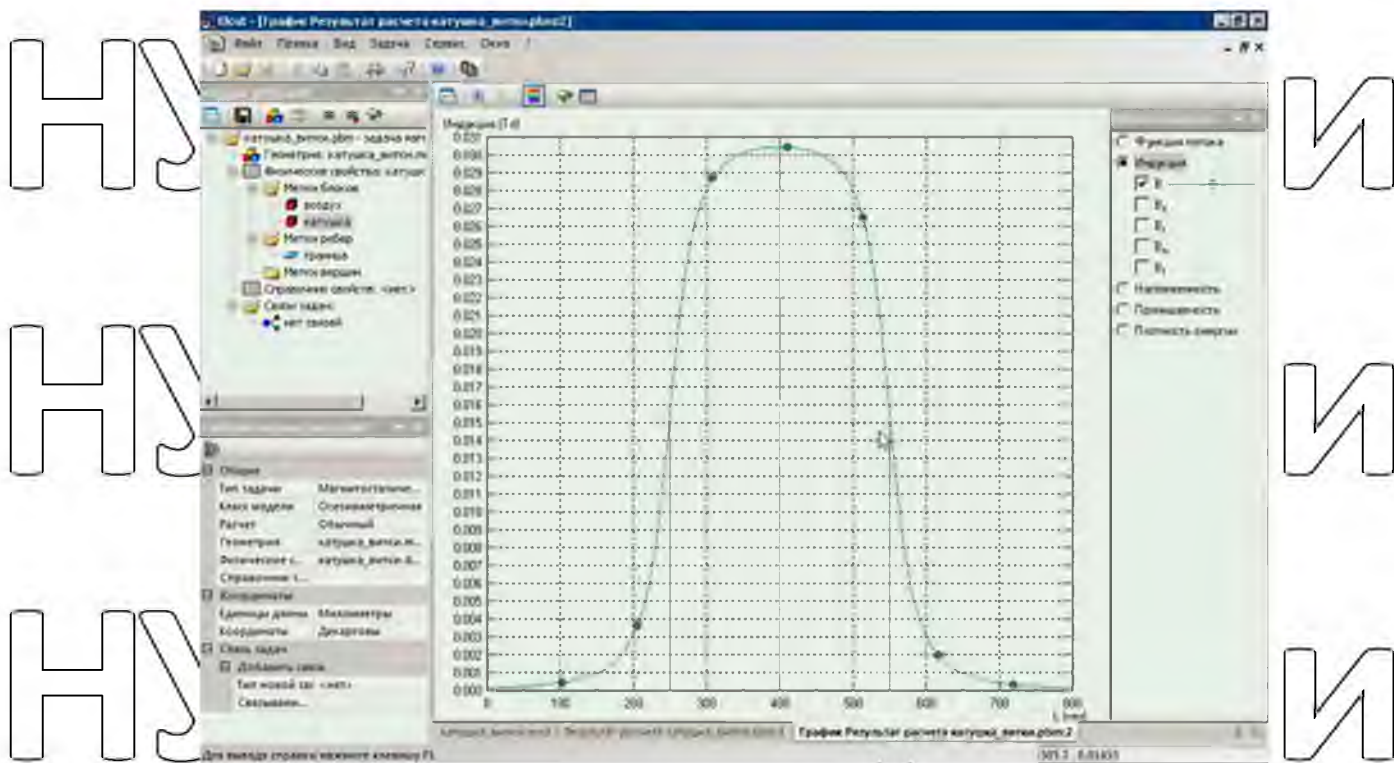


Рис. 4.18. Графік розподілу електромагнітної індукції багатовиткової котушки (соленоїда).

В результаті моделювання було отримано картину розподілу складових електромагнітного поля, а саме магнітної індукції по довжині по глибині багатовиткової котушки (соленоїда) електромагнітного контактора, в результаті якого видно, що максимальна електромагнітна індукція спостерігається у центрі котушки і складає $B = 0,03$ Тл, а чим далі до країв проявляється крайовий ефект і магнітна індукція падає, а на відстані від поверхні котушки в 1-2 мм видно, що вона на порядок нижча ніж в регулярній зоні у 10 разів.

РОЗДІЛ 5

ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПРИ МОНТАЖІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ
КОНТАКТОРІВ

До самостійних робіт з монтажу контакторів допускається технічний персонал (категорія допуску не нижче ІІІ), що пройшов відповідний інструктаж [10].

Монтаж повинен відбуватись при температурі $-10...+40^{\circ}\text{C}$ і відносній вологості повітря не більше 75%. Перед монтажем контактора необхідно зробити кілька включень і відключень, щоб переконатись у справності механізму [4].

Контактор монтується на DIN-рейку або гвинтами на монтажну панель. Для забезпечення нормальної роботи контактора під'єднання необхідно проводити одножильним проводом. Застосовувати проводи різного діаметру допускається тільки при умові щільного звивання під'єднувальної ділянки. У разі використання багатожильного проводу необхідно залудити контактні ділянки або використовувати спеціальні наконечники.

Планово-профілактичні роботи виконуються у відповідності з Правилами експлуатації електроустановок і включають:

- щотижневий візуальний огляд;
- очищення від пилу і забруднень;
- періодичну перевірку надійності контактних з'єднань: уперше – через 7–

10 діб після монтажу, в подальшому – один раз після 300 комутацій, але не рідше, ніж один раз на півроку.

Момент зусилля при затягуванні затискачів – 5 Н·м.

Установку, ремонт, планово-профілактичні роботи виконувати лише при відключеній електричній мережі.

Забороняється під'єднувати навантаження потужністю більше, ніж зазначено в інструкції з експлуатації.

При підключенні контакторів до мережі, як і при проведенні будь-яких інших електротехнічних робіт, необхідно неухильно дотримуватися правил ПУЕ [10].

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі досліджувалося питання розподілу електромагнітного поля у сучасних електромагнітних контакторів.

Проведений аналіз технічної літератури та сучасних каталогів електромагнітних контакторів показав, що найкраще на ринку зарекомендували себе електромагнітні контактори компанії ABB, Hager, Schneider Electric. Обґрунтовано галузі застосування, принцип роботи та описані основні схеми включення електромагнітних контакторів, за допомогою кнопок або теплового реле.

У магістерській роботі також було наведено основні умови вибору електромагнітного пускача (контактора), здійснено тепловий розрахунок сучасних конструкцій електромагнітного контактора: розрахунок температури нагріву струмопровідних частин у номінальному режимі, розрахунок термічної стійкості та ін., що дасть змогу визначити робоздатність котнакторів та їх термін служби.

З метою вивчення особливостей розподілу електромагнітного поля в котушках електромагнітних контакторів у магістерській роботі виконано чисельне моделювання методом кінцевих елементів. Для цього котушку електромагнітного контатора, яка є багатовитковим соленоїдом було змодельовано у програмному середовищі EMCUT. Моделювання заключалося в тому, що на першому етапі відбувається побудова геометричної моделі із завданням геометричних та електрофізичних параметрів обмотки котушки. Наступним кроком є завдання кінцево- елементної сітки, а саме розбиття робочих областей моделі на кінцево-елементну сітку, яка би забезпечувала хоча би мінімум 10 кінцевих елементів у кожній області. Після цього необхідно задати граничні умови на межах розподілення областей, а також позначити зовнішні границі для обмеження результатів розрахунку.

В результаті моделювання ми отримали загальну картину розподілу ліній електромагнітного поля та магнітної індукції. З отриманих даних видно, що максимальна електромагнітна індукція спостерігається у центрі котушки і складає $B = 0,03$ Тл, а чим далі до країв проявляється крайовий ефект, а на певній відстані від поверхні видно, що величина поля падає в порівнянні із регулярною зоною у 10 разів.

Таким чином отримавши ці результати було побудовано графік розподілу електромагнітної індукції по довжині обмотки. Даний графік дублює результат розподілу електромагнітної індукції, де видно, що на краях вона падає на порядок, а регулярна зона це якраз і є робоча частина котушки, яка створює максимальне магнітне поле для притягування ярма до осердя.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Клименко Б.В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: Навчальний посібник. Харків: Вид-во «Точка», 2012. - 340 с.

2. Кохановський С.П., Василенко В.В. Апарати керування і захисту - Київ: Видавництво ТОВ Аграр Медіа Груп, 2012. - 228 с.

3. Клименко Б.В. Електричні та магнітні пристрої, електричні аксесуари, електричні установки. Терміни, тлумачення, коментарі. – Харків: ТОЧКА, 2008.

272 с.

4. Офіційний сайт компанії АВВ. Електронний ресурс.
<https://abbua.com.ua/nizkovoltne-obladnannya/aparatura-puskoregulyuyucha-elektronna/kontaktori>

5. Рогінська Л.Е., Мухутдінова Г.С., Рахманова Ю.В. Електричні та електронні апарати. Навчальне електронне видання. 2010 р.

6. Березюк А.О. Методичні вказівки щодо виконання курсового проєкту з дисципліни «Електричні апарати» для студентів ОС «Бакалавр» напрямку підготовки 141. К.: вид-во ЦП «Компринт».- 2018. – 119 с.

7. Макаричев Ю.А. Чисельне моделювання в Електротехніці з використанням програмного середовища ELCUT: навч. посібник / Ю.А. Макаричев, Ю.Н. Іванников. – С.: Самар. гос. техн. ун-т, 2020. – 92 с.

8. Особливості застосування сучасних магнітних пускачів та їх застосування. «Електрик Інфо» - онлайн журнал про електрику. Теорія і практика. Режим доступу: <https://elektrik.info/main/master/1343-osobennosti-sovremennyh-magnitnyh-puskateley-i-ih-primeneniye.html>

9. Що являє собою контактор, його особливості та схеми підключення. Electroinfo.net - онлайн журнал. Режим доступу: <https://electroinfo.net/raznoe/kontaktor-princip-dejstviya-shemy-podklucheniya-cho-soboi-predstavlyayet-kontaktor-ego-osobennosti-i-shemy-podklucheniya.html>

10. Правила улаштування електроустановок. Електронне видання
Міністерство енергетики України. Режим доступу:
<https://nev.gov.ua/storinka/pravyla-ulashtuvannya-elektroinstallovok>

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України