

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

**Трифазний силовий масляний трансформатор загального призначення
курсний проект**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів, які навчаються за
спеціальністю*

*141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»,
освітньою програмою
«Електричні машини і апарати»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2018

Трифазний силовий масляний трансформатор загального призначення: курсовий проект [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньою програмою «Електричні машини і апарати» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.В. Чумак, С.С. Цивінський, В.В. Котлярова. – Електронні текстові дані (1 файл: 0,61 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018 - 35 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 4 від 20.12.2018 р.)
за поданням Вченої ради ФЕА
(протокол № 4 від 26.11.2018 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

**Трифазний силовий масляний трансформатор загального призначення
курсний проект**

Укладачі	Чумак Вадим Володимирович, канд. техн. наук, доц. Цивінський Сергій Станіславович, канд. техн. наук, доц. Котлярова Вікторія Володимирівна, асистент
Відповідальний редактор	Реуцький М. О., канд. техн. наук, доц.
Рецензент	Гуторова М.С., н.с., к.т.н., Інститут Електродинаміки НАНУ

Представлено методику проектування трифазних силових масляних трансформаторів загального призначення. Приведено вимоги до оформлення курсового проекту, графік його виконання, контрольні запитання до його захисту.

Навчальний посібник призначений для бакалаврів, що навчаються за спеціальністю «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньою програмою «Електричні машини і апарати»

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018

ЗМІСТ

Мета і завдання курсового проекту	4
1. Загальні вимоги	5
1.1. Текстові документи.....	5
1.2. Графічна документація проекту	10
2. Технічні умови.....	11
2.1. Вступна частина ТУ	11
2.2. Підрозділ технічні вимоги ТУ	11
2.3. Правила приймання	13
2.4. Методи контролю.....	13
2.5. Транспортування та зберігання	13
2.6. Вказівки по експлуатації	13
2.7. Гарантії постачальника.....	13
3. Вибір і опис конструкції.....	14
3.1. Загальна конструктивна схема трансформатора.....	14
3.2. Конструкція магнітної системи	14
3.3. Система обмоток	14
3.4. Допоміжна система	15
4. Основні розрахунки.....	16
4.1. Визначення основних електричних величин	16
4.2. Вибір ізоляційних проміжків	16
4.3. Визначення основних розмірів трансформатора	17
4.4. Розрахунок обмоток НН і ВН	17
4.5. Розрахунок втрат і напруги короткого замикання.....	19
4.6. Розрахунок механічних сил в обмотках	21
4.7. Розрахунок магнітного кола.....	22
4.8. Розрахунок робочих характеристик	22
4.9. Тепловий розрахунок.....	23
5. Порядок захисту проекту.....	25
Перелік використаної літератури	26
Додаток А. Таблиця варіантів завдань на проект	27
Додаток В. Запитання та завдання для самоконтролю.....	30
Додаток С. Титульний лист	32
Додаток D. Основні написи для документів.....	33
Додаток Е. Бланк завдання	34
Додаток F. Календарний план	35

МЕТА І ЗАВДАННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

Методичні вказівки призначені для студентів електротехнічних і електроенергетичних спеціальностей денної та заочної форм навчання, де відповідно до навчальних програм дисциплін "Проектування електричних машин" та "Електричні машини" передбачений курсовий проект з проектування силового трансформатора.

Мета курсового проекту - проектування силового трифазного двообмоткового масляного трансформатора загального призначення виконується при вирішенні наступних завдань:

- вивчення основних тенденцій розвитку та проблем сучасного трансформаторобудування;
- складання технічних умов для трансформатора, що проектується;
- вибір і опис конструкції трансформатора;
- виконання електромагнітного, механічного та теплового розрахунків для ряду варіантів;
- вибір варіанта розрахунку, що найбільше повно задовольняє технічним умовам, визначення для нього зовнішніх характеристик і характеристик ККД;
- порівняння спроектованого трансформатора із прототипом;
- конструктивна розробка креслення загального виду і основних вузлів конструкції спроектованого трансформатора.

Виконання курсового проекту сприяє підвищенню якості навчального процесу:

- закріпленню, поглибленню та розширенню знань студентів основ загальної теорії трансформаторів та методики їхнього проектування;
- вироблення у студентів уміння застосовувати раніше отримані знання, самостійно працювати з літературою, користуватися стандартами при складанні технічних умов;
- самостійно приймати інженерні рішення, оцінювати кількісні і якісні показники спроектованого трансформатора, використовувати елементи системи автоматизованого проектування трансформаторів /САПР ТР/ при проектуванні та інженерних розрахунках;
- формуванню навичок щодо застосування основних законів електромеханіки, механіки та теплотехніки при проектуванні трансформаторів, а також при вирішенні найпростіших інженерних завдань.

У методичних вказівках дані рекомендації та пояснення, які допоможуть студентам цілеспрямовано орієнтуватися: у довідниках і стандартах, у літературі з розрахунку та конструкції трансформаторів, при використанні програми розрахунку на персональному комп'ютері і у послідовності розрахунків. Крім того, методичні вказівки містять: вимоги до структури, змісту та оформленню курсового проекту; питання для самопідготовки перед захистом курсового проекту; варіанти завдань на проектування трифазних силових масляних трансформаторів потужністю від 1000кВА до 6300кВА на напругу до 35кВ.

1. ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ

Курсовий проект складається з комплексу текстових та графічних документів, структура, зміст і обсяг яких зазначені в методичних вказівках.

1.1. Текстові документи

Текстові документи повинні містити повні та систематизовані відомості про спроектований трансформатор. Вони повинні бути чіткі, конкретні, мати логічну послідовність у викладенні, переконливість аргументації і обґрунтованість ухвалених рішень, стислість і точність формулювань, що виключають можливість неоднозначного тлумачення.

1.1.1. Перелік текстових документів

Системність у викладі змісту курсового проекту досягається такою послідовністю текстових документів:

- титульний лист;
- бланк-завдання на курсовий проект;
- календарний план;
- реферат;
- зміст;
- вступ (постановка завдання);
- технічні умови;
- вибір і опис конструкції;
- основні розрахунки;
- науково-дослідна робота;
- висновки;
- список використаної літератури;
- додатки;
- специфікації до креслень.

Керівником проекту наведена структура може бути скорочена.

1.1.2. Зміст текстових документів

Повнота викладу відомостей про спроектований трансформатор досягається виконанням наступних вимог до змісту та оформлення перерахованих вище розділів текстової документації проекту.

1.1.2.1. Титульний лист має зміст і оформлення за зразком, розроблений на кафедрі електромеханіки згідно вимог стандарту підприємства СІТІ КПІ 2.001-83.

1.1.2.2. Бланк завдання виконується на загальноприйнятому зразку (додаток Е), містить вихідні дані та перелік питань, які повинні бути вирішені виконанням курсового проекту, а також графік виконання проекту; вихідні дані для проекту наведені в додатку А; заповнений бланк завдання підписують студент і викладач - керівник проекту.

1.1.2.3. Бланк до календарного плану наведено у додатку Ф.

1.1.2.4. Реферат містить короткі відомості про номінальні дані, основні конструктивні і техніко-експлуатаційні характеристики, області застосування спроектованого трансформатора; обсяг реферату 0,5-0,75с.

1.1.2.5. Зміст складається із заголовків, послідовно викладених структурних розділів і підрозділів текстової частини проекту.

1.1.2.6. Вступ (постановка завдання) містить коротку характеристику науково-технічних проблем, що стосуються проектування, технології та виготовлення, експлуатації і перспектив розвитку трансформаторів; формулюються мета та завдання, які повинні бути вирішені шляхом безпомилкового виконання курсового проекту; орієнтовний обсяг 2-3 сторінки.

1.1.2.7. Технічні умови нумерують як перший розділ проекту; вимоги до змісту ТУ наведені в розділі 2 даних вказівок.

1.1.2.8. Вибір і опис конструкції спроектованого трансформатора нумерують як другий розділ; вимоги до змісту викладені в розділі 3 даних вказівок.

1.1.2.9. Основні розрахунки нумерують як третій розділ і містять підрозділи розрахунків: електричних величин та вибір ізоляційних проміжків; основних розмірів трансформатора; обмоток низької (НН) та високої (ВН) напруг; втрати та напругу короткого замикання; механічних зусиль в обмотках; магнітного кола; робочих характеристик; тепловий. Вказівки щодо виконання основних розрахунків наведені в розділі 4.

1.1.2.10. Науково-дослідна робота нумерується як розділ чотири та містить підрозділи:

- мета роботи чи завдання (питання);
- методика та результати дослідження;
- аналіз отриманих результатів (висновки).

Тему науково-дослідної роботи вказує викладач, вона повинна складатися з розрахунків або інших форм, які ілюструють можливість студента вирішувати самостійно спеціальні питання проектування і розрахунків, не викладені в стандартних прикладах розрахунків; орієнтовний обсяг 4-6с.

1.1.2.11. Висновки за проектом не нумеруються як розділ, містять критичну оцінку результатів розрахунку та відповідності вимогам стандартів, а також порівняння техніко-економічних показників спроектованого трансформатора з відомим прототипом.

1.1.2.12. Перелік використаної літератури не нумерують як розділ, містить кількість літературних джерел, які використовувались при виконанні проекту; оформлення списку виконують відповідно до вимог стандарту СТП КПП 2.001-83.

1.1.2.13. Додатки не нумерують як розділ і включають до них допоміжний матеріал, який при викладі в основній частині проекту є необов'язковий для розгляду, але необхідний для повноти опису розрахунків і обґрунтувань ухвалених рішень; додатки також містять звіт про патентні дослідження; оформлення додатків повинно відповідати вимогам державного стандарту ДСТУ 3008-95.

1.1.2.14. Специфікації не нумеруються як розділ і складаються з переліку основних складальних одиниць, деталей, стандартних виробів і матеріалів; оформлення специфікацій відповідно до вимог міждержавного стандарту ГОСТ 2.106-96.

1.1.3. Оформлення текстових документів

Основні вимоги до оформлення текстової частини проекту враховують рекомендації міждержавних стандартів систем ЄСКД (зокрема, стандартів ГОСТ 2.105-95, ГОСТ 2.106-96) і ЄСТД, державного стандарту України ДСТУ 3008-95 і стандарту підприємства (університету «КПП») – СТП КПП 2.001-83.

Нижче наведена частина вимог цих стандартів, з огляду на специфіку навчального процесу стосовно до курсового проектування.

1.1.3.1. Текстові документи пишуть на одній стороні аркуша білого паперу формату А4, мають титульний лист і наступні текстові листи.

1.1.3.2. Зразок виконання титульного листа наведений у додатку С.

1.1.3.3. Відповідно до вимог міждержавних стандартів ГОСТ 2.104-68 і ГОСТ 2.301-68 та державного стандарту ДСТУ 3008-95 лист реферату необхідно виконувати за формою 2, а наступні листи за формою 2а. Приклад оформлення даний у додатку D.

1.1.3.4. Текстову частину проекту згідно з вимогами державного стандарту ДСТУ 3008-95 виконують одним з наступних способів:

- машинописним, при цьому шрифт друкарської машинки повинен бути чітким, висотою не менше 2,5 мм, стрічка тільки чорного кольору (напівжирна);
- рукописним - креслярським шрифтом з висотою літер і цифр не менш 2,5 мм; цифри та літери необхідно писати чітко чорною тушшю (або ручкою із чорною пастою);
- із застосуванням друкуючих графічних пристроїв виводу ЕОМ.

1.1.3.5. Відстань від рамки форми до границь тексту на початку та наприкінці рядків - не менше 3 мм. Відстань від верхнього та нижнього рядка тексту від верхньої або нижньої рамки повинна бути не менше 10 мм. Абзаци в тексті починають відступом, який дорівнює п'ятьом ударам друкарської машинки (15-17 мм).

1.1.3.6. Текст проекту складається з розділів, підрозділів і пунктів. Розділи, підрозділи повинні мати заголовки. Пункти, як правило, заголовків не мають.

Заголовки повинні чітко і коротко відбивати зміст розділів, підрозділів.

Заголовки слід друкувати із прописної літери без крапки наприкінці, не підкреслюючи. Переноси слів у заголовках заборонено. Якщо заголовок складається із двох речень, то їх розділяють крапкою.

Відстань між заголовком і текстом при виконанні документа машинописним способом повинна бути рівною 3 або 4 інтервали, при виконанні рукописним способом – 15 мм. Відстань між заголовками розділу та підрозділу - 2 інтервали, при виконанні рукописним способом – 8 мм.

1.1.3.7. Кожний розділ текстового документа рекомендується починати з нового листа (сторінки).

Розділи повинні мати порядкові номери, позначені арабськими цифрами. У проекті реферат, зміст, бланк завдання, вступ, висновки і список використаної літератури не нумерують, оформлюють із нового листа.

1.1.3.8. Підрозділи повинні мати нумерацію арабськими цифрами в межах кожного розділу. Номер підрозділу складають з номерів розділу та підрозділу, розділених крапкою. Наприкінці номера підрозділу крапки не ставлять, наприклад:

3 Основні розрахунки

3.1 Розрахунок електричних величин

1.1.3.9. Пункти нумеруються арабськими цифрами в межах кожного підрозділу. Номер пункту складається з номерів розділу, підрозділу та пункту, розділених крапкою. Наприкінці номера пункту крапка не ставиться, наприклад:

1 Технічні умови

1.1 Технічні вимоги

1.1.1 Основні дані та розміри

1.1.3.10. Пункти, при необхідності, можуть бути розбиті на підпункти, які повинні мати порядкову нумерацію в межах кожного пункту.

1.1.3.11. У середині пунктів або підпунктів може бути наведено перелік. Перед кожною позицією переліку треба ставити дефіс або, при необхідності, посилання в тексті документа на одне з переліку, малу літеру, після якої ставиться дужка. Для подальшої деталізації переліку необхідно використовувати арабські цифри, після яких ставиться дужка, а запис виконується з абзацного відступу, наприклад:

- a) _____
- б) _____
 - 1) _____
 - 2) _____
- в) _____

1.1.3.12. Кожний пункт, підпункт і перелічення записують із абзацного відступу.

1.1.3.13. Текст проекту повинен бути коротким, чітким і не допускати різних тлумачень.

При викладі обов'язкових вимог у тексті повинні застосовуватися слова "повинен", "треба", "необхідно", "потрібно, щоб", "дозволяється тільки", "не допускається", "забороняється", "не треба". При викладі інших положень варто застосовувати слова "можуть бути", "як правило", "при необхідності", "може бути", "у випадку" і т.п. При цьому допускається використовувати оповідальну форму викладу тексту документа, наприклад "застосовують", "вказують" і т.п.

У проекті повинні застосовуватися науково-технічні терміни, позначення та визначення, встановлені відповідними стандартами, а при їхній відсутності - загальноприйняті в науково-технічній літературі.

1.1.3.14. У тексті проекту, за винятком формул, таблиць і малюнків, заборонено:

- скорочувати позначення одиниць фізичних величин, якщо вони вживаються без цифр, за винятком одиниць фізичних величин у заголовках і боковиках таблиць, і в розшифровках літерних позначень, що входять у формули та рисунки;
- застосовувати математичний знак мінус (-) перед від'ємними значеннями величин (треба писати слово "мінус");
- застосовувати знак "Ø" для позначення діаметра (треба писати слово "діаметр"). При вказівці розміру або граничних відхилень діаметра на кресленнях, які поміщені у тексті документа, перед розмірним числом треба писати знак "Ø";
- застосовувати без числових значень математичні знаки, наприклад >(більше), <(менше), =(дорівнює), ≥(більше або дорівнює), ≤(менше або дорівнює), ≠(не дорівнює), а також знаки №(номер), %(відсоток).

1.1.3.15. У формулах, як символи треба застосовувати позначення, встановлені відповідними державними стандартами. Пояснення символів і числових коефіцієнтів, які входять у формулу, якщо вони не пояснені раніше в тексті, повинні бути наведені безпосередньо під формулою. Пояснення кожного символу слід давати з но-

вого рядка в тій послідовності, у якій символи наведені у формулі. Перший рядок пояснення повинен починатися зі слова «де» без двокрапки після нього, наприклад:

Щільність кожного зразка ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$, обчислюють за формулою

$$\rho = m/V,$$

де m - маса зразка, кг ;

V - об'єм зразка, м^3 .

1.1.3.16. Дробові числа необхідно приводити у вигляді десяткових дробів. При неможливості виразити числове значення у вигляді десяткового дробу, допускається записувати у вигляді простого дробу в один рядок через косу рису, наприклад, $5/32$; $(50\text{A}-4\text{C})/(40\text{B}-2\text{C})$

1.1.3.17. Кількість ілюстрацій повинна відповідати вимогам до змісту проекту. Ілюстрації повинні бути розташовані по тексту (можливо як можна ближче до відповідних частин тексту). Ілюстрацію підписують словом “Рисунок” і нумерують арабськими цифрами в межах розділу; номер рисунка складається з номера розділу і порядкового номера в розділі, розділених крапкою, наприклад, “Рисунок 1.1”.

Обов'язкове посилання на ілюстрацію в тексті, де треба писати “... відповідно до рисунка 1.1”.

1.1.3.18. Ілюстрації, при необхідності, можуть мати найменування та пояснювальні дані (підрисуночний текст). Слово “Рисунок” і найменування поміщують після пояснювальних даних і розташовують наступним чином:

Рисунок 2.1 - Загальний вигляд трансформатора

1.1.3.19. Ілюстрації в додатках нумерують арабськими цифрами з додаванням перед цифрою позначення додатка. Наприклад, “Рисунок А.3”, тобто малюнок третій у додатку А.

1.1.3.20. При наявності таблиць у тексті їх розташовують по ходу тексту і позначають словом “Таблиця” із вказівкою номера розділу та порядкового номера таблиці в його межах. Далі розташовується назва таблиці через дефіс, наприклад

Таблиця 4.2 - Зовнішні характеристики трансформатора

Слово “Таблиця” вказують один раз ліворуч над першою частиною таблиці, над іншими частинами пишуть слова “Продовження таблиці” із вказівкою номера таблиці.

У тексті обов'язково повинне бути посилання на таблицю, наприклад, “... відповідно до даних таблиці 4.2 побудовані робочі характеристики на рисунку 4.2”.

Якщо у тексті є посилання та характеристика (призначення) таблиці, то її назву можна не вказувати.

1.1.3.21. Ілюстрації і таблиці, що розташовуються на окремих сторінках, включаються у загальну нумерацію аркушів, а при розмірах аркуша більше формату А4 враховують як одну сторінку.

1.1.3.22. Розрахунки, що заважають сприйняття думки і кінцевих результатів проекту (наприклад, варіанти розрахунків по науково-дослідній роботі), але необхідні для використання, поміщують у додатках.

Кожний додаток варто починати з нової сторінки із вказівкою поверху посеред сторінки слово “ДОДАТОК” і його позначення, а під ним у дужках для

обов'язкового додатка пишуть слово “обов'язковий”, а для інформаційного - “рекомендований” або “довідковий”.

Додаток повинен мати заголовок, що записують симетрично щодо тексту із прописної букви окремим рядком.

1.1.3.23. Додатки позначають заголовними літерами українського алфавіту, починаючи з А, за винятком літер З, І, О, Ч, Ї. Після слова “ДОДАТОК” йде літера, що позначає його послідовність, наприклад: “ДОДАТОК Б” (це другий додаток).

1.1.3.24. У тексті проекту обов'язкові посилання на додатки, які повинні мати загальну з іншою частиною тексту наскрізну нумерацію таблиць.

1.2. Графічна документація проекту

Ця частина проекту складається з робочих креслень: загального виду спроектованого трансформатора (один лист формату А1); трьох-чотирьох складальних одиниць або деталей (на одному листі формату А1).

В [9, 10, 11] дані робочі креслення та специфікації до них для трансформаторів, що випускають на заводах. Ці креслення варто використати за основу при виконанні графічної частини проекту.

Розміри робочих креслень, що виконуються, повинні відповідати розрахованим у проекті і вимогам міждержавних стандартів ЄСКД.

2. ТЕХНІЧНІ УМОВИ

Технічні умови - це перший розділ текстової документації проекту.

Відповідно до міждержавного стандарту ГОСТ 2.114-70 технічні умови (ТУ) містять всі вимоги до продукції, її виготовлення, контролю, прийому та поставці. ТУ повинні мати наступну послідовність викладу:

- вступна частина (не озаглавлюють, не нумерують);
- технічні вимоги (нумерують 1.1):
 - а) основні параметри і розміри (нумерують 1.1.1);
 - б) характеристики (властивості) (нумерують 1.1.2);
 - в) комплектність (нумерують 1.1.3);
 - г) маркування (нумерують 1.1.4);
 - д) упакування (нумерують 1.1.5);
- правила приймання (нумерують 1.2);
- методи контролю (виміру, випробувань) (нумерують 1.3);
- транспортування та зберігання (нумерують 1.4);
- вказівки по експлуатації (нумерують 1.5);
- гарантії постачальника (нумерують 1.6).

2.1. Вступна частина ТУ

Вступну частину не озаглавлюють, а йде вона текстом безпосередньо після назви розділу — 1 Технічні умови — з нової сторінки.

Вступна частина повинна мати наступний стандартний зміст (ГОСТ 2.114-70):

“Дані технічні умови поширюються на силовий трифазний двообмотковий масляний трансформатор потужністю ... загального призначення, призначений для ...”.

Далі необхідно вказати місце встановлення і умови експлуатації (кліматичне виконання та категорію розміщення), а у кінці вступу - умовне позначення трансформатора, наприклад: ТМ 6300/35 У1.

2.2. Підрозділ технічні вимоги ТУ

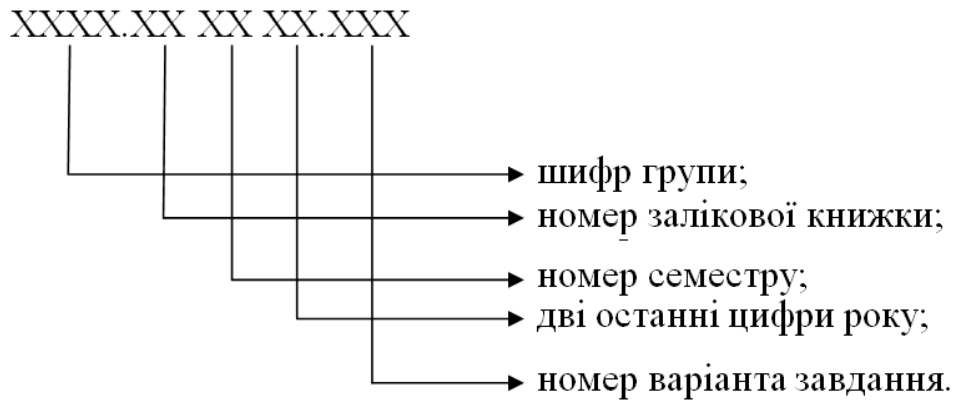
Підрозділ технічні вимоги (ТВ) має вступну частину, що не озаглавлюють, не нумерують і йде безпосередньо текстом після заголовка — 1.1 Технічні вимоги — з нової сторінки.

Вступна частина має стандартний зміст (ГОСТ 2.114-70):

«Спроекований трифазний силовий масляний трансформатор загального призначення потужністю ...кВА повинен відповідати вимогам даних технічних умов і комплекту документації згідно шифру XXXX.XXXXXX.XXX»

Документація курсового проекту повинна мати шифр, що вказується в рамках текстових форм 2 і 2а, а також на складальному кресленні трансформатора.

Кожний студент має власний шифр, що складається:



2.2.1. Основні параметри та розміри

У пункті 1.1.1 ТВ “Основні параметри та розміри” містяться підпункти:

- основні параметри,
- установчі та габаритні розміри.

2.2.1.1. Основні параметри зручно представити у вигляді таблиці, куди варто занести:

- повну потужність трансформатора, кВА;
- номінальні лінійні напруги обмоток ВН і НН, кВ;
- схему та групу з'єднання обмоток;
- кількість ступенів і межі регулювання напруги;
- втрати неробочого ходу, кВт;
- втрати короткого замикання, кВт;
- струм неробочого ходу, %;
- напругу короткого замикання, %;
- кількість фаз;
- частоту живлячої мережі, Гц;
- спосіб охолодження;
- характер навантаження.

Значення перерахованих параметрів частково зазначені у вихідних даних для проекту (додаток А) і у відповідних стандартах.

2.2.1.2. Треба вказати габаритні і установчі розміри трансформатора, дати ескіз розташування розширника, уводів і інших елементів конструкції на кришці баку, а також припустимі відхилення на стандартні розміри і відстані.

2.2.2. Характеристики (властивості)

У пункті 1.1.2 ТВ “Характеристики (властивості)” у підпунктах треба вказати особливості та вимоги до властивостей і параметрів стосовно конструкції, режимів експлуатації і випробувань спроектованого трансформатора.

Обов'язково вказати припустимі відхилення від заданих стандартами параметрів (лімітерів).

2.2.3. Комплектність

У тексті ТВ пункт “Комплектність” нумерують 1.1.3 і перераховують окремі складові частини трансформатора, які входять у комплект поставки (уводи, фільтр і т.д.), які зазвичай вказують у відповідних стандартах.

2.2.4. Маркування

У пункті тексту проекту 1.1.4 “Маркування” необхідно вказати маркування (літерні позначення) уводів ВН і НН, вимоги до нанесення і довговічності маркування.

2.2.5. Упакування

У пункті тексту проекту 1.1.5 “Упакування” треба вказати вимоги до упаковки спроектованого трансформатора при зберіганні і транспортуванні.

2.3. Правила приймання

У підрозділі “Правила приймання” (у тексті проекту нумерують 1.2) необхідно вказати види випробувань при прийманні виготовлених і модифікованих зразків спроектованого трансформатора.

2.4. Методи контролю

Підрозділ “Методи контролю” нумерується в тексті ТУ і повинен містити вказівки до методів контролю, норм показників, зазначених у підрозділі “Технічні вимоги”, причому послідовність викладу методів контролю повинна відповідати послідовності вимог у ТВ.

Обов’язково треба привести значення величин випробувальних напруг обмоток при промисловій частоті (таблиці 4.1 і таблиці 4.3 [1]).

2.5. Транспортування та зберігання

У підрозділі “Транспортування та зберігання” (у тексті проекту нумерується 1.4) повинні бути наведені вимоги до транспортування та зберігання спроектованого трансформатора.

2.6. Вказівки по експлуатації

У підрозділі “Вказівки по експлуатації” (у тексті ТУ нумерується 1.5) необхідно дати вказівки по місцю застосування, умовам охолодження, висоті розташування, заходам щодо протипожежної безпеки та техніки безпеки при монтажі і експлуатації трансформатора.

2.7. Гарантії постачальника

Підрозділ “Гарантії постачальника” нумерується в тексті ТУ 1.6 і повинен містити гарантії заводу-виробника по строках збереження та експлуатації за умови дотримання відповідних норм і правил.

Рекомендації:

1. Відповіді на перераховані вимоги розділу 2 викладені у відповідних стандартах додатка Д і в описі конструкції силових трансформаторів [1].
2. За вказівкою викладача структура ТУ може бути скорочена.
3. Обсяг розділу повинен складати 5-10 сторінок.

3. ВИБІР І ОПИС КОНСТРУКЦІЇ

Виконання вимог цього розділу, що у текстовій документації позначається 2, варто почати з вивчення §2.1, 2.3 [1]. Послідовність викладу змісту розділу подається нижче.

3.1. Загальна конструктивна схема трансформатора

В якості конструктивного прототипу в проекті рекомендується використати конструкцію серійного трансформатора загального призначення. Це дозволить при виготовленні спроектованого трансформатора використати відпрацьовану та надійну технологію виготовлення і уніфікувати окремі вузли та деталі.

У цьому розділі необхідно коротко описати конструкцію окремих систем трансформатора та дати ескіз загальної конструктивної схеми (компонування), де прономерувати основні елементи та вузли конструкції, на номери позицій яких варто посилалися в тексті при їхньому згадуванні.

Рекомендується подальший короткий виклад у такій послідовності:

- магнітна система - її призначення, класифікація по взаємному розташуванню стрижнів і ярем;
- система обмоток - їхня кількість і призначення, класифікація за способом взаємного розташування і формі;
- допоміжна система - перерахування наявності в трансформаторі, що проектується, основних вузлів і елементів таких систем;
- робота системи охолодження.

3.2. Конструкція магнітної системи

У цьому підрозділі необхідно описати особливості прийнятої в проекті конструкції магнітної системи:

- марку електротехнічної сталі і вид її ізоляції, коефіцієнт заповнення, рекомендовані значення індукції в стержні; це викладено в §2.2, таблиці 2.2 і таблиці 2.4 [1];
- спосіб зборки (шихтовки) і вид стиків (показати на ескізі два положення); вибір здійснити з §2.2 і §2.3 [1];
- прийняти по таблиці 2.5 [1] кількість ступенів стержня, коефіцієнт заповнення площі круга і орієнтовний діаметр стержня; дати ескіз стержня;
- описати і показати на ескізах пресування стержня і ярма, використовуючи рекомендації §2.3 [1].

3.3. Система обмоток

Виконання вимог по цьому підрозділі вимагає вивчення §5.1 і §5.2 [1]; викласти в тексті наступні моменти:

- короткий перелік вимог до обмоток;
- матеріал провідників обмоток; рекомендується застосовувати для трансформаторів загального призначення від 25 до 16000кВА — алюміній;
- вибір типів обмоток у спроектованому трансформаторі, навести їхні основні переваги і недоліки, для чого скористатися таблицею 5.8 [1], попередньо визначив-

ши фазний струм обмотки та переріз витка $P_{\phi} = I / j$, де густина струму j задається згідно рекомендацій таблиці 5.7 [1].

3.4. Допоміжна система

У цьому підрозділі треба вказати призначення елементів допоміжної системи (наприклад, розширювача, викидної труби, термосифонного фільтра і т.д.), які зазначені на ескізі конструктивної схеми.

4. ОСНОВНІ РОЗРАХУНКИ

Це третій розділ у текстовій документації проекту, складається з підрозділів і пунктів, містить основні розрахункові дані, що показують здатність спроектованого трансформатора забезпечити достатню надійність і необхідні робочі властивості при експлуатації.

Нижче подається послідовність потрібних розрахунків, яку дотримують також при розрахунках з використанням персональних комп'ютерів.

4.1. Визначення основних електричних величин

Підрозділ починає розрахункову частину спроектованого трансформатора і включає: розрахунки потужності на стержень; лінійних і фазних струмів і напруг; вибір випробувальних напруг; розрахунок активної і реактивної складових напруг короткого замикання.

Рекомендації та послідовність розрахунку зазначених величин наведені в §3.2 [1]. Особливо варто звернути увагу на правильність визначення фазних струмів і напруг обмоток, значення яких залежать від схеми з'єднання обмоток і визначають правильність подальшого ходу розрахунків.

Схема і група з'єднання обмоток задана в розділі "Технічні умови". Особливості роботи сполучень схем з'єднання обмоток ВН і НН викладені в §3.2 [1] і §12.4 [2].

Перевірку правильності визначення значень фазних струмів і напруг можна здійснити, визначивши добуток цих величин окремо для обмотки ВН і НН; ці добутки повинні бути рівні між собою та рівні номінальній потужності на фазу.

4.2. Вибір ізоляційних проміжків

Ізоляційні проміжки потрібні в трансформаторі для забезпечення електричної міцності при його роботі. Завищені величини цих проміжків призводять до збільшення запасу по електричній міцності, а також до росту витрат активних і конструктивних матеріалів, тобто до погіршення техніко-економічних показників трансформаторів.

Для виконання вимог цього підрозділу необхідно познайомитися з §§4.1-4.5 [1] і викласти в ньому: загальні вимоги до ізоляції трансформатора, підрозділ ізоляції щодо призначення, матеріал головної і поздовжньої ізоляції. Треба дати ескіз вікна спроектованого трансформатора з літерними позначеннями, прийнятими на рисунку 3.5 [1].

Використовуючи значення випробувальних напруг і рекомендації таблиці 4.4 і таблиці 4.5 в §4.4 і §4.5 [1], вибрати та вказати в тексті величини ізоляційних проміжків, які позначені на ескізі. Обов'язково дати розшифровку цих проміжків у тексті.

Зменшення величин ізоляційних проміжків менше рекомендованих неприпустимо.

Прийняті величини ізоляційних проміжків слід використати при подальших розрахунках.

4.3. Визначення основних розмірів трансформатора

В загальній теорії проектування електричних машин і трансформаторів вводиться поняття “основні розміри”.

Основні розміри істотно впливають на техніко-економічні і експлуатаційні показники. У трансформаторах під основними розмірами розуміють діаметр стержня, висоту обмоток та середній діаметр каналу розсіювання між обмотками.

Для студентів спеціальності “Електричні машини і апарати” пропонуються три способи визначення основних розмірів:

- за допомогою сталої Арнольда;
- за допомогою універсальної машинної сталої;
- за рекомендацією [1].

Для студентів інших спеціальностей досить провести розрахунок за рекомендацією [1].

На початку підрозділу потрібно задатися: електромагнітними навантаженнями (індукцією в стержні і лінійним навантаженням), коефіцієнтами заповнення кола стержня ступінчатою фігурою та заповнення сталі, геометричними коефіцієнтами і т.п., використовуючи конспект лекцій [1].

Найпоширеніший спосіб визначення основних розмірів викладений в §3.7 [1]. Слід зазначити, що в цьому випадку при визначенні діаметра стержня рекомендується вибір величини коефіцієнта β з таблиці 3.12 [1]. Це дозволить у загальному випадку звузити (зменшити) область пошуку варіанта трансформатора із заданим рівнем втрат, необхідною напругою короткого замикання і прийнятними техніко-економічними показниками.

З огляду на те, що зі зменшенням β зменшуються втрати неробочого ходу, вартість охолоджувальної системи, кількість масла і загальна маса трансформатора, з метою економії матеріалів можна рекомендувати за інших рівних умов вибирати менші із рекомендованих значень β .

Величину індукції в стержні варто приймати в межах (1,55-1,61)Тл.

По розрахованому діаметрі визначається і висота обмотки. Далі варто обов’язково прийняти уточнене значення діаметра стержня зі стандартної шкали в §2.3 [1] з урахуванням рекомендацій таблиці 2.5 [1].

За остаточно прийнятою величиною діаметра стержня:

- уточнюють висоту обмотки;
- визначають переріз чистого заліза стрижня;
- знаходять попереднє значення напруги (ЕРС) одного витка.

4.4. Розрахунок обмоток НН і ВН

Завдання підрозділу полягає у визначенні кількості витків і виборі марки проводів, уточненні конструкції обраного типу обмоток, остаточному розрахунку геометричних розмірів і маси обмоток.

Розрахунок обмоток проводять за рекомендацією §6.1 і §6.3 [1]; приклад послідовності розрахунку даний в §6.4 [1]. При розрахунку обмоток варто мати на увазі:

- трансформатори загального призначення виготовляють із обмотками з алюмінію;
- при виборі перерізу металу провідника обмоток по сортаменту обмотуваль-

ного проводу з таблиці 5.1, таблиці 5.2 або таблиці 5.3 [1] можливо деяке відхилення фактичних густин струму обмоток ВН і НН від середніх значень, отриманих з формул (5.4) або (5.5) [1]; однак це відхилення не слід допускати більше 5-10% середнього значення, причому напівсума дійсних значень густин струму обох обмоток повинна бути близька до розрахункового середнього значення;

- при використанні прямокутних провідників для обмоток необхідно перевірити припустимість прийнятого найбільшого розміру провідника, користуючись рисунком 5.38 [1]; якщо найбільший розмір обраного провідника більше припустимого, то необхідно збільшити кількість паралельних провідників, забезпечуючи той же переріз витка;

- потрібно прагнути того, щоб висоти обмоток ВН і НН були однакові і досить близькі до значення, отриманому при визначенні головних розмірів трансформатора; радіальний розмір a_1 обмотки повинен бути отриманий таким, щоб величина його була близька до значення, розрахованого при попередньому визначенні головних розмірів;

- розраховані висоти обмоток не повинні відрізнятися більш ніж на (5-10)% від раніше попередньо прийнятих, у противному випадку це призведе до зміни величини коефіцієнта β і неприпустимому відхиленню величин u_k і p_k від заданих;

- осьовий і радіальний розміри обмотки із проводу прямокутного профілю можна визначити, користуючись таблицею 5.2 [1], змінювати в бажаному напрямку шляхом відповідного варіювання співвідношення розмірів сторін обмоткового проводу, зберігаючи переріз його незмінним; ці ж розміри багат шарових циліндричних обмоток із круглого проводу регулюються зміною числа провідників у шарі;

- висоту котушкових обмоток у невеликих межах можна так само підбирати за рахунок осьового розміру висоти каналів між котушками; при цьому необхідно мати на увазі, що висота каналу не повинна бути менше мінімально припустимих значень, визначених у таблиці 4.9 [1].

В окремих випадках осьові розміри обмоток ВН і НН можуть бути взяті різними, причому більш низькою виконується обмотка ВН, тому що відстанню саме цієї обмотки від ярма визначається висота стержня осердя трансформатора та його маса. Таке рішення може бути прийняте при умовах, коли немає в сортаменті підходящого розміру проводу; радіальний канал не може бути взятий більше рекомендованого і т.п. При цьому варто мати на увазі, що при нерівновисокості обмоток ВН і НН виникають додаткові електродинамічні зусилля, що діють на обидві обмотки. Цю обставину треба враховувати при оцінці механічної міцності обмоток.

При виборі в якості обмоток ВН безперервної спіральної котушкової обмотки слід зазначити, що ця обмотка містить котушки різного призначення - основні, регулювальні та з посиленою ізоляцією. Ці котушки можуть містити різну кількість витків. Однак радіальні розміри всіх котушок повинні бути досить близькими, не слід допускати значного розходження в числах витків окремих котушок. Виключення можуть становити тільки регулювальні котушки, які повинні містити кількість витків, жорстко обмежені заданими межами регулювання напруги трансформатора.

Якщо радіальний розмір регулювальних котушок виявляється більшим ніж основних, можна число витків кожного ступеня регулювання не зосереджувати в одній котушці, а розподілити на дві котушки так, щоб кожна з них містила половину витків, що доводяться на один ступінь регулювання. Очевидно, що при цьому радіа-

льний розмір регулювальних котушок зменшиться вдвічі, а кількість їх стане в 2 рази більше.

Якщо радіальний розмір регулювальних котушок менше основних і ніякими комбінаціями чисел витків та кількістю регулювальних котушок його не вдається збільшити до потрібної величини, то між витками регулювальних котушок можна прокласти смуги електрокартону так, щоб радіальний розмір цих котушок став таким же, як і в основних (“розгін” витків).

Можливе виконання котушок із дробовим числом витків, але при цьому знаменник дробу повинен мати загальний дільник з кількістю рейок.

Методика проектування котушкової обмотки на стороні НН аналогічна, але відсутні регулювальні котушки.

Вибір схеми виконання відгалужень в обмотках ВН для регулювання напруги без збудження (ПБЗ) здійснювати з рисунка 6.6 [1]. Схеми, зображені на рисунку 6.6а і рисунку 6.6б, застосовують при багат шарових циліндричних обмотках, причому перша схема (рисунок 6.6а) застосовується тільки в трансформаторах потужністю до 160кВА включно. Схему, показану на рисунку 6.6в (“оборотна”), можна виконувати при багат шаровій циліндричній і спіральній котушковій обмотці для трансформаторів потужністю не більше 1000кВА при номінальній напрузі не вище 38,5кВ. Перераховані схеми дозволяють застосовувати найбільш простий і дешевий перемикач - один на три фази трансформатора (“нульовий” перемикач). Схема, зображена на рисунку 6.6г, застосовується для трансформаторів з котушковою обмоткою ВН потужністю від 1000кВА і вище через незадовільну механічну стійкість обмоток таких трансформаторів при виконанні регулювання за схемою на рисунку 6.6в. Однак схема, показана на рисунку 6.6г, вимагає застосування на кожну фазу окремого (однофазного) перемикача. У трифазних трансформаторах третього габариту три однофазних перемикачі вдається конструктивно об’єднати в один із загальним приводом.

Наприкінці розрахунку кожної обмотки необхідно визначити щільність теплового потоку, прийнявши коефіцієнт додаткових втрат 1,03...1,05. Чисельне значення щільності теплового потоку в трансформаторах із природним масляним охолодженням не рекомендується мати більше (1200-1400)Вт/м². У той же час низька щільність теплового потоку (<600...700Вт/м²) вказує на те, що в тепловому відношенні обмотка спроектована невдало: має місце надмірно розвинена поверхня обмотки, низька щільність струму і незадовільне використання металу обмоток.

Щільності теплових потоків повинні бути приблизно однаковими для обох обмоток. У протилежному випадку нагрівання їх буде неоднаковим, що свідчить про низьку якість проекту.

Обов’язковим є наявність по ходу розрахунку обмоток наступних ескізів: переріз витка обмоток ВН і НН; схема регулювання напруги ВН; розташування котушок обмоток по висоті стержня і розміри радіальних каналів (для котушкових обмоток); схема транспозиції проводів (для гвинтових обмоток).

4.5. Розрахунок втрат і напруги короткого замикання

Втрати і напруга КЗ є найважливішими параметрами, значення та допуски на відхилення яких обмежуються стандартами. Відповідно до міждержавного стандарту ГОСТ 11677-75 повні втрати КЗ при розрахунку трансформатора можуть відхи-

лятися від заданого значення не більше +5%, а напруга КЗ - не більше $\pm 5\%$. У готовому трансформаторі допуски в 2 рази більше (враховуються можливі відхилення при виготовленні трансформатора). Такі жорсткі вимоги обумовлені істотним впливом цих параметрів на техніко-економічні показники трансформатора.

Рекомендації, послідовність і об'єм розрахунків по визначенню втрат і напруги КЗ викладені в §7.1 і §7.2 [1], а приклад розрахунку в §7.5 [1]. Однак слід зазначити, що виконання зазначених вимог до величин втрат і напруги КЗ вимагає, як правило, декілька варіантів розрахунків. Для більш повної інформації та прийняття більш ефективних заходів по виконанню вимог рекомендується повністю провести розрахунок втрат і напруги КЗ, навіть якщо одна або обидві величини мають неприпустимі відхилення.

У тих випадках, коли відхилення розрахункових значень втрат і напруги КЗ перевищують допуски, у розрахунок необхідно ввести корективи.

При перевищенні втрат КЗ варто зменшити густину струму в обмотках ВН і НН. Потрібно відзначити, що обмотка ВН, як зовнішня, завжди по об'єму та масі більша обмотки НН, тому її частка в сумарних втратах КЗ більше. У зв'язку з цим при більших густинах струму в обмотці ВН і невеликому відхиленні від допуску втрат КЗ виконання вимог можна здійснити, зменшивши густину струму в обмотці ВН. Обов'язково при цьому оцінити вплив вжитих заходів на величину напруги КЗ.

При відхиленні напруги КЗ від заданої величини (з урахуванням допуску) коректування варто вести, як правило, за рахунок зміни її реактивної складової, оскільки вона для силових трансформаторів становить більшу частину повного значення напруги КЗ. Аналіз виразу (7.32) [1] показує, що величина реактивної складової напруги КЗ пропорційна добутку $\beta \cdot a_p$ і обернено пропорційна квадрату виткової напруги, тому коректування реактивної складової напруги КЗ варто здійснювати варіацією цих величин.

Невеликі зміни реактивної складової напруги КЗ можуть бути отримані зміною ширини приведенного каналу розсіювання a_p за рахунок зміни розміру між обмотками ВН і НН або висоти обмотки. При зміні відстані між обмотками ВН і НН варто мати на увазі, що мінімальні величини a_{12} обмежені значеннями, наведеними в таблиці 4.5 [1]. Оскільки зазвичай відстань a_{12} на початку розрахунку вибирається мінімальною, то цей спосіб практично застосовується в тих випадках, коли реактивну складову напруги КЗ потрібно збільшити на невелику величину і, головним чином, тоді, коли є запас по допуску на втрати КЗ.

Найбільш прийнятний спосіб корекції напруги КЗ, а точніше її реактивної складової, є зміна висоти обмоток. При цьому варто знати, що зміна висоти обмотки спричинить зміну радіального розміру, маси і втрат у ній, якщо густина струму обмотки незмінна. Звідси видно, що корекції напруги КЗ і втрат КЗ взаємопов'язані, і для правильного напрямку, що наближує до необхідних значень u_k і p_k , необхідно зробити повний попередній розрахунок цього підрозділу.

Реактивна складова напруги КЗ обернено пропорційна напрузі (ЕРС) витка у квадраті. Тому незначна зміна U_ϕ призводить до істотної зміни реактивної складової напруги КЗ. У зв'язку з цим варіювати величиною U_ϕ рекомендується в тих випадках, коли при розрахунку обмоток індукція в стержні виявилася менше 1,55Тл або невдало обраний діаметр стержня, що видно з порівнянь із діаметрами прототи-

пів, таблиця 2.5 [1].

Слід зазначити, що саме одержання потрібних величин втрат КЗ і напруги КЗ є найбільш складним завданням і вимагає декількох перерахунків, починаючи з розрахунків обмоток.

Якщо величина втрат КЗ і напруги КЗ відповідають пропонованим вимогам, то треба продовжити розрахунок трансформатора далі.

4.6. Розрахунок механічних сил в обмотках

Велику небезпеку для трансформатора представляють механічні сили, що виникають при короткому замиканні у результаті взаємодії струмів обмоток з магнітним полем розсіювання. Метою цього підрозділу є перевірка механічної міцності обмоток.

Для оцінки механічної міцності обмоток звичайно визначають механічну напругу у проводі обмотки і напругу стиску в ізоляційних міжкотушечних або міжвиткових прокладках, а також опорної ізоляції обмоток при ударному (максимальному) струмі раптового (або аварійного) короткого замикання.

Основи теорії і розрахункові формули для визначення механічних сил в обмотках і їхнього нагрівання при короткому замиканні наведені в §7.3, а приклад розрахунку в §7.4 [1].

Радіальні сили F_p прагнуть стиснути провідники обмотки НН і розтягти (розірвати) провідники обмотки ВН. Порушення первісної форми обмоток (стійкості) призводить до зміни ізоляційних проміжків і порушенню електричної міцності головної ізоляції обмоток.

При визначенні стискаючих осьових сил F_{oc} варто керуватися рисунком 7.11, §7.3 [1], де показаний розподіл осьових сил для різних випадків взаємного розташування обмоток НН і ВН. Підібравши один з випадків, що відповідає прийнятому розташуванню обмоток, у проекті необхідно визначити напрямок і величину F_{oc} , виражену через складові F'_{oc} і F''_{oc} .

По зусиллях F_p і F_{oc} знаходять відповідні механічні напруги, які не повинні перевищувати припустимі.

Завданням розрахунку є не тільки оцінка механічних напруг, але і прийняття, якщо буде потреба, ряду заходів, що виключають появу цих напруг вище припустимих.

Зменшення механічних напруг у провідниках обмотки досягається зменшенням густини струму і збільшення перерізу витка.

Для зменшення осьових сил треба:

- витримувати однакові осьові розміри усіх обмоток трансформатора;
- розташовувати регульовальні котушки котушкових обмоток у середині висоти обмотки; регульовальні витки багатопарових циліндричних обмоток варто розташовувати по висоті всього зовнішнього шару так, щоб витки кожного ступеня розташовувалися симетрично щодо середини висоти обмотки, рисунок 6.6в, рисунок 6.6г і рисунок 7.12 [1];
- прагнути до зменшення зони розриву в обмотці ВН;
- робити кілька збільшених радіальних масляних каналів у середині обмотки НН проти зони регулювання обмотки ВН.

Обов'язковою є перевірка нагрівання обмоток через $t_k = 4$ секунди з моменту раптового короткого замикання. Величина t_k обумовлена часом відключення струмовим захистом трансформатора. Результат вважають задовільним, якщо отримана температура не перевищує 200°C для алюмінієвих обмоток і 250°C - для мідних.

Для підстрахування проводять розрахунок часу відключення, при якому обмотки досягають зазначених найбільших припустимих температур. Цей час повинен перевищувати 4 секунди.

При оформленні тексту розрахунків необхідно дати ескізи радіальних і осьових зусиль, що діють на обмотки ВН і НН, а також розподіл по колу обмоток прокладок (для гвинтових і котушкових обмоток).

4.7. Розрахунок магнітного кола

Завданням підрозділу є визначення: геометричних розмірів магнітопроводу, величин індукції в стержні, ярмі та стиках, втрат НХ і струму НХ. Основні положення теорії, рекомендації з конструктивного виконання, методика розрахунку та приклад розрахунку наведені в главі 8 [1]. При розрахунку геометрії та маси магнітопроводу знаходять: розміри пакетів стержня і ярма та їхні активні перерізи, висоту стержня, відстань між осями стержнів, масу стержнів, ярем і повну масу активної сталі в трансформаторі. Потрібно привести ескіз перерізу стержня і ярма із вказівкою розмірів пакетів.

Міждержавний стандарт ГОСТ 11677-75 регламентує відхилення втрат НХ і струму НХ. Втрати НХ при розрахунках не повинні перевищувати задані не більше $+7,5\%$, а струм - не більше $+15\%$.

З огляду на можливу нестабільність якості сталі, недостатньо точний облік збільшення втрат внаслідок наклепу при механічній обробці, відхилення величин зазорів у місцях стику листів сталі відхилення втрат НХ і струму НХ готового трансформатора збільшують у 2 рази.

Значення втрат НХ і струму НХ, що перевищують допуск, обумовлені завищеними значеннями індукції за умови безпомилкового виконання попередніх розрахунків. Рекомендації з виконання вимог стандарту такі:

- при незначному перевищенні допуску можна збільшити переріз в ярмі;
- при значних перевищеннях, що не усуваються попереднім способом, варто змінити індукцію в стержні, повторивши весь розрахунок спочатку.

4.8. Розрахунок робочих характеристик

Під робочими характеристиками трансформатора розуміють залежності ККД і вторинної напруги від навантаження трансформатора при постійних коефіцієнті потужності, частоті і первинній напрузі.

Зазвичай характеристики розраховують для двох значень коефіцієнтів потужності $\cos \varphi_2 = 1,0 = \text{const}$ (активне) і $\cos \varphi_2 = 0,8 = \text{const}$ (активно-індуктивне навантаження).

Задаючись коефіцієнтом навантаження:

$$K_{HB} = I_2 / I_{2N} = 0.25; 0.5; 0.75; 1.0; 1.25,$$

розраховують характеристику ККД ($\eta = f(K_{HB})$) при $\cos \varphi_2 = \text{const}$ за відо-

ним виразом

$$\eta = 1 - \frac{K_{HB}^2 \cdot P_{K3} + P_{HX}}{K_{HB} \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2 + K_{HB}^2 \cdot P_{K3} + P_{HX}},$$

де P_{K3} - розрахункові втрати короткого замикання;

P_{HX} - розрахункові втрати неробочого ходу;

S_H - номінальна потужність трансформатора.

Розраховані значення $\eta = f(K_{HB})$ для двох значень $\cos \varphi_2$ представляють у вигляді таблиці, за даними якої будують залежності. На графіках варто вказати значення ККД для номінального навантаження ($K_{HB}=1$), а також максимальні значення ККД, які мають місце при

$$K_{HB} = \sqrt{\frac{P_{HX}}{P_{K3}}}.$$

Залежність вторинної напруги трансформатора U_2 від K_{HB} визначається як

$$U_2 = U_{2H} - \Delta U,$$

де $\Delta U \approx K_{HB}(U_{Ka} \cdot \cos \varphi_2 + U_{Kp} \cdot \sin \varphi_2)$ - зменшення напруги на обмотці зростом навантаження;

U_{Ka} і U_{Kp} - відповідно розрахункові значення активної і реактивної складових напруги короткого замикання;

K_{HB} і $\cos \varphi_2$ - відомі величини, які задаються також, як і при розрахунку характеристик ККД.

Якщо U_{Ka} і U_{Kp} визначають у відсотках, то ΔU виходить також у відсотках і U_{2H} варто брати рівним 100%.

Результати розрахунку потрібно звести в таблицю, за даними якої будують зовнішні характеристики на графіках, вказавши зменшення напруги ΔU при номінальному навантаженні.

4.9. Тепловий розрахунок

Мета розрахунків:

- визначити перепади (різницю) температур усередині обмоток і між поверхнею обмоток та охолоджуючим маслом;
- підібрати конструкцію і розміри бака, що забезпечують нормальну тепловіддачу всіх втрат при температурах обмоток і верхніх шарів масла, що не перевищує допустимі;
- визначити перевищення температури обмоток над навколишнім повітрям.

Перед тепловим розрахунком варто познайомитися із процесом тепловіддачі в трансформаторі §9.1 [1], з системами охолодження, §9.2 [1] і нормами меж перевищень температур, §9.3 [1].

Перевірочний тепловий розрахунок обмоток і розрахунок бака проводиться згідно §9.5, §9.6, §9.7 [1].

Розрахункові перевищення температури масла у верхніх шарах і обмоток над

навколишнім повітрям не повинні бути більше величин, припустимих для масляних трансформаторів відповідно до стандарту ГОСТ 11677-75. Якщо отримані значення перевищень температури більше припустимих, то треба збільшити поверхню охолодження, збільшуючи кількість навісних радіаторів або кількість труб у них.

Як ілюстрації потрібно привести ескізи бака з розміщенням у ньому активної частини з вказівкою відстаней від обмоток до стінок бака, розміри бака з радіаторами, ескіз якого накреслити в масштабі для уточнення поверхні випромінювання.

Слід зазначити, що вибір кількості радіаторів для трансформаторів потужністю не більше 630кВА треба проводити за рекомендацією [1], а при потужності 1000кВА і вище - з використанням [9, 10].

5. ПОРЯДОК ЗАХИСТУ ПРОЕКТУ

Виконаний проект пред'являється керівнику проекту для перевірки, після якої, за умови правильності розрахунків і оформлення текстової та графічної частини проекту, на титульному листі робиться позначка про допуск до захисту.

На захисті проекту студент розміщує на дошці графічну документацію та віддає текстову частину викладачам.

Далі коротко студент зобов'язаний викласти про пророблену роботу та відповісти на питання, які стосуються: ходу та методики проектування, конструкції, теорії та експлуатаційних властивостей трансформатора.

Для успішних відповідей на питання під час захисту рекомендується ознайомитися з переліком питань для самоконтролю знань (додаток В).

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. -М.: Энергия. 1976.-544 с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. -М.: Энергия, 1974. - 840с.
3. Постников И.М. Проектирование электрических машин. - Киев: Гостехиздат УССР, 1960. - 910 с.
4. Петров Г.Н. Электрические машины. 4.1. - М.: Энергия, 1974.-283 с.
5. Антонов М.В., Герасимова Л.С. Технология производства электрических машин. Учеб. пособ. для вузов. - М.: Энергоиздат, 1982. -512 с.
6. Воеводин И.Д., Бунин А.Г., Конторович Л.Н., Виногреев М.Ю. Основные направления и принципы создания САПР крупных силовых трансформаторов. Тр. ВНИИЭМ. Системы автоматического проектирования в электротехнической промышленности. - М.: 1982, т. 71. - 144 с.
7. Бородулин Ю.Б., Бурченко В.М., Попов А.В. База данных САПР типоразмеров трансформаторов класса 10-35 кВ. Автоматизация проектирования в электротехнике и энергетике. Межвуз. сб. науч. трудов. - Иваново, Ивановский гос. ун-т. 1982, с. 12-22.
8. Методические указания к курсовому проектированию силовых трансформаторов с применением ЭВМ по дисциплине «Инженерное проектирование и САПР» и «Электрические машины». Сост.: Н.Г. Васьковский, А.Н. Давыдов, Л.Е. Довгань, В.И. Подвижина, В.Ф. Росланкин. -к: КПИ, 1990.-52с.
9. Методические указания к выполнению курсовых проектов по курсам «Проектирование электрических машин», «Электрические машины» для студентов электротехнических специальностей. Раздел «Трансформаторы силовые масляные напряжением до ЮкВ». Сост.: Н.Г. Анпилогов, А.Н. Давыдов, В.Ф. Росланкин. - Киев: КПИ, 1988. - 72с.
10. Методические указания к выполнению курсовых проектов по дисциплинам «Инженерное проектирование и САПР», «Электрические машины» для студентов электротехнических специальностей. Раздел «Трансформаторы силовые масляные мощности 1000-10000 кВ-А класса напряжения до 35 кВ». Сост.: Н.Г. Анпилогов, А.Н. Давыдов, В.М.Красников, Н.А. Реуцкий, В.Ф. Росланкин. - Киев: КПИ, 1989. - 56 с.
11. Методические указания к выполнению курсовых проектов по курсам «Проектирование электрических машин», «Электрические машины» для студентов электротехнических специальностей. Раздел Трансформаторы силовые масляные мощности 25-630 кВ-А класса напряжения до 35 кВ». Сост.: Н.Г. Анпилогов, А.Н. Давыдов, Н.А. Реуцкий, В.Ф. Росланкин В.М. Красников. - Киев: КПИ, 1990. - 88 с.

Додаток А.
Таблиця варіантів завдань на проект

№	Номінальна потужність, кВ·А	Напруга, кВ		Втрати, кВт		Напруга	Струм	Схема з'єднання обмоток
		ВН	НН	НХ	КЗ	КЗ, %	Н.Х., %	
1	1000	6	0,4	2,1	12,2	5,5	1,4	Y/Y-0
2	1000	6	0,4	2,1	12,2	5,5	1,4	Δ/Y-11
3	1000	6	0,525	2,1	12,2	5,5	1,4	Δ/Y-11
4	1000	6	0,69	2,1	12,2	5,5	1,4	Δ/Y-11
5	1000	6	3,15	2,1	12,2	5,5	1,4	Y/Δ-11
6	1000	6	6,3	2,1	11,6	5,5	1,4	Y/Δ-11
7	1000	6,3	0,4	2,1	11,6	5,5	1,4	Y/Y-0
8	1000	6,3	0,4	2,1	11,6	5,5	1,4	Δ/Y-11
9	1000	6,3	0,525	2,1	11,6	5,5	1,4	Δ/Y-11
10	1000	10	0,4	2,1	12,2	5,5	1,4	Y/Y-0
11	1000	10	0,4	2,1	12,2	5,5	1,4	Δ/Y-11
12	1000	10,5	0,4	2,1	12,2	5,5	1,4	Y/Y-0
13	1000	10,5	0,525	2,1	12,2	5,5	1,4	Δ/Y-11
14	1000	10	0,525	2,1	12,2	5,5	1,4	Δ/Y-11
15	1000	10	0,69	2,1	12,2	5,5	1,4	Δ/Y-11
16	1000	10	3,15	2,1	12,2	5,5	1,4	Y/Δ-11
17	1000	10	6,3	2,1	11,6	5,5	1,4	Y/Δ-11
18	1000	10	10,5	2,1	11,6	5,5	1,4	Y/Δ-11
19	1000	20	0,4	2,1	11,6	5,5	1,4	Y/Y-0
20	1000	20	0,4	2,1	12,2	5,5	1,4	Δ/Y-11
21	1000	20	0,69	2,1	12,2	5,5	1,4	Δ/Y-11
22	1000	20	6,3	2,1	11,6	5,5	1,4	Y/Δ-11
23	1000	20	10,5	2,1	11,6	6,5	1,5	Y/Δ-11
24	1000	35	0,4	2,35	12,2	6,5	1,5	Y/Y-0
25	1000	35	0,69	2,35	12,2	6,5	1,5	Δ/Y-11
26	1000	35	3,15	2,35	12,2	6,5	1,5	Y/Δ-11
27	1000	35	6,3	2,35	11,6	6,5	1,5	Δ/Y-11
28	1000	35	10,5	2,35	11,6	6,5	1,5	Y/Δ-11
29	1600	6	0,4	2,8	18	5,5	1,3	Y/Y-0
30	1600	6	0,4	2,8	18	5,5	1,3	Δ/Y-11
31	1600	6	0,69	2,8	18	5,5	1,3	Δ/Y-11
32	1600	6	3,15	2,8	16,5	5,5	1,3	Δ/Y-11
33	1600	6	6,3	2,8	16,5	5,5	1,3	Δ/Y-11

№	Номинальна потужність, кВ·А	Напруга, кВ		Втрати, кВт		Напруга	Струм	Схема з'єднання обмоток
		ВН	НН	НХ	КЗ	КЗ, %	Н.Х., %	
34	1600	10	0,4	2,8	18	5,5	1,3	Δ/Y-11
35	1600	10	0,4	2,8	18	5,5	1,3	Y/Y-0
36	1600	10	0,69	2,8	18	5,5	1,3	Δ/Y-11
37	1600	10	3,15	2,8	16,5	5,5	1,3	Δ/Y-11
38	1600	10	6,3	2,8	16,5	5,5	1,4	Δ/Y-11
39	1600	20	0,4	2,8	18	5,5	1,4	Y/Y-0
40	1600	20	0,4	2,8	18	5,5	1,4	Δ/Y-11
41	1600	20	0,69	2,8	18	5,5	1,4	Δ/Y-11
42	1600	20	6,3	2,8	16,5	5,5	1,4	Δ/Y-11
43	1600	20	10,5	2,8	16,5	5,5	1,4	Δ/Y-11
44	1600	35	0,4	3,1	18	6,5	1,4	Y/Y-0
45	1600	35	0,69	3,1	18	6,5	1,4	Y/Y-0
46	1600	35	3,15	3,1	16,5	6,5	1,4	Δ/Y-11
47	1600	35	6,3	3,1	16,5	6,5	1,4	Δ/Y-11
48	1600	35	10,5	3,1	16,5	6,5	1,4	Δ/Y-11
49	2500	6	0,4	3,9	25,0	5,5	1,0	Δ/Y-11
50	2500	6	0,69	3,9	25,0	5,5	1,0	Δ/Y-11
51	2500	6	3,15	3,9	25,0	5,5	1,0	Y/Δ-11
52	2500	10	0,4	3,9	25,0	5,5	1,0	Δ/Y-11
53	2500	10	0,69	3,9	25,0	5,5	1,0	Y/Δ-11
54	2500	10	3,15	3,9	23,5	5,5	1,0	Y/Δ-11
55	2500	10	6,3	3,9	23,5	5,5	1,0	Y/Δ-11
56	2500	10	10,5	3,9	23,5	5,5	1,0	Y/Δ-11
57	2500	20	0,69	3,9	25,0	5,5	1,0	Δ/Y-11
58	2500	20	6,3	3,9	25,0	5,5	1,0	Y/Δ-11
59	2500	20	10,5	3,9	23,5	5,5	1,0	Y/Δ-11
60	2500	35	0,69	4,35	25,0	6,6	1,1	Y/Y-0
61	2500	35	3,15	4,35	23,0	6,6	1,1	Y/Δ-11
62	2500	35	6	4,35	23,5	6,6	1,1	Y/Δ-11
63	2500	35	10,5	4,35	23,5	6,6	1,1	Y/Δ-11
64	4000	6	3,15	5,45	33,5	6,5	0,9	Y/Δ-11
65	4000	6	6,3	5,45	33,5	6,5	0,9	Y/Δ-11
66	4000	10	3,15	5,45	33,5	6,5	0,9	Y/Δ-11
67	4000	10	6,3	5,45	33,5	6,5	0,9	Y/Δ-11
68	4000	20	6,3	5,45	33,5	6,5	0,9	Y/Δ-11
69	4000	20	10,5	5,45	33,5	6,5	0,9	Y/Δ-11

№	Номинальна потужність, кВ·А	Напруга, кВ		Втрати, кВт		Напруга	Струм	Схема з'єднання обмоток
		ВН	НН	НХ	КЗ	КЗ, %	Н.Х., %	
70	4000	35	3,15	5,45	33,5	6,5	0,9	Y/Δ-11
71	4000	35	6	5,7	33,5	7,5	1,0	Y/Δ-11
72	4000	35	10,5	5,7	33,5	7,5	1,0	Y/Δ-11
73	6300	10	3,15	7,65	46,5	6,5	0,8	Y/Δ-11
74	6300	10	6,3	7,65	46,5	6,5	0,8	Y/Δ-11
75	6300	10	10,5	7,65	46,5	6,5	0,8	Y/Δ-11
76	6300	10,5	6,3	7,65	46,5	6,5	0,8	Y/Δ-11
77	6300	20	6,3	7,65	46,5	6,5	0,8	Y/Δ-11
78	6300	20	10,5	7,65	46,5	6,5	0,8	Y/Δ-11
79	6300	35	3,15	8,0	46,5	7,5	0,6	Y/Δ-11
80	6300	35	6,3	8,0	46,5	7,5	0,6	Y/Δ-11
81	6300	35	10,5	8,0	46,5	7,5	0,6	Y/Δ-11

Додаток В.

Запитання та завдання для самоконтролю

1. Які основні тенденції у розвитку сучасного трансформаторобудування?
2. Що містить розділ «Технічні умови»?
3. Перерахуйте форми стандартизації, приведіть приклади використання їх у курсовому проекті.
4. Укажіть значення допусків на стандартизовані параметри трансформатора.
5. Що розуміють під кліматичним виконанням, категорією розміщення та ступенем захисту трансформатора?
6. Які сучасні тенденції в конструюванні трансформаторів?
7. Які матеріали використовуються в трансформаторобудуванні?
8. Які розміри вважають основними при проектуванні трансформатора?
9. Назвіть можливі способи визначення основних розмірів трансформатора, їхні переваги і недоліки.
10. Що розуміють під електромагнітними навантаженнями трансформатора? Як вони впливають на основні розміри?
11. До чого призводить помилковий розрахунок значень фазних струмів і напруг?
12. Яка мета вибору значень випробувальних напруг?
13. Який зв'язок величин Ізоляційних проміжків з масою, габаритами і вартістю трансформатора?
14. Що розуміють під головною і повздовжньою ізоляцією обмоток?
15. Які електроізоляційні матеріали застосовані в спроектованому трансформаторі? Який клас нагрівостійкості ізоляції?
16. Як впливає величина коефіцієнта β на геометричні розміри і масу трансформатора?
17. Як змінюються втрати та струм НХ, втрати та напруга КЗ при збільшенні коефіцієнта β ?
18. Який зв'язок густини струму, механічній міцності і вартості трансформатора зі значенням коефіцієнта β ?
19. Опишіть будову циліндричних обмоток.
20. Опишіть будову гвинтових обмоток.
21. Опишіть будову спіральних котушечних обмоток.
22. Якими критеріями потрібно користуватися при виборі типу обмоток трансформатора?
23. Які переваги та недоліки має обрана Вами схема регулювання напруги перед іншими схемами?
24. У якому напрямку та чому потрібно змінювати кількість витків обмотки ВН для збільшення на 5% напруги обмотки НН, якщо з боку ВН напруга не змінюється?
25. Як забезпечити номінальну напругу на обмотці НН, якщо напруга на обмотці ВН збільшилася на 5%?
26. Чи можна в спроектованому Вами трансформаторі регулювати напругу під навантаженням?
27. Спроектвані Вами обмотки (при збереженні їх розмірів і витків) розташовані на стержні з меншим діаметром. Чим буде відрізнятися новий трансформатор від

спроєктованого, якщо матеріал осердя і напруга, що підводиться до первинної" обмотки, залишилися незмінними?

28. Що Ви запропонуєте у випадках, коли втрати КЗ: вище припустимих на 1-2%, вище припустимих на 20-30%, нижче заданих на 20-30%?

29. Що називається напругою КЗ, чим визначається її значення?

30. Чи зміниться значення напруги КЗ трансформатора, якщо змінити співвідношення розмірів сторін провідника прямокутного перерізу, з якого виконані обмотки, при незмінній ширині каналу між обмотками ВН і НН?

31. Які зміни Ви повинні ввести, щоб одержати потрібну величину напруги КЗ, якщо вона розрахована: вище припустимої на 20-30%, нижче припустимої на 20-30%, відрізняється на 1-2% від припустимої?

32. Які застосовують заходи для зменшення осьових сил в обмотках трансформатора?

33. Дайте коротку характеристику матеріалів, що застосовуються у трансформаторобудуванні при виготовленні магнітопроводів.

34. З якою метою переріз стержня магнітопроводу трансформатора виконують ступінчастим?

35. Як можна зменшити масу сталі магнітопроводу трансформатора при збереженні номінальних значень напруг його обмоток?

36. Магнітопровід трансформатора помилково виконаний з гарячекатаної сталі замість холоднокатаної, розміри однакові. На чому це відіб'ється, якщо номінальне значення напруг обмоток не зміниться?

37. З якою метою застосовують у магнітопроводі косі стики?

38. Як здійснюється пресування ярма і стержнів магнітопроводу трансформатора?

39. Про що свідчить відхилення значень втрат і струму НХ від припустимих на: 20-30% вище, на 20-30% нижче? Ваші рекомендації.

40. Яка послідовність розрахунку магнітного кола трансформатора?

41. При яких умовах ККД трансформатора максимальний?

42. Перерахуйте складові, що входять у сумарні втрати.

43. Чому при заповненні бака трансформатора маслом поліпшується охолодження його обмоток? Як передається тепло в масляному трансформаторі від обмотки до зовнішнього навколишнього середовища?

44. Що таке температура і перевищення температури окремих частин трансформатора? Які допускаються перевищення температури для обмоток, магнітопроводу, масла у верхніх шарах?

45. Що варто робити, якщо отримане розрахунком перевищення температури обмоток трансформатора і масла у верхніх шарах: вище припустимих, відрізняються більш ніж на 5°C?

46. Поясніть призначення, принцип роботи і конструкцію розширювача.

47. Поясніть призначення, принцип роботи і конструкцію газового реле.

48. Яке призначення і конструкція вихлопної труби?

49. Конструкція і призначення термосифонного фільтра.

50. Конструкція і призначення осушувача повітря.

**Додаток С.
Титульний лист**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені Ігоря Сікорського"
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ**

КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

**Трансформатор силовий масляний
трифазний загального призначення
потужністю _____ кВА**

XXXX.XX XX XX.XXX

Курсовий проект

з дисципліни

"Основи автоматизованого проектування електричних машин"

Керівник: _____
прізвище і. п.

Виконав:

"ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ"

Студент _____
прізвище і.п.

_____ 20__ р.
підпис керівника дата

гр. ЕМ- _____

ЗАХИЩЕНО З ОЦІНКОЮ:

Залікова книжка № _____

оцінка прописом

особистий підпис студента

КИЇВ 20__

Додаток D.
Основні написи для документів

Форма 2

					XXXX.XX XX XX.XXX					
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Трифазний силовий масляний трансформатор загального призначення ____кВА			Літ.	Лист	Листів
Розробив										
Перевірив										
Реценз.								гр. ЕМ-____, ФЕА		
Н. Контр.										
Утвердив										

Форма 2а

					XXXX.XX XX XX.XXX					Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

Додаток Е.
Бланк завдання

«Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

(назва вищого навчального закладу)

Кафедра: Електромеханіки

Дисципліна: Основи автоматизованого проектування електричних машин

Спеціальність: Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Курс _____ Група _____ Семестр _____

ЗАВДАННЯ
на курсовий проект (роботу) студента

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи): _____

2. Термін здачі студентом завершеного проекту (роботи): _____

3. Вихідні дані по проекту (роботі): _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розгляданню): _____

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): _____

6. Дата видачі завдання: _____

Додаток F.
Календарний план
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів курсового проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітки
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			
6.			
7.			
8.			
9.			
10.			
11.			
12.			
13.			
14.			
15.			

Студент _____
(підпис)

(прізвище, ініціали)

Керівник _____
(підпис)

(прізвище, ініціали)

(дата)