Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПРИСТРОЇ

Методичні вказівки до самостійної роботи
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
галузі знань 14 Електрична інженерія
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
денної та заочної форм навчання

Луцьк 2025

УДК 621.391(07)
Е50

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій ЛНТУ

Директор бібліотеки _____ Наталія ПОЛІЩУК

Рекомендовано до видання вченою радою факультету комп'ютерних та інформаційних технологій ЛНТУ, протокол № __ від «__» _____2025 року.

Голова вченої ради ФКІТ _____ Інна КОНДІУС

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ, протокол № ___ від «___» _____2025 року.

Завідувач кафедри ЕіТК	_____	Валентин ЗАБЛОЦЬКИЙ, к.т.н., доц. кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ
Укладач:	_____	Віктор ЛИШУК, к.т.н., доц. кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ
Рецензент:	_____	Микола ЄВСЮК, к.т.н., доц. кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ
Відповідальний за випуск:	_____	Валентин ЗАБЛОЦЬКИЙ, к.т.н., доц., завідувач кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ

Е50 Електромеханічні пристрої. Методичні вказівки до самостійної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 Електрична інженерія спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка денної та заочної форм навчання / укладач В. В. Лишук. Луцьк: ЛНТУ, 2025. 64 с.

Навчальне видання є методичними вказівками до самостійної роботи і містить комплексні практичні індивідуальні завдання з детальними поясненнями до них. Призначене для вивчення дисципліни «Електромеханічні пристрої» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

В. В. Лишук, 2025

Зміст

Вступ 4
1. Методичні вказівки до вивчення розділів «Асинхронні машини», «Синхронні машини», «Машини постійного струму»…… 5
2. Методичні вказівки до вивчення розділу «Трансформатори»…… 17
3. Комплексні практичні індивідуальні завдання (КПІЗ) 21
3.1. Завдання на КПІЗ №1. «Розрахунок механічної та робочих характеристик асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором»… 21
3.2. Завдання на КПІЗ №2. «Розрахунок електромеханічних параметрів та побудова механічної характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором»…… 28
3.3. Завдання на КПІЗ №3. «Розрахунок параметрів і характеристик синхронного генератора»…….. 32
3.4. Завдання на КПІЗ №4. «Розрахунок параметрів і характеристик синхронного двигуна»..... 38
3.5. Завдання на КПІЗ №5. «Розрахунок параметрів і характеристик двигуна постійного струму» 44
3.6. Завдання на КПІЗ №6. «Регулювання швидкості обертання двигунів постійного струму…… 48
3.7. Завдання на КПІЗ №7. «Розрахунок трифазного трансформатора».. 51
3.8. Завдання на КПІЗ №8. «Розрахунок характеристик трифазного трансформатора»…… 55
Перелік питань до самостійного опрацювання……... 61
Список використаних джерел……..... 63

Вступ

Сучасна енергетика являє собою складну багаторівневу ієрархічну структуру, призначену забезпечити комфортні умови проживання населення, а також нормальне функціонування промислових підприємств, виробництв і закладів. Лише на основі надійної та ефективної системи забезпечення споживачів різного рівня потрібною електричною енергією можливі їх нормальне функціонування і розвиток.

Електромеханічні пристрої (електричні машини) за призначенням класифікуються на трансформатори (для перетворення напруги однієї величини в іншу), генератори (для перетворення механічної потужності в електричну), двигуни (для перетворення електричну потужності в механічну), тахогенератори (для перетворення частоти обертання в електричний сигнал), електромашинні підсилювачі (підсилювачі потужності електричних сигналів), синхронні компенсатори (для підвищення коефіцієнта потужності), індукційні регулятори (для регулювання напруги змінного струму), сельсини (для отримання електричних сигналів, пропорційних куту повороту вала) тощо. Електричні машини за принципом дії поділяються на колекторні і безколекторні. Безколекторні машини – це машини змінного струму – асинхронні і синхронні. Колекторні електричні машини використовують головним чином для роботи на постійному струмі в якості генераторів або двигунів. Лише колекторні машини невисокої потужності виконують універсальними двигунами, здатними працювати як від мережі постійного, так і змінного струму.

Електричні машини однакового принципу дії можуть відрізнятися схемами ввімкнення або іншими ознаками, що впливають на експлуатаційні властивості цих машин. Наприклад, асинхронні і синхронні машини можуть бути трифазними або однофазними. Асинхронні машини в залежності від конструкції обмотки ротора можуть бути з короткозамкненим або фазним ротором. Синхронні машини і колекторні машини постійного струму в залежності від способу створення в них магнітного поля збудження поділяють на машини з обмоткою збудження і машини з постійними магнітами.

Дане навчально-методичне видання призначене для студентів денної та заочної форм навчання за спеціальністю «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», як методичні вказівки при вивченні дисципліни «Електромеханічні пристрої».

1. Методичні вказівки до вивчення розділів «Асинхронні машини», «Синхронні машини», «Машини постійного струму»

(*4 семестр)*

1.1. Вступ

Основні етапи розвитку електричних машин, їх роль і значення в сучасній техніці та електроенергетиці. Класифікація, номінальні дані та конструкції електричних машин. Матеріали, що використовуються в електромашинобудуванні. Закони електромеханіки.

Література: [1,с.8-27; 3,с.11-20; 5,с.6-19; 6,с.5-16, 21-23].

Запитання для самоконтролю

– За якими ознаками класифікують електричні машини?

– Які величини називають номінальними величинами електричних машин?

– Які матеріали відносять до активних, ізоляційних, конструктивних?

– Назвіть класи нагрівостійкості ізоляційних матеріалів.

– Назвіть закони електромеханіки.

Методичні рекомендації до вивчення розділу

Під час вивчення вступу до дисципліни „Електричні машини" необхідно звернути увагу на: основні етапи історії розвитку електричних машин; вклад українських та російських вчених у розвиток електромашинобудування; конструкцію, класифікацію та номінальні дані електричних машин; закони електромеханіки.

Після вивчення цього розділу студенти повинні:

– Знати структуру курсу електричних машин та його зв'язок з іншими дисциплінами, основні етапи розвитку електромашинобудування, закони електромеханіки, класифікацію та номінальні дані електричних машин.

– Розуміти, що режим роботи електричної машини визначається не тільки видом енергетичного процесу, що протікає в ній, але й має кількісну оцінку (потужність, напруга, струм, ККД, тощо).

– Вміти обґрунтувати значення робіт українських і російських вчених у розвитку електричних машин як науки, пояснити особливості конструкцій електричних машин, пов'язаних з різними факторами.

1.2. Загальні питання теорії машин змінного струму

1.2.1. Загальні питання машин змінного струму. Основні види машин змінного струму та їх будова. Статорні обмотки машин змінного струму.

Література: [1, с.156-159; 3, с.57-83; 5, с.109-117].

Запитання для самоконтролю

– Розкажіть будову асинхронної машини.

– Розкажіть будову синхронної машини.

– Назвіть основні види статорних обмоток машин змінного струму, вкажіть їх переваги і недоліки.

– Якими величинами характеризуються обмотки машин змінного струму?

1.2.2. Електрорушійні сили обмоток машин змінного струм. Електрорушійна сила котушки, котушкової групи і фази. Покращення форми кривої ЕРС обмоток машин змінного струму.

Література: [1, с.154-155; 3, с.86-102; 5, с.122-127].

Запитання для самоконтролю

– Запишіть вирази для обчислення електрорушійних сил провідника, витка, котушки, котушкової групи, фази обмотки.

– Запишіть вирази для визначення коефіцієнтів вкорочення, розподілу та обмоткового коефіцієнту.

– З якою метою використовують вкорочення та розподіл обмотки?

– Для чого використовують скіс пазів або полюсів?

1.2.3. Магніторушійні сили обмоток машин змінного струму. Магніторушійні сили котушки, фазної обмотки, трифазної обмотки. Індуктивний опір обмоток машин змінного струму.

Література: [1, с.138-145; 2, с.131-152; 5, с.128-142].

Запитання для самоконтролю

– Запишіть вирази для визначення намагнічуючих сил котушки з діаметральним кроком, котушкової групи, фази обмотки з вкороченим кроком, трифазної обмотки.

– Яке магнітне поле в машинах змінного струму називають робочим, а яке – полем розсіяння?

– Запишіть вираз для індуктивного опору розсіяння обмотки статора.

Методичні рекомендації до вивчення розділу

На початку вивчення цього розділу необхідно ознайомитися з основними видами електричних машин змінного струму та їх будовою. Приділити увагу загальним характеристикам статорних обмоток та їх розгорнутим схемам.

При вивченні цієї теми необхідно зрозуміти те, що кожна фаза створює нерухому в просторі магніторушійну силу, однак магніторушійна сила трифазної обмотки обертається в просторі.

Особливу увагу звернути на фізичну сутність способів покращення форми кривої ЕРС обмоток машин змінного струму.

Після вивчення цього розділу студенти повинні

– Знати основні види машин змінного струму та їх будову, формули для визначення ЕРС та МРС трифазної обмотки.

– Розуміти фізичну суть електромагнітних процесів в електричних машинах, що створюються обмотками.

– Вміти записати формули для визначення ЕРС та МРС трифазної обмотки, намалювати розгорнуту схему найпростішої трифазної обмотки.

1.3. Асинхронні машини

1.3.1. Загальні відомості про асинхронні машини. Області використання, конструкція та принцип роботи асинхронних машин. Трифазна асинхронна машина при нерухомому роторі. Робота асинхронної машини з загальмованим ротором як фазорегулятор та індукційний регулятор.

Література: [1, с.178-188; 2, с.177-185; 5, с.144-155].

Запитання для самоконтролю

– Опишіть конструкцію та принцип роботи асинхронних машин.

– Опишіть фізичні процеси, що відбуваються в асинхронній машині з нерухомим ротором при неробочому ході та навантаженні.

– Поясніть принцип роботи асинхронної машини як фазорегулятора та індукційного регулятора.

1.3.2. Електромагнітні процеси в асинхронній машині при рухомому роторі. Заміна обертового ротора нерухомим. Механічна характеристика та стійкість роботи асинхронного двигуна. Робочі характеристики асинхронного двигуна.

Література: [1, с.204-213; 2, с.211-225; 5, с.156-168].

Запитання для самоконтролю

– У чому полягає суть заміни обертового ротора нерухомим?

– Накресліть Т і Г – подібні заступні схеми асинхронної машини.

– Намалюйте енергетичну діаграму асинхронного двигуна.

– Дайте визначення електромагнітної, механічної та корисної потужностей.

– Виведіть формулу для визначення електромагнітного моменту асинхронного двигуна.

– Запишіть вираз для обчислення електромагнітного моменту асинхронного двигуна за величиною максимального моменту (формула Клосса).

– Що називають механічною характеристикою асинхронного двигуна? Нарисуйте її та покажіть характерні точки.

– Покажіть область стійкої роботи асинхронного двигуна на механічній характеристиці.

– Які залежності називають робочими характеристиками?

– Нарисуйте робочі характеристики та поясніть їх вигляд.

1.3.3. Пуск асинхронних двигунів. Пуск асинхронних двигунів з короткозамкненим та фазним ротором. Асинхронні двигуни з покращеними пусковими характеристиками.

Література: [1, с.214-221; 2, с.266-272; 5, с.169-174].

Запитання для самоконтролю

– Які існують способи пуску асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором?

– Як відбувається пуск асинхронного двигуна з фазним ротором?

– Поясніть принципи роботи глибокопазного асинхронного двигуна.

– Опишіть будову та принцип роботи двокліткового асинхронного двигуна.

1.3.4. Регулювання швидкості обертання та гальмівні режими роботи асинхронних двигунів. Регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна з короткозамкненим та фазним ротором. Гальмівні режими роботи асинхронного двигуна.

Література: [1, с.223-232; 2,с.273-284; 5, с.177-189]

Запитання для самоконтролю

– Назвіть можливі способи регулювання швидкості ротора асинхронного двигуна.

– Наведіть способи регулювання швидкості обертання двигунів із фазним ротором.

– Назвіть гальмівні режими роботи асинхронних двигунів.

– Що таке рекуперативне гальмування?

– У чому полягає суть гальмування противмиканням?

– Як здійснюють динамічне гальмування?

1.3.5. Спеціальні асинхронні машини. Асинхронний перетворювач частоти. Обертові трансформатори. Сельсини. Лінійні двигуни. Асинхронний двигун з масивним ротором.

Література: [1, с.246-247; 2, с.315-320; 5, с.190-197].

Запитання для самоконтролю

– Розкажіть принцип роботи асинхронного перетворювача частоти.

– Будова, призначення та принцип роботи обертових трансформаторів.

– Робота сельсина в індикаторному та трансформаторному режимах.

– Розкажіть будову та принципи роботи лінійних двигунів і двигунів з масивним ротором.

1.3.6. Однофазні асинхронні двигуни. Однофазний конденсаторний двигун. Робота трифазного асинхронного двигуна від однофазної мережі. Однофазні двигуни з екранованими полюсами.

Література: [1, с.248-250; 2, с.305-314; 5, с.198-207].

Запитання для самоконтролю

– Будова та принцип роботи однофазного конденсаторного двигуна.

– Опишіть роботу трифазного асинхронного двигуна в однофазному режимі.

– Розкажіть будову та принцип роботи однофазного асинхронного двигуна з екранованими полюсами.

Методичні рекомендації до вивчення розділу

Нині асинхронні двигуни є найбільш розповсюджені завдяки малій вартості та надійності. Принцип роботи асинхронного двигуна ґрунтується на використанні обертового магнітного поля. Варто зазначити, що фізичні процеси в асинхронних двигунах описуються рівняннями електричної і магнітної рівноваги, що аналогічні рівнянням трансформатора. Відмінна особливість цих рівнянь пов'язана з наявністю величини, яка називається ковзанням.

При вивченні рівняння електромагнітного моменту доцільно звернути увагу на квадратичну залежність електромагнітного моменту від напруги живлення, а також на вплив додаткових опорів у колі ротора на пусковий момент і струм двигуна. Вивчаючи питання пуску, регулювання швидкості обертання, та гальмівні режими доцільно вияснити характер зміни механічних характеристик при різних режимах.

Після вивчення цього розділу студенти повинні:

– Знати будову трифазних асинхронних двигунів з фазним та короткозамкненим ротором; способи пуску, регулювання швидкості обертання та гальмівні режими роботи асинхронних двигунів; механічні та робочі характеристики.

– Розуміти електромагнітні процеси в трифазному асинхронному двигуні; фактори, що впливають на швидкість обертання ротора.

– Вміти під'єднати трифазний асинхронний двигун до мережі живлення і провести його пуск; змінити напрям обертання ротора; визначити за каталожними даними номінальний, максимальний і пусковий момент, пусковий струм, номінальне ковзання.

1.4. Синхронні машини

1.4.1. Загальні питання синхронних машин. Конструктивні схеми і принцип роботи синхронної машини. Охолодження синхронних машин. Системи збудження синхронних машин.

Література: [2, с.45-59; 2, с.208-219; 5, с.290-312].

Запитання для самоконтролю

– Опишіть конструкції і принцип роботи синхронних машин.

– Розкажіть про охолодження синхронних машин.

– Що таке електромашинна та вентильна системи збудження?

1.4.2. Електромагнітні процеси в синхронному генераторі при неробочому ході. Робота синхронного генератора при неробочому ході. Розрахунок магнітного кола синхронних машин при неробочому ході.

Література: [2, с.60-63; 5, с.320-328].

Запитання для самоконтролю

– За якою формулою визначають діюче значення електрорушійної сили обмотки якоря?

– Якими коефіцієнтами характеризується магнітне поле обмотки збудження?

– За яким алгоритмом відбувається розрахунок магнітного кола синхронних машин у режимі неробочого ходу?

1.4.3. Електромагнітні процеси в синхронному генераторі при навантаженні. Реакція якоря синхронного генератора. Векторні діаграми неявнополюсного та явнополюсного синхронних генераторів з урахуванням та без урахування насичення магнітного кола.

Література: [2, с.64-73; 5, с.344-362].

Запитання для самоконтролю

– Що таке реакція якоря?

– Від чого залежить напрям реакції якоря?

– Запишіть рівняння електричної рівноваги обмотки якоря для явнополюсного і неявнополюсного синхронного генератора.

– Побудуйте векторні діаграми напруг неявнополюсного і явнополюсного синхронного генератора, якщо задані: напруга обмотки якоря, струм якоря, кут φ і параметри машини.

– Як враховують насичення магнітного кола у векторних діаграмах синхронних генераторів?

1.4.4. Параметри і характеристики синхронного генератора при автономному навантаженні. Характеристики синхронного генератора при

роботі на автономне навантаження. Визначення індуктивних опорів синхронної машини.

Література: [2, с.74-75; 5, с.346-357].

Запитання для самоконтролю

– Що називають характеристикою неробочого ходу синхронного генератора та який вона має вигляд?

– Яку характеристику називають характеристикою короткого замикання синхронного генератора та який вона має вигляд?

– Що називають зовнішньою характеристикою синхронного генератора? Який вигляд вона має для активного, індуктивного і ємнісного навантаження?

– Що називають регулювальною характеристикою синхронного генератора? Як залежить вигляд цієї характеристики від характеру навантаження?

– Як визначаються індуктивні опори X_d, X_q, X_σ?

1.4.5. Паралельна робота синхронних генераторів. Вмикання синхронного генератора на паралельну роботу. Регулювання активної і реактивної потужностей генератора, що працює паралельно з мережею. Потужність, електромагнітний момент, статична стійкість та режими роботи синхронного генератора при паралельній роботі з мережею.

Література: [2, с.80-93; 5, с.386-405].

Запитання для самоконтролю

– Назвіть умови вмикання синхронного генератора на паралельну роботу з мережею.

– У яких випадках використовують грубу синхронізацію та як вона виконується?

– Як навантажити ввімкнену в мережу синхронну машину реактивною потужністю?

– Як навантажити ввімкнену в мережу синхронну машину активною потужністю у режимі генератора та двигуна?

– Нарисуйте кутову характеристику активної потужності неявнополюсної та явнополюсної синхронної машини.

– Як залежать максимальний момент синхронної машини при роботі її паралельно з мережею від напруги мережі та струму збудження?

– Що називають статичною перевантажувальною здатністю синхронної машини та від чого вона залежить?

– Дайте означення V-подібної характеристики, поясніть характерні точки та її вигляд.

1.4.6. Синхронні двигуни. Робота синхронної машини в режимі двигуна. Характеристики синхронного двигуна. Пуск та регулювання швидкості обертання ротора синхронного двигуна. Синхронний компенсатор.

Література: [2, с.99-113; 4, с.343-350; 5, с.275-284].

Запитання для самоконтролю

– Назвіть переваги й недоліки синхронних двигунів порівняно з асинхронними.

– Назвіть характеристики синхронних двигунів.

– Які існують способи пуску синхронних двигунів?

– Як регулюють швидкість обертання ротора синхронного двигуна?

– Для чого використовують синхронний компенсатор?

1.4.7. Синхронні машини спеціального виконання. Синхронні реактивні двигуни. Синхронний гістерезисний двигун. Синхронні машини з збудженням від постійних магнітів. Крокові двигуни. Індукторні синхронні машини. Синхронні машини з надпровідними обмотками збудження.

Література: [2, с.127-150; 5, с.385-397].

Запитання для самоконтролю

– Розкажіть будову та принцип роботи синхронних реактивних двигунів.

– Що таке синхронний гістерезисний двигун?

– Розкажіть будову синхронних машин із збудженням від постійних магнітів.

– Де використовують крокові двигуни?

– Сфери використання індукторних синхронних машин.

1.4.8. Несиметричні режими роботи та перехідні процеси в синхронних генераторах. Несиметричні режими роботи синхронних генераторів. Несиметричні короткі замикання. Раптове трифазне коротке замикання синхронного генератора. Перехідні процеси при гашенні поля.

Література: [2, с.122-126; 5, с.398-412].

Запитання для самоконтролю

– Умови виникнення несиметричних режимів.

– Який вигляд мають характеристики одно-, дво- і трифазного короткого замикань?

– Опишіть фізичні процеси при раптовому трифазному короткому замиканні синхронного генератора.

– Який процес називають гашенням поля? Коли його використовують?

Методичні рекомендації до вивчення розділу

Оскільки вся електрична енергія виробляється на електричних станціях синхронними машинами, то особливу увага слід звернути на конструкцію ротора: неявнополюсну (турбогенератор) і явнополюсну (гідрогенератор). При навантаженні синхронної машини осі полюсів статора і ротора розходяться на кут що визначається навантаженням. Якщо цей кут досягає критичного значення, ротор випадає із синхронізму. При вивченні механічних і робочих характеристик синхронного двигуна необхідно звернути увагу на його перевантажувальну здатність, залежність коефіцієнта потужності від навантаження та струму збудження. Широкого практичного використання набули синхронні машини спеціального виконання. Зверніть увагу на їх будову та сфери застосування.

Після вивчення цього розділу студенти повинні:

– Знати будову синхронних машин з явно та неявно вираженими полюсами; принцип їх роботи в режимі генератора та двигуна; кутові, механічні та робочі характеристики; способи регулювання коефіцієнта потужності двигуна.

– Розуміти електромагнітні процеси в синхронних машинах; залежність моменту від кута між осями полюсів статора і ротора; роль короткозамкненої обмотки ротора трифазного синхронного двигуна.

– Вміти визначити конструкцію явно та неявнополюсної синхронної машини; оцінити вплив коефіцієнта потужності синхронного двигуна на економію електричної енергії.

1.5. Машини постійного струму

1.5.1. Загальні питання машин постійного струму. Будова, принцип роботи і конструкція машин постійного струму. Електрорушійна сила обмотки якоря і електромагнітний момент машини постійного струму.

Література: [2, с.151-160; 3, с.27-38; 5, с.313-323].

Запитання для самоконтролю

– Поясніть принцип роботи машини постійного струму у режимах двигуна та генератора.

– Яку форму мають електрорушійна сила та струм в обмотці якоря і зовнішньому колі?

– За якими формулами визначають електрорушійну силу обмотки якоря і електромагнітний момент МПС?

1.5.2. Якірні обмотки машин постійного струму. Класифікація обмоток машин постійного струму та їх елементи. Проста петльова обмотка. Проста хвильова обмотка.

Література: [2, с.161-167; 3, с.53-89; 5, с.324-330].

Запитання для самоконтролю

– Що називають секцією обмотки?

– Що таке елементарний паз, реальний паз?

– Що називають першим і другим частковим кроком, результуючим кроком та кроком по колектору?

– Покажіть їх на прикладі простої петльової обмотки.

– Петльова та хвильова обмотки. У чому їх відмінність?

– Для чого призначені зрівнювальні з'єднання, в яких обмотках їх використовують?

1.5.3. Реакція якоря в машинах постійного струму. Поперечна та поздовжня реакція якоря. Круговий вогонь на колекторі.

Література: [2, с.168-175; 3, с.99-109; 5, с.331-340].

Запитання для самоконтролю

– Що таке реакція якоря?

– У яких випадках виникає поздовжня реакція якоря? Як вона впливає на магнітний потік полюсів?

– Як впливає поперечна реакція якоря на розподіл магнітного поля в повітряному проміжку?

– Для чого використовують компенсаційну обмотку, де вона розташовується, як вмикається?

– Коли виникає круговий вогонь на колекторі?

1.5.4. Комутація струму в машинах постійного струму. Загальні відомості про комутацію. Рівняння комутаційного процесу. Види комутації. Основні способи покращення комутації. Експериментальне налагодження комутації.

Література: [2, с.176-203; 3, с.110-138; 5, с.341-352].

Запитання для самоконтролю

– Назвіть причини, які можуть спричинити іскріння під щітками.

– Які процеси відбуваються у секції при переході її з однієї паралельної вітки в іншу?

– Що таке сповільнена та прискорена комутація?

– Які є способи покращення комутації?

– Призначення та конструкція додаткових полюсів. Де їх розташовують та як вони з'єднуються з обмоткою якоря?

– Як експериментально відбувається налагодження комутації?

1.5.5. Генератори постійного струму. Класифікація генераторів постійного струму за способами збудження. Характеристики генераторів постійного струму. Паралельна робота генераторів постійного струму.

Література: [2, с.204-216; 3, с.172-199; 5, с.353-369].

Запитання для самоконтролю

– Як класифікують генератори постійного струму за способами збудження?

– Назвіть основні характеристики генераторів постійного струму.

– Що називають характеристикою неробочого ходу? Який вигляд вона має?

– Що називають зовнішньою характеристикою? Нарисуйте зовнішні характеристики генераторів постійного струму незалежного та паралельного збудження, поясніть їх вигляд.

– Що називають регулювальною характеристикою генератора постійного струму?

– Сформулюйте умови самозбудження генератора з паралельним збудженням. Поясніть процес самозбудження.

– Сформулюйте умови вмикання генераторів постійного струму на паралельну роботу.

1.5.3.6. Двигуни постійного струму. Класифікація двигунів постійного струму за способами збудження. Характеристики двигунів постійного струму. Пуск, регулювання швидкості обертання та гальмівні режими роботи двигунів постійного струму.

Література: [2, с.217-242; 3, с.200-225; 5, с.163-184].

Запитання для самоконтролю

– Накресліть електричні схеми двигунів постійного струму з різними способами збудження.

– За якими характеристиками оцінюють робочі властивості двигунів постійного струму?

– Нарисуйте механічні характеристики двигунів із різними способами збудження, поясніть їх вигляд.

– Як здійснюють пуск двигунів постійного струму?

– Чому не можна допускати розриву кола збудження двигуна з паралельним збудженням?

– Які є способи регулювання швидкості обертання двигунів постійного струму? У чому їх переваги і недоліки?

– Де використовують двигуни з послідовним збудженням? У чому їх переваги порівняно з двигунами паралельного збудження?

– Назвіть електричні способи гальмування двигунів постійного струму.

1.5.7. Спеціальні машини постійного струму. Електромашинний підсилювач з поперечним полем. Магнітогідродинамічні машини. Уніполярна машина. Вентильний двигун. Зварювальний генератор з розщепленими полюсами. Мікродвигуни з безпазовим і печатним якорем.

Література: [2, с.243-260; 3, с.226-239; 5, с.393-407].

Запитання для самоконтролю

– Розкажіть будову та принципи роботи електромашинного підсилювача з поперечним полем.

– Принцип роботи магнітогідродинамічних машин.

– Опишіть будову уніполярної машини та вентильного двигуна.

– Де використовують генератори з розщепленими полюсами?

– Розкажіть будову мікродвигунів постійного струму з безпазовим і печатним якорем.

Методичні рекомендації до вивчення розділу

Вивчаючи будову і принцип роботи машин постійного струму необхідно звернути увагу на роль колектора в цих машинах, різні способи збудження.

Аналізуючи основні рівняння, що характеризують роботу машин постійного струму, необхідно усвідомити, що при незмінному струмі збудження ЕРС пропорційна швидкості обертання, а електромагнітний момент – струму якоря. Причини іскріння на колекторі пов’язані з реакцією якоря.

Зверніть увагу на можливість широкого, плавного і економічного регулювання швидкості обертання ротора двигунів постійного струму та використання цього в регульованих електроприводах.

Після вивчення цього розділу студенти повинні:

– Знати будову машин постійного струму і способи їх збудження; способи регулювання швидкості двигунів постійного струму та напруги генератора; як змінити напрям обертання якоря.

– Розуміти електромагнітні процеси в машинах постійного струму, роль послідовної обмотки збудження та додаткових полюсів, особливості пуску двигунів постійного стуму.

– Вміти під’єднати двигун постійного струму до мережі живлення, експериментально визначити характеристики двигуна, під’єднати колекторний двигун до мережі постійної та змінної напруги.

2. Методичні вказівки до вивчення розділу «Трансформатори» (*5 семестр)*

2.1. Однофазні трансформатори

2.1.1. Основні відомості про трансформатори. Призначення, сфера застосування і номінальні дані трансформаторів. Конструкції магнітопроводів та обмоток трансформаторів. Охолодження трансформаторів.

Література: [1, с.28-48; 3, с.241-262; 5, с.21-33].

Запитання для самоконтролю

– Призначення та сфери застосування трансформаторів.
– Поясніть принципи роботи трансформатора.
– Назвіть конструкції магнітопроводів та обмоток трансформаторів.
– Назвіть величини, що вказують у паспорті трансформатора.
– Що називають коефіцієнтом трансформації трансформатора?
– Для чого потрібні відводи трансформаторів?
– Як відбувається охолодження трансформаторів?

2.1.2. Електромагнітні процеси в трансформаторі при неробочому ході. Рівняння напруг трансформатора при неробочому ході. Векторна діаграма напруг. Намагнічуючий струм і струм неробочого ходу трансформатора. Заступна схема та втрати в трансформаторі при неробочому ході. Дослід неробочого ходу трансформатора.

Література: [1, с.49-52; 6, с.34-42].

Запитання для самоконтролю

– Від чого залежить величина магнітного потоку в трансформаторі?
– Що таке намагнічуючий струм і струм неробочого ходу трансформатора?
– Нарисуйте заступну схему трансформатора при неробочому ході.
– Для визначення яких величин використовують дослід неробочого ходу трансформатора?
– Нарисуйте схему досліду неробочого ходу трансформатора.

2.1.3. Електромагнітні процеси в трансформаторі при навантаженні. Магнітне поле і рівняння магніторушійних сил трансформатора при навантаженні. Рівняння напруг обмоток при навантаженні. Зведення вторинних величин до первинної обмотки. Заступна схема та векторна діаграма трансформатора при навантаженні. Дослід короткого замикання трансформатора.

Література: [1, с.58-61; 6, с.43-51].

Запитання для самоконтролю

– Запишіть рівняння електричної рівноваги трансформатора при навантаженні.

– Запишіть рівняння магнітного стану трансформатора при навантаженні.

– Чому відбувається зведення вторинних величин до первинної обмотки?

– Нарисуйте заступну схему та векторну діаграму трансформатора при активно-індуктивному навантаженні.

– Яка мета та умови проведення досліду короткого замикання трансформатора?

– Нарисуйте схему досліду короткого замикання однофазного трансформатора?

2.1.4. Характеристики трансформаторів. Зміна вторинної напруги трансформатора при навантаженні. Регулювання вторинної напруги та зовнішні характеристики трансформатора. Розрахунок магнітного кола, втрати потужності та коефіцієнт корисної дії трансформатора.

Література: [1, с.68-73; 6, с.52-64].

Запитання для самоконтролю

– Як визначається зміна вторинної напруги трансформатора при навантаженні?

– Поясніть як здійснюється регулювання напруги трансформаторів під навантаженням і без навантаження.

– Що таке зовнішня характеристика трансформатора?

– Для чого проводиться розрахунок магнітного кола трансформатора?

– Назвіть втрати, які виникають у трансформаторі, від чого вони залежать та запишіть вираз для визначення коефіцієнта корисної дії.

2.2. Трифазні трансформатори

2.2.1. Трифазні трансформатори. Магнітні системи і способи з'єднання обмоток трифазних трансформаторів. Групи з'єднань обмоток трансформаторів. Паралельна робота трансформаторів.

Література: [1, с.74-83, 92-96; 6, с.64-74].

Запитання для самоконтролю

– Назвіть конструкції магнітопроводів трифазних трансформаторів.

– Які існують схеми з'єднання обмоток трифазних трансформаторів?

– Які групи з'єднань передбачені держстандартами?

– Як експериментально визначити групу з'єднань обмоток трансформатора?

– Назвіть умови вмикання трансформаторів на паралельну роботу.

– Як розподіляється навантаження між паралельно ввімкненими трансформаторами з різними напругами короткого замикання?

2.2.2. Трансформатори спеціального призначення. Автотрансформатори. Триобмотковий трансформатор. Вимірювальні трансформатори напруги і струму. Інші трансформатори спеціального призначення.

Література: [1, с.117-130; 6, с.74-84].

Запитання для самоконтролю

– Поясніть будову триобмоткового трансформатора, накресліть його заступну схему.

– Поясніть будову та принципи роботи автотрансформатора.

– Призначення, схема вмикання та особливості роботи вимірювальних трансформаторів напруги та струму.

– Назвіть особливості роботи зварювальних трансформаторів, пік-трансформаторів, високочастотних трансформаторів.

2.2.3. Несиметричне навантаження трифазних трансформаторів. Використання методу симетричних складових для аналізу несиметричних режимів роботи трансформаторів. Несиметричне навантаження трансформаторів за наявності та відсутності струмів нульової послідовності. Експериментальне визначення опору нульової послідовності.

Література: [1, с.112-116; 6, с.85-95]

Запитання для самоконтролю

– За допомогою якого методу проводять дослідження несиметричних режимів трансформатора? В чому полягає суть цього методу?

– За наявності яких факторів появляються струми нульової послідовності при різних схемах з'єднань обЗмоток?

– Опишіть дію струмів нульової послідовності зі схемою з'єднань обмоток У/$У_Н$.

– Опишіть дію струмів нульової послідовності зі схемою з'єднань обмоток Д/$У_Н$.

– Як експериментально визначають опір нульової послідовності?

2.2.4. Перехідні процеси в трансформаторі. Перехідні процеси в трансформаторі при короткому замиканні на затискачах вторинної обмотки та при вмиканні ненавантаженого трансформатора в мережу. Перенапруги в трансформаторах.

Література: [1, с.101-111; 6, с.96-106].

Запитання для самоконтролю

– Опишіть перехідні процеси в трансформаторі при короткому замиканні.

– Опишіть перехідні процеси при вмиканні ненавантаженого трансформатора в мережу.

– Який захист використовують від грозових перенапруг в електромережах?

Методичні рекомендації до вивчення розділу

Принцип роботи трансформатора грунтується на явищі електромагнітної індукції, що забезпечує виникнення ЕРС в обмотках трансформатора. Необхідно звернути увагу на те, що передача електричної енергії від первинної обмотки до вторинної відбувається за рахунок магнітного поля. При цьому магнітний потік залишається незмінним при зміні навантаження трансформатора від неробочого ходу до номінального .

Векторна діаграма та заступна схема трансформатора дають можливість краще зрозуміти вплив навантаження трансформатора на його зовнішні характеристики.

При вивченні трифазних трансформаторів необхідно звернути увагу на їх конструкцію, групи з'єднання обмоток, умови вмикання на паралельну роботу.

При вивченні трансформаторів спеціального призначення необхідно розібратися в схемах їх вмикання.

Після вивчення цього розділу студенти повинні:

– Знати конструкцію однофазних та трифазних трансформаторів, їх характеристики та способи охолодження; схеми вмикання автотрансформаторів та вимірювальних трансформаторів струму та напруги.

– Розуміти принцип роботи трансформатора; побудову його векторних діаграм при неробочому ході та навантаженні; розподіл витрат енергії у трансформаторі; роль групи з'єднання обмоток трифазного трансформатора при вмиканні його на паралельну роботу.

– Вміти визначати коефіцієнт корисної дії при різних навантаженнях; експериментально визначити групу з'єднань обмоток; вмикати електровимірювальні прилади через вимірювальні трансформатори.

3. Комплексні практичні індивідуальні завдання (КПІЗ)

Загальні методичні вказівки до виконання КПІЗ

Номер варіанта завдання студента визначається порядковим номером за списком академічної групи. КПІЗ виконуються в зошиті або на аркушах формату А4, скріплених між собою. На титульному аркуші повинно бути вказано прізвище та ініціали студента, номер варіанту, шифр групи, номер та назва роботи.

На першій сторінці роботи наводиться завдання та детальний опис вихідних даних із зазначенням їх розмірностей. Розв'язок по кожному пункту записують у загальному вигляді, після чого в формули підставляють числові значення величин та наводять результат обчислень. Необхідно вказати розмірності обчислених величин, кожен пункт розрахунків супроводжувати поясненнями. У разі використання довідкової та навчальної літератури, не вказаної в переліку рекомендованої літератури, обов'язково дати посилання на цю літературу і навести її вихідні дані. Всі розрахунки виконують у системі СІ.

Якщо розв'язання задачі вимагає множини однотипних розрахунків, наприклад, для побудови характеристик, то в тексті роботи наводять детальний розрахунок для однієї точки характеристики (краще для номінального режиму), а решту зводять у таблицю. Кожну таблицю і кожен рисунок підписують і нумерують.

Послідовність побудови векторних діаграм описують. На діаграмах вказують масштаби і конкретні значення параметрів, використаних при побудові цих діаграм.

Всі графіки і векторні діаграми виконують на міліметровому папері. На полі графіка наносять розрахункові точки, які сполучають гладкою кривою. На одному графіку можна будувати декілька залежностей, при цьому для кожної з них будують відповідні осі.

4-й семестр

3.1. Завдання на КПІЗ №1

«Розрахунок механічної та робочих характеристик асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором»

Для трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, обмотка статора якого з'єднана зіркою, а дані наведені в таблиці 3.1.1 необхідно:

1. Розрахувати і побудувати робочі характеристики двигуна.
2. Побудувати енергетичну діаграму для режиму роботи при $s = s_H$.
3. Розрахувати механічну характеристику за формулою для електромагнітного моменту.
4. Розрахувати механічну характеристику за спрощеною формулою Клосса.

5. Побудувати розраховані обома методами механічні характеристики на одному графіку та позначити характерні точки (пуску, критичну та номінальну).

Методичні вказівки до розв'язання КПІЗ №1

До п.1. Робочими характеристиками асинхронного двигуна називають залежності потужності P_1, яку двигун споживає з мережі; струму I_1 статора; коефіцієнта потужності $\cos\varphi_1$; коефіцієнта корисної дії η; ковзання s; частоти n обертання ротора і моменту M_B на валу двигуна від корисної потужності (потужності на валу двигуна) при постійній напрузі живлення $U = const$ і стабільній частоті мережі $f = const$. Розрахунок робочих характеристик базується на використанні системи чотирьох рівнянь, які описують *Г*-подібну заступну схему двигуна, зображену на рисунку 3.1.1.

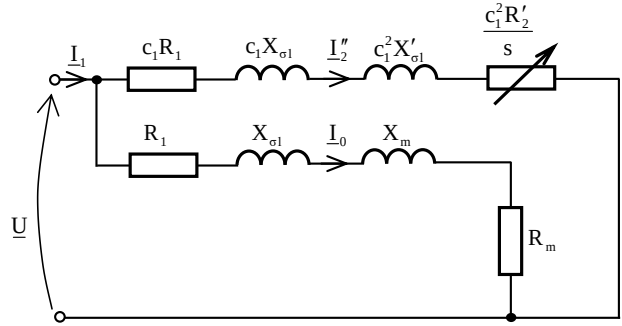

Рисунок 3.1.1 – *Г*-подібна заступна схема асинхронного двигуна

Розрахунки розпочинають із визначення значень незалежних від ковзання величин: c_1, I_{OA}, I_{OP}, P_{1H}, I_{1H}, $p_{ДОДН}$, n_0.

Коефіцієнт c_1, який враховує зміну параметрів заступної схеми двигуна при її перетворенні з *Т*-подібної у *Г*-подібну, визначають за формулою:

$$c_1 = 1 + \frac{X_{\sigma 1}}{X_m}. \qquad (3.1.1)$$

Активну I_{OA} та реактивну I_{OP} складові струму I_0 визначають за формулами:

$$I_{OA} = I_0 \cdot \cos\varphi_0; \quad I_{OP} = I_0 \cdot \sin\varphi_0, \tag{3.1.2}$$

де I_0 – значення – струму неробочого ходу:

$$I_0 = \frac{U}{Z_0}; \tag{3.1.3}$$

U – значення номінальної фазної напруги двигуна:

$$U = \frac{U_{НЛ}}{\sqrt{3}}; \tag{3.1.4}$$

$U_{НЛ}$ – задане значення номінальної лінійної напруги;

$$Z_0 = \sqrt{(R_1 + R_m)^2 + (X_{\sigma 1} + X_m)^2}; \tag{3.1.5}$$

$$\cos\varphi_0 = \frac{R_1 + R_m}{Z_0}; \quad \sin\varphi_0 = \frac{X_{\sigma 1} + X_m}{Z_0}. \tag{3.1.6}$$

Додаткові втрати $p_{ДОДН}$ у номінальному режимі визначаються як 0,5% від споживаної потужності:

$$p_{ДОДН} = 0,005 P_{1H}. \tag{3.1.7}$$

Попередні значення потужності P_{1H} і I_{1H}, які споживає двигун у номінальному режимі, визначають за формулами:

$$P_{1H} = \frac{P_H}{\eta_H}; \qquad I_{1H} = \frac{P_{1H}}{3U\cos\varphi_H}. \tag{3.1.8}$$

Номінальне значення ковзання обчислюють за формулою:

$$s_H = \frac{n_1 - n_H}{n_1}, \tag{3.1.9}$$

де $n_1 = \frac{60f}{p}$ – швидкість обертання магнітного поля, об/хв.; p – кількість пар полюсів магнітного поля.

Незалежними від ковзання вважають також втрати механічні $p_{мех}$ та втрати в сталі $p_{ст}$.

Результати розрахунків робочих характеристик двигуна зводять у таблицю 3.1.2.

До п.2. Енергетичну діаграму [5, с.61] будують у довільно обраному масштабі за даними таблиці 3.1.2 для $s = s_H$.

До п.3. Механічною характеристикою двигуна називають залежність $M = M(s)$ електромагнітного моменту M від ковзання s або залежність $M = M(n)$ електромагнітного моменту від швидкості обертання n за умови, що напруга U і частота f мережі живлення залишаються незмінними.

Для розрахунку механічної характеристики задаються низкою значень ковзання s із діапазону $0 \le s \le 1$, при цьому в діапазоні $0 \le s \le s_m$ інтервал Δs зміни ковзання приймають таким, що дорівнює $\Delta s = 0{,}25\, s_m$, а в діапазоні $s_m < s \le 1$ – таким, що дорівнює $\Delta s = 0{,}2$. Обов'язково порахувати точки, які відповідають $s = s_H$, $s = s_m$, $s = 1$.

Критичне ковзання s_m обчислюють за формулою:

$$s_m = \frac{c_1 R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 X_{\sigma 2}')^2}}. \qquad (3.1.10)$$

Електромагнітний момент визначають за формулою:

$$M = \frac{3pU^2 R_2' / s}{\omega_1 \left[\left(R_1 + c_1 R_2' / s \right)^2 + \left(X_{\sigma 1} + c_1 X_{\sigma 2}' \right)^2 \right]}, \qquad (3.1.11)$$

де ω_1 - кутова частота струму, рад/с.

$$\omega_1 = 2\pi f \qquad (3.1.12)$$

Таблиця 3.1.1 – Вихідні дані до КПІЗ №1

Параметр, його умовне позначення, розмірність	Номер варіанта відповідно до останньої цифри залікової книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номінальна потужність P_H, кВт	1,50	5,50	315	132	37	2,20	75	160	55	250
Номінальна напруга (лінійна) $U_{НЛ}$, В	380	380	660	660	380	380	380	660	380	660
Номінальна частота струму f, Гц	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Номінальний коефіцієнт потужності $cos\varphi_H$	0,868	0,917	0,930	0,890	0,910	0,750	0,880	0,850	0,840	0,930
Номінальний коефіцієнт корисної дії η_H	0,817	0,887	0,950	0,940	0,915	0,790	0,925	0,920	0,920	0,947
Номінальна швидкість обертання n_H, об/хв.	2865	2890	2965	1475	1470	950	980	735	735	1475
Кількість пар полюсів p	1	1	1	2	2	3	3	4	4	2
Активний опір R_1 фази статора при робочій температурі, Ом	5,60	1,10	0,015	0,056	0,125	3,10	0,045	0,057	0,060	0,033
Індуктивний опір розсіяння $X_{\sigma 1}$ фази статора, Ом	3,50	1,20	0,120	0,300	0,270	4,20	0,190	0,270	0,240	0,175
Активний опір R_2' фази зведеної обмотки ротора при робочій температурі, Ом	3,30	0,85	0,014	0,045	0,060	2,30	0,033	0,042	0,040	0,025
Індуктивний опір $X_{\sigma 2}'$ фази зведеної обмотки ротора,Ом	5,30	2,30	0,150	0,400	0,450	7,50	0,200	0,320	0,280	0,208
Активний опір R_m гілки намагнічування, Ом	10	6,10	0,130	0,300	0,650	6,50	0,150	0,220	0,160	3,00
Індуктивний опір X_m гілки намагнічування, Ом	165	80	7,50	12,1	14,1	7,40	5,90	6,70	5,5	8,60
Механічні втрати $p_{мех}$, Вт	30	85	3650	1670	370	13	730	1210	410	940
Втрати в сталі статора $p_{ст}$, Вт	50	135	1050	750	450	150	600	1400	800	1690
Перенавантажувальна здатність $\kappa_M=M_m/M_H$	2,70	2,50	2,20	2,00	2,00	1,90	2,20	1,90	2,10	2,00

Таблиця 3.1.2 – Результати розрахунку робочих характеристик двигуна

№ з/п	Розрахунковий вираз	Одиниця вимірю-вання	Ковзання						
			$0{,}1\,s_H$	$0{,}25\,s_H$	$0{,}5\,s_H$	$0{,}75\,s_H$	$1{,}0\,s_H$	$1{,}25\,s_H$	$1{,}5\,s_H$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	$c_1^2 R_2' / s$	Ом							
2.	$R = c_1 R_1 + c_1^2 R_2' / s$	Ом							
3.	$X = c_1 X_{\sigma 1} + c_1^2 X_{\sigma 2}'$	Ом							
4.	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом							
5.	$I_2'' = U / Z$	А							
6.	$\cos\varphi_2'' = R / Z$	-							
7.	$\sin\varphi_2'' = X / Z$	-							
8.	$I_{1A} = I_{OA} + I_2'' \cos''\varphi_2$	А							
9.	$I_{1P} = I_{OP} + I_2'' \sin\varphi_2''$	А							
10.	$I_1 = \sqrt{I_{1A}^2 + I_{1P}^2}$	А							
11.	$I_2' = c_1 I_2''$	А							
12.	$P_1 = 3U \cdot I_{1A}$	Вт							
13.	$p_{e1} = 3I_1^2 R_1$	Вт							
14.	$p_{e2} = 3(I_2')^2 R_2'$	Вт							
15.	$p_{ДОД} = p_{ДОДН}(I_1 / I_{1H})^2$	Вт							
16.	$\Sigma p = p_{e1} + p_{e2} + p_{ДОД} + p_{МЕХ} + p_{СТ}$	Вт							
17.	$P_2 = P_1 - \Sigma p$	Вт							
18.	$\cos\varphi_1 = I_{1A} / I_1$	-							
19.	$\eta = P_2 / P_1$	-							
20.	$n = n_1(1 - s)$	об/хв							
21.	$M_B = \dfrac{P_2}{2\pi n / 60}$	Нм							

Результати розрахунку оформляють у вигляді таблиці 3.1.3.

Таблиця 3.1.3 – Результати розрахунку механічної характеристики за формулою (3.1.2).

s	$0{,}25\,s_m$	$0{,}5\,s_m$	$0{,}75\,s_m$	s_m	s_H	0,2	0,4	0,6	0,8	1
M, Нм										

До п.4. Спрощена формула Клосса має вигляд:

$$M = \frac{2M_m}{\dfrac{s}{s_m} + \dfrac{s_m}{s}} \qquad (3.1.13)$$

де M_m – максимальний момент; s_m – критичне ковзання.

За її допомогою можна розрахувати механічну характеристику двигуна, якщо не відомі параметри його заступної схеми. Для цього запишемо (3.1.13) для номінального режиму:

$$M_H = \frac{2M_m}{\frac{s_H}{s_m} + \frac{s_m}{s_H}} \tag{3.1.14}$$

і розв'яжемо отримане рівняння відносно s_m. У результаті отримаємо:

$$s_m = s_H \left[\frac{M_m}{M_H} + \sqrt{\left(\frac{M_m}{M_H} \right)^2 - 1} \right]. \tag{3.1.15}$$

Якщо в (3.1.15) підставити задане у таблиці 3.1.1 значення перенавантажувальної здатності двигуна $k_M = M_m / M_H$, то знаходимо значення критичного ковзання s_m.

Необхідне для подальших розрахунків значення максимального моменту M_m визначаємо за формулою:

$$M_m = \left(\frac{M_m}{M_H} \right) \cdot M_H, \tag{3.1.16}$$

де

$$M_H = \frac{P_H}{\frac{2\pi n_1}{60}(1 - s_H)} \tag{3.1.17}$$

- номінальний момент двигуна.

За відомими M_m і s_m та низкою значень ковзання s із діапазону $0 \le s \le 1$, обчислюють значення моменту M за формулою (3.1.13).

Для зручності результати розрахунку зводять у таблицю 3.1.4.

Таблиця 3.1.4 – Результати розрахунку механічної характеристики двигуна за формулою Клосса.

s	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0,08	0,06	0,04	0,02	0
s / s_m											
s_m / s											
$s / s_m + s_m / s$											
M, Нм											

3.2. Завдання на КПІЗ №2
«Розрахунок електромеханічних параметрів та побудова механічної характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором»

Трифазний асинхронний двигун загального призначення серії 4А ввімкнений в мережу з напругою 220/380 В. Визначити: синхронну частоту обертання n_0, обертальні моменти двигуна, номінальний $M_{ном}$, пусковий $M_п$, максимальний (критичний) M_{max}, потужність, використану двигуном $P_{1ном}$; номінальний $I_{ном}$ і пусковий $I_п$ струми в статорі двигуна; максимальне (критичнее) ковзання S_{max}, обертальний момент для ряду ковзання $S = S_{ном}$; $S_к$; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0.

Побудувати механічну характеристику $M = f(s)$ двигуна, визначити частоту обертання ротора при навантаженні моментом статичного опору M_C, з'ясувати можливість роботи двигуна при наявності миттєвих перевантажень з моментом $M_м$, з'ясувати можливість пуску двигуна при зниженій напрузі $U = 0{,}9U_{ном}$, якщо момент опору робочого механізму становитиме $M_р$.

Таблиця 3.2.1 – Вихідні дані до КПІЗ №2

№ вар.	$P_{ном}$, *кВт*	$n_{ном}$, об/хв	η, *в.о.*	*cos*φ, *в.о.*	K_I	$K_П$	K_M	M_C, *Нм*	$M_м$, *Нм*	$M_р$, *Нм*
0	1,1	1415	0,75	0,81	5	2	2,2	10	15	10
1	5,5	1440	0,86	0,85	5,5	2	2,2	50	50	40
2	7,5	2925	0,88	0,88	6	2	2,8	40	50	40
3	11	975	0,86	0,86	6	1,4	2,2	180	100	120
4	30	980	0,9	0,9	6,5	1,3	2,4	350	300	320
5	15	730	0,87	0,82	5,5	1,2	2	300	200	170
6	11	2950	0,89	0,91	6	1,4	2,5	70	40	35
7	4	705	0,83	0,82	5,5	1,9	2,6	100	70	90
8	15	1470	0,89	0,88	6	1,4	2,3	200	100	150
9	22	975	0,9	0,9	5	1,2	2,2	350	300	180

Методичні вказівки до розв'язання КПІЗ №2

Дано: $P_{ном} = 30000$ *Вт*, $U_л = 380$ *В*, $n_{ном} = 960$ *об/хв*, $\eta_{ном} = 0{,}92$, $cos\varphi_{ном} = 0{,}9$, $K_I = I_п / I_{ном} = 5{,}5$, $K_п = M_п / M_{ном} = 1{,}4$, $K_м = M_{max} / M_{ном} = 2{,}0$.

Розв'язання

Синхронна частота обертання магнітного поля статора приймає-ться найближчою і більшою з ряду: 3000 об/хв, 1500 об/хв, 1000 об/хв, 750 об/хв, 600 об/хв, 500 об/хв.

$$n_0 = 1000 \text{ об / хв.}$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_{ном} = \frac{9{,}55 \cdot P_{ном}}{n_н} = \frac{9{,}55 \cdot 30000}{960} = 298 \text{ Нм.}$$

Максимальний момент двигуна:

$$M_{мах} = K_м \cdot M_{ном} = 2 \cdot 298 = 596 \text{ Нм.}$$

Пусковий момент двигуна:

$$M_{пуск} = K_п \cdot M_{ном} = 1{,}4 \cdot 298 = 417 \text{ Нм.}$$

Електромагнітна потужність двигуна:

$$P_{1н} = \frac{P_{ном}}{\eta} = \frac{30000}{0{,}92} = 32610 \text{ Вт.}$$

Струм статора:

$$I_{ном} = \frac{P_{1н}}{3U_{1ф} \cdot cos\varphi} = \frac{32610}{3 \cdot 220 \cdot 0{,}9} = 55 \text{ А.}$$

Пусковий струм статора:

$$I_{пуск} = K_I \cdot I_{ном} = 5{,}5 \cdot 55 = 302 \text{ А.}$$

Номінальне ковзання двигуна:

$$s_{ном} = \frac{n_0 - n_н}{n_0} = \frac{1000 - 960}{1000} = 0{,}04.$$

Критичне ковзання:

$$s_m = s_H \left[\frac{M_m}{M_H} + \sqrt{\left(\frac{M_m}{M_H} \right)^2 - 1} \right] = 0{,}04 \left[2 + \sqrt{2^2 - 1} \right] = 0{,}15.$$

Для побудови механічної характеристики використовуємо формулу Клосса, задавшись ковзанням в діапазоні $0 \le s \le 1$.

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{s_{кр}}{s} + \frac{s}{s_{кр}}}.$$

Результати розрахунків заносимо в таблицю 3.2.2.

Таблиця 3.2.2 – Результати розрахунку механічної характеристики

s,в.о	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,15	0,1	0,08	0,06	0,04	0,02	0
M, Нм	174	215	279	391	572	596	551	496	413	298	157	0

За результатами будуємо механічну характеристику $M = f(s)$ (рис.3.2.1)

Позначаємо на ній характерні точки. Тут є дві замітні ділянки. Одна з них є областю стійкої роботи двигуна (ділянка 0А), а інша ділянкою нестійкої роботи (АВ).

Щоб визначити частоту обертання ротора при заданому моменті навантаження необхідно рівняння Клосса розв'язати відносно ковзання s.

$$\frac{s_{кр}}{s} + \frac{s}{s_{кр}} = \frac{2M_{кр}}{M} = \frac{2 \cdot 596}{220} = 5{,}41; \qquad \frac{s_{кр}^2 + s^2}{s_{кр} s} = \frac{0{,}0225 + s^2}{0{,}15 \cdot s} = 5{,}41.$$

Звідси отримуємо таке квадратне рівняння.

$$s^2 - 0{,}81s + 0{,}0225 = 0.$$

Корені рівняння:

$$s_1 = \frac{0{,}81 + \sqrt{(-0{,}81)^2 - 4 \cdot 0{,}0225}}{2} = 0{,}78; \qquad s_2 = \frac{0{,}81 - \sqrt{(-0{,}81)^2 - 4 \cdot 0{,}0225}}{2} = 0{,}029.$$

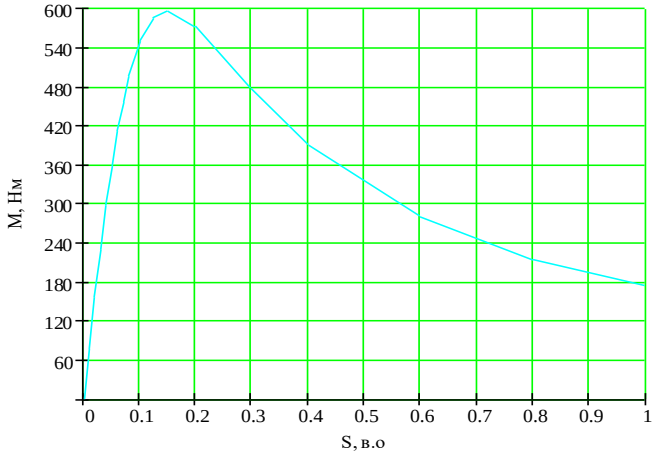

Рисунок 3.2.1 – Механічна характеристика асинхронного двигуна

Перший корінь відкидаємо, оскільки він лежить у нестійкій ділянці механічної характеристики.

За формулою, що поєднує швидкість обертання ротора з ковзанням, обчислюємо швидкість обертання ротора двигуна.

$$n = n_0 (1 - s) = 1000 \cdot (1 - 0{,}029) = 971 \; об / хв.$$

Номінальна робота двигуна характеризується номінальним моментом $M_{ном} = 298 \, Нм.$ Момент двигуна при перевантаженні становить $M' = M_{ном} + M_м = 298 + 400 = 698 \, Нм,$ що є більшим за критичний момент двигуна $M_{кр} = 596 \, Нм \; (M' > M_{кр}).$

Нормальна робота двигуна порушується і він зупиняється під дією гальмівного моменту.

Як відомо момент пропорційний напрузі в квадраті. Напруга понизилась на 10% , тобто стало $0{,}9U$). $0{,}9^2$=0,81. Тобто пусковий момент зменшився на 19% (1-0,81=0,19).

$$M'_{пуск} = 0{,}81 \cdot M_{пуск} = 0{,}81 \cdot 174 = 141 \; Нм.$$

Тут $M_{пуск} = 174 \; Нм$ вибираємо з таблиці 2.2 при $s = 1.$

Порівнюємо пусковий момент $M'_{пуск}$ після зниження напруги з моментом опору робочого механізму $M_p = 170 \, Нм.$

$$M'_{пуск} = 141\,Нм < M_р = 170\,Нм.$$

Двигун при пониженій напрузі не запуститься.

3.3. Завдання на КПІЗ №3
«Розрахунок параметрів і характеристик синхронного генератора»

Трифазний синхронний генератор, що працює на електромережу дуже великої потужності, має такі номінальні параметри: $P_{ном}$, лінійна напруга статора $U_{Sном}$, ККД $\eta_{ном}$, коефіцієнт потужності $cos\varphi$, кількість пар полюсів, синхронний опір у відносних одиницях X_S^*, струм збудження неробочого ходу $I_{зб0}$ при $U_{ном}$, частота $f_{sном} = 50\,Гц$, схема з'єднання обмотки статора – «зірка».

Розрахувати параметри генератора у номінальному режимі, побудувати векторну діаграму, розрахувати та побудувати *V*-подібні характеристики генератора. Номер варіанту відповідає списковому номеру студента у групі. Вихідні дані подано у таблиці 3.3.1.

Таблиця – 3.3.1 Вихідні дані до роботи

№ вар.	$P_{ном}$, МВт	$U_{ном}$, кВ	$2p$	cosφ, в.о.	η, в.о.	X_S^*	$I_{зб0}$, А
1	12	10,5	2	0,85	0,975	1,85	114
2	20	6,3	2	0,8	0,976	1,9	208
3	20	10,5	2	0,85	0,975	1,95	209
4	25	6,3	2	0,8	0,977	1,61	108
5	30	6,3	2	0,8	0,979	2,36	126
6	30	10,5	2	0,9	0,981	1,39	139
7	60	10,5	2	0,85	0,983	1,57	216
8	63	6,3	2	0,85	0,982	1,9	517
9	63	10,5	2	0,8	0,983	1,86	512
10	110	10,5	2	0,85	0,985	1,88	686
11	100	10,5	4	0,85	0,983	1,92	242
12	100	15,75	2	0,9	0,984	1,57	284
13	150	18	2	0,85	0,985	1,85	537
14	160	15,75	2	0,8	0,983	2,05	813
15	165	18	2	0,85	0,985	1,71	521
16	200	15,75	2	0,8	0,986	2,12	724
17	220	15,75	2	0,8	0,986	2,27	522
18	300	20	2	0,85	0,986	1,72	945
19	320	20	2	0,85	0,986	1,69	945
20	500	20	4	0,85	0,987	2,06	1840

Методичні рекомендації до розв'язання КПІЗ №3

Трифазний синхронний генератор, що працює на електромережу дуже великої потужності, має такі номінальні параметри: $P_{ном} = 12\,MBm$, лінійна напруга обмотки статора $U_{Sном} = 6,3\,кВ$, ККД $\eta_{ном} = 0,976$, коефіцієнт потужності $cos\varphi = 0,8$, кількість пар полюсів $2p = 2$, синхронний опір у відносних одиницях $X_S^* = 1,63$ струм збудження неробочого ходу $I_{зб0} = 89\,A$ при $U_{ном}$, частота $f_{sном} = 50$ Гц, схема з'єднання обмотки статора – «зірка».

Розрахувати параметри генератора у номінальному режимі, побудувати векторну діаграму, розрахувати та побудувати *V*-подібні характеристики генератора.

Розв'язання.

При з'єднанні обмотки статора за схемою «зірка» номінальні лінійна і фазна напруги пов'язані співвідношенням

$$U_{\phi S} = \frac{U_{Sном}}{\sqrt{3}} = \frac{6300}{\sqrt{3}} = 3637\,B.$$

Фазний (лінійний) струми дорівнюють:

$$I_{\phi S} = I_{ном} = \frac{P_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{Sном} \cdot cos\,\varphi_{ном}} = \frac{12 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6300 \cdot 0,8} = 1375\ A.$$

Визначаємо фазовий зсув між напругами та струмами

$$\varphi_{Sном} = arccos\left(cos\,\varphi_{ном}\right) = arccos\left(0,8\right) = 37^{\circ}.$$

Для синхронних машин базовим опором є повний опір

$$Z_{ном} = \frac{U_{\phi S}}{I_{\phi S}} = \frac{3637\,B}{1375\,A} = 2,645\ Ом.$$

Тому синхронний опір фазної обмотки у абсолютних одиницях

$$X_S = X_S^* \cdot Z_{ном} = 1,63 \cdot 2,645 = 4,31\ Ом.$$

Реактивний спад напруги у обмотці статора генератора

$$\Delta U_{pS} = X_S \cdot I_{\phi S} = 4,31 \cdot 1375 = 5926\ B.$$

Активним спадом напруги на активному опорі знехтуємо.

Співвідношення електричних величин проілюструємо спрощеною векторною діаграмою (рис.3.3.1). Масштаби напруг та струму: m_u = 1000 В/см; m_i = 250 А/см.

Пояснимо порядок побудови діаграми. Вектор струму $I_{\phi S}$ напрямляємо по дійсній осі. Відносно нього під кутом $\varphi_{ном}$ в сторону випередження вектор фазної напруги статора $U_{\phi S}$. Вектор реактивного спаду напруги в обмотці статора $\Delta\vec{U}_{pS} = jX_S \cdot \vec{I}_{\phi S}$ є перпендикулярним до вектора $I_{\phi S}$. Вектор ЕРС обмотки статора від магнітного поля обмотки ротора будуємо на основі другого закону Кірхгофа $\vec{E} = \vec{U}_{\phi S} + \Delta\vec{U}_{pS}$. Діюче значення цієї ЕРС визначаємо за формулою (за геометричними співвідношеннями на векторній діаграмі).

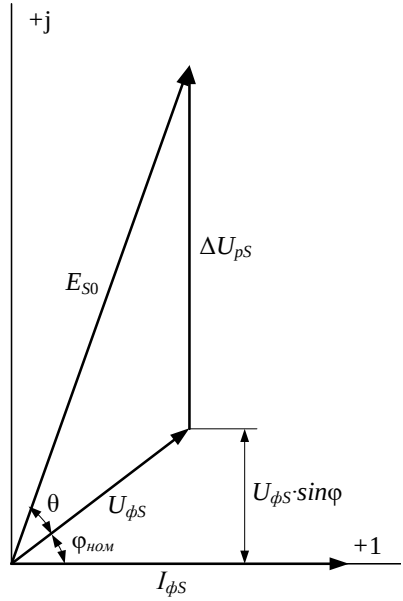

Рисунок 3.3.1 – Векторна діаграма синхронного генератора.

$$E_{S0} = \sqrt{\left(U_{\phi S}\, cos\,\varphi_{ном}\right)^2 + \left(U_{\phi S}\, sin\,\varphi_{ном} + \Delta U_{pS}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(3637 \cdot 0{,}8\right)^2 + \left(3637 \cdot sin 37^\circ + 5926\right)^2} = 8617\, B.$$

З діаграми визначаємо номінальний кут навантаження θ

$$\Theta_{ном} = arctg\left(\frac{U_{\phi S}\, sin\,\varphi_{ном} + \Delta U_{pS}}{U_{\phi S}\, cos\,\varphi_{ном}}\right) - \varphi_{ном} = 70^\circ - 37^\circ = 33^\circ.$$

Прийнявши, що магнітна система генератора є ненасиченою, можна визначити струм збудження у номінальному режимі

$$I_{збн} = I_{зб0} \cdot \frac{E_{S0}}{U_{фS}} = 89 \cdot \frac{8617}{3637} = 211A.$$

Кутова швидкість обертання ротора

$$\omega = \frac{2\pi f_{ном}}{p} = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 50}{1} = 314 c^{-1}.$$

Вхідна механічна потужність генератора та обертальний момент

$$P_{мех} = \frac{P_{ном}}{\eta} = \frac{12}{0{,}976} = 12{,}3\ МВт.$$

$$M_{ном} = \frac{P_{мех}}{\omega} = \frac{12{,}3 \cdot 10^6}{314} = 39{,}2\ кН \cdot м.$$

Максимальний момент та перевантажуюча здатність генератора:

$$M_{max} = \frac{M_{ном}}{sin\Theta_{ном}} = \frac{39{,}2}{sin33^\circ} = 71{,}1\ кН \cdot м.$$

$$K_M = \frac{M_{max}}{M_{ном}} = \frac{71{,}1}{39{,}2} = 1{,}8.$$

Розрахуємо *V*-подібні характеристики генератора. Це залежність струму обмотки статора від струму збудження $I_S = f(I_{зб})$ при певній потужності *P*, а також при незмінній синхронній частоті обертання *n* та напрузі *U*. Якщо взяти низку значень потужності *P*, то можна отримати сімейство *V*-подібних характеристик.

Задаємось струмом збудження $I_{зб}$ і вважаючи заданими деяке значення потужності *P* та фазну напругу $U_{фS}$.

Приймемо, що характеристика неробочого ходу генератора є лінійною (магнітна система ненасичена). Тоді при постійному значенні струму збудження $I_{зб} = const$ ЕРС обмотки дорівнює:

$$E_{S0} = U_{фS} \cdot \frac{I_{зб}}{I_{зб0}} = 3637 \cdot \frac{I_{зб}}{89} = 40{,}87 I_{зб}.$$

З відомої формули потужності синхронної машини

$$P = \frac{3U_{\phi S} \cdot E_{S0} \cdot \sin\Theta}{X_S}$$

визначимо кут навантаження:

$$\Theta = arc\sin\left(\frac{P \cdot X_S}{3U_{\phi S} \cdot E_{S0}}\right) = arc\sin\left(\frac{4{,}3 \cdot P}{3 \cdot 3637 \cdot 40{,}87 I_{зб}}\right) = arc\sin\left(9{,}67 \cdot 10^{-6}\frac{P}{I_{зб}}\right).$$

З трикутника $U_{\phi S}$, ΔU_{pS}, E за теоремою косинусів розрахуємо реактивний спад напруги ΔU_{pS}

$$\Delta U_{pS} = \sqrt{U_{\phi S}^2 + E_{S0}^2 - 2U_{\phi S} \cdot E_{S0} \cdot \cos\Theta}.$$

У результаті фазний струм статора дорівнює

$$I_S = \frac{\Delta U_{pS}}{X_S} = \frac{\sqrt{U_{\phi S}^2 + E_{S0}^2 - 2U_{\phi S} \cdot E_{S0} \cdot \cos\Theta}}{X_S}.$$

Для проведення розрахунків задаємося струмом збудження, дещо перевищуючи номінальне значення $I_{збн}$ = 211 А. Розраховуємо струм статора для чотирьох значень потужності P.

Обрив кривих і відсутність значень струму статора в області малих значень струму збудження свідчить про досягення межі стійкості (кут навантаження $\theta = 90^o$).

Результати заносимо в таблицю 3.3.2.

Таблиця 3.3.2 – До побудови V-подібних характеристик генератора

P, МВт	$I_{зб}$, А	15	45	75	90	105	120	150	180	210	240
0	I_S, А	703	418	133	10	152	435	580	865	1150	1435
4		–	725	435	374	376	295	646	903	1175	1452
8		–	–	–	838	752	734	824	1014	1248	1505
12		–	–	–	–	–	1227	1102	1194	1372	1593

Зміни величин при зміні струму збудження проілюстровано частково на рисунку 3.3.2 для номінальної потужності P = 12 МВт і для трьох значень кутів φ: φ > 0 для активно-індуктивного навантаження, φ = 0 для активного навантаження і φ < 0 для активно-ємнісного навантаження.

Масштаби напруг, ЕРС та струмів: m_u = 500 В/см; m_i = 500 А/см. З діаграми рисунка 3.2 видно, що при $P = const$ добуток $I_S \cos\varphi = const$, а

$E_{S0}\sin\theta = const.$ Тому при зміні струму збудження кінці векторів $\vec{I}_S$ та $\vec{E}_{S0}$ ковзають по проведених прямих лініях.

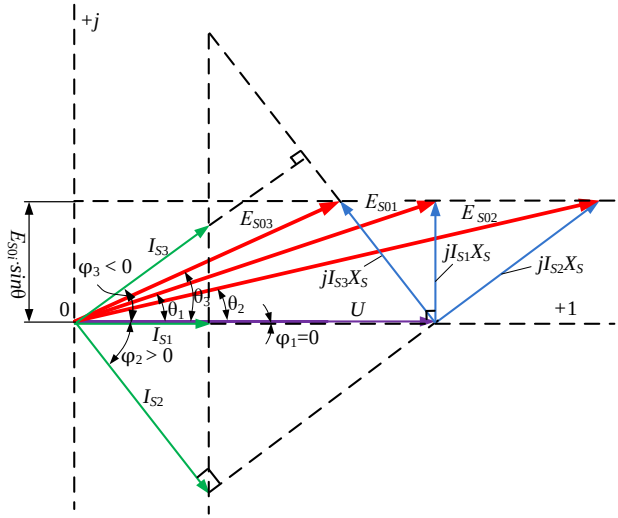

Рисунок 3.3.2 – Векторна діаграма при зміні струму збудження

На рисунку 3.3.3 побудовано V-подібні характеристики синхронного генератора.

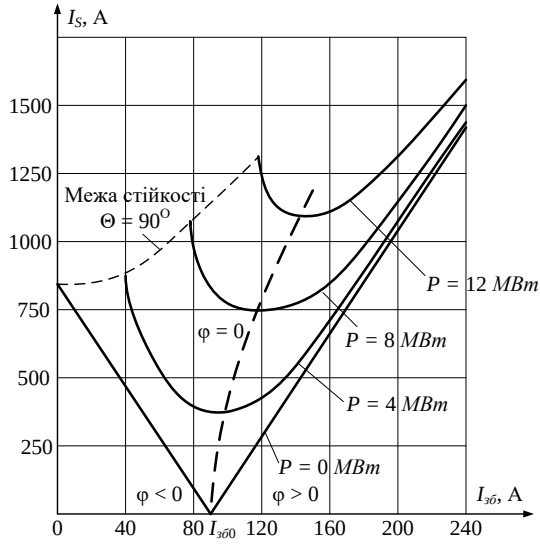

Рисунок 3.3.3 – *V*-подібні характеристики синхронного генератора.

4. Завдання на КПІЗ №4
«Розрахунок параметрів і характеристик синхронного двигуна»

Трифазний синхронний двигун, має такі номінальні параметри: $P_{ном}$, лінійна напруга статора $U_{Sном}$, ККД $\eta_{ном}$, коефіцієнт потужності $cos\varphi$, частота обертання $n_{ном}$, струм збудження $I_{збном}$, частота $f_{sном} = 50\,Гц$, схема з'єднання обмотки статора – «зірка», перевантажувальна здатність K_M.

Розрахувати параметри двигуна у номінальному режимі, а також при зменшенні обертального моменту у два рази побудувати векторну діаграму, розрахувати та побудувати *V*-подібні характеристики двигуна для номінального режиму. Номер варіанту відповідає списковому номеру студента у групі. Вихідні дані подано у таблиці 3.4.1.

Таблиця 3.4.1 – Вихідні дані до КПІЗ №4

№ вар.	$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, кВ	cosφ, в.о.	$n_{ном}$, об/хв	η, в.о.	$I_{зб0}$, А	K_M
1	800	6	0,9	375	0,938	260	2,0
2	1000	6	0,9	375	0,946	250	2,0
3	12500	10	0,88	3000	0,978	920	1,9
4	1250	6	0,9	375	0,948	256	2,1
5	17500	6	0,9	375	0,974	893	1,9
6	3150	6	0,9	375	0,962	270	1,9
7	10000	10	0,88	3000	0,977	750	2,0
8	4000	6	0,9	375	0,962	240	1,9
9	5000	6	0,9	375	0,965	240	1,8
10	1600	10	0,865	3000	0,96	310	2,2
11	5000	6	0,9	300	0,963	265	1,9
12	1600	6	0,9	375	0,955	230	2,1
13	315	6	0,82	500	0,922	295	1,9
14	6300	10	0,87	3000	0,975	720	1,9
15	400	6	0,84	500	0,93	285	1,8
16	2000	6	0,9	1500	0,956	340	1,65
17	2500	6	0,9	1500	0,959	390	1,65
18	12500	6	0,9	375	0,973	904	1,9
19	13300	10	0,9	375	0,973	738	1,9
20	17500	10	0,9	375	0,975	809	2,0

Методичні вказівки до розв'язання КПІЗ №4

Трифазний синхронний двигун, має такі номінальні параметри: $P_{ном} = 800\,кВт$, лінійна напруга статора $U_{Sном} = 6000\,В$, ККД $\eta_{ном} = 0,945$, коефіцієнт потужності $cos\varphi = 0,9$, частота обертання $n_{ном}$ = 500 об/хв., струм збудження $I_{збном} = 285\,А$, частота $f_{sном} = 50\,Гц$, схема з'єднання обмотки

статора – «зірка», перевантажувальна здатність K_M = 2,1. Розрахувати параметри двигуна у номінальному режимі, а також при зменшенні обертального моменту у два рази, побудувати векторну діаграму, розрахувати та побудувати *V*-подібні характеристики двигуна для номінального режиму роботи.

Розв'язання

При з'єднанні обмотки статора за схемою «зірка» номінальні лінійна і фазна напруги двигуна пов'язані співвідношенням

$$U_{\phi S} = \frac{U_{S\text{ном}}}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3460\,B.$$

Споживана потужність з мережі та її втрати

$$P_{1\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta} = \frac{800}{0{,}945} = 847\ кВт.$$

$$\Delta P = P_{1\text{ном}} - P_{\text{ном}} = 847 - 800 = 47\,кВт.$$

Фазний (лінійний) струми в обмотці статора дорівнюють:

$$I_{\phi S} = I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3}\cdot U_{S\text{ном}}\cdot \cos\varphi_{\text{ном}}} = \frac{847\cdot 10^3}{\sqrt{3}\cdot 6000\cdot 0{,}9} = 90{,}7\ A.$$

Визначаємо фазовий зсув між напругами та струмами

$$\varphi_{S\text{ном}} = arccos\left(\cos\varphi_{\text{ном}}\right) = arccos\left(0{,}9\right) = 26^\circ.$$

Співвідношення електричних величин проілюструємо спрощеною векторною діаграмою. Масштаби напруг та струму: m_u = 500 В/см; m_i = 20 А/см.

Кількість пар полюсів

$$p = \frac{60\,f}{n_{\text{ном}}} = \frac{60\cdot 50}{500} = 6.$$

Кутова швидкість обертання ротора

$$\omega = \frac{2\pi f_{\text{ном}}}{p} = \frac{2\cdot 3{,}14\cdot 50}{6} = 52{,}3\ c^{-1}.$$

Номінальний обертальний момент

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega} = \frac{800}{52,3} = 15,3\ кН \cdot м.$$

Максимальний момент та номінальний кут навантаження

$$M_{max} = K_M \cdot M_{ном} = 2,1 \cdot 15,3 = 32,1\ кН \cdot м.$$

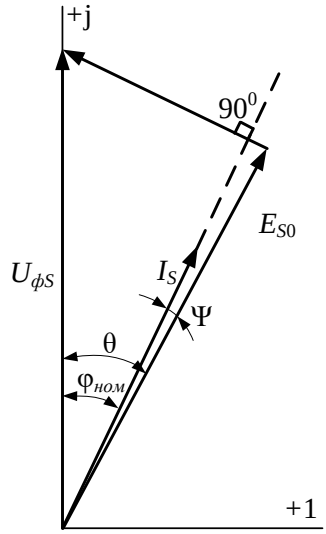

Рисунок 3.4.1 – Векторні діаграми для синхронного двигуна для номінального режиму роботи

$$\Theta_{ном} = arcsin\left(\frac{M_{ном}}{M_{ном}}\right) = arcsin\left(\frac{1}{K_M}\right) = arcsin\left(\frac{1}{2,1}\right) = 28^0.$$

Пояснимо порядок побудови діаграми. У масштабі проводимо вектор фазної напруги $\vec{U}_{фS} = \vec{U}_{Sном}$. Відносно нього під кутом $\varphi_{ном}$ вектор струму $\vec{I}_S$ і під кутом $\theta = -\theta_{ном}$ вектор ЕРС $\vec{E}_{S0}$.

Вектор реактивного спаду напруги $\Delta\vec{U}_{pS}$ стикується з вектором $\vec{U}_{фS}$ і проводиться перпендикулярно до вектора $\vec{I}_S$. Довжини векторів $\vec{E}_{S0}$ та

$\Delta\vec{U}_{pS}$ обмежені їх перетином. З векторної діаграми очевидно, що $\vec{E}_{S0} \cdot cos\,\Psi = \vec{U}_S \cdot cos\,\varphi_{ном}$, де кут $\Psi = \varphi_{ном} + \Theta_{ном} = 26^0 - 28^0 = -2^0$.

Звідси

$$E_{Sном} = \frac{U_{\phi S} \cdot cos\,\varphi_{ном}}{cos\,\Psi} = \frac{3460 \cdot 0{,}9}{cos\left(-2^0\right)} = 3120\,B.$$

З трикутника $U_{\phi S}$, ΔU_{pS}, E за теоремою косинусів розрахуємо реактивний спад напруги ΔU_{pS}

$$\Delta U_{pS} = \sqrt{U_{\phi S}^2 + E_{S0}^2 - 2U_{\phi S} \cdot E_{S0} \cdot cos\,\Theta} =$$
$$= \sqrt{3460^2 + 3120^2 - 3460 \cdot 3120 \cdot cos\,28^0} = 1647\,B.$$

Визначаємо синхронний індуктивний опір двигуна

$$X_S = \frac{\Delta U_{pS}}{I_S} = \frac{1647}{90{,}7} = 18{,}2\ Ом.$$

Розрахуємо параметри синхронного двигуна при зменшенні обертального моменту в два рази. Новий кут навантаження становить

$$\Theta = arcsin\left(\frac{0{,}5M_{ном}}{M_{max}}\right) = arcsin\left(\frac{0{,}5}{K_M}\right) = arcsin\left(\frac{0{,}5}{2{,}1}\right) = 14^0.$$

Напруга не змінюються, а їх вектори $\vec{U}_{\phi S}$ та $\vec{E}_{S0}$ зсунуті на новій діаграмі на кут $\Theta = -14^0$. Вектор реактивного спаду напруги $\Delta\vec{U}_{pS}$ з'єднує їх кінці відповідно до рівняння рівноваги напруг $\vec{U}_{\phi S} = \vec{E}_{S0} + \Delta\vec{U}_{pS}$, а діюче значення визначається за формулою

$$\Delta U_{pS} = \sqrt{U_{\phi S}^2 + E_{S0}^2 - 2U_{\phi S} \cdot E_{S0} \cdot cos\,\Theta} = \sqrt{3460^2 + 3120^2 - 3460 \cdot 3120 \cdot cos\,14^0} = 860\,B.$$

Фазний струм відповідно до співвідношення $\Delta\vec{U}_{pS} = jX_S \cdot \vec{I}_S$ складає

$$I_S = \frac{\Delta U_{pS}}{X_S} = \frac{860}{18{,}2} = 47{,}3\,A.$$

На рисунку 3.4.2 цей вектор струму $\vec{I}_S$ проведений перпендикулярно до вектора $\Delta\vec{U}_{pS}$.

З діаграми вимірюванням або розрахунками отримаємо фазовий зсув між напругою $\vec{U}_{\phi S}$ та струмом $\vec{I}_S$ $\varphi'_{ном} = 31^0$.

Корисна потужність двигуна на його валу

$$P = M \cdot \omega = 0{,}5 \cdot M_{ном} \cdot \omega = $$
$$= 0{,}5 \cdot 15{,}3 \cdot 52{,}3 = 400\ кВт.$$

Споживана електрична потужність

$$P_{1ном} = 3U_{\phi S} \cdot I_S \cdot cos\varphi =$$
$$= 3 \cdot 3460 \cdot 47{,}3 \cdot cos31^0 = 420\ кВт.$$

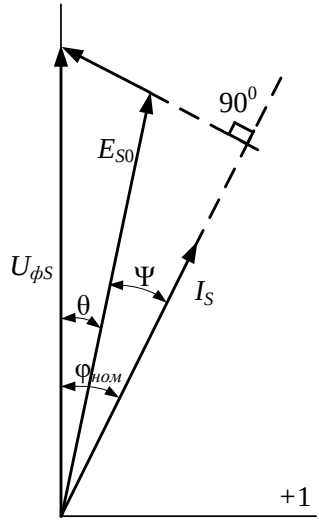

Рисунок 3.4.2 – Векторні діаграми для синхронного двигуна при зменшенні обертального моменту у два рази

Розрахуємо *V*-подібні характеристики двигуна. Це залежність струму обмотки статора від струму збудження $I_S = f(I_{зб})$ при певній електричній потужності *P*, а також при незмінних частоті обертання *n* та напрузі U_S = 3460 В.

Якщо взяти низку значень потужності *P*, то можна отримати сімейство *V*-подібних характеристик. Задаємось струмом збудження $I_{зб}$ і вважаючи заданими деяке значення потужності *P* та фазну напругу $U_{\phi S}$.

Приймемо, що характеристика неробочого ходу двигуна є лінійною (магнітна система ненасичена). Тоді при постійному струмі збудження $I_{зб}$ = = *const* ЕРС обмотки статора дорівнює:

$$E_{S0} = E_{S0} \cdot \frac{I_{зб}}{I_{збном}} = 3120 \cdot \frac{I_{зб}}{265} = 11{,}77 I_{зб}.$$

Визначимо кут навантаження:

$$\Theta = arc\,sin\left(\frac{P \cdot X_S}{3U_{\phi S} \cdot E_{S0}}\right) = arc\,sin\left(\frac{18{,}2 \cdot P}{3 \cdot 3460 \cdot E_{S0}}\right) = arc\,sin\left(149 \cdot 10^{-6}\,\frac{P}{I_{зб}}\right).$$

З трикутника $U_{\phi S}$, ΔU_{pS}, E за теоремою косинусів розрахуємо реактивний спад напруги ΔU_{pS}

$$\Delta U_{pS} = \sqrt{U_{\phi S}^2 + E_{S0}^2 - 2U_{\phi S} \cdot E_{S0} \cdot \cos\Theta}; \qquad I_S = \frac{\Delta U_{pS}}{X_S} = \frac{\Delta U_{pS}}{18{,}2}.$$

Ілюстрацію проведених числових розрахунків подамо для номінального режиму роботи двигуна при електричній потужності $P = P_{1ном}$ = 847 кВт і трьох значеннях струму збудження $I_{зб}$ = 0,75·$I_{збном}$ = 0,75·285 = 214 *А*, $I_{зб}$ = = $I_{збном}$ = 285 *А*, $I_{зб}$ = 1,25·$I_{збном}$ = 1,25·285 = 356 *А*.

На рисунку 3.4.4 струми статора та збудження суттєво перевищують номінальні значення, що дало можливість повною мірою відобразити характеристики. Реально ж область роботи синхронного двигуна обмежена штрихованим трикутником.

Обрив кривих в області малих значень струму збудження свідчить про досягення межі стійкості (кут навантаження θ = -90°).

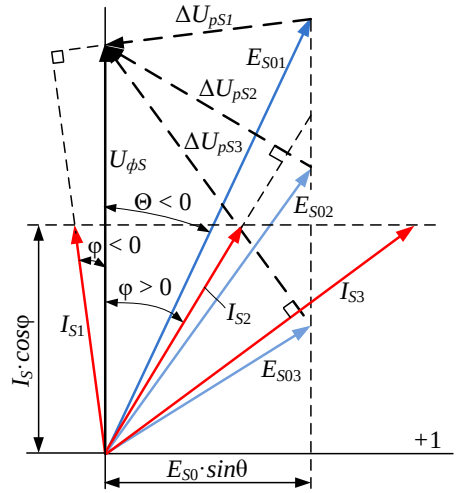

Рисунок 3.4.3 – Зміни векторної діаграми СД при зміні струму збудження

Дані розрахунків наведені в таблиці 3.4.2. Як і на рисунку 3.3.3 на рисунку 3.4.3 видно, що при P = *const* повинно справджуватись співвідношення $I_S \cos\varphi = const$, а також $E_{S0} \cdot \cos\varphi = const$, тому зі зміною струму збудження $I_{зб}$ кінці векторів $\vec{I}_S$ та $\vec{E}_{S0}$ ковзають по пунктирних лініях.

Для детальної побудови *V*-подібних характеристик розрахунки проведено аналогічно до таблиці 4.2 для таких значень електричної потужності: P = 0 кВт, P = 282,5 кВт, P = 565 кВт, P = $P_{1ном}$ = 847 кВт, P = 1130 кВт при різних струмах збудження. Отримані характеристики зображені на рисунку 3.4.4.

Таблиця 3.4.2 – До побудови *V*-подібних характеристик двигуна

$I_{зб}$, А	214	285	356
E_{S0}, В	2340	3120	3900
Θ, град.	-39^{O}	-28^{O}	-22^{o}
ΔU_{pS}, В	2220	1650	1490
I_S, А	122	90,6	82
φ, град.	48^{o}	26^{o}	-6^{o}

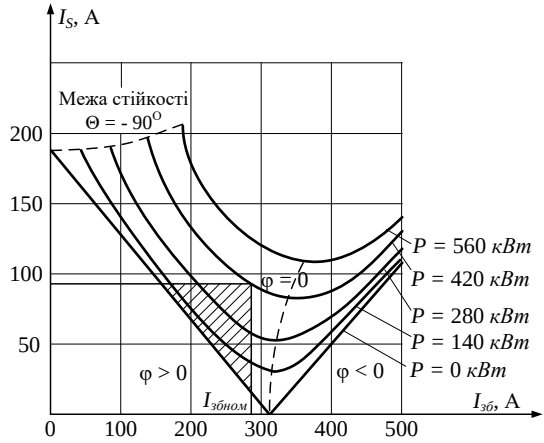

Рисунок 3.4.4 – *V*-подібні характеристики синхронного двигуна

5. Завдання на КПІЗ №5.
«Розрахунок параметрів і характеристик двигуна постійного струму»

Електродвигун постійного струму з паралельним збудженням характеризується наступними номінальними даними таблиці 5.1: потужність $P_{ном}$, напруга на затискачах $U_{ном}$, частота обертання $n_{ном}$, ККД $\eta_{ном}$, втрати потужності в колі якоря $P_я$, % і в колі збудження $P_{зб}$, % задані в процентах від споживаної потужності $P_{1ном.}$.

Визначити: а) струм у колі збудження $I_{зб.ном.}$; б) струм якоря $I_{я.ном.}$; в) струм, що споживається двигуном $I_{ном.}$; г) номінальний момент $M_{ном.}$; д) пусковий обертовий момент і опір пускового реостату при $I_{я.п.} = 2 \cdot I_{я.ном}$. Побудувати природну і штучну механічні характеристики двигуна при опорі в колі якоря $R_{я.р.} = 3 \cdot R_я$. Нарисувати електричну схему двигуна. Вихідні дані подано в таблиці 3.5.1.

Таблиця 3.5.1 – Вихідні дані до КПІЗ №5

Варіант	$P_{ном}$, *кВт*	$U_{ном.}$, *В*	$n_{ном.}$, *об/хв*	$\eta_{ном.}$, %	$P_{я.}$, %	$P_{зб.}$, %
1	60	110	980	86,5	5,2	4,8
2	10	220	2250	86,0	5,0	4,8
3	4,0	220	1025	82,2	6,2	4,2
4	6,6	220	2400	85,5	6,2	4,1
5	4,4	220	2100	84,5	6,5	4,8
6	2,5	220	1000	85,0	5,8	4,8
7	10	220	2250	83,0	5,3	4,4
8	77	110	1050	85,5	5,0	4,2
9	80	110	1150	85,8	5,4	4,5
10	92	110	970	86,5	5,3	4,1
11	66	110	1050	85,5	6,2	5,0
12	35	110	2200	85,5	6,3	5,2
13	45	110	1500	85,0	5,7	4,6
14	15	220	1000	84,5	5,0	4,0
15	10	220	970	85,5	5,2	4,2
16	5,8	220	2200	84,0	6,0	5,0
17	19	220	980	86,5	4,8	4,5
18	29	220	2520	86,0	5,0	4,3
19	46,5	220	1025	82,2	5,4	4,8
20	14	220	2400	84,0	4,0	4,6

Методичні вказівки до розв'язання КПІЗ №5

Дано: $P_{ном}$ = 14 кВт, $U_{ном}$ = 220 В, $P_{я}$ = 4 %, $P_{зб}$ = 4,6 %, $n_{ном}$ = 2400 об/хв., η = 0,84.

Розв'язання

а) електрична потужність, що споживається двигуном:

$$P_{1H} = \frac{P_H}{\eta} = \frac{14000}{0{,}84} = 16667\ Вт.$$

б) номінальний струм обмотки збудження:

$$I_{збн} = P_{збн}\frac{P_{1H}}{100\% \cdot U_H} = 4{,}6 \cdot \frac{16667}{100\% \cdot 220} = 3{,}48\ А.$$

в) номінальний струм двигуна:

$$I_H = \frac{P_{1H}}{U_H} = \frac{16667}{220} = 75{,}7\ А.$$

Електрична схема двигуна показана на рисунку 3.5.1.

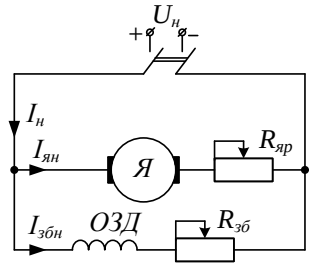

Рисунок 3.5.1 – Електрична схема двигуна

г) номінальний струм якоря:

$$I_{ЯН} = I_Н - I_{збн} = 75{,}7 - 3{,}8 = 71{,}9\ А.$$

д) номінальний момент двигуна:

$$M_{ном} = 9{,}55 \cdot \frac{P_Н}{n_{ном}} = 9{,}55 \cdot \frac{14000}{2400} = 55{,}7\ Нм.$$

е) пусковий момент двигуна:

$$M_{пуск} = 2M_{ном} = 2 \cdot 55{,}7 = 111{,}4\ Нм.$$

є) опір обмотки якоря:

$$R_я = P_я\% \cdot \frac{P_{1Н}}{100\% \cdot I_{ян}^{\ 2}} = 4 \cdot \frac{16667}{100\% \cdot 71{,}9^2} = 0{,}12\ Ом.$$

Опір пускового реостату:

$$R_{пуск} = \frac{U_Н}{2I_{ян}} - R_я = \frac{220}{2 \cdot 71{,}9} - 0{,}12 = 1{,}4\ Ом. \qquad R_{яр} = 3R_я = 3 \cdot 1{,}4 = 4{,}2\ Ом.$$

ж) побудова механічних характеристик:
номінальна кутова швидкість обертання якоря:

$$\omega_н = \frac{\pi n_{ном}}{30} = \frac{3{,}14 \cdot 2400}{30} = 251\ с^{-1}.$$

Конструктивний коефіцієнт двигуна:

$$КФ = \frac{U_Н - I_{ЯН} \cdot R_Я}{\omega_Н} = \frac{220 - 71{,}9 \cdot 1{,}4}{251} = 0{,}84.$$

Кутова швидкість холостого ходу:

$$\omega_{0пр} = \frac{U_Н}{КФ} = \frac{220}{0{,}84} = 261 \ c^{-1}.$$

$$\Delta\omega_{пр} = \frac{I_{ЯН} \cdot R_Я}{КФ} = \frac{71{,}9 \cdot 0{,}12}{0{,}84} = 10 \ c^{-1}. \qquad \omega_{нпр} = \omega_0 - \Delta\omega_{пр} = 261 - 10 = 251 c^{-1}.$$

Штучна характеристика:

$$\omega_{0шт} = \omega_{0пр} = 261 \ c^{-1}; \qquad \Delta\omega_{шт} = 3 \cdot \Delta\omega_{пр} = 3 \cdot 10 = 30 \ c^{-1}.$$
$$\omega_{шт} = \omega_{0шт} - \Delta\omega_{шт} = 261 - 30 = 231 c^{-1}.$$

Пускова характеристика:

$$\omega_{0пуск} = \omega_{0пр} = 261 \ c^{-1}; \qquad \Delta\omega_{пуск} = 261 \ c^{-1}.$$
$$\omega_{пуск} = \omega_{0пуск} - \Delta\omega_{пуск} = 261 - 261 = 0 \ c^{-1}.$$

Будуємо механічні характеристики двигуна:

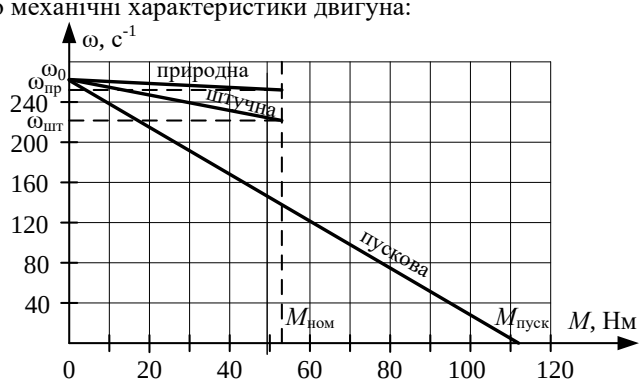

Рисунок 3.5.2 – Механічні характеристики двигуна постійного струму

3.6. Завдання на КПІЗ №6
«Регулювання швидкості обертання двигунів постійного струму»

Розрахувати та побудувати природну та штучні механічні характеристики при регулюванні швидкості: 1) підведеною напругою (U = 200 В), 2) введенням додаткового опору в колі якоря ($R_{дод} = 10 \cdot R_{ном}$), 3) зміною магнітного потоку ($кФ = 0{,}75 \cdot кФ_{ном}$). Вихідні дані наведені в таблиці 3.6.1.

Таблиця 3.6.1 – Вихідні дані до КПІЗ №6

№	$P_{ном}$, *кВт*	$U_{ном}$, *В*	$I_{я\ ном}$, *А*	$R_{я\ ном}$, *Ом*	$n_{ном}$, *об/хв.*
1	13,3	230	58	0,465	1460
2	45	660	62	0,03	750
3	23	230	103	0,197	970
4	50	460	110	0,094	375
5	14	220	71	0,205	1000
6	30	230	132	0,064	640
7	95	220	470	0,0125	500
8	67	220	338	0,0218	560
9	32	220	164	0,0563	760
10	16	220	85	0,1611	710
11	12	220	65	0,274	790
12	21	220	110	0,1183	660
13	46	220	238	0,0349	625
14	8,5	220	47	0,432	870
15	6	220	33,3	0,4	3000
16	6	220	33	0,52	1500
17	4,5	220	25	0,69	1500
18	6	220	33	0,44	1000
19	3,2	220	18,8	0,32	750
20	6	220	32,6	0,56	750

Методичні вказівки до розв'язання КПІЗ №6

Для побудови природної характеристики ДПС НЗ необхідно мати дві точки: точку ідеального холостого ходу (ω_0, $M = 0$) та точку при номінальному моменті ($\omega_{ном}$, $M_{ном}$).

Знайдемо точку ідеального холостого ходу ДПС НЗ

$$\omega_0 = \frac{U_{ном}}{k\Phi_{ном}}, \qquad (3.3.6.1)$$

де $кФ_{ном}$ – коефіцієнт двигуна, В·с.

$$k\Phi_{ном} = \frac{U_{ном} - I_{яном} R_{\Sigma}}{\omega_{ном}}, \tag{3.6.2}$$

де $\omega_{ном}$ – номінальна швидкість ДПС НЗ, 1/с.

$$\omega_{ном} = \frac{2\pi \cdot n_{ном}}{60} \tag{3.6.3}$$

$$\omega_{ном} = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 750}{60} = 78{,}5\ c^{-1}.$$

$$k\Phi_{ном} = \frac{220 - 78{,}5 \cdot 0{,}205}{78{,}5} = 2{,}6\ Вс.$$

$$\omega_0 = \frac{220}{2{,}6} = 84{,}6\ c^{-1}.$$

Знайдемо електромагнітний номінальний момент

$$M_{еном} = k\Phi_{ном} \cdot I_{яном}. \tag{3.6.4}$$

$$M_{еном} = 2{,}6 \cdot 78{,}5 = 204{,}1 Нм.$$

Знайдемо номінальний момент ДПС НЗ

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}}. \tag{3.6.5}$$

$$M_{ном} = \frac{15000}{78{,}5} = 191 Нм.$$

Для побудови штучної характеристики двигуна необхідно дві точки ω_0 та ω_c.

Розрахуємо характеристику при регулюванні швидкості підведеною напругою.

Знайдемо точку ідеального холостого ходу ДПС НЗ

$$\omega_{0U} = \frac{U}{k\Phi_{ном}}. \tag{3.6.6}$$

$$\omega_{0U} = \frac{200}{2,6} = 77\ c^{-1}.$$

Так як при регулюванні швидкості підводимою напругою величина зменшення швидкості під навантаженням $\Delta\omega_c$ не залежить від напруги живлення, тому

$$\omega_{cU} = \omega_{0U} - \frac{M_{ном} R_{я_\Sigma}}{к\Phi_{ном}^{\ 2}}. \qquad (3.6.7)$$

$$\omega_{cU} = 77 - \frac{191 \cdot 0,205}{2,6^2} = 71\ c^{-1}.$$

Розрахуємо характеристику двигуна при введені додаткового опору в колі якоря. При регулюванні швидкості додатковим опором в ланцюзі якоря швидкість ідеального холостого ходу не залежить від сумарного опору, тому

$$\omega_{0R} = \frac{U_{ном}}{k\Phi_{ном}}. \qquad (3.6.8)$$

$$\omega_{0R} = \frac{220}{2,6} = 84,6\ c^{-1}.$$

Швидкість під навантаженням

$$\omega_{cR} = \omega_{0R} - \frac{M_{ном} \cdot (R_{я_\Sigma} + R_{дод})}{к\Phi_{ном}^{\ 2}}. \qquad (3.6.9)$$

$$\omega_{cR} = 84,6 - \frac{191 \cdot (0,205 + 10 \cdot 0,205)}{2,6^2} = 16,5\ c^{-1}.$$

Розрахуємо характеристику при регулюванні швидкості двигуна при зміні магнітного потоку.

Швидкість ідеального холостого ходу

$$\omega_{0\Phi} = \frac{U_{ном}}{k\Phi}. \qquad (3.6.10)$$

$$\omega_{0\Phi} = \frac{220}{0,75 \cdot 2,6} = 113\ c^{-1}.$$

Швидкість під навантаженням

$$\omega_{c\Phi} = \omega_{0\Phi} - \frac{M_{ном} \cdot R_{я\Sigma}}{\kappa \Phi^2}. \qquad (3.6.11)$$

$$\omega_{c\Phi} = 113 - \frac{191 \cdot 0,205}{(0,75 \cdot 2,6)^2} = 102,7\ c^{-1}.$$

За результатами розрахунку побудуємо характеристики (рис.3.6.1).

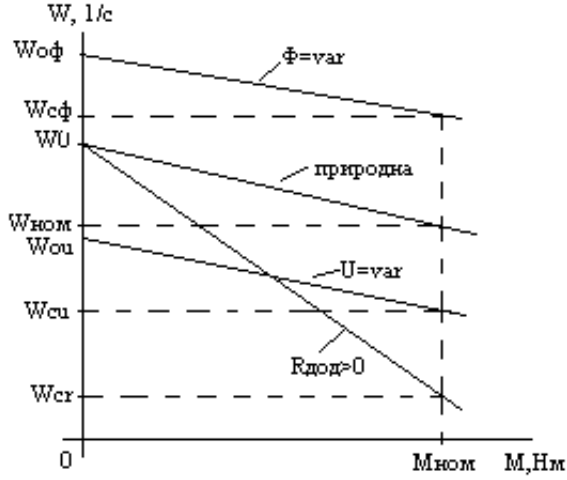

Рисунок 3.6.1 – Механічні характеристики ДПС НЗ

5-й семестр

7. Завдання на КПІЗ №7

«Розрахунок трифазного трансформатора»

Для трифазного двообмоткового трансформатора, дані якого наведені в таблиці 3.7.1, необхідно:

1. Накреслити схему з'єднання обмоток.

2. Побудувати векторну діаграму ЕРС, яка відповідає заданій групі з'єднання.

3. Визначити значення номінальних фазних напруг для обох обмоток трансформатора.

4. Визначити значення номінальних фазних і лінійних струмів.

5. Визначити значення номінального (лінійного) і розрахункового (фазного) коефіцієнтів трансформації.

6. Розрахувати значення параметрів Т-подібної заступної схеми. Накреслити заступну схему.

7. Визначити значення активної та реактивної складових напруги короткого замикання.

8. Визначити залежність зміни напруги трансформатора від характеру навантаження. Графічно зобразити цю залежність.

9. Розрахувати і побудувати залежність коефіцієнта корисної дії від навантаження трансформатора при коефіцієнтах потужності $\cos\varphi_2$=1 та при $\cos\varphi_2$=0,707.

10. Визначити розподіл навантаження між двома однаковими трансформаторами, які увімкнені паралельно, та їх допустиме сумарне навантаження за умови, що $\cos\varphi_2$=0,8 для таких випадків:

– обмотка ВН першого трансформатора ввімкнена на номінальну напругу, а обмотка ВН другого – на відводи +5% номінальної напруги;

– напруга короткого замикання першого трансформатора, більша від напруги короткого замикання другого, вказаної у таблиці 7.1 на 20%.

11. Визначити ударний струм короткого замикання у вторинній обмотці.

Таблиця 3.7.1 – Вихідні дані до КПІЗ №7

Параметр, його умовне позначення, розмірність	Номер варіанта відповідно до останньої цифри залікової книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Група з'єднання	Д/$У_н$-11	У/$У_н$-0	$У_н$/У-6	У/Д-11	Д/Д-0	У/$У_н$-0	Д/$У_н$-11	У/$У_н$-0	$У_н$/У-6	$У_н$/Д-11
Потужність номінальна S_H, кВА	25	63	100	180	320	630	1000	2500	5000	8000
Номінальні лінійні напруги U_{1H}/U_{2H}, кВ	6/0,4	3/0,525	20/0,69	6/0,525	10/0,4	35/6,3	6/0,69	20/3,15	35/11	35/3,15
Струм неробочого ходу I_0, %	3,5	3,0	2,7	2,5	2,2	2,0	1,5	1,3	1,1	0,5
Втрати неробочого ходу P_0, Вт	100	200	290	480	950	1500	2000	3200	5600	12000
Напруга короткого замикання U_K, %	6,2	6,5	6,4	6,2	6,0	5,7	5,5	5,3	5,1	4,8
Втрати короткого замикання P_K, Вт	600	1250	2100	3000	4300	5800	11000	23000	38000	54000

Методичні вказівки до розв'язання КПІЗ №7

До п.1. Схему з'єднання двообмоткового трансформатора позначають у вигляді дробу, в чисельнику якого є позначення схеми з'єднання обмотки ВН, а в знаменнику – обмотки НН (наприклад Д/$У_н$, де Д, У умовне позначення в тексті з'єднання трикутником/зіркою; індекс „н" вказує на те, що зовні виводиться нейтральна точка обмотки).

До п.2. Для побудови векторної діаграми ЕРС, що відповідає заданій групі з'єднання обмоток, необхідно ретельно вивчити підрозділ 1.3.6.2 [5, с.67-70].

До п.3. Для визначення номінальних фазних напруг необхідно пам'ятати:

– під номінальними напругами обмоток розуміють їх лінійне значення, при цьому номінальна лінійна напруга $U_{2н}$ на розімкненій вторинній обмотці при під'єднанні первинної обмотки до напруги $U_{1н}$;

– співвідношення між – напругами $U_{\Lambda} = U_{\phi}$ – при з'єднанні обмоток трикутником і $U_{\phi} = \frac{U_{\Lambda}}{\sqrt{3}}$ – при з'єднанні обмоток зіркою.

До п.4. При визначенні струмів необхідно враховувати схему з'єднань обмоток. Лінійні і фазні номінальні струми первинної і вторинної обмоток визначаються за формулами:

$$\begin{aligned} I_{1H\Lambda} &= S_H / (\sqrt{3} U_{1H\Lambda}); \quad I_{2H\Lambda} = S_H / (\sqrt{3} U_{2H\Lambda}); \\ I_{1H\Phi} &= S_H / (3 \cdot U_{1H\Phi}); \quad I_{2H\Phi} = S_H / (3 \cdot U_{2H\Phi}); \end{aligned} \tag{3.7.1}$$

До п.5. Номінальний (лінійний) коефіцієнт трансформації обчислюють за формулою:

$$n = \frac{U_{1H}}{U_{2H}}, \tag{3.7.2}$$

де U_{1H}, U_{2H} – номінальна первинна і вторинна лінійні напруги трансформатора, відповідно.

Розрахунковий (фазний) коефіцієнт трансформації обчислюють за формулою:

$$n = \frac{U_{1\Phi}}{U_{2\Phi}}, \tag{3.7.3}$$

де $U_{1\Phi}$, $U_{2\Phi}$ – номінальна первинна і вторинна фазні напруги трансформатора, відповідно.

До п. 6. Параметри заступної схеми трансформатора визначають за такими виразами:

$$Z_M = \frac{U_{1H\Phi}}{I_{0\Phi}}; \quad R_M = \frac{P_0}{3I_{0\Phi}^2}; \quad X_M = \sqrt{Z_M^2 - R_M^2}; \tag{3.7.4}$$

$$Z_K = \frac{U_{K\Phi}}{I_{1H\Phi}}; \quad R_K = \frac{P_K}{3I_{1H\Phi}^2}; \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}; \tag{3.7.5}$$

$$R_1 = R_2' = R_K / 2 \; ; \; X_1 = X_2' = X_K / 2 \, ,$$

де $U_{1H\Phi}$ – номінальна фазна напруга первинної обмотки; $I_{0\Phi} = \frac{I_0}{100} \cdot I_{1H\Phi}$ – фазний струм неробочого ходу; P_0 – втрати неробочого ходу; $U_{K\Phi} = \frac{U_{K\%}}{100} \cdot U_{1H\Phi}$ – фазна напруга короткого замикання; $I_{1H\Phi}$ – номінальний фазний струм первинної обмотки.

Заступна схема зведеного трансформатора наведена в [5].

До п.7. Активну і реактивну складові напруги короткого замикання у відсотках визначають за такими виразами:

$$U_{KA\%} = \frac{I_{1H\Phi} \cdot R_K}{U_{1H\Phi}} \cdot 100\%; \quad U_{KP\%} = \frac{I_{1H\Phi} \cdot X_K}{U_{1H\Phi}} \cdot 100\% \, . \tag{3.7.6}$$

До п.8. Зміну вихідної напруги трансформатора, навантаженого номінальним струмом, залежно від характеру навантаження (індуктивне, активне, ємнісне) визначають за формулою

$$\Delta U_{\%} = U_{KA\%} \cdot \cos\varphi_2 + U_{KP\%} \cdot \sin\varphi_2 + \frac{\left(U_{KP\%} \cdot \cos\varphi_2 - U_{KA\%} \cdot \sin\varphi_2\right)^2}{200} \tag{3.7.7}$$

в діапазоні зміни кута навантаження φ_2 від $+90^0$ до -90^0 через 30^0. За результатами розрахунків необхідно побудувати графік. На графіку показати точки з нульовим і максимальним відхиленнями $\Delta U_{\%}$. Визначити значення кутів навантаження φ_2, при яких досягаються ці відхилення.

До п.9. Залежність коефіцієнта корисної дії від навантаження визначають за формулою:

$$\eta = 1 - \frac{\beta^2 \cdot P_K + P_0}{\beta \cdot S_H \cdot \cos\varphi_2 + \beta^2 \cdot P_K + P_0} \, , \tag{3.7.8}$$

де $\beta = \frac{I_2}{I_{2H}}$ – коефіцієнт завантаження трансформатора.

Залежність коефіцієнта корисної дії від навантаження обчислюють при β =0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25 для $\cos\varphi_2$ =1 та $\cos\varphi_2$ =0,703.7. Результати розрахунків зводять в таблицю. За результатами розрахунків будують графіки на одному рисунку, за якими визначають максимальні значення η та відповідні до них значення β .

До п.10. Перший випадок відповідає паралельній роботі двох трансформаторів однакової потужності з різними коефіцієнтами трансформації (різними ЕРС вторинних обмоток). У цьому випадку через обмотки обох трансформаторів крім струмів навантаження протікатиме ще й зрівнювальний струм $I^*_{ЗР}$, відносна величина якого визначається за формулою:

$$I^*_{ЗР} = \frac{\Delta E^*}{2U^*_K}, \tag{3.7.9}$$

де ΔE^* – різниця ЕРС вторинних обмоток трансформатора у в.о. (згідно з завданням ΔE^*=0,05); U^*_K – напруга короткого замикання у в.о.

Струми вторинних обмоток трансформаторів у відносних одиницях визначаються за формулами:

$$I^*_{НВ1} = \sqrt{I^{*2}_H + I^{*2}_{ЗР} - 2I^*_H I^*_{ЗР}\cos(\varphi_K - \varphi_2)} \tag{3.7.10}$$

– для трансформатора, обмотка ВН якого ввімкнена на номінальну напругу, і

$$I^*_{НВ2} = \sqrt{I^{*2}_H + I^{*2}_{ЗР} + 2I^*_H I^*_{ЗР}\cos(\varphi_K - \varphi_2)} \tag{3.7.11}$$

– для трансформатора, обмотка ВН якого ввімкнена на відводи +5% номінальної напруги, де $\varphi_K = \arccos\frac{R_K}{Z_K}$.

Сумарну потужність, якою можна навантажити трансформатори, обчислюють за формулою:

$$S_\Sigma = S_H\left(1 + \frac{I^*_{НВ1}}{I^*_{НВ2}}\right), \tag{3.7.12}$$

при цьому другий трансформатор буде працювати з номінальним навантаженням S_H , а навантаження першого буде дорівнювати:

$$S_2 = S_H \frac{I^*_{HB1}}{I^*_{HB2}} \ . \qquad (3.7.13)$$

Розподіл навантаження між двома увімкненими паралельно трансформаторами однакової потужності, які відрізняються напругами короткого замикання, визначається співвідношенням:

$$\frac{S^*_1}{S^*_2} = \frac{U^*_{K2}}{U^*_{K1}} \ . \qquad (3.7.14)$$

З цієї формули видно, що трансформатор з меншою напругою короткого замикання буде завантажений більше. У нашому випадку – це другий трансформатор. Але його навантаження не може бути більшим від номінального. При номінальному навантаженні другого трансформатора перший може прийняти навантаження не більше ніж

$$S_1 = \frac{U^*_{K2}}{U^*_{K1}} S_H \ , \qquad (3.7.15)$$

а сумарне навантаження двох трансформаторів буде становити:

$$S_\Sigma = \left(1 + \frac{U^*_{K2}}{U^*_{K1}}\right) S_H . \qquad (3.7.16)$$

До п.11. Відносне значення ударного струму короткого замикання на вторинній стороні обчислюють за формулою:

$$I^*_{2KУД} = \frac{100}{U_{K\%}} \left(1 + e^{-\frac{\pi R_K}{X_K}}\right) , \qquad (3.7.17)$$

а ударне значення струму короткого замикання дорівнює:

$$I_{2KУД} = \sqrt{2} I_{2HФ} \cdot I^*_{2KУД} .$$

Множник у дужках цього виразу називається ударним коефіцієнтом, який показує у скільки разів ударний струм короткого замикання більший від амплітуди усталеного струму короткого замикання.

8. Завдання на КПІЗ №8
«Розрахунок характеристик трифазного трансформатора»

Трифазний силовий трансформатор характеризується наступними величинами: потужність $S_{ном}$, номінальна первинна лінійна напруга $U_{1ном}$, номінальна вторинна напруга $U_{2ном}$, напруга короткого замикання $U_к$ %, струм холостого ходу i_0 %, потужність втрат холостого ходу P_0 (при первинній напрузі, рівній номінальній), потужність втрат короткого замикання $P_к$ (при струмах в обмотках, рівних номінальним), група з'єднання обмоток.

Визначити: а) коефіцієнт трансформації; б) фазні напруги первинної і вторинної обмоток при холостому ході; в) номінальні струми в обмотках трансформатора; г) параметри *Т*-подібної схеми заміщення R_0, X_0, R_1, X_1, R_2, X_2; д) вторинну напругу при $cos\varphi_2 = 0{,}8$ і значеннях коефіцієнта навантаження β: 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25; е) Річний ККД трансформатора при тих самих значеннях $cos\varphi_2$ і коефіцієнта навантаження при умові, що трансформатор знаходиться під навантаженням протягом року T годин, а в інший час коло вторинної обмотки розімкнуте (навантаження відсутнє).

Побудувати залежності $U_2(\beta)$ і $\eta(\beta)$, включаючи точку $\beta = 0$. Прийняти, що в досліді короткого замикання потужність втрат ділиться порівну між первинною і вторинною обмотками ($R_1 = R_2' = R_к/2$, $X_1 = X_2' = X_к/2$).

Таблиця 3.8.1 – Вихідні дані до КПІЗ №8

Варі-ант	$S_н$, кВА	$U_{1н}$, кВ	$U_{2н}$, В	$U_к$, %	i_0, %	P_0, Вт	$P_к$, Вт	T, год.	Група з'єдн. обмоток
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	10	6,3	400	5,0	10,0	105	335	3000	Y/Y-0
2	20	6,3	230	5,0	9,0	180	600	3100	Y/Δ-11
3	35	10	400	4,7	3,0	125	690	3100	Y/Δ-11
4	25	10	230	4,7	9,0	125	690	3100	Y/Y-0
5	25	6	400	4,5	3,0	125	600	3200	Y/Δ-11
6	30	10	400	5,0	9,0	300	850	3300	Y/Y-0
7	40	6	230	4,5	8,5	180	880	3400	Y/Y-0
8	40	10	400	4,0	3,2	125	690	3600	Y/Δ-11
9	50	10	400	5,0	8,0	440	1325	3800	Y/Y-0
10	63	10	400	4,7	2,8	260	1470	4000	Y/Y-0
11	63	6	400	4,5	8,0	260	1280	4200	Y/Δ-11
12	63	10	230	4,7	2,8	260	1470	4300	Y/Δ-11
13	75	10	230	5,0	7,5	590	1875	4400	Y/Y-0
14	100	20	230	4,7	2,6	465	2270	4500	Y/Δ-11
15	100	10	400	4,7	7,5	305	2270	4600	Y/Y-0
16	100	35	230	4,7	2,6	465	2270	4700	Y/Δ-11
17	160	6	400	4,5	2,4	540	2650	5000	Y/Δ-11
18	160	10	230	4,5	2,4	540	3100	5200	Y/Y-0
19	160	10	525	5,0	7,0	1200	4100	5300	Y/Δ-11
20	240	10	525	5,0	7,0	1600	5100	5400	Y/Y-0

Методичні вказівки до розв'язання КПІЗ №8

Дано: $S_H = 240\ кВА,\ U_{1H} = 10\ кВ,\ U_{2H} = 525\ В,\ u_k = 5\%,\ i_0 = 7\ \%,\ P_0 = 1600\ Вт,$

$P_K = 5100\ Вт,\ T = 5400\ год.,\ cos\varphi = 0{,}8,\ Y/Y - 0.$

Розв'язання

Схема з'єднань обмоток та заступна схема трансформатора показані на рисунках 3.8.1, 3.8.2 відповідно.

а) Для схеми *Y/Y*-0 лінійний та фазний коефіцієнти трансформації однакові

$$n_л = n_ф = \frac{U_{1нл}}{U_{2нл}} = \frac{10000}{525} = 19{,}05.$$

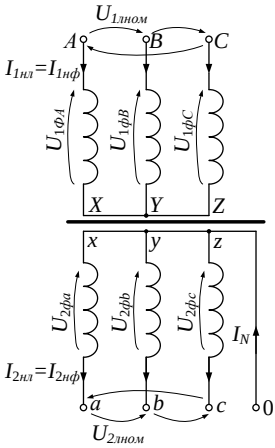

Рисунок 3.8.1 – Схема з'єднань

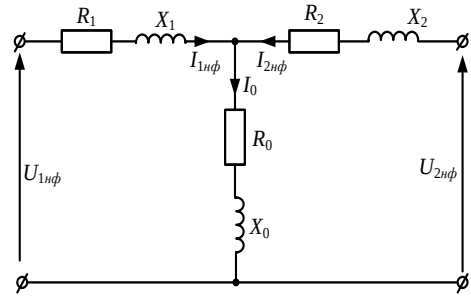

Рисунок 3.8.2 – Т-подібна схема заміщення

б) фазні напруги первинної та вторинної обмоток:

$$U_{1нф} = U_{1нл} \Big/ \sqrt{3} = 10000 / \sqrt{3} = 5774\ В,$$

$$U_{2нф} = U_{2нл} \Big/ \sqrt{3} = 525 / \sqrt{3} = 303\ В.$$

в) номінальні струми в обмотках трансформатора:

$$I_{1л} = I_{1ф} = \frac{S_{1н}}{\sqrt{3} \cdot U_{1нл}} = \frac{240000}{\sqrt{3} \cdot 10000} = 13{,}85 \ A;$$

$$I_{2нл} = I_{2нф} = \frac{S_{1н}}{\sqrt{3} \cdot U_{2нл}} = \frac{240000}{\sqrt{3} \cdot 525} = 263{,}9 \ A.$$

г) параметри *Т*-подібної схеми заміщення.

Повний, активний та реактивний опори фази при короткому замиканні:

$$Z_K = \frac{u_k \cdot U_{1нф}}{100 \cdot I_{1нф}} = \frac{5 \cdot 5774}{100 \cdot 13{,}85} = 20{,}8 \ Ом; \qquad R_K = \frac{P_K}{3 \cdot I_{1нф}^2} = \frac{5100}{3 \cdot 13{,}85^2} = 8{,}9 \ Ом;$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{20{,}8^2 - 8{,}9^2} = 18{,}8 \ Ом.$$

Опори первинної обмотки:

$$R_1 = R_K / 2 = 8{,}9 / 2 = 4{,}45 \ Ом; \qquad X_1 = X_K / 2 = 18{,}8 / 2 = 9{,}9 \ Ом.$$

Опори вторинної обмотки трансформатора:

$$R_2 = R_1 / n_ф^2 = 4{,}45 / 19{,}05^2 = 0{,}012 \ Ом; \quad X_2 = X_1 / n_ф^2 = 9{,}9 / 19{,}05^2 = 0{,}027 \ Ом.$$

Струм холостого ходу:

$$I_0 = \frac{i_0(\%)}{100\%} \cdot I_{1нф} = \frac{7}{100} \cdot 13{,}85 = 0{,}97 \ A.$$

Опори намагнічуючої вітки:

$$Z_0 = \frac{U_{1нф}}{I_{1X}} = \frac{5774}{0{,}97} = 5953 \ Ом; \qquad R_0 = \frac{P_0}{3 \cdot I_0^2} = \frac{1600}{3 \cdot 0{,}97^2} = 567 \ Ом.$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{5953^2 - 567^2} = 5926 \ Ом.$$

Вторинна напруга при $cos\varphi = 0{,}8$, звідки $sin\varphi = 0{,}6$.

$$u_{ak} = u_k(\%) \cdot \frac{R_K}{Z_K} \cdot cos\varphi_2 = 5\% \cdot \frac{8{,}9}{20{,}8} \cdot 0{,}8 = 1{,}71 \ \%;$$

$$u_{pk} = u_k(\%) \cdot \frac{X_K}{Z_K} \cdot sin\varphi_2 = 5\% \cdot \frac{18{,}8}{20{,}8} \cdot 0{,}6 = 2{,}71\ \%.$$

Задаючись значеннями коефіцієнта навантаження β за формулами: $U'_{2\phi} = \frac{U_{2нф}}{100\%} \cdot \left(100\% - \beta\left(u_{ak} + u_{pk}\right)\right)$ та $\eta = \frac{\beta S_{1н}\, cos\varphi_2}{\beta S_{1н}\, cos\varphi_2 + \beta^2 P_K + P_0}$ знаходимо вторинну напругу та коефіцієнт корисної дії трансформатора.

Результати заносимо в таблицю 3.8.2 і будуємо залежності $U_2 = f(\beta)$ і $\eta = f(\beta)$ (рис.3.8.3).

Таблиця 3.8.2 – Результати розрахунку

β, *в.о.*	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25
$U'_{2\delta}$, *В*	303	299,6	296,3	292,9	289,6	286,2
η, *в.о.*	0	0,9615	0,977	0,969	0,966	0,961

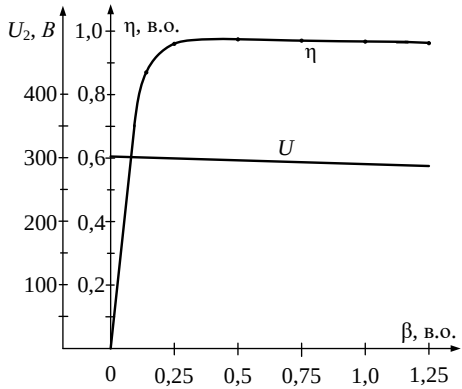

Рисунок 3.8.3 – Залежності $U_2 = f(\beta)$ і $\eta = f(\beta)$

Перелік питань до самостійного опрацювання

1. Класифікація та номінальні дані електричних машин.
2. Призначення, область використання та номінальні дані трансформаторів.
3. Конструкції магнітопроводів та обмоток трансформатора. Охолодження трансформатора.
4. Рівняння напруг трансформатора при неробочому ході. Векторна діаграма напруг.
5. Намагнічуючий струм і струм неробочого ходу трансформатора.
6. Заступна схема та втрати в трансформаторі при неробочому ході.
7. Дослід неробочого ходу трансформатора.
8. Магнітне поле і рівняння м.р.с. трансформатора при навантаженні.
10. Рівняння напруг обмоток трансформатора при навантаженні. Зведення вторинних величин до первинної обмотки.
11. Заступна схема та векторна діаграма трансформатора при навантаженні.
12. Дослід короткого замикання трансформатора.
13. Зовнішні характеристики трансформатора.
14. Втрати потужності та к.к.д. трансформатора.
15. Групи з'єднань обмоток трансформаторів.
16. Паралельна робота трансформаторів.
17. Автотрансформатори. Триобмотковий трансформатор.
18. Вимірювальні трансформатори напруги та струму.
19. Перехідні процеси в трансформаторі при короткому замиканні на затискачах вторинної обмотки.
20. Перехідні процеси при вмиканні ненавантаженого трансформатора в мережу.
21. Перенапруги в трансформаторах.
22. Основні види машин змінного струму та їх будова.
23. Статорні обмотки машин змінного струму.
24. Електрорушійна сила котушки, котушкової групи і фази.
25. Покращення форми кривої ЕРС обмоток машин змінного струму.
26. Магніторушійна сила котушки, фазної обмотки, трифазної обмотки.
27. Області використання, конструкція та принцип роботи асинхронних машин.
28. Асинхронна машина з загальмованим ротором як фазорегулятор та індукційний регулятор.
29. Заміна обертового ротора нерухомим.
30. Механічна характеристика асинхронного двигуна.
31. Робочі характеристики асинхронного двигуна.
32. Пуск асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором.
33. Пуск асинхронних двигунів з фазним ротором.
34. Асинхронні двигуни з покращеними пусковими характеристиками.

35. Регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

36. Регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна з фазним ротором.

37. Гальмівні режими роботи асинхронного двигуна.

38. Асинхронний двигун з масивним ротором. Однофазний конденсаторний двигун.

39. Робота трифазного асинхронного двигуна від однофазної мережі.

40. Конструктивні схеми і принцип роботи синхронної машини.

41. Охолодження та системи збудження синхронних машин.

42. Робота синхронного генератора при неробочому ході.

43. Реакція якоря синхронного генератора.

44. Векторні діаграми неявнополюсного синхронного генератора з урахуванням та без урахування насичення магнітного кола.

45. Векторні діаграми явнополюсного синхронного генератора з урахуванням та без урахування насичення магнітного кола.

46. Характеристики синхронного генератора при роботі на автономне навантаження.

47. Вмикання синхронного генератора на паралельну роботу.

48. Регулювання активної та реактивної потужностей генератора, що працює паралельно з мережею.

49. Потужність, електромагнітний момент та статична стійкість синхронного генератора, що працює паралельно з мережею.

50. Робота синхронної машини в режимі двигуна.

51. Характеристики синхронного двигуна.

52. Пуск синхронних двигунів.

53. Регулювання швидкості обертання ротора синхронного двигуна.

54. Синхронний компенсатор.

55. Синхронні реактивні двигуни.

56. Синхронні машини зі збудженням від постійних магнітів.

57. Будова та принцип роботи машин постійного струму.

58. Електрорушійна сила обмотки якоря і електромагнітний момент машини постійного струму.

59. Класифікація обмоток машин постійного струму та їх елементи.

60. Поперечна та поздовжня реакція якоря машини постійного струму.

61. Класифікація генераторів постійного струму за збудженням.

62. Характеристики генераторів постійного струму.

63. Класифікація двигунів постійного струму за способами збудження.

64. Характеристики двигунів постійного струму.

65. Пуск двигунів постійного струму. Регулювання швидкості обертання двигунів постійного струму.

66. Гальмівні режими роботи двигунів постійного струму.

67. Однофазні колекторні двигуни.

Список використаних джерел

1. Безвесільна О.М. Толочко Т.О. Елементи і пристрої автоматики та систем управління. НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Київ. 2023, 328 с.

2. Видмиш А.А., Ярошенко Л.В. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. Навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ. 2020, 387 с.

3. Донець О.В. Теорія електропривода. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. 2021, 148 с.

4. Лавріненко Ю.М. Основи електропривода. К.: Ліра-К. 2021, 532 с.

5. Синявський О. Ю., Лавріненко Ю.М., Войтюк Д.Г., Бунько В.Я., Рамш В.Ю. Електропривод виробничих машин і механізмів. К.: ФОП Ямчинський О.В. 2020, 444 с.

6. Щерба А.А., Поворознюк Н.І. Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси. НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Київ. 2022, 497 с.

Е50 Електромеханічні пристрої. Методичні вказівки до самостійної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 Електрична інженерія спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка денної та заочної форм навчання / укладач В. В. Лишук. Луцьк: ЛНТУ, 2025. 64 с.

Комп'ютерний набір Віктор ЛИШУК
Редактор Віктор ЛИШУК

Підп. до друку «__»_____2025 р.
Формат 60х84/13.6. Папір офс.
Гарн. Таймс. Ум. друк. арк. 3
Тираж 50 прим.

Відділ іміджу та промоції
Луцького національного технічного університету
43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75
Друк – ВІП Луцького НТУ