

**ПРОГРАМА**  
**вступного іспиту зі спеціальності**  
**141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**  
**для здобувачів вищої освіти третього (освітньо-наукового) рівня**

Програма визначає обсяг матеріалу, яким повинен володіти абітурієнт, що вступає на навчання за освітньо-науковою програмою підготовки доктора філософії за спеціальністю «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Програма охоплює питання з теоретичної електротехніки, синтезу, моделювання, дослідження, проектування та експлуатації, електричних машини і апаратів, електротехнічних комплексів та систем, електричних станцій, мереж і систем.

**1. Основні поняття електромагнітного поля і електричних кіл.**

Загальна характеристика задач теорії електромагнітного поля й теорії електричних кіл і магнітних кіл. Основні рівняння електромагнітного поля в інтегральній формі. Енергія, сили і механічні прояви електричного й магнітного полів. Основні параметри електричних і магнітних полів в інтегральній формі. Постановка задач автоматизованого проектування електротехнічних пристроїв.

**2. Теорія лінійних електричних кіл.**

Електричні та електронні кола в системах передачі й перетворення енергії і інформації. Класифікація кіл та їх елементів. Двополюсники і багатополусники. керовані джерела. Індуктивно зв'язані елементи. Графи і топологічні матриці електричних схем, топологічні рівняння. Закон Ома для узагальненої вітки, матричні компонентні рівняння. Вузлові і розширені вузлові рівняння, контурні рівняння. Чисельні методи розв'язку кіл при ustalених режимах. Точні та ітераційні методи. Метод Гауса, розклад матриць на трикутні співмножники, чисельні методи обернення матриць. Умови збіжності ітераційних методів. Розрахунок вхідних і передатних функцій у символічній формі. Топологічні методи аналізу. Сигнальні графи та їх застосування до аналізу електричних кіл.

Багатофазні кола. Розрахунок симетричних і несиметричних трифазних кіл. Метод симетричних складових.

Багатополусники, матриці багатополусників. Основні рівняння регулярних чотириполусників. Характеристичні опори і коефіцієнт передачі. Заступні схеми взаємних і невзаємних чотириполусників. З'єднання чотириполусників. Чотириполусники із зворотними зв'язками. Особливості формування рівнянь кіл із багатополусними компонентами. Гібридні рівняння. Гіратори і конвертори опору.

Електричні кола з негармонічними напругами і струмами. Гармонічний аналіз періодичних функцій. Діюче значення і потужність. Сигнали і їх спектри. Спектральна густина. Перетворення сигналів лінійними системами. Елементи теорії фільтрів. Реактивні фільтри. Безіндукційні фільтри. Частотні характеристики і методи їх розрахунку.

Перехідні процеси в лінійних колах. Аналіз динамічних процесів в часовій області. Класичний метод. Особливості розрахунку при наявності ємнісних контурів та індуктивних перерізів. Складання та чисельні методи розв'язку рівнянь стану. Дискретні схемні моделі компонентів кола і їх застосування для чисельного розв'язку рівнянь стану. Аналіз динамічних процесів в частотній області. Застосування перетворень Лапласа і Фур'є для розрахунку перехідних процесів. Наближені і числові методи спектрального аналізу. Зв'язок перехідних і частотних характеристик.

Елементи синтезу лінійних кіл. Властивості функцій і методи реалізації двополюсників і чотириполусників пасивних електричних кіл. Синтез безіндуктивних чотириполусників з активними і невзаємними елементами.

Кола з розподіленими параметрами. Основні рівняння довгих ліній і їх розв'язок для усталених синусоїдних коливань. Перехідні процеси в колах з розподіленими параметрами.

### **3. Теорія нелінійних електричних кіл.**

Усталені процеси в нелінійних колах. Методи розрахунку нелінійних електричних і магнітних кіл при постійних струмах і напругах. Особливості нелінійних кіл змінного струму й методи їх розрахунку. Аналіз усталених процесів в нелінійних колах змінного струму. Формування та чисельні методи розв'язку алгебраїчних рівнянь нелінійних резистивних електричних кіл. Метод малого параметру.

Перехідні процеси в нелінійних колах. Основні методи аналізу. Асимптотичні методи. Метод збурення. Метод гармонічного балансу і частотні властивості нелінійних кіл. Фазова площина. Метод змінних стану. Чисельні методи розв'язку нелінійних рівнянь стану. Методи неявного інтегрування. Дискретні моделі нелінійних реактивних елементів і їх застосування для розрахунку динамічних процесів.

Автоколивання. Майже гармонійні коливання. Релаксаційні коливання. Стійкість. Енергетичні співвідношення. Машинний метод розрахунку періодичних і автоколивальних режимів.

### **4. Теорія електромагнітного поля.**

Основні вектори та основні рівняння електромагнітного поля. Система рівнянь Максвелла. Електродинамічні потенціали. Граничні умови. Теорема Умова-Пойнтінга. Теорема Гауса.

Статичні поля. Основні рівняння електричного і магнітного статичного поля. Крайові задачі і методи їх розв'язку. Метод конформних перетворень і метод розділення змінних. Чисельні методи розв'язку крайових задач. Метод сіток. Метод кінцевих елементів. Метод інтегральних рівнянь теорії потенціалу і його чисельна реалізація. Ємність, ємнісні і потенційні коефіцієнти.

Стаціонарні електричні і магнітні поля. Основні рівняння поля. Диференційна форма законів Ома, Джоуля-Ленца, Кірхгофа. Подібність статичних і стаціонарних полів. Векторний магнітний потенціал. Потокозчеплення. Власна і взаємна індуктивність. Застосування методу інтегральних рівнянь.

Змінне електромагнітне поле в провідному середовищі. Хвилі в провідних середовищах. Поверхневий ефект. Проникнення магнітного поля в масив феромагнетика для прямокутної характеристики намагнічення. Моделювання змінних полів в провідних середовищах.

Електромагнітні хвилі і випромінювання. Хвильове рівняння і його розв'язок. Гармонійні хвилі в ідеальному діелектрику. Відбиття електромагнітних хвиль. Хвилі в просторі, обмеженому провідними границями. Хвильоводи і резонатори. Типи хвиль. Фазова і групова швидкість. Рівняння Д'Аламбера. Випромінювання квантових генераторів. Електромагнітні поля в реальних діелектриках, феромагнетиках і анізотропних середовищах. Комплексні параметри середовища.

Чисельні методи розрахунку нестаціонарних полів. Електромагнітні поля в рухомих середовищах. Основні рівняння магнітної гідродинаміки.

### **5. Математичні методи розв'язання рівнянь в задачах електротехніки.**

Розв'язання алгебраїчних і трансцендентних рівнянь однієї змінної в задачах електротехніки (метод половинного ділення, метод простої ітерації, метод дотичних, метод Ейткена-Стефенсона, ітераційний метод послідовних наближень). Визначення коренів алгебраїчних рівнянь на основі обчислення власних значень матриці. Наближені формули для визначення коренів деяких алгебраїчних рівнянь.

Розв'язання систем лінійних рівнянь у задачах електротехніки (ітераційні методи розв'язання систем лінійних рівнянь, метод простої ітерації, метод ітерації Зейделя, метод найшвидшого спуску). Розв'язання систем лінійних рівнянь методами мінімізації (метод

мінімізації суми квадратів нев'язок, метод найменших квадратів, метод мінімізації суми модулів нев'язок, метод релаксації).

Розв'язання систем нелінійних рівнянь у задачах електротехніки методами ітерації (метод простої ітерації, метод ітерації Зейделя, метод найшвидшого спуску, метод Ньютона, метод Ейткена-Стефенсона).

Розв'язання диференційних рівнянь у задачах електротехніки (інтегрування диференційних рівнянь за допомогою степеневих рядів, метод послідовних наближень, формули числового інтегрування). Чисельні методи розв'язання диференційних рівнянь (метод Ейлера-Коші, метод Рунге-Кутта). Різницеві (багатокрокові) чисельні методи розв'язання диференційних рівнянь (метод Мілна, метод Адамса). Методом кусково-аналітичного розв'язання нелінійних диференційних рівнянь. Лінеаризація нелінійних диференційних рівнянь. Розв'язання крайових задач.

Розв'язання диференційних рівнянь у часткових похідних у задачах електричних кіл з розподіленими параметрами (метод Д'Аламбера, метод прямих, метод розділення змінних, метод малого параметру). Розв'язання еліптичних рівнянь.

Елементи математичних основ теорії стійкості режимів електричних кіл (алгебраїчні критерії стійкості, частотні критерії стійкості). Методи Ляпунова.

Основи теорії імовірностей в задачах електротехніки (випадкові події, випадкові величини). Основи математичної статистики. Визначення статичних числових характеристик випадкових величин. Основні положення теорії випадкових функцій.

Елементи теорії інформації. Метод Монте-Карло в задачах електротехніки. Елементи математичних основ теорії надійності.

Елементи математичних основ оптимізації в задачах електротехніки. Метод неозначених множників Лагранжа. Основи лінійного програмування. Основи нелінійного програмування. Чисельні методи оптимізації (метод сканування, метод Монте-Карло, метод Гауса-Зейделя, метод найшвидшого спуску).

## **6. Методи дослідження електричних машин**

Електромеханічне перетворення енергії, його умови і закони. Конструктивні види перетворювачів - електричних машин.

Два підходи до опису електромагнітних процесів в електричних машинах: з позиції теорії поля і теорії електричних кіл. Порівняльне зіставлення фізичного моделювання, аналітичних і числових методів розв'язування рівнянь.

Узагальнена електрична машина - математична модель електричних машин усіх типів. Допущення при запису рівнянь узагальненої машини. Диференційні рівняння в різних системах координат. Рівняння Парка-Горева синхронної машини. Фізичний зміст параметрів узагальненої машини - коефіцієнтів в диференційних рівняннях.

Рівняння усталеного режиму роботи електричних машин. Векторні діаграми і еквівалентні заступні схеми.

Електромагнітний момент узагальненої електричної машини, рівняння руху ротора. Статичні та динамічні механічні характеристики електродвигунів. Способи вимірювання моменту.

Нескінченний спектр гармонік поля в повітряному проміжку електричної машини. Часові і просторові гармоніки. Параметри вищих гармонік. Методи розрахунку гармонік МРС і магнітної індукції в повітряному проміжку з урахуванням зубчатості осердь та нелінійних властивостей магнітного кола. Узагальнений електромеханічний перетворювач енергії - багатообмоткова електрична машина як математична модель машин з безконечним спектром гармонік поля в повітряному проміжку.

Багатообмоткові електричні машини. Математичні моделі асинхронних двигунів з подвійною білячою кліткою і синхронних машин із демпферними обмотками. Урахування впливу вихрових струмів, гістерезису та втрат в сталі.

Математичне моделювання електричних машин зі змінними параметрами. Урахування витіснення струму в провідниках, насичення та зміни моменту інерції.

Однофазні двигуни змінного струму.

Електрична машина як елемент електромеханічної системи. Математичні моделі електричних машин з урахуванням зовнішніх елементів, які увімкнені в кола статора і ротора.

## **7. Електромагнітне поле в електричних машинах**

Область поля електричної машини. Математичний опис електромагнітного поля електричної машини. Розподіл області поля на обертову та нерухому частини. Граничні і початкові умови.

Електромагнітна сила, яка діє в області паза зі струмом в магнітному полі (розподіл сили між провідником та стінками паза). Залежність сили від величини поля, отриманої із енергетичних міркувань. Аналітичні вирази електромагнітних сил та електромагнітного моменту.

ЕРС, яка індукована в розташованому в пазу електричної машини провіднику, залежність її від індукції в повітряному проміжку, виходячи зі зміни потокозчеплення при малому переміщенні.

Магнітне поле в гладкому проміжку між статором і ротором. Магнітне поле в ярах статора, і ротора, (урахування кривизни, розрахунок магнітної напруги, витіснення магнітного потоку в оточуюче середовище).

Методи і результати дослідження магнітного поля в зубчастому повітряному проміжку. Поле в області пазів зі струмом і без струму при односторонній зубчастості. Коефіцієнт повітряного проміжку. Поле при двосторонній зубчастості.

Гармонічний аналіз питомої магнітної провідності повітряного проміжку, МРС і магнітної індукції в повітряному проміжку стосовно однофазних і багатофазних обмоток синхронних та асинхронних машин.

Взаємна індукція однофазних та багатофазних обмоток для струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей в машинах змінного струму.

Поле розсіяння в пазах різної форми. Розрахунок індуктивностей пазового, диференційного і лобового розсіяння для одношарових та двошарових багатофазних обмоток.

Магнітне поле в ділянці торцевих частин машини. Розрахункова довжина машини. Поле лобових частин. Електромагнітні сили, які діють на лобові частини. Магнітні поля і параметри синхронних машин при симетричному і асиметричному навантаженнях.

Вплив вихрових струмів у провідниках, які лежать в пазу, на їх активний та індуктивний опори. Заходи щодо зменшення додаткових втрат в обмотках (транспозиція елементарних провідників, скрутка в лобових частинах).

## **8. Втрати і теплові явища в електричних машинах**

Види втрат і фізичні причини їх виникнення в електричних машинах. Методи розрахунку основних і додаткових втрат в машинах змінного і постійного струму. ККД електричних машин і трансформаторів, способи розрахункового і експериментального визначення.

Фізичні процеси нагрівання і охолодження електричних машин та трансформаторів. Рівняння теплообміну і теплові параметри. Методи розрахунку перехідних і ustalених температур. Еквівалентні заступі схеми електричних машин та трансформаторів.

Електроізоляційні матеріали і класи їх нагрівостійкості. Залежність терміну служби ізоляції від температури і режимів роботи електричних машин та трансформаторів.

Теплові дослідження електричних машин.

## **9. Спеціальні електричні машини**

Електричні машини автоматичних пристроїв: виконавчі двигуни змінного і постійного струму; синхронні мікродвигуни з постійними магнітами, реактивні, гістерезисні, з електромагнітною редукцією частоти обертання; двигуни з ротором, що котиться і гнучким хвильовим ротором; універсальні колекторні двигуни; інформаційні електричні мікромашини.

Багатомірні електричні машини, двигуни зі сферичним і конічним ротором, торцеві конструкції електричних машин, уніполярні машини. Електричні машини коливного і зворотно-поступального руху, лінійні і дугостаторні двигуни, МГД - генератори і насоси. Електричні машини з надпровідними обмотками. Ємнісні електричні машини.

## **10. Трансформатори**

Трансформатор як електромагнітний перетворювач енергії. Фізичні процеси в трансформаторі. Магнітні системи і обмотки трансформаторів, групи з'єднання обмоток.

Основні рівняння і заступні схеми трансформатора. Параметри трансформаторів, методи їх визначення.

Паралельна робота трансформаторів. Несиметричні режими роботи трансформаторів. Перехідні процеси в трансформаторах.

Класифікація трансформаторів, їх спеціальні типи.

## **11. Електричні апарати**

Основні різновидності електричних апаратів. Програмовані електричні апарати. Процеси відключення та включення електричних кіл. Підігрів біметалевих елементів. Процес зношування контактів. Захисна характеристика запобіжників та методи її розрахунку. Особливості процесу комутації високочастотних електричних кіл.

Вольт-амперна характеристика електричної дуги. Умови гасіння дуги в апаратах постійного і змінного струму. Відновлювальна міцність міжконтактного проміжку апаратів. Магнітне дуття і дугогасильні камери. Розрахунок дугогасильних пристроїв.

Методи розрахунку магнітних провідностей повітряних проміжків, електромагнітних систем та динамічних характеристик електричних апаратів.

Теплові процеси в електричних апаратах та методи їх розрахунку.

## **12. Механіка електропривода.**

Кінематичні схеми. Навантаження механічної частини електропривода. Рушійні сили, сили опору, сили інерції. Динамічний момент. Рівняння руху електропривода як системи твердих тіл і як системи з пружними зв'язками. Складання розрахункових механічних схем, приведення до однієї осі моментів інерції і рухомих мас, приведення моментів зовнішніх сил. Врахування втрат при приведенні статичних та динамічних моментів до вала електродвигуна при різних напрямках передачі механічної енергії.

Механічні перехідні процеси. Прискорення та сповільнення, пуск, реверс, гальмування, вибіг. Час пуску та гальмування. Кут повороту або шлях за час пуску та гальмування.

Узагальнене рівняння руху при змінних параметрах електропривода і механізму (маса, момент інерції, передавальне число, радіус приведення). Вплив інерційних мас на процеси пуску та гальмування, економічна ефективність та продуктивність електропривода, способи підвищення економічної ефективності роботи електропривода. використання кінетичної енергії, що виділяється в рухомих частинах. Класифікація характеристик механізмів.

## **13. Електромеханічні властивості та характеристики електродвигунів**

Універсальна діаграма роботи електропривода, зворотність електричної машини. Природна та штучна характеристики, використання відносних одиниць при розрахунку характеристик.

Двигун постійного струму (ДПС) незалежного та паралельного збудження. Рівняння електромеханічної та механічної характеристик електродвигуна, їх аналіз. Вплив різних параметрів на вигляд характеристики.

Регульовальні властивості і характеристики ДПС, способи регулювання швидкості зміною опору якірного кола, зміною потоку збудження, шунтуванням якоря, зміною напруги, яка живить якір. Автономні джерела регульованої напруги, система генератор-двигун та її різновидності, система керований випрямляч-двигун, система тиристорний перетворювач-двигун, система широтно-імпульсний перетворювач-двигун. Послідовно-паралельне включення двигунів. Властивості способів регулювання. Порівняння способів регулювання по їх основних техніко-економічних показниках.

Пускові властивості і характеристики електродвигуна, способи пуску: прямий пуск, реостатний пуск, пуск зміною напруги якоря. Поняття про пускову діаграму. Аналітичний та графічний способи розрахунку резисторів пускових ступеней реостата.

Гальмівні властивості і характеристики електродвигуна, способи гальмування: противмиканням, динамічний, з рекуперацією енергії. Розрахунок резисторів пускових ступенів реостатів. Техніко-економічне порівняння способів гальмування.

Двигун постійного струму послідовного та змішаного збудження. Рівняння електромеханічної та механічної характеристик електродвигуна. Вплив різних параметрів на вигляд характеристик.

Регульовані властивості та характеристики електродвигунів, реостатне регулювання, регулювання зміною потоку збудження, регулювання зміною напруги якоря, система генератор-двигун на машинах послідовного збудження. Характеристики електродвигуна при різних способах шунтування якоря і обмотки збудження. Методи розрахунку регульованих характеристик, техніко-економічне порівняння способів регулювання.

Пускові властивості та характеристики електродвигуна, способи пуску електродвигуна послідовного збудження, пускова діаграма, розрахунок пускового реостата.

Гальмівні властивості та характеристики електродвигуна, способи гальмування та їх особливості: динамічне гальмування, противмиканням та шунтування якоря. Техніко-економічне порівняння способів гальмування.

Природні та штучні механічні характеристики двигуна змішаного збудження. Механічні характеристики при різних співвідношеннях намагнічуючих сил в послідовній і незалежній обмотках збудження. Раціональні області використання двигунів постійного струму з різними системами збудження.

Асинхронний двигун. Особливості роботи асинхронного двигуна в усталеному режимі. Схеми заміщення асинхронного електродвигуна в усталеному режимі. Рівняння механічної характеристики асинхронного електродвигуна і його аналіз, спрощена та повна відносна форма рівняння механічної характеристики. I

Регульовальні властивості та характеристики електродвигуна, способи регулювання швидкості: введенням резистора в коло ротора, введенням резисторів в коло статора; зміною кількості пар полюсів; зміною частоти живильної мережі; зміною напруги, яка підводиться до статора; дросельний спосіб регулювання швидкості; імпульсний спосіб регулювання швидкості; регулювання швидкості при каскадному з'єднанні (асинхронно-машинний каскад, асинхронно-вентильний каскад). Способи розрахунку регульованих характеристик. Техніко-економічне порівняння способів регулювання швидкості.

Пускові властивості та характеристики електродвигуна. Прямий пуск, покращення пускових властивостей електродвигунів при прямому пуску, реостатний пуск, способи розрахунку пускового реостата, пуск зміною напруги, яка підводиться до статора: перемиканням із зірки та трикутник, реакторний, автотрансформаторний, з допомогою перетворювача напруги.

Гальмівні властивості та характеристики електродвигуна. Природні та штучні способи гальмування, гальмування противмиканням, гальмування з рекуперацією енергії в мережу, гальмування постійним струмом, однофазне гальмування, конденсаторне гальмування, комбіновані способи гальмування. Техніко-економічне порівняння способів гальмування.

Синхронний двигун. Особливості роботи синхронного електродвигуна в усталеному режимі. Властивості електропривода в синхронними двигунами. Механічні характеристики. Методи регулювання швидкості: вентильне регулювання, частотне регулювання. Пускові

властивості та характеристики синхронного електродвигуна, способи пуску. Способи гальмування. Техніко-економічні показники і сфери застосування електропривода з синхронними двигунами.

Багатодвигунні електроприводи. Сфери застосування багатодвигунних електроприводів. Системи багатодвигунних приводів з механічним зв'язком, з електричним та електромеханічним зв'язком. Механічні характеристики при сумісній роботі двох двигунів на спільний вал з жорстким з'єднанням двигунів, розподіл навантаження між двигунами. Механічні характеристики двох двигунів з жорстким з'єднанням валів при роботі одного з них в двигунному, а другого в гальмівному режимах.

Робота двигунів, з'єднаних по принципу електричного валу. Системи з автоматичним узгодженням швидкості обертання електродвигунів. Способи синхронізації приводних двигунів: шляхом зрівнювальних з'єднань, за допомогою синхронних або асинхронних зрівнювальних машин. Рівняння залежності синхронізуючого моменту електричного валу від кута розузгодження і швидкості обертання. Техніко-економічні показники багатодвигунних електроприводів.

#### 14. Динаміка електропривода.

Види перехідних процесів електропривода. Показники якості перехідних процесів. Вплив механічної, електромагнітної і теплової енергії на перехідні процеси. Механічні, електромеханічні, теплоелектромеханічні перехідні процеси.

Методика складання диференціальних рівнянь елементів лінійних і нелінійних систем електроприводів. Методи визначення параметрів, які входять в рівняння.

Спрощені лінеаризовані моделі і структурні схеми. Узагальнена лінеаризована модель електропривода з лінійною механічною характеристикою, її структурна схема і передавальні функції. Динамічні властивості електропривода з лінійною механічною характеристикою без урахування та з урахуванням пружних зв'язків. Поняття про демпфуючу здатність електропривода. Особливості частотних характеристик елементів системи з пружними зв'язками. Вплив нелінійності на динамічні властивості елементів електромеханічної системи.

Зображення перехідних процесів в часовій площині і в площині "швидкість-момент".

Значення вивчення перехідних процесів. Класифікація перехідних процесів по основних групах.

Перша група. Перехідні процеси в лінійних системах електропривода при врахуванні механічної, але без урахування електромагнітної інерції. Приклади.

Перехідні процеси при прямому пуску електродвигуна паралельного збудження при різних законах зміни напруги на якорі, при реостатному пуску, при динамічному гальмуванні і противмиканні, пуск та гальмування асинхронного двигуна без навантаження.

Друга група. Перехідні процеси в нелінійних системах електропривода при врахуванні механічної, але без урахування електромагнітної інерції. Перехідні процеси при пуску електродвигуна послідовного та змішаного збудження при  $M_c = \text{const}$  і  $M_c = \text{var}$ . Перехідні процеси в асинхронному електроприводі при змінних параметрах. Перехідні процеси при змінному моменті інерції або масі.

Третя група. Перехідні процеси в лінійних системах електропривода при врахуванні як механічної так і електромагнітної інерції. Перехідні процеси при прямому пуску електродвигуна паралельного збудження. Перехідні процеси в колі збудження електричних машин. Три види рівнянь для кола збудження електричної машини постійного струму. Поняття про форсування протікання перехідних процесів. Способи здійснення форсування. Рівняння системи перетворювач-двигун та їх аналіз. Методи лінеаризації нелінійних рівнянь, рівняння в приростах і методи їх розв'язку. Перехідні процеси в електроприводі за системою перетворювач-двигун. Перехідні процеси в електроприводі з асинхронним двигуном. Перехідні процеси в електроприводі з асинхронним двигуном. Сфери застосування "ручних" і машинних методів розрахунку, їх взаємозв'язок.

Четверта група. Перехідні процеси в нелінійних системах електропривода при

врахуванні як механічної так і електромагнітної інерції (загальний випадок). Рівняння стану. Особливості узагальненого графічного методу при рішенні даного типу задач. Узагальнений алгоритм послідовного типу рішення рівнянь стану. Структурна схема алгоритму рішення задач. Перехідні процеси в інерційних нелінійних ланках без зворотних зв'язків. Перехідні процеси в електродвигуні постійного струму незалежного збудження при постійному потоці і змінній напрузі на якорі. Перехідні процеси в електродвигуні при одночасній зміні потоку збудження і напруги на якорі.

#### **15. Вибір потужності основних елементів електропривода.**

Принципи вибору потужності електродвигуна. Фактори, які визначають номінальну потужність приводного двигуна і його перевантажувальну здатність. Допустимий нагрів електродвигуна. Строки служби ізоляції електричних машин в залежності від теплового режиму.

Навантажувальні діаграми електродвигунів.

Основи теорії нагріву. Основні допущення при аналізі процесу нагріву електричних машин і апаратів. Сталі часу теплового процесу. Вплив теплової інерції при нагріві. Нагрів електричних машин при постійному та змінному навантаженні.

Вибір потужності електродвигуна при довготривалому режимі роботи. Аналітичний і графічний методи визначення температури при різних режимах роботи електродвигуна.

Вибір потужності двигуна при короткочасному режимі роботи. Вибір потужності електродвигуна при повторно-короткочасному режимі за середніми втратами, середньоквадратичних величинах струму, моменту і потужності. Врахування змін умов охолодження. Перерахунок потужності двигуна при різних режимах роботи електропривода. Вплив числа пусків в годину на нагрів двигуна. Визначення допустимого числа вмикань на годину. Вибір потужності двигуна при ударному навантаженні. Застосування маховика. Визначення розмірів маховика (уточнений розрахунок).

Вибір потужності двигуна за параметрами виробничої установки, експлуатаційним коефіцієнтом і іншими технічними умовами. Вибір типу і потужності перетворювача для живлення двигуна привада. Техніко-економічне обґрунтування вибору основних елементів привода.

#### **16. Формування статичних і динамічних характеристик систем автоматизованого електропривода**

##### **16.1. Релейно-контактори і системи керування рухом електропривода**

Принципи автоматичного керування пуском і гальмуванням електропривода з параметричним регулюванням струму, моменту і швидкості. Типові вузли завдання напряму і величини швидкості, плавного вибору величини люфтів і ін. Типові вузли захисту і блокування. Розрахунок параметрів і вибір елементів типових вузлів.

Типові схеми формування пуско-гальмівних режимів в системах релейно-контакторного керування електроприводами постійного струму з двигунами незалежного та послідовного збудження. Схеми з регулюванням струму якоря при зміні поля двигуна. Типові схеми формування пуско-гальмівних режимів з системами релейно-контакторного керування асинхронними двигунами з короткозамкнутим і фазним ротором. Бездугова комутація. Напівпровідникові комутатори. Типові схеми формування пуску і гальмування електроприводів з синхронними двигунами. Вплив автоматичного регулювання збудження на характеристики. Використання законів  $Q=\text{const}$ ,  $F=\text{const}$  і ін. Особливості формування пускових характеристик електропривода з асинхронними короткозамкнутими і синхронними двигунами, які живляться від мережі з обмеженою потужністю. Особливості захисту електроприводів змінного струму.

Використання безконтактних пристроїв, які працюють за принципом релейних систем для керування роботою електропривода. Типи безконтактних пристроїв.

##### **16.2. Формування статичних і динамічних характеристик замкнутих систем електроприводів постійного струму**



Застосування зворотних зв'язків для формування штучних характеристик електроприводів. Види зв'язків: за напругою, струмом, магнітним потоком, швидкістю. Зв'язки з відсічками. Комбіновані зв'язки. Методи розрахунку регулювальних і штучних характеристик електродвигунів в системах із зворотними зв'язками. Перехідні процеси при послідовному з'єднанні ланок системи управління електроприводами, при наявності декількох прямих і зворотних зв'язків. Перехідні процеси при наявності в системі нелінійностей різного роду (зв'язки з відсічками, зони нечутливості, сухе тертя, обмеження координат і ін.).

Типові вузли замкнутих систем керування швидкістю електропривода постійного струму, розрахунок їх параметрів і вибір елементів. Статичні характеристики при різних зворотних зв'язках. Нормування динамічних механічних характеристик при пуску, гальмуванні, зміні навантаження, їх порівняння із статичними характеристиками.

Вузли схем керування полем двигуна. Особливості аналізу і синтезу систем при керуванні полем двигуна. Формування статичних і динамічних характеристик при керуванні полем двигуна.

Типова схема керування електроприводом в системі ТП-Д. Особливості формування потрібних статичних і динамічних характеристик. Корежуючі зв'язки. Вплив зони перервних струмів перетворювача. Особливості схеми з нереверсивним тиристорним перетворювачем. Аналіз статичних і динамічних характеристик.

Система Г-Д з тиристорним збудженням. Синтез корегуючих зв'язків, Розрахунок параметрів. Формування оптимальних перехідних процесів, статичних і динамічних характеристик. Тиристорні збудники, схеми і розрахунки. Стабілізація прискорення або підтримання стабільності струму в перехідних процесах з різними навантаженнями.

Типова схема керування електроприводом постійного струму за допомогою тиристорного збудника із широтно-імпульсною модуляцією. Особливості аналізу і синтезу. Статичні характеристики і динамічні властивості електропривода.

Структури підпорядкованого регулювання координат, особливості їх послідовної корекції. Забезпечення граничної швидкодії перехідних процесів. Критерії оптимізації динаміки. Амплітудно-частотний критерій. "Модульний" і "Симетричний" оптимуми.

Схема ТП-Д з підпорядкованим контуром регулювання струму, з налагодженням контуру регулювання на "технічний" і "симетричний" оптимуми. Застосування адаптивного регулятора струму. Розрахунок параметрів регуляторів, їх реалізація на елементах УБСР. Програмне керування швидкістю з допомогою задавачів інтенсивності першого і другого порядку. Точність відтворення заданих законів руху. Формування характеристик в системі двохзонного регулювання швидкості.

Система Г-Д з тиристорним збудженням, оптимізована методом послідовної корекції. Розрахунок і вибір елементів. Статичні і динамічні характеристики, їх порівняння. Оцінка точності і якості регулювання.

Синтез модального регулятора в одномасових системах. Умова астатизму одномасових систем з модальним регулятором.

### **16.3. Формування статичних і динамічних характеристик систем електроприводів змінного струму**

Типові вузли схем керування швидкістю асинхронних електроприводів з перетворювачами напруги, розрахунок їх параметрів і вибір елементів (система ТПН-АД) .

Керування асинхронним електроприводом з періодичною зміною додаткового опору в колі ротора двигуна. Типові вузли схем, розрахунок їх параметрів і вибір елементів. Схеми керування асинхронним електроприводом з імпульсним регулюванням струму двигуна. Нормування статичних і динамічних характеристик.

Система ПЧ-АД. Типові вузли схем і типові схеми керування з різними перетворювачами частоти. Особливості синтезу, замкненої системи регулювання швидкості, розрахунок параметрів і вибір елементів схем. Формування статичних і динамічних характеристик. Системи частотно-струмового керування. Системи векторного керування АД.

Типові вузли схем керування асинхронними електроприводами з каскадним

регулюванням швидкості. Розрахунок параметрів і вибір елементів схем. Схеми автоматичного керування синхронно-вентильним електричним і електромеханічним каскадами.

Частотне керування синхронним електроприводом. Синхронний двигун, який живиться від незалежно керованого перетворювача частоти. Синхронний двигун, який живиться від залежного перетворювача частоти (вентильний двигун), формування моменту, зворотний зв'язок за положенням ротора, граничні характеристики, перевантажувальна здатність.

Механічні характеристики вентильного двигуна з керуванням за напругою і за струмом.

Регулювання швидкості вентильного двигуна: зміною збудження, зміною напруги живлення, поворотом осі давача положення відносно осі фаз обмоток статора. Можливість регулювання напруги перетворювача за рахунок зворотного зв'язку за положенням ротора (керування сигналами малої потужності).

#### **16.4. Формування характеристик автоматизованих електроприводів з урахуванням пружності**

Аналіз і синтез систем з пружністю. Структура системи підпорядкованого керування при описі пружного механізму двомасовою моделлю і її перетворення. Умови суттєвого впливу пружності на частоту зрізу системи керування електроприводом. Співвідношення параметрів, яке дає змогу знехтувати пружністю. Вплив коефіцієнта співвідношення мас і його оптимальне значення. Способи корекції, які дають змогу забезпечити плавну зміну вихідних координат при високій швидкодії. Вплив співвідношення між сталою часу пружності і сталою часу системи. Деякі питання побудови систем з багатомасовим пружним механізмом.

Синтез модального регулятора в двомасових системах з пружністю першого роду. Синтез спостерігаючих пристроїв у двомасових системах. Умови астатизму двомасових систем з модальним регулятором. Математична модель об'єкта з пружними деформаціями другого роду.

### **17. Електричні мережі (електромережі).**

Класифікація електромереж. Умови роботи та конструктивне виконання ліній електромереж. Режим заземлення нейтралей в електромережах.

Елементи електричної мережі, їх характеристики та параметри розрахункових схем заміщення.

Задачі аналізу ustalених режимів електромереж. Методи вузлових напруг, контурних струмів, балансу потужностей, узагальнених незалежних змінних. Розрахунки режимів складних електромереж чисельними методами.

Якість електроенергії та її показники. Відхилення та коливання напруги, засоби їх зниження. Несиметрія та несинусоїдність в електромережах та засоби їх зниження. Розрахунок, втрат електроенергії та заходи для їх зниження. Оптимізація режимів електромереж, в тому числі шляхом компенсації перетоків реактивної потужності.

Мережі електропостачальних систем. Розрахункові навантаження систем електропостачання, методи їх визначення. Схеми підстанцій електропостачальних систем. Компенсація реактивної потужності в мережах споживачів. Система тарифів на електроенергію.

Елементи проектування електромереж, та основні техніко-економічні показники їх. Вибір перерізів проводів ліній. Схеми електромереж, їх вибір.

### **18. Електричні станції (електрична частина)**

Технологічні схеми електростанцій (ЕС) різного типу. Графіки навантажень ЕС та їх регулювання. Вплив зростання одиничної потужності генераторів, силових трансформаторів та електричних двигунів на побудову схем ЕС, на вимоги до комутаційної апаратури та струмопровідних елементів. Особливості головних схем і схем власних потреб ЕС різного типу.

Методи та засоби обмеження струмів короткого замикання (КЗ). Експлуатаційні

характеристики та конструктивні особливості струмопровідних елементів, контактних сполучень, методика їх вибору.

Режими роботи синхронних генераторів, двигунів, компенсаторів та їх систем збудження. Методика їх аналізу. Режими роботи електродвигунів власних потреб ЕС в нормальних та аномальних режимах. Режими роботи силових трансформаторів на електростанціях та підстанціях.

Системи управління, контролю та сигналізації на ЕС і підстанціях.

Заземлюючі пристрої електроустановок.

Основи проектування електростанцій.

Конструкція розподільних пристроїв, компоновка електричних станцій та підстанцій. Оцінка надійності схем електричних з'єднань електроустановки.

## **19. Аварійні режими та стійкість електроенергетичних систем**

Класифікація аварійних режимів і процесів. Метод симетричних складових для аналізу несиметричних аварійних режимів та розрахункові схеми заміщення елементів.

Методи розрахунку аварійних режимів і перехідних процесів у складних ЕЕС, у тому числі й у фазних координатах. Загальні рівняння перехідних електромеханічних процесів в ЕЕС.

Основні поняття теорії стійкості ЕЕС. Моделі та розрахункові схеми заміщення елементів ЕЕС для аналізу стійкості. Структурні схеми та рівняння систем регулювання. Статична стійкість ЕЕС. Динамічна стійкість ЕЕС. Методи розрахунку та засоби забезпечення стійкості складних ЕЕС.

## **20. Автоматичне керування та релейний захист електроенергетичних систем**

Задачі керування енергетичною системою та її елементами. Основні положення теорії інформації та принципи побудови інформаційно-керуючих систем, у тому числі в електроенергетиці.

Побудова, структура та інформаційне забезпечення мікропроцесорних систем в електроенергетиці. Сигнали і завади. Методи аналізу сигналів. Передача і захист даних.

Телемеханічні системи передачі інформації в ЕЕС. Принципи побудови пристроїв телевимірювання, телесигналізації та телекерування. Оброблення та відображення телеінформації.

Автоматичне регулювання напруги та реактивної потужності. Автоматичні регулятори збудження синхронних генераторів. Автоматичне регулювання коефіцієнтів трансформації, трансформаторів та автотрансформаторів. Автоматичне регулювання частоти та активної потужності й алгоритми їх реалізації.

Релейний захист об'єктів електроенергетичних систем, функції, властивості та принципи дії, засоби реалізації. Захист електричних мереж. Захист синхронних генераторів, двигунів. Захист трансформаторів. Захист шин електростанцій та підстанцій.

Первинні вимірювальні перетворювачі для пристроїв захисту та особливості їх режимів.

Функційна надійність пристроїв захисту та автоматики.

## Перелік літератури

1. Бобало Ю.Я., Мандзій Б.А., Писаренко Л.Д., Якименко Ю.І. Основи теорії електронних кіл: Підручник / За ред. проф. Стахів П.Г. – Львів: Магнолія плюс, 2006. – 205 с.
2. Коруд В. І., Гамала О. Є., Малинівський С. М. Електротехніка: Підручник/ За ред. В. І. Коруда. – 3-тє вид., переробл. і доп. – Львів: “Магнолія плюс”, 2006. – 447 с.
3. Теоретические основы электротехники. Т. 1: Основы теории линейных цепей/ Под ред. Ионкина П. А. -М.: Высшая школа, 1976.-554 с.
4. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. В 2-х т. Учебник для вузов. Т. 1.- Л.: Энергоиздат, 1981.-536 с., Т. 2.- Л.: Энергоиздат, 1981.-416 с.
5. Матханов П. М. Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи. М.: Высшая школа, 1981.
6. Матханов П. М. Основы анализа электрических цепей. Нелинейные цепи. М.: Высшая школа, 1986.
7. Тамм И. Е. Основы теории электричества. М.: Наука, 1991.-624 с.
8. Перхач В. С. Теоретична електротехніка. К.: Вища школа, 1992.- 439 с.
9. Сегеда М. С. Математичне моделювання в електроенергетиці: Навч. посібник.-Львів: Видавництво Національного ун-ту “Львівська політехніка”, 2002.-300 с.
10. Малинівський С. М. Загальна електротехніка: Навч. посібник.-Львів: Видавництво Національного ун-ту “Львівська політехніка”, 2001.-596 с.
11. Dennis M. Buede The Engineers Design of Systems: Models and Methods, John Wiley & Sons Inc., 1999.
12. Charles M. Close, Dean K. Frederick, Jonathan C. Newell Modeling and Analysis of Dynamic Systems, John Wiley & Sons Inc, 2001.- 592 p.
13. Півняк Г.Г., Довгань В.П., Шкрабець Ф.П. Електричні машини: Навчальний посібник. - Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2003. -327 с.
14. Електричні машини та мікро машини: Навчальний посібник для електротехн. спец. ВНЗів / В.П. Метельський; наук. ред. А.М. Кравченко. - 2-ге вид., доповнене й перероблене. - Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. -616 с.
15. Електричні машини. Синхронні машини. Машини постійного струму: Навчальний посібник/ Л.В. Кубинець, О.І. Момот, О.Л. Маренич. - Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2007. - 200 с.
16. Електричні машини. Трансформатори. Асинхронні машини: Навчальний посібник/ Л.В. Кубинець, О.І. Момот, О.Л. Маренич. - Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2004. - 208 с.
17. Яцун М.А. Електричні машини. - Л.: Львівська політехніка, 2001. - 428 с.
18. Ткачук В.І. Автоматизоване проектування колекторних двигунів постійного струму: Навч. посібник. - Л.: Видавництво Національний університет “Львівська політехніка”, 2005. - 348 с.
19. Набиев Ф.М. Электрические машины. - М.: "РадиоСофт", 2008. -292 с.
20. Копылов И.П. Электрические машины. — М.: "Высшая школа", 2006. — 608 с.
21. Кацман М.М. Электрические машины. - М.: "Академия", 2007. - 496 с.
22. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины постоянного тока и трансформаторы: Учебник для ВУЗов. - Петербург: "Питер", 2006. -320 с.
23. П.Гольдберг О.Д., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин: Для высших учебных заведений. - М.: "Высшая школа", 2006. -432 с.
24. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. Том 2: - М.: "OZON", 2004.-536 с.
25. Инкин А.М. Электромагнитные поля и параметры электрических машин: Учебное пособие: - М.: "ЮКЗА", 2002. - 464 с.
26. 14. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин Учебник для ВУЗов изд. 3-е, пераб., доп. - М.: "Высшая школа", 2001. - 327 с.
27. Теорія електроприводу. За ред. М.Г. Поповича. - Київ: "Вища школа". 1993. - 495 с,

28. Ключев В. И. Теория электропривода. - М.: Энергоатомиздат, 2001. - 697 с.
29. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. - Київ, "Либідь", 2005. 697 с.
30. Зеленов А.Б Теория электропривода, ч.І, П. Алчевск, 2005, ч 1. 394 с, ч.ІІ. - 512 с.
31. Костинюк Л.Д., Мороз В.І., Паранчук Я.С. Моделивання електроприводів. - Львів; НУ "Львівська політехніка", 2004. - 404 с.
32. Попович М.Г. Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування". – Київ "Либідь" 1997. — 504с.
33. Ткачук В.І. Електромеханотроніка. Підручник. - Львів: НУ "Львівська політехніка", 2006. -440 с.
34. Алексеев А. А., Солодовников А. И. Диагностика в технических системах управления: Учеб. пособие для втузов/Под ред. В.Б. Яковлева. - СПб., 1997.
35. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. - Л.: Энергоиздат. 1982. 392 с.
36. Дружинин Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. М.: Металлургия,. 1975 - 260 с.
37. Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учебник для вузов. -М.: Энергия, 1980. - 360 с.
38. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных установках. М: Энергоатомиздат, 1998, 200 с.
39. Поляков В.В., Скворцов Л.С. Насосы и вентиляторы: Учеб. для вузов. - М.: Стройиздат, 1990. - 336 с.
40. Робототехника и гибкие автоматизированные производства. В 9-ти кн. Кн. 2. Приводы робототехнических систем: Учеб. пособие для втузов/ Ж. П. Ахромеев, Н. Д. Дмитриева, В. М. Лохин и др.; Под ред. И. М. Макарова. - М.: Высшая шк., 1986.
41. Справочник по автоматизированному электроприводу/ Под ред. В. А. Елисеева и А.В. Шинянского. -М.: Энергоатомиздат, 1983.
42. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами / Под ред. В.И. Круповича, Ю.Г. Барыкина, М.Л. Салювера. - 3-е изд., - М.: Энергоатомиздат. 1982.- 416 с,
43. Яуре А.Г., Певзнер Е.М. Крановый электропривод: Справочник. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 344 с.
44. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К., Кужекин Н.П., Жуков А.В. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике. / Под ред. А.Ф.Дьякова. - М.: Энергоатомиздат, 2003. - 767 с.
45. Півняк Г.Г., Волков О.В. Сучасні частотно-регульовані електроприводи зі широтно-імпульсною модуляцією: Монографія. - Дніпропетровськ, НГУ, 2006. - 470 с.
46. Методы робастного, нейронечеткого и адаптивного управления /Под ред. Егупова Н.Д. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002. - 744 с.
47. Арзамасцев Д.А., Бартоломей П.И., Холян А.М. АСУ и оптимизация режимов энергосистем. - М.: Высшая школа, 1983.
48. Барзам А.Б. Системная автоматика. - М.: Энергоатомиздат, 1989.
49. Букович Н.В. Автоматика електроенергетичних систем. - Київ, 1998. - 280 с.
50. Букович Н.В., Міркевич Г.Н. Розрахунок струмів короткого замикання. Навч. посібник. - К.: УМК ВО, 1991. - 224 с.
51. Букович Н.В. Розрахунок струмів короткого замикання електроенергетичних систем. - Львів, 1988. - 248 с.
52. Вавин В.Н. Трансформаторы напряжения и их вторичные цепи. - М.: Энергия, 1977. - 104 с.
53. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. - М.: Высшая школа, 1985.
54. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. - М.: Энергия. 1979.

55. Журахівський А.В., Жежеленко Г.В. Оптимізація режимів електроенергетичних систем. Навч. посібник. - Львів, Маріуполь. 2000. - 109 с.
56. Идельчик. В.С. Электрические системы и сети. - М.: Энергоатомиздат, 1989.
57. Интегрированные экспертные системы диагностирования в электроэнергетике / Под ред. Стогния Б.С., Кириленко А.В., Проске Д. - Киев: Наукова думка, 1992.
58. Казанский В.Е. Трансформаторы тока в устройствах релейной защиты и автоматики. - М.: Энергия, 1978. - 264 с.
59. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.И., Баженов В.А. Оптимизация режимов электрических сетей. - К.: Наукова думка, 1992.
60. Лысяк. Г.Н., Стряпан В.Н., Данилюк А.В., Математическое моделирование установившихся режимов электрических систем переменного-постоянного тока. - Киев. УМК ВО, 1991. - 113 с.
61. Микропроцессорные системы в электроэнергетике. / Стогний Б.С., Рогоза В.В., Кириленко А.В. и др. - Киев: Наук, думка, 1988.
62. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций. - М.: Энергия, 1976.
63. Пезисье Р. Электрические системы. - М.: Высшая школа, 1982.
64. Перхач В.С. Математичні задачі електроенергетики. - Львів: Вища школа, 1989. - 462 с.
65. Перхач В.С., Скрипник О.І. Обчислювальна техніка в електроенергетичних розрахунках. - Львів. Світ. - 1992. - 452 с.
66. Сегеда М.С. Електричні мережі та системи. Навчальний посібник. Мін. освіти України. Держ. Ун-т "Львівська політехніка", - Львів: НМК ВО, Каменярь, 1999. - 296 с.
67. Сидоров В.С., Хохулін Б.К. Заземлення електричних мереж. - К: ІМЗН. 1997. - 140 с.
68. Сидоров В.С. Алгоритмізація оптимізаційних задач енергетики. - Київ: 1998. - 232 с.
69. Сидоров В.С. Додаткові джерела реактивної потужності в електричних мережах 35-220 кВ. - Київ, НМК ВО. 1992 - 82 с.
70. Совалов С.А. Режимы Единой энергосистемы. - М.: Энергоатомиздат, 1983.
71. Совалов С.А., Семенов В.А. Противоаварийное управление в энергосистемах. - М.: Энергоатомиздат, 1988.