

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ НАН УКРАЇНИ**

*Затверджено на засіданні Вченої  
ради ІЕД НАН України  
протокол № 5 від 09.09.2021 р.*

**ПРОГРАМА ВСТУПНОГО  
ФАХОВОГО ВИПРОБУВАННЯ**

третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти  
для здобуття ступеня доктор філософії

Галузь знань	14 – Електрична інженерія
Спеціальність	141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Спеціалізація	Електричні машини і апарати

Програму підготували:

д-р. техн. наук	Л.І. Мазуренко,
д-р. техн. наук	А.П. Ращепкін,
д-р. техн. наук	В.В. Гребеніков,
д-р. техн. наук	О.М. Попович

м. Київ 2021 р.

## **ВСТУП**

Роль і значення електричних машин в сучасній електротехніці та енергетиці. Основні види електричних машин для генерування і електромеханічного перетворення енергії. Загальні принципи побудови машин. Зв'язок потужності і геометричних розмірів машин. Класифікація електричних апаратів. Вплив кліматичних факторів на електричні апарати. Коротка історія розвитку електричних машин.

## **ТРАНСФОРМАТОРИ**

Принцип роботи трансформатора. Основні конструктивні елементи трансформатора. Рівняння магніторухливих та електрорухливих сил трансформатора. Приведений трансформатор. Схема заміщення та її параметри. Визначення параметрів схеми заміщення шляхом розрахунків. Визначення параметрів схеми заміщення експериментальним шляхом. Векторні діаграми трансформатора при холостому ході і короткому замиканні. Розрахунок втрат в сталі трансформатора. Струм намагнічування трансформатора. Напряга короткого замикання.

Магнітні системи трифазних трансформаторів. Способи сполучення і електрична напряга фазних обмоток трансформатора. Схеми і групи сполучення обмоток. Области застосування різних способів сполучення обмоток.

Фізичні умови роботи трансформатора в режимах навантаження. Векторна діаграма роботи трансформатора під навантаженням. Зміна напряги трансформатора. Коефіцієнт корисної дії трансформатора. Паралельна робота трансформаторів. Умови включення на паралельну роботу. Паралельна робота трифазних трансформаторів з різними схемами сполучення обмоток. Паралельна робота трансформаторів з різними напрягами короткого замикання.

Несиметричне навантаження трифазних трансформаторів, застосування методу симетричних складових. Схеми заміщення та електричний опір трансформатора для струмів прямої і зворотної послідовності. Схема заміщення та опір для струмів нульової послідовності. Несиметричне навантаження при відсутності струмів нульової послідовності. Навантаження трансформатора при наявності струмів нульової послідовності. Перехідні процеси в трансформаторах, включення на напрягу.

Раптове коротке замикання трансформатора. Дія струмів короткого замикання: механічні зусилля і термічні процеси.

Складові нагріву і способи охолодження трансформаторів. Допустиме перевищення температури та його вплив на довговічність роботи трансформатора. Контроль температури і тепловий захист трансформатора.

Спеціальні типи трансформаторів, автотрансформатор. Триобмотковий трансформатор, векторна діаграма. Трансформатори для випрямлячів, схеми включення. Трансформатори зварювальних агрегатів.

## **ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ**

Методи розрахунку електродинамічних сил. Сили між паралельними провідниками. Зусилля у витку і котушці. Зусилля при наявності феромагнетиків. Електродинамічні зусилля при змінному струмі. Магнітне коло електромагнітів постійного струму. Магнітне коло електромагнітів змінного струму. Обмотки електромагнітів. Сила тяжіння електромагнітів. Динаміка роботи і час спрацьовування електромагнітів. Магнітні кола з постійними магнітами. Активні втрати енергії в апаратах. Сталий режим нагріву. Нагрів апаратів при перехідних режимах.

Режими роботи контактів. Конструкції твердометалевих контактів. Дуга постійного струму. Перенапруги при комутації конденсаторів. Методи гасіння дуги.

Контролери, командоапарати і реостати, їх призначення. Контактори, магнітні пускачі, рубильники і перемикачі, загальні відомості. Автоматичні повітряні вимикачі. Конструкція і принцип дії масляного вимикача. Повітряні вимикачі з відділювачем. Конструкція елегазових вимикачів. Електромагнітний вимикач. Призначення і конструкції роз'єднувачів, відокремлювачів і короткозамикачів. Призначення і конструкції реакторів. Вимірювальні трансформатори напруги. Конструкції трансформаторів струму. Режим роботи трансформаторів струму. Похибки трансформаторів струму.

Електромагнітні реле струму і напруги. Електромагнітні реле часу. Принцип дії і конструкції електромагнітних муфт керування.

## **ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ТЕОРІЇ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ.**

Класифікація машин змінного струму. Основні елементи конструкції. Обмотки машин змінного струму. ЕРС провідника, витка, котушки, фази. ЕРС при несинусоїдальній зміні з часом поточкозчеплення обмотки. Сполучення у зірку та трикутник. Засоби зменшення вищих гармонік у кривій ЕРС.

Принципи побудови та основні типи статорних обмоток змінного струму. Одношарові обмотки. Двошарові обмотки з діаметральним і скороченим кроком. Обмотки з дробовим числом пазів на полюс і фазу.

МРС обмоток машин змінного струму. Крива МРС трифазної обмотки. Створення обертового поля, прямого та зворотного. Вищі гармонічні МРС. Вплив на форму кривої МРС числа пазів, дрібності та скорочення кроку.

Магнітне поле машин та його розрахунок. Індуктивність та взаємна індуктивність обмоток. Поле розсіяння. Індуктивний опір розсіяння та його визначення. Методи математичного моделювання електричних машин змінного струму. Системи диференціальних рівнянь синхронної, асинхронної машини. Системи координат, їх застосування для аналізу перехідних процесів синхронних та асинхронних машин. Узагальнена електрична машина. Рівняння узагальненої електричної машини в різних системах координат, їх застосування для аналізу перехідних процесів синхронних та асинхронних машин.

## **АСИНХРОННІ МАШИНИ.**

Принцип дії асинхронних машин. Основні елементи їх конструкції. Просторові та часові діаграми МРС статора та ротора. Перетворення параметрів вторинних кіл до первинних. Рівняння рівноваги напруг в символічній формі, схеми заміщення та векторні діаграми.

Обертний момент асинхронної машини в залежності від ковзання та опору електричного кола ротора. Початковий, номінальний та максимальний моменти. Зміна напрямку обертання двигуна. Колова діаграма асинхронної машини. Визначення параметрів схеми заміщення та побудова діаграми за даними дослідів холостого ходу та короткого замикання. Одержання робочих характеристик за круговою діаграмою. Вплив зміни параметрів асинхронної машини на діаграму струму.

Пуск трифазних асинхронних двигунів. Пуск двигунів при номінальній та зниженій напругах. Пусковий струм та його вплив на довговічність. Двигуни з контактними кільцями. Короткозамкнуті двигуни з покращеними пусковими характеристиками. Ротор з подвійною кліткою. Ротор з глибоким пазом. Масивний феромагнітний ротор та його модифікації. Шляхи покращення параметрів та характеристик асинхронних двигунів з масивним ротором. Вплив вищих гармонічних магнітного поля на роботу машин з короткозамкненим ротором. Мінімальний момент та його вплив на процес пуску, його регламентація за стандартами.

Регулювання частоти обертання трифазного двигуна шляхом зміни живлячої напруги, частоти струму та числа полюсів. Робота асинхронної машини в режимі гальмування. Засоби гальмування асинхронних двигунів.

Робота асинхронного двигуна в аномальних умовах: вплив на роботу двигуна коливань напруги, частоти, несиметрії напруги та несиметрії параметрів.

Математичне моделювання асинхронних машин. Припущення при побудові математичних моделей.

Аналіз перехідних процесів в асинхронній машині. Струми та обертові моменти в перехідних процесах. Однофазні асинхронні двигуни, їх типи та принцип дії. Пуск та пускові характеристики. Конденсаторний двигун.

Втрати потужності та ККД асинхронних машин. Нагрівання машин, норми припустимого нагріву та способи охолодження.

Типові та контрольні випробування асинхронних двигунів.

Визначення головних розмірів асинхронних машин та порядок їх визначення. Оптиміальне проектування.

Типи та конструкції асинхронних двигунів, які серійно виробляються машинобудівними заводами України та за кордоном, їх характеристики. Типорозміри асинхронних двигунів. Визначення за даними довідника номінальних та початкових пускових струмів і моментів, максимальних і мінімальних моментів.

Асинхронні генератори (АГ). Переведення асинхронного двигуна в генераторний режим. Колова діаграма генераторного режиму асинхронної машини.

Характеристики асинхронного генератора при паралельній роботі з електромережею. Компенсація спожитої реактивної потужності.

Автономні асинхронні генератори з ємнісним збудженням. Самозбудження генератора. Робочі характеристики АГ із нерегульованим та регульованим ємнісним збудженням. Порівняння характеристик та техніко-економічних показників асинхронних та синхронних генераторів.

Автономні асинхронні генератори з вентильним та вентильно-ємнісним збудженням: принцип дії; напівпровідникові перетворювачі для збудження; галузі застосування.

## **СИНХРОННІ МАШИНИ**

Принцип дії синхронних машин (СМ). Основні елементи конструкції явно- та неявнополюсних машин. Системи збудження синхронних машин.

Холостий хід синхронного генератора (СГ). Магнітне поле синхронного генератора при симетричному навантаженні. Поперечне та повздовжнє поле якоря. Коефіцієнти зведення повздовжньої та поперечної МРС до МРС обмотки збудження. Вплив поля якоря на форму кривої напруги.

Параметри обмотки статора при сталому симетричному режимі навантаження. Система відносних одиниць. Векторні діаграми трифазного синхронного генератора при симетричному навантаженні. Діаграма при короткому замиканні трьох фаз.

Характеристики синхронних генераторів: зовнішня, навантажувальна та трифазного короткого замикання. Відношення короткого замикання (ВКЗ). Визначення індуктивного опору з характеристик холостого ходу та трифазного короткого замикання.

Несиметричне навантаження трифазного СГ та його аналіз за методом симетричних складових. Індуктивні опори прямого, зворотного та нульового слідування. Зниження потужності генератора при несиметричному навантаженні. Стале коротке замикання двох фаз, однієї фази та двох на нейтраль.

Паралельна робота синхронних генераторів. Умови включення генераторів на паралельну роботу та синхронізація. Включення методом самосинхронізації. Електромагнітна потужність СМ. Синхронний та реактивний моменти. Синхронізуюча потужність СМ. Максимальна електромагнітна потужність СМ в сталому режимі як межа статичної стійкості. Робота на мережу нескінченної потужності.

V - образні криві СМ. Переведення навантаження з одного генератора на інший та розподіл між ними активної та реактивної потужності. Зарядна потужність генератора при роботі на ємнісне навантаження. Робота СМ при втраті збудження.

Синхронний двигун (СД). Векторні діаграми СД, V - образні криві. Колова діаграма. Робочі характеристики. Способи пуску СД. Області використання

синхронних двигунів. Реактивні та гістерезисні СД. Синхронний компенсатор. Використання синхронного компенсатора для покращення коефіцієнта потужності та регулювання напруги електромережі.

Математичне моделювання синхронних машин. Загальна характеристика перехідних процесів в СМ. Перехідні процеси у колі обмотки збудження, форсування збудження, гасіння поля. Раптове коротке замикання СМ. Перехідні та зверхперехідні опори. Схеми заміщення. Постійні часу обмоток статора, збудження та демпферної. Вплив демпферної обмотки на ударний струм короткого замикання та його визначення при замиканні трьох, двох та однієї фази.

Власні та вимушені коливання швидкості обертання синхронних машин при паралельній роботі. Моменти, які діють на ротор, та рівняння руху ротора. Період власних коливань. Вимушені коливання ротора. Поняття про динамічну стійкість синхронних машин. Системи швидкодіючого збудження. Підтримка стійкості за допомогою форсування збудження. Дослідження електромеханічних перехідних процесів на динамічних моделях та обчислювальних машинах.

Втрати в синхронних машинах. Коефіцієнт корисної дії СМ та його визначення. Норми нагрівання машин. Засоби охолодження. Протяжна та замкнена система вентиляції. Внутрішнє водневе охолодження ротора. Рідинне охолодження обмоток. Типові та контрольні випробування синхронних машин. Визначення головних розмірів та порядок розрахунку синхронних машин.

Розвиток турбо- і гідрогенераторобудування в Україні та за кордоном. Типи та конструкції синхронних машин, що випускаються вітчизняними заводами, їх характеристики.

Діагностика і прогнозування технічного стану турбогенераторів.

Електричні машини з постійними магнітами. Типи електричних машин з постійними магнітами: з дисковим ротором; циліндричні з зовнішнім і внутрішнім ротором. Застосування електричних двигунів з постійними магнітами для транспорту. Застосування електричних генераторів для вітроустановок. Зовнішні характеристики електричних генераторів з постійними магнітами. Робочі характеристики електричних двигунів з постійними магнітами: залежність електромагнітного моменту і потужності від частоти обертання ротора.

Вентильно-індукторні машини. Побудова вентильно-індукторних машин, конфігурації магнітних систем, конфігурації вентильних перетворювачів, принцип роботи. Принципи керування вентильно-індукторними машинами: в режимі двигуна, в генераторному режимі. Коефіцієнт корисної дії вентильно-індукторних машин. Галузі застосування вентильно-індукторних машин.

## **ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ АВТОМАТИЧНИХ ПРИСТРОЇВ.**

Синхронні та асинхронні тахогенератори. Крокові електродвигуни. Гіроскопічні двигуни.

## ЛІТЕРАТУРА.

1. Копылов И. П. Электрические машины: Учеб. для вузов/И. П. Копылов. — 5-е изд., стер. — М.: Высш. шк., 2006.— 607 с.
2. Міліх В. І. Електротехніка та електромеханіка: Навч. посібник. — К.: Каравела, 2005.— 376 с.
3. Метельський В. П. Електричні машини та мікромашини: навчальний посібник / В. П. Метельський; наук. ред. Кравченко А. М. — 3-е вид., доп. і перероб. — Запоріжжя : ЗНТУ, 2010. —660 с.
4. Костенко МП., Пиотровский Л.М. Электрические машины, ч. I. Машины постоянного тока. Трансформаторы. - Л.: Энергия, 1972.
5. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины, ч. II. Машины переменного тока. - Л.: Энергия, 1973.
6. Постников И.М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин. - М.: Высшая школа, 1975.
7. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978. – 272 с.
8. Копылов И.П. Электромеханическое преобразование энергии. - М.: Энергия, 1973.
9. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. - М.: Энергия, 1980.
10. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. - М.: Высшая школа, 1976.
11. Лищенко А.И., Лесник В.А. Асинхронные машины с массивным ферромагнитным ротором. - Киев: Наук. думка, 1984.
12. Мазуренко Л.И., Лищенко А.И. Асинхронные генераторы с вентильным и вентильно-емкостным возбуждением для автономных энергоустановок.— К.: Наукова думка, 2011 – 272 с.
13. Клименко Б.В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: навчальний посібник (видання друге, допрацьоване та доповнене). – Харків: Вид-во «Точка», 2013. – 400с.
14. Антонов А.Е. Электрические машины магнитоэлектрического типа. – К.: НАН Украины, Институт электродинамики, 2011. – 216с.
15. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели: учебн. пособ. М.: МЭИ, 2003. 70 с.
16. Фисенко В.Г., Попов А.Н. Проектирование вентильных индукторных двигателей: методическое пособ. М.: Из-во МЭИ, 2005. 56 с.
17. Miller T.J.E. Electronic Control of Switched Reluctance Machines. UK, Oxford: Newnes, 2001. 272 с.
18. Krishnan R. Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications. US, Washington, DC: CRC Press LLC, 2001. 416 p