



# АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

## Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

### Реквізити навчальної дисципліни

|                                                   |                                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Рівень вищої освіти                               | <i>Третій (освітньо-науковий)</i>                                                                                                            |
| Галузь знань                                      | <i>14 «Електрична інженерія»</i>                                                                                                             |
| Спеціальність                                     | <i>141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»</i>                                                                            |
| Освітня програма                                  | <i>ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА</i>                                                                                  |
| Статус дисципліни                                 | <i>Вибіркова</i>                                                                                                                             |
| Форма навчання                                    | <i>Очна(денна)</i>                                                                                                                           |
| Рік підготовки, семестр                           | <i>II курс, осінній семестр</i>                                                                                                              |
| Обсяг дисципліни                                  | <i>90 годин / 3 кредити ECTS</i>                                                                                                             |
| Семестровий контроль/<br>контрольні заходи        | <i>Залік/МКР/РГР</i>                                                                                                                         |
| Розклад занять                                    | <i><a href="http://rozklad.kpi.ua">http://rozklad.kpi.ua</a></i>                                                                             |
| Мова викладання                                   | <i>Українська/Англійська</i>                                                                                                                 |
| Інформація про<br>керівника курсу /<br>викладачів | <i>Лектор: д.т.н. , професор Кирик в. В., 0968817257</i>                                                                                     |
| Розміщення курсу                                  | <i><a href="https://classroom.google.com/c/MTUxNDQ0MzY5MTg5?cjc=m2shqxv">https://classroom.google.com/c/MTUxNDQ0MzY5MTg5?cjc=m2shqxv</a></i> |

### Програма навчальної дисципліни

#### 1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

Програму навчальної дисципліни «Аналіз та синтез систем передачі електричної енергії постійного струму» складено відповідно до освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» підготовки доктора філософії спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

**Метою навчальної дисципліни** є формування у здобувачів наступних здатностей: виконувати аналіз режимів роботи мереж змінного струму зі вставками та лініями постійного струму; синтез розрахункових схем для дослідження систем передачі постійного струму; розробляти імітаційні математичні моделі в програмних середовищах MatLab та Power Factory .

**Предмет навчальної дисципліни** – аналіз режимних параметрів систем змінного струму з лініями та вставками постійного струму, імітаційні моделі електричних мереж з лініями та вставками постійного струму і методика їх створення.

**Програмні результати навчання:**

Компетенції: здатність розробляти імітаційні моделі електричних мереж з лініями та вставками постійного струму, використання програмних середовищ MatLab та Power Factory, аналізу режимних параметрів мереж.

Знання: параметрів мереж постійного струму, інструментів дослідження ліній постійного струму, методів аналізу режимів роботи гібридних мереж.

Уміння: планувати і виконувати імітаційні дослідження систем змінного струму з лініями та вставками постійного струму та дотичних міждисциплінарних напрямів з використанням сучасних інструментів, розуміти загальні принципи та методи технічних наук, а також методологію наукових експериментальних досліджень, застосовувати їх у власних дослідженнях у галузі електричної інженерії та у викладацькій практиці.

**2. Пререквізити та постреквізити дисципліни (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)**

Матеріал кредитного модуля дисципліни «Аналіз та синтез систем передачі електричної енергії постійного струму» відповідно до структурно-логічної схеми ОКР «доктор філософії» базується на знаннях, отриманих здобувачами при вивченні таких дисциплін для здобуття глибоких знань зі спеціальності, як «Методи дослідження, формування та керування інтелектуальними енергетичними системами та комплексами», «Фундаментальні основи теорії електромагнітного поля та процесів», «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії в електроенергетичних системах та електротехнічних комплексах», «Моніторинг, керування та захист електроенергетичних систем та електротехнічних комплексів».

Для успішного засвоєння дисципліни здобувач повинен володіти «Іноземною мовою для наукової діяльності», оскільки значна частина новітніх технологій описується в науковій літературі англійською мовою. Компетенції, знання та уміння, одержані в процесі вивчення кредитного модуля є необхідними для подальшого вивчення дисциплін «Моніторинг і діагностика електроенергетичних систем, а також для якісного виконання наукових досліджень за темою дисертації».

**3. Зміст навчальної дисципліни**

Дисципліну структурно розділено на **4 розділи**, а саме:

**1. Загальна характеристика високовольтних мереж постійного струму HVDC**

Тема 1.1. Характеристика HVDC та їх порівняння з AC мережами

Тема 1.2. Порівняння HVDC та AC систем

**2. Інтеграція систем постійного струму в енергосистеми**

Тема 2.1. Інтеграція систем DC з AC

Тема 2.2 Порівняння систем постійного струму LCC та VSC

Тема 2.3. Гармонічний склад струму в системах LCC HVDC конверторах

**3. Математичні моделі HVDC**

Тема 3.1. Аналітичні моделі HVDC

Тема 3.2. Моделювання та управління випрямлячами HVDC

Тема 3.3. Моделювання та управління інверторами HVDC

**4. Захист мереж постійного струму**

Тема 4.1. Захист мереж постійного струму

#### 4. Навчальні матеріали та ресурси

##### Основні інформаційні ресурси:

1. *Аналіз та синтез систем передачі електричної енергії постійного струму [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньої програми «Електричні системи і мережі» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В.В. Кирик. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,4 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 59 с.*
2. *Ананичева С. С. Передача электроэнергии на большие расстояния / С. С. Ананичева, П. И. Бартоломей, А. Л. Мызин. – Екатеринбург: УрФу, 2012. – 85 с.*
3. *Веников В. А. Дальние электропередачи переменного и постоянного тока. Учебн. пособие для вузов / В. А. Веников, Ю. П. Рыжов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 272 с.*
4. *Идельчик В. И. Расчеты установившихся режимов электрических систем / В. И. Идельчик. – М.: Энергия, 1977. – 192 с.*
5. *Мельников Н. А. Электрические сети и системы / Н. А. Мельников. – М.: Энергия, 1975. – 464 с.*
6. *Поссе А. В. Схемы и режимы электропередач постоянного тока / А. В. Поссе. – Л.: Энергия, 1973. – 304 с.*
7. *Терентьев И. Э. Анализ технологий высоковольтной передачи энергии постоянным током (ВППТ) [Електронний ресурс] / И. Э. Терентьев, Н. О. Шадрина, Р. А. Уфа // Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия. – 2013. – Режим доступа до ресурсу: <https://scienceforum.ru/2015/article/2015012905>.*
8. *Электрические системы. Т.3. Передача энергии переменным и постоянным током высокого напряжения: Учебн. пособие для электроэнерг. вузов / Под ред. В.А. Веникова. – М.: Высшая школа, 1972. – 368 с.*
9. *High Voltage Direct Current Transmission – Proven Technology for Power Exchange [Електронний ресурс] // SIEMENS. – 2011. – Режим доступа до ресурсу: <https://electrical-engineering-portal.com/download-center/books-and-guides/power-substations/guide-to-hvdc-transmission>.*
10. *Jovcic D. High Voltage Direct Current Transmission: Converters, Systems and DC Grids / D. Jovcic, K. Ahmed. – School of Engineering, University of Aberdeen, Scotland, UK: John Wiley & Sons, 2015. – 421 pp. – ISBN 978-1-118-84666-7.*
11. *Kirby N. High Voltage Direct Current Transmission [Електронний ресурс] / N. Kirby, P. Kohnstam // United States Department of Energy, Siemens. – 2013. – Режим доступа до ресурсу: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/05/f0/HVDC2013-Kohnstam\\_0.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/05/f0/HVDC2013-Kohnstam_0.pdf).*

## Навчальний контент

### 5. Методика опанування навчальної дисципліни(освітнього компонента)

#### Лекційні заняття

| № з/п | Назва теми лекції та перелік основних питань<br>(перелік дидактичних засобів, посилання на інформаційні джерела)                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | <b>Характеристика високовольтних мереж постійного струму.</b><br>Конфігурація HVDC; передача потужності між двома точками двох окремих систем. HVDC; системи передачі – "моно-" або "біполярна"<br>Література: [1], [2]                                                                                                                                                                                          |
| 2     | <b>Порівняння характеристик мереж змінного та постійного струму</b><br>Позитивні та негативні сторони електропостачання змінним і постійним струмом<br>Література: [1], [3]                                                                                                                                                                                                                                      |
| 3     | <b>Типова структура системи HVDC</b><br>Конфігурація HVDC передбачає передачу потужності між двома точками двох окремих систем. HVDC може бути "моно-" або "біполярною"<br>Література: [1], [5], [6], [7]                                                                                                                                                                                                        |
| 4     | <b>Типові складові системи HVDC</b><br>Перетворювальні трансформатори, згладжувальний реактор, гармонічні фільтри<br>Література: [1], [2], [7]                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 5     | <b>Інтеграція високовольтних мереж постійного струму в системи змінного струму</b><br>Система HVDC, вбудована в АС мережу; Система HVDC між двома відокремленими АС системами; Паралельна робота системи HVDC з міжсистемним АС зв'язком<br>Література: [1], [8]                                                                                                                                                 |
| 6     | <b>Система HVDC і її роль у підтримці стабільності частоти</b><br>Статичне відхилення частоти виникне за недотримання в АС системі балансу потужності між навантаженням та генерацією. З метою вирішення вказаної проблеми управління системою, HVDC можна налаштувати таким чином, здійснювався обмін потужністю з віддаленою АС системою у відповідь на відхилення частоти.<br>Література: [1], [3], [4], [10] |
| 7     | <b>Порівняння систем постійного струму LCC та VSC</b><br>Системи HVDC і FACTS є важливими технологіями, які підтримують надійну і безперервну роботу сучасних енергосистем<br>Література: [1], [8], [9]                                                                                                                                                                                                          |
| 8     | <b>Гармонічний склад струму в системах LCC HVDC конверторах</b><br>Тиристорний перетворювач як джерело гармонік струму<br>Література: [1], [8], [9]                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 9     | <b>Причини появи нехарактерних гармонік</b><br>Неврівноважена система змінного струму, викликана невеликими відмінностями у фазних параметрах лінії<br>Література: [1], [10], [11]                                                                                                                                                                                                                               |
| 10    | <b>Підстанція HVDC зі встановленими фільтрами</b><br>Системи HVDC з повітряними ЛЕП характеризуються наявністю фільтрів, призначених для боротьби з 12-ою або 24-ою гармоніками на DC стороні.                                                                                                                                                                                                                   |

|    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | <i>Література: [1], [8], [9]</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 11 | <b>Аналітичні моделі HVDC</b><br><i>Динамічні моделі сучасних систем HVDC, що інтегровані до складу існуючих енергосистем, характеризуються широким діапазоном значень сталих часу моделювання. В залежності від величин цих сталих часу розрізняють декілька методів моделювання</i><br><i>Література: [1], [9], [10]</i>                |
| 12 | <b>Моделювання та управління випрямлячами HVDC</b><br><i>Типові підключення кількох мостових схем послідовно з відповідним чином зміщеними фазами з метою зменшення впливу гармонік</i><br><i>Література: [1], [9], [10]</i>                                                                                                              |
| 13 | <b>Моделювання та управління інверторами HVDC</b><br><i>Три системи управління: управління кутом <math>\gamma</math>, контроль AC/DC напруги та контроль DC струму – конкурують через елемент «мінімум», забезпечення мінімального значення кута управління з метою забезпечення стійкої роботи</i><br><i>Література: [1], [10], [11]</i> |
| 14 | <b>Захист мереж постійного струму</b><br><i>Відключення безпосередньо лінії DC призводить до розмикання шляху протікання струму. Як наслідок, значення DC падає до нуля, а рівень напруги випрямляча/інвертора зростає до максимуму</i><br><i>Література: [1], [9]</i>                                                                    |

## 6. Самостійна робота здобувача

| №з/п | Вид самостійної роботи          | Кількість годин СРС |
|------|---------------------------------|---------------------|
| 1    | Підготовка до аудиторних занять | 14                  |
| 2    | Підготовка РГР                  | 20                  |
| 3    | Підготовка до МКР               | 9                   |
| 4    | Підготовка до заліку            | 20                  |

## Політика та контроль

## 7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які викладач ставить перед здобувачем:

- правила відвідування занять: відповідно до Наказу 1-273 від 14.09.2020 р. заборонено оцінювати присутність або відсутність здобувача на аудиторному занятті, в тому числі нараховувати заохочувальні або штрафні бали. Відповідно до РСО даної дисципліни бали нараховують за відповідні види навчальної активності на лекційних та практичних заняттях.

- правила поведінки на заняттях: здобувач має можливість отримувати бали за відповідні види навчальної активності на лекційних та практичних заняттях, передбачені РСО дисципліни. Використання засобів зв'язку для пошуку інформації на гугл-диску викладача, в інтернеті, в дистанційному курсі на платформі Сікорський здійснюється за умови вказівки викладача;

- правила захисту індивідуальних завдань: захист розрахунково-графічної роботи з дисципліни здійснюється індивідуально і лише у випадку, коли здобувач не погоджується із



нарахованими балами за результатами перевірки РГР (за умови дотримання календарного плану виконання РГР);

- політика дедлайнів та перескладань: якщо здобувач не проходив або не з'явиться на МКР (без поважної причини), його результат оцінюється у 0 балів. Перескладання результатів МКР не передбачено;

- політика щодо академічної доброчесності: Кодекс честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» <https://kpi.ua/files/honorcode.pdf> встановлює загальні моральні принципи, правила етичної поведінки осіб та передбачає політику академічної доброчесності для осіб, що працюють і навчаються в університеті, якими вони мають керуватись у своїй діяльності, в тому числі при вивченні та складанні контрольних заходів з дисципліни «Передові технології в електроприводі та електромеханічних системах-1»;

- при використанні цифрових засобів зв'язку з викладачем (мобільний зв'язок, електронна пошта, переписка на форумах та у соцмережах тощо) необхідно дотримуватись загальноприйнятих етичних норм, зокрема бути ввічливим та обмежувати спілкування робочим часом викладача.

## 8. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)

**Поточний контроль:** експрес-тест, МКР.

**Календарний контроль:** провадиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.

**Семестровий контроль:** залік.

**Умови допуску до семестрового контролю:** семестровий рейтинг більше 35 балів.

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

| Кількість балів | Оцінка       |
|-----------------|--------------|
| 95-100          | Відмінно     |
| 85-94           | Дуже добре   |
| 75-84           | Добре        |
| 65-74           | Задовільно   |
| 60-64           | Достатньо    |
| Менше 60        | Незадовільно |
| Менше 30        | Не допущено  |

Загальна рейтингова оцінка здобувача після завершення семестру складається з балів, отриманих за:

- відповіді під час проведення експрес-тесту;
- виконання модульної контрольної роботи (МКР).
- підготовка РГР

| Експрес-тест | РГР | МКР |
|--------------|-----|-----|
| 14           | 40  | 46  |

### Відповіді під час проведення експрес-опитувань на лекціях

Ваговий бал 1.

Максимальна кількість балів тесту –

1 бал \* 14 = 14 балів.

Критерії оцінювання

- вибір правильної відповіді на окремі питання – 1;

**Індивідуальне семестрове завдання (РГР)**

Згідно з робочою навчальною програмою кожен здобувач виконує розрахунково-графічну роботу.

Максимальна кількість балів за виконання РГР – 40.

#### Критерії оцінювання

- повне, точне і вчасне виконання – 40 балів;
- розрахунок неточний є окремі несуттєві помилки – 14...35 балів;
- розрахунок неповний, є окремі суттєві помилки – 2...13 балів;
- розрахунок неправильний – 0 балів;
- на виконання РГР відводять 8 тижнів з моменту видачі завдання; задача РГР після встановленого терміну передбачає нарахування штрафного балу -2 за кожен тиждень понад встановлений термін.

#### Модульна контрольна робота

Ваговий бал МКР – 46.

Максимальний бал за МКР – 46.

#### Критерії оцінювання

- повна відповідь на всі запитання (більше 90% матеріалу) 40 – 46 балів;
- неповна відповідь на всі запитання (від 60 до 90% матеріалу) - 20 – 39 балів;
- відповідь містить менше 60 % необхідної інформації – 0 балів;

Календарний контроль базується на поточній рейтинговій оцінці. Умовою позитивної атестації є значення поточного рейтингу здобувача не менше 50% від максимально можливого на час атестації.

#### Форма семестрового контролю – залік

Максимальна сума балів складає 100. Необхідною умовою допуску до заліку є повний конспект лекцій, виконаний і захищений реферат. Для отримання заліку з кредитного модулю «автоматом» потрібно мати рейтинг не менше 60 балів, а також виконані умови допуску до заліку.

Здобувачі, які наприкінці семестру мають рейтинг менше 60 балів, а також ті, хто хоче підвищити свою оцінку в системі ECTS, виконують залікову контрольну роботу. При цьому набрані бали здобувачом анулюються, а оцінка за залікову контрольну роботу є остаточною.

Залікова робота складається з двох теоретичних запитань

#### Критерії оцінювання заліку

- «відмінно», повна відповідь, не менше 95% потрібної інформації (повне, безпомилкове розв'язування завдання) – 95 - 100 балів;
- «дуже добре», достатньо повна відповідь, не менше 85% потрібної інформації або незначні неточності (повне розв'язування завдання з незначними неточностями) – 85-94 бали;
- «добре», достатньо повна відповідь, не менше 75% потрібної інформації або незначні неточності (повне розв'язування завдання з незначними неточностями) – 75-84 бали;
- «задовільно», неповна відповідь, не менше 65% потрібної інформації та деякі помилки (завдання виконане з певними недоліками) – 65-74 балів;
- «достатньо», неповна відповідь, але не менше 60% потрібної інформації та деякі помилки (завдання виконане з певними недоліками) – 60 - 64 бали;
- «незадовільно», відповідь не відповідає умовам до «задовільно» – 0 балів.

## 9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

### **Завдання на РГР**

*Виконання РГР відбувається в програмному середовищі Power Factory та MatLab. Завдання на РГР передбачає розроблення імітаційні моделі електричної мережі з лініями та вставками постійного струму. Схема мережі визначаються лектором для кожного здобувача індивідуально.*

### **Перелік тем, які виносяться на семестровий контроль**

1. Характеристика HVDC та їх порівняння з AC мережами
2. Порівняння HVDC та AC систем
3. Інтеграція систем DC з AC
4. Порівняння систем постійного струму LCC та VSC
5. Гармонічний склад струму в системах LCC HVDC конверторах
6. Аналітичні моделі HVDC
7. Моделювання та управління випрямлячами HVDC
8. Моделювання та управління інверторами
9. Захист мереж постійного струму

**Сертифікати проходження дистанційних чи онлайн курсів за відповідною тематикою можуть бути зараховані за умови виконання вимог, наведених у НАКАЗІ № 7-177 від 01.10.2020 ПРО ЗАТВЕРДЖЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ПРО ВИЗНАННЯ В КПІ ІМ. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО РЕЗУЛЬТАТІВ НАВЧАННЯ, НАБУТИХ У НЕФОРМАЛЬНІЙ/ІНФОРМАЛЬНІЙ ОСВІТІ**

### **Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):**

**Складено** проф. кафедри електричних мереж та систем ФЕА, д.т.н. Кирик В.В.

**Ухвалено** кафедрою електричних мереж та систем ФЕА (протокол № 10 від 24.06.2020 р.)

**Погоджено** Методичною комісією факультету<sup>1</sup> (протокол №25 від 25.06.2020 р)

---

<sup>1</sup>Методичною радою університету— для загальноуніверситетських дисциплін.