



Національний технічний університет України
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»



Кафедра відновлюваних
джерел енергії

ФОТОЕНЕРГЕТИКА

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	Перший (освітньо-професійний)
Галузь знань	14 «Електрична інженерія»
Спеціальність	141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітня програма	ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА
Статус дисципліни	Нормативна
Форма навчання	очна(денна)
Рік підготовки, семестр	4курс, осінній семестр
Обсяг дисципліни	90 годин/Зкредитів ECTS
Семестровий контроль/ контрольні заходи	Екзамен/ МКР/ РГР
Розклад занять	36 год. – лекції, 18 год. - лабораторні
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: д.ф.-м.н, професор, Гаєвський Олександр Юлійович, +380 975704643, aj.gaevsky@gmail.com
Розміщення курсу	

Програма навчальної дисципліни

Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

Програма навчальної дисципліни «Фотоенергетика» складена відповідно до освітньо-наукової програми підготовки доктора філософії з галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Метою навчальної дисципліни є формування у студентів - чіткого розуміння фізичних та інженерних основ фотоелектричних систем, принципів роботи електричного обладнання фотоелектричних станцій (ФЕС), вміння самостійно вирішувати задачі з фотоенергетики, насамперед розрахунку та проектування ФЕС, оцінки виробітку електроенергії мережевими та автономними ФЕС.

Предметом навчальної дисципліни є методи вирішення різноманітних задач фотоенергетики, комп'ютерні та моніторингові технології, які застосовуються в даній галузі енергетики. Ці питання в даному курсі розглядаються комплексно з урахуванням сучасних вимог до знань з технічних, технологічних і економічних аспектів фотоелектричної області відновлюваної енергетики.

Програмні результати навчання:

Компетенції: здатність робити розрахунки автономних і мережевих ФЕС, вирішувати задачі оптимальної конструкції станцій.

Знання: структури фотоелектричних систем та обладнання; термінології, що стосується основних понять дисципліни; взаємодії елементів обладнання, об'єктів фотоелектричних систем; фізичних основ роботи фотоелектричних модулів; питань сонячної радіації, розсіювання та поглинання сонячного випромінювання в атмосфері; питань акумулювання електроенергії, яка генерується ФЕС;

Уміння: розраховувати компоненти автономних та мережевих ФЕС; вимірювати та аналізувати параметри фотомодулів; оцінювати радіаційний потенціал для певних робочих періодів ФЕС та місцевості на основі метеорологічних даних; оцінювати виробіток електроенергії від ФЕС, що планується; кваліфіковано виконувати підбір обладнання ФЕС..

Досвід: використання програмних додатків для розрахунку фотоелектричних систем; створення власних програм для моделювання роботи та параметрів вузлів ФЕС; створення електричних схем для вимірювання ВАХ, ККД, гармонічних спотворень електронного обладнання ФЕС та інших характеристик.

1. Зміст навчальної дисципліни

1. Фотоенергетика і сонячна радіація
2. Електронні та оптичні процеси в напівпровідника
3. Характеристики фотоелектричних перетворювачів
4. Типи фотоелектричних модулів, технології їх виробництва
5. Типи і конфігурації фотоелектричних станцій
6. Пристрої та обладнання ФЕС
7. Проектування автономних ФЕС
8. Проектування мережевих ФЕС
9. Системи моніторингу та діагностики ФЕС
10. Технології моніторингу ФЕС в Smart Grid.
11. Основи методів прогнозування потужності та виробітку ФЕС.

2. Навчальні матеріали та ресурси

Основні інформаційні ресурси:

1. S. A. Kalogirou. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems.*- London: Academic Press, 2009. – 760 p.
2. Кудря С.О. «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії» – Підручник. – Київ: Національний технічний університет України («КПІ»), 2012. – 495 с.
3. В. М. Андреев, В. А. Грилихес, В. Д. Румянцев. *Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения.* Л.: Наука, 1989, - 310с.

4. A Mc Evoy, T. Markvart, L. Castaner. *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications. Second Ed.* / Oxford: Elsevier, 2012. – 1224 p
5. M.R. Patel. *Wind and solar power systems.* CRC Press LLC: BocaRaton, Florida, 2000. - 350 p.
6. Дж. Даффи, У.А. Бекман. *Тепловые процессы с использованием солнечной энергии.* М.: Мир, 1977. – 420 с.
7. P. Gevorkian. *Solar Power in Building Design.* McGraw-Hill.N.Y. – Toronto, 2008. 506 p.
8. Г. Раушенбах. *Справочник по проектированию солнечных батарей.* М.: Энергоатомиздат, 1983.- 360 с.
9. *Солнечная энергетика. Учебное пособие для ВУЗов.* Под ред. В.И. Виссарионова. М.: МЭИ, 2008. — 276 с.
10. *Энергетическое оборудование для использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии.* Под ред. Виссарионова В.И. М.: ВИЭН, 2004. - 448 с.
11. M.Paulescu et al. *Weather Modeling and Forecasting of PV Systems Operation.* London: Springer-Verlag, 2013. – 362 p.

Додаткові:

12. К.В.Шалимова. *Физика полупроводников.* М.: Энергоатомиздат, 1985. - 392 с.
13. В. А. Гуртов. *Твердотельная электроника.* М.: МИФИ, 2005. - 506 с.
14. J. W. Bishop. *Computer simulation of the effects of electrical mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits.* *Solar Cells*, v. 25 (1988), p. 73 - 89.
15. Гаевский А. Ю. *Определение параметров фотоэлектрических модулей на основе точного решения уравнения для ВАХ* // *Відновлювана енергетика.* – 2012. - №4. - с. 32-39.
16. Гаєвський О. Ю., Врещ М. О., Мельник О. В. *Аналіз ефекту затінення фотоелектричних модулів у послідовно-паралельному з'єднанні* // *Відновлювана енергетика.* – 2013. - №1. – с. 28-30
17. Гаевский А.Ю., Уикаленко О.В.. *Оптимизационный расчет автономной фотоэлектрической станции* // *Альтернативная энергетика и экология.* – 2015.- №15 – 16.
18. Розанов Ю.К. *Основы силовой электроники.* М.: Энергоатомиздат, 1992.- 296 с.
19. S.B. Kjaer et al. *A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules*//*IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 41, No. 5, 2005. - p.1292 – 1306.
20. *Расчет системы автономного энергоснабжения с использованием фотоэлектрических преобразователей. Метод. пособие для дипломного проектирования.* Под ред. Бекирова Э.А. Симферополь, 2010, - 83 с.
21. С. Я. Свирен. *Электрические станции, подстанции и сети. Пособие по курсовому и дипломному проектированию.* ГИТЛ УССР .Киев, 1962 – 278 с.
22. P. Dunlop. *Batteries and charge control in stand-alone PV systems.* Sandia NL. – Albuquerque, 1997 – 71 p.
23. J. Dunlop, B. Fahri. *Recommendations for maximizing battery life in PV systems.* Florida Solar Energy Center, 1999. – 7p.
24. D.J. Sundar, M.S. Kumaran. *A Comparative Review of Islanding Detection Schemes in Distributed Generation Systems*//*International Journal of Renewable Energy Research.* -Vol.5, No.4, 2015. p. 1016 – 1023.
25. J.M. Carrasco. *Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey*//*IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, No. 4, 2006. - p.1002-1016.
26. ABB: *Technical Application Papers No.10. Photovoltaic plants.* Bergamo, Italy. - 116p.
27. E. Liu, J. Bebic. *Distribution System Voltage Performance Analysis for High-Penetration Photovoltaics.* Subcontract Report NREL/SR-581-42298, Colorado, 2008, 46 p.
28. J. M. A. Myrzik, M. Calais. *String and Module Integrated Inverters for Single-Phase Grid Connected Photovoltaic Systems - A Review* //*Bologna Power Tech Conference*, June 2003. -8 p.

29. S.K. Firth. A simple model of PV system performance and its use in fault detection // *Solar Energy* 84 (2010) p. 624–635.
30. E. Carestia et al. *Solar Plant Fault Detection and Diagnostics Software. NASA ESMD Pa-per Competition: Florida Gulf Coast University, March 21, 2011.* - 51 p.
31. M. Gagliarducci, D.A. Lampasi, L. Podesta. GSM-based monitoring and control of photo-voltaic power generation // *Measurement* 40 (2007) 314–321
32. A. Drews et al. Monitoring and remote failure detection of grid-connected PV systems based on satellite observations // *Solar Energy* 81 (2007) 548–564ю
33. *Weather Intelligence for Renewable Energies (WIRE). Current State Report. August 2012. COST Action ES1002.* - 163 p.
34. A. Hammer et al. Solar energy assessment using remote sensing technologies // *Remote Sensing of Environment* 86 (2003) 423–432
35. Joe-Air Jiang et al. Analysis of the junction temperature and thermal characteristics of photovoltaic modules under various operation conditions // *Energy* 44 (2012) 292 – 301.
36. Khatib T., Ibrahim I.A., Mohamed A. A review on sizing methodologies of photovoltaic array and storage battery in a standalone photovoltaic system // *Energy Conversion and Management.* – 2016. – Vol.120. – p. 430–448.

Навчальний контент

1. Методика опанування навчальної дисципліни(освітнього компонента)

Лекційні заняття

№ з/п	<i>Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на інформаційні джерела)</i>
1	<i>Загальна інформація з сонячної енергетики. Основні напрямки сонячної енергетики. Світло та його форми. Розподіл різних типів електромагнітного випромінювання за довжиною хвиль. Спектри різних джерел світла.</i>
2	<i>Геометричні параметри сонячного джерела. Інтенсивність та спектральний склад сонячного випромінювання (СВ). Процеси поглинання та розсіяння СВ в атмосфері. Види сонячної радіації. Основні формули для сонячної радіації. Повна радіація на похилій поверхні.</i>
3	<i>Зонна структура напівпровідників. Прямозонні та непрямоzonні напівпровідники. Електропровідність напівпровідників. Дрейфовий і дифузний струми. Ефективна маса носіїв струму. Електронно-діркові (pn)-переходи. Електричні властивості pn-переходу</i>
4	<i>Вольтамперна характеристика (ВАХ) pn-переходу. Вплив дифузного і рекомбінаційного струмів. Робота p-n переходу при освітленні. Електрична схема заміщення фотоелектричної комірки. Точка максимуму потужності. Основні параметри сонячних елементів. Температурна залежність ВАХ.</i>
5	<i>Оптичні та рекомбінаційні втрати в фотоелектричних перетворювачах (ФЕП). Засоби зменшення всіх видів втрат в ФЕП. Параметри реальних фотомодулів. Модель фотомодуля з послідовним опором. З'єднання фотомодулів. Часткове затінення систем ФЕП. Ефект обвідних діодів</i>
6	<i>Основні типи комерційних фотомодулів. Типові кремнієві фотомодулі. Технологічні етапи виробництва кремнієвих фотоелектричних модулів. ФЕП на основі арсенідів, теллуридів, халькогенідів. Гетеро pn-переходи. ФЕП з гетеропереходами. Тонкоплівкові фотомодулі.</i>

7	<i>Автономні (stand-alone) фотоелектричні системи (Ф Мережеві ФЕС (МФЕС). Потужнісні характеристики МФЕС. Співвідношення по-тужності МФЕС і навантаження. Проблеми високого ступеню проникнення ФЕ генерації в центральну мережу. Інжекція вищих гармонік в енергосистему. Оперативний моніторинг інверторів МФЕС. Своєчасне виявлення острівкування. Ефективність та надійність мережевих інверторів.ЕС). Електрична схема автономної ФЕС. Мережеві (grid connected) ФЕС. Конфігурації ФЕС: централізована, стрингова, мультістрингова, модульна. Можливі схеми з'єднання фотомодулів і ін-верторів. Топологія ФЕС, підключеної до передавальної мережі</i>
8	<i>Інвертори. Класифікація інверторів. Ефективність інверторів. Залежність ККД ін-верторів від рівня навантаження. Гармонійні спотворення інверторів. Інвертори струму та інвертори напруги. Бестрансформаторні інвертори. Відстеження точки максимальної потужності (Maximum Power Point Tracking–MPPT). Фільтрація вихідний потужності інверторів.</i>
9	<i>Контролери заряду-розряду (КЗР). Основні функції та типи КЗР. Типові з'єднання PV-контролерів. Часові профілі роботи КЗР різного типу. Паралельна робота конт-ролерів. Фотоелектричні системи з саморегулюванням. MPPT-контролери. ШІМ-контролери. Ефективність контролерів та її залежність від температури фотомоду-лів</i>
10	<i>Акумуляторні системи ФЕС. Конфігурації ФЕС з використанням акумуляторів. Ти-пи акумуляторних систем. Свинцево-кислотні акумуляторні батареї (АБ). Нікель-кадмієві АБ. Літій-іонні АБ. Літій-полімерні АБ. Порівняння акумуляторних систем. АГМ-акумулятори. Панцирні АБ. Припустима ступінь розряду та кількість циклів заряду-розряду. Терміни служби АБ.</i>
11	<i>Мережеві ФЕС (МФЕС). Потужнісні характеристики МФЕС. Співвідношення по-тужності МФЕС і навантаження. Проблеми високого ступеню проникнення ФЕ ге-нерації в центральну мережу. Інжекція вищих гармонік в енергосистему. Оператив-ний моніторинг інверторів МФЕС. Своєчасне виявлення острівкування. Ефективність та надійність мережевих інверторів.</i>
12	<i>Мережеві ФЕС (МФЕС). Потужнісні характеристики МФЕС. Співвідношення по-тужності МФЕС і навантаження. Проблеми високого ступеню проникнення ФЕ генерації в центральну мережу. Інжекція вищих гармонік в енергосистему. Оперативний моніторинг інверторів МФЕС. Своєчасне виявлення острівкування. Ефективність та надійність мережевих інверторів.</i>
13	<i>Оптимізаційні розрахунки. Загальний алгоритм розрахунку ФЕС. Розрахунок еко-номічної ефективності. Стандарти електробезпеки ФЕС. Програмні додатки для ро-зрахунку ФЕС.</i>
14	<i>Способи оцінки ефективності роботи ФЕС. Причини втрати енергії від ФЕС. Необ-хідні параметри для моніторингу. Типи дефектів та пошкоджень в роботі ФЕС. Діа-гностика та прогнозування ушкоджень.</i>
15	<i>Збір даних про роботу ФЕС в реальному часі. Архітектура систем моніторингу (СМ). Моніторингове обладнання. Метеорологічні вимірювання. Вимірювальні пристрої та засоби збору метеоданих. Програмне забезпечення СМ. Локальний і видалений моніторинг.</i>

16	<i>Використання спеціалізованих програмних додатків та систем в процесі проектування та моніторингу ФЕС. Система моніторингу та діагностики NASA. Програмні додатки та системи моніторингу ефективності ФЕС.</i>
17	<i>Проблеми прогнозування потужності та виробітку ФЕС. Горизонти прогнозування. Фактори, які впливають на сонячну радіацію та потужність ФЕС. Фізичні та статистичні методи прогнозування.</i>
18	<i>Прогнозування виробітку електроенергії ФЕС як складова smart-грид. Врахування технічних параметрів обладнання ФЕС. Врахування взаємного затінення рядів фотомодулів. Погрішності прогнозування виробітку енергії.</i>

Самостійна робота студента

<i>№з/п</i>	<i>Вид самостійної роботи</i>	<i>Кількість годин СРС</i>
1	<i>Підготовка до аудиторних занять</i>	50
2	<i>Підготовка до екзамену</i>	13

Політика та контроль

2. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які викладач ставить перед аспірантом:

- *правила відвідування занять: відповідно до РСО даної дисципліни бали нараховують не за присутність або відсутність здобувача на аудиторному занятті, а за відповідну навчальну активність на лекційних заняттях.*
- *правила поведінки на заняттях: аспірант має можливість отримувати бали за відповідні види навчальної активності на лекційних заняттях, передбачені РСО дисципліни. Має право використовувати засоби зв'язку для пошуку інформації на гугл-диску викладача, в інтернеті;*
- *правила призначення заохочувальних та штрафних балів: заохочувальні та штрафні бали не входять до основної шкали РСО, а їх сума не перевищує 10% стартової шкали.*
- *політика щодо академічної доброчесності встановлює загальні моральні принципи, правила етичної поведінки осіб та передбачає політику академічної доброчесності при вивченні та складанні контрольних заходів з дисципліни “Сучасні тенденції інтегрування відновлюваних джерел енергії в енергомережу”;*
- *при використанні цифрових засобів зв'язку з викладачем (мобільний зв'язок, електронна пошта, переписка на форумах та у соц.мережах тощо) необхідно дотримуватись загальноприйнятих етичних норм, зокрема бути ввічливим та обмежувати спілкування робочим часом викладача.*

Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (РСО)

Поточний контроль: експрес-опитування

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

Семестровий контроль: залік

Умови допуску до семестрового контролю: мінімальний семестровий рейтинг більше 40 балів.

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

<i>Кількість балів</i>	<i>Оцінка</i>
100-95	Відмінно
94-85	Дуже добре

84-75	Добре
74-65	Задовільно
64-60	Достатньо
Менше 60	Незадовільно
Не виконані умови допуску	Не допущено

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

- відповіді під час проведення експрес-опитувань на лекціях;

Відповіді під час проведення експрес-опитувань на лекціях

Ваговий бал – 5

Максимальна кількість балів на всіх лекціях –

5 бали * 8 = 40 балів.

Форма семестрового контролю – залік

Екзаменаційна робота складається з двох теоретичних запитань

Критерії оцінювання заліку

Рейтинг $R_c \geq 0,6 \cdot R$, тобто 60 балів – зараховується автоматично.

Рейтинг R_c в межах $(0,4 - 0,59) \cdot R$, тобто 40 – 59 балів – студенти складають екзамен.

Максимальний рейтинг екзамену $R_z = 40$ балів.

Рейтинг екзамену $R_z = 33 - 40$ балів – студент дав вичерпні відповіді на всі питання (при необхідності – і на додаткові), дає чіткі визначення всіх понять і величин, відповіді логічні і послідовні.

Рейтинг екзамену $R_z = 25 - 32$ балів – відповідаючи на питання, студент припускається окремих помилок, але може їх виправити за допомогою викладача; знає визначення основних понять і величин дисципліни, в цілому розуміє фізичну суть процесів в об'єктах, які вивчав.

Рейтинг екзамену $R_z = 16 - 24$ балів – студент частково відповідає на екзаменаційні питання, показує знання, але недостатньо розуміє фізичну суть процесів. Відповіді непослідовні і нечіткі.

Рейтинг екзамену $R_z \leq 15$ балів – у відповіді студент припускається суттєвих помилок, проявляє незрозуміння фізичної суті процесів, не може виправити помилки за допомогою викладача. Відповіді некоректні, а в деяких випадках не відповідають суті поставленого питання.

Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

Перелік тем, які виносяться на семестровий контроль:

1. Фотоенергетика і сонячна радіація
2. Електронні та оптичні процеси в напівп-ровідника
3. Характеристики фотоелектричних перет-ворювачів
4. Типи фотоелектричних модулів, технології їх виробництва
5. Типи і конфігурації фотоелектричних станцій
6. Пристрої та обладнання ФЕС
7. Проектування автономних ФЕС
8. Проектування мережевих ФЕС
9. Системи моніторингу та діагностики ФЕС
10. Технології моніторингу ФЕС в Smart Grid.
11. Основи методів прогнозування потужності та виробітку ФЕС.

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено професором кафедри відновлюваних джерел енергії ФЕА, д.ф.-м.н., Гаєвським О.Ю.

Ухвалено кафедрою відновлюваних джерел енергії ФЕА (протокол № 10 від 28.05.2020).

Погоджено Методичною комісією факультету (протокол №8 від 23.06.20 р.).