

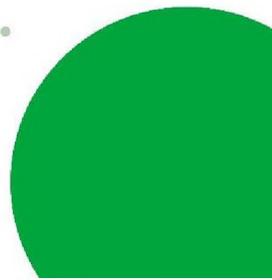


Сумський
Національний
Аграрний
Університет

ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Навчальний посібник

В. М. Козін,
О. Ю. Савойський



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

В. М. КОЗИН, О. Ю. САВОЙСЬКИЙ

ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Навчальний посібник

СУМИ – 2025

УДК 621.315.1

Л 11

Автори:

Козін В. М., к.т.н., доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем,
Савойський О. Ю., к.т.н., доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем, завідувач кафедри транспортних технологій.

Рецензенти:

Червінський Л. С., д.т.н., професор кафедри електротехніки, електромеханіки та електротехнології Національного університету біоресурсів і природокористування У країни,

Жила В. І., к.т.н., професор кафедри інтегрованих електротехнологій та енергетичного машинобудування Державного біотехнологічного університету.

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Сумського національного аграрного університету
(протокол № 7 від «27» жовтня 2025 року)*

Л 11 **Лінії електропередачі:** навчальний посібник / В. М. Козін,
О. Ю. Савойський, – Суми: СНАУ, 2025. – 369 с.
ISBN: 978-617-95269-4-7

Навчальний посібник системно поєднує теорію, практичні рекомендації та нормативні вимоги сучасної інженерії ліній електропередачі. Його структура охоплює електротехнічні основи (параметри та моделі лінії, хвильові процеси, передача потужності і стійкість), електрофізичні явища (коронні розряди, грозові й комутаційні перенапруги, координація ізоляції) та інженерію повітряних і кабельних ліній електропередачі (опори, проводи, ізолятори, грозозахист, заземлення, пропускна здатність ліній, їх монтаж; перехідні вузли між кабельною та повітряною лініями, високовольтні лінії постійного струму, методи прокладання і діагностики кабелів). У навчальному посібнику забезпечено цілісність подачі інформації від фізичних уявлень до практичних рекомендацій, узгодженість із актуальними стандартами, зроблено акцент на цифрових інструментах та сучасних викликах електроенергетики. Актуальність тем, розглянутих у посібнику, зумовлена модернізацією електричних мереж, інтеграцією відновлювальних джерел енергії та розвитком зв'язків між окремими енергетичними системами.

Посібник рекомендовано здобувачам спеціальностей G3 Електрична інженерія та G4 Енерговиробництво (за спеціалізаціями), інженерам, що займаються проектуванням і експлуатацією електромереж, фахівцям з релейного захисту та автоматики.

УДК 621.315.1

ISBN: 978-617-95269-4-7

© В. М. Козін, О. Ю. Савойський, 2025
© СНАУ, 2025

ЗМІСТ

ВСТУП	6
ЧАСТИНА I. ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ ОСНОВИ	8
1 ОГЛЯД СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	8
1.1 Історичний розвиток ліній електропередачі	8
1.2 Лінії електропередачі змінного і постійного струму	12
1.3 Класи напруги ліній електропередачі	33
Список рекомендованої літератури до розділу 1	35
2 ПАРАМЕТРИ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ	38
2.1 Поздовжній опір, індуктивність, ємність і провідність лінії	38
2.2 Еквівалентні π - та T-схеми	49
Список рекомендованої літератури до розділу 2	53
3 ХВИЛЬОВІ ПРОЦЕСИ ТА ХВИЛЬОВИЙ ОПІР	55
3.1 Рівняння Телеграфіста	55
3.2 Хвильовий опір	58
3.3 Фазова та групова швидкості поширення	64
Список рекомендованої літератури до розділу 3	67
4 ПЕРЕДАЧА ПОТУЖНОСТІ ТА СТАБІЛЬНІСТЬ МЕРЕЖІ	69
4.1 Максимальна передана потужність	69
4.2 Кутова та частотна стабільність	76
4.3 Підсинхронні коливання	79
Список рекомендованої літератури до розділу 4	82
ЧАСТИНА II. ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ЯВИЩА ТА ІЗОЛЯЦІЯ	84
5 КОРОННІ РОЗРЯДИ ТА РАДІОПЕРЕШКОДИ	84
5.1 Напруженість початку коронного розряду	84
5.2 Емпірична формула Піка	86
5.3 Енергетичні втрати на корону та акустичний шум	90
5.4 Методи вимірювання та моделювання коронних розрядів	95
Список рекомендованої літератури до розділу 5	102
6 ГРОЗОВІ І ПОВЕРХНЕВІ ПЕРЕНАПРУГИ	104
6.1 Імпульсні моделі струму блискавки	105
6.2 Методика розрахунку блискавкостійкості ЛЕП	107
6.3 Конструкції систем грозозахисту	115
6.4 Грозозахисні троси	118
6.5 Моніторинг та реєстрація атмосферних перенапруг	120
Список рекомендованої літератури до розділу 6	124

7 КООРДИНАЦІЯ ІЗОЛЯЦІЇ	126
7.1 Імовірнісний підхід до координації.....	126
7.2 Стандартна грозова імпульсна напруга.....	128
7.3 Визначення довжини гірлянди ізоляторів	131
7.4 Випробування на довготривалу електричну міцність	134
ЧАСТИНА ІІІ. ПОВІТРЯНІ ТА КАБЕЛЬНІ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРО- ПЕРЕДАЧІ	142
8 ПОВІТРЯНІ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ	142
8.1 Терміни та визначення понять	142
8.2 Елементи повітряної лінії електропередачі	145
8.3 Класифікація опор повітряних ліній електропередачі	155
8.4 Конструкції опор повітряних ліній електропередачі.....	166
8.4.1 Дерев'яні опори	166
8.4.2 Залізобетонні опори	169
8.4.3 Металеві опори.....	171
8.4.4 Композитні опори.....	176
8.4.5 Комбіновані опори.....	177
8.4.6 Особливості конструкцій опор повітряних ліній електропередачі.....	178
8.5 Маркування опор повітряних ліній електропередачі	180
8.6 Способи закріплення опор повітряних ліній електропередачі	181
8.7 Монтаж опор повітряних ліній електропередачі	184
8.7.1 Загальні відомості	184
8.7.2 Правила встановлення.....	185
8.7.3 Особливості монтажу опор на важких трасах і переходах через водойми.....	186
8.7.4 Підготовка проводів повітряних ліній електропередачі для закріплення на опорах	187
8.8 Проводи повітряних ліній електропередачі	189
8.9 Способи з'єднання проводів повітряних ліній електропередачі	193
8.10 Перетин та зближення повітряних ліній електропередачі між собою. Прогин проводів	196
8.11 Види та характеристики ізоляторів повітряних ліній електропередачі.	199
8.12 Способи закріплення проводів повітряних ліній електропередачі.....	204
8.13 Захист повітряних ліній електропередачі від грозових перенапруг	209
8.14 Заземлювальні пристрої повітряних ліній електропередачі	219
8.15 Правила розміщення опорних точок. Охоронні зони повітряних ліній електропередачі.....	222

8.16 Втрати енергії повітряних ліній електропередачі та способи їх зменшення	225
8.17 Пропускна здатність повітряних ліній електропередачі	229
8.18 Механічний розрахунок	234
8.19 Підключення повітряних ліній електропередачі до об'єктів електроприймачів.....	238
Список рекомендованої літератури до розділу 8.....	246
9 КАБЕЛЬНІ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ	250
9.1 Силові кабелі високої та надвисокої напруги	251
9.2 Тепловий режим і допустима струмова навантажувальна здатність кабельних ліній.....	258
9.3 Способи прокладання кабельних ліній	262
9.3.1 Підземне прокладання	265
9.3.2 Повітряне прокладання	273
9.3.3 Підводне прокладання.....	274
9.3.4 Прокладання високотемпературних надпровідних кабелів HTS.....	278
9.4 З'єднувальні елементи кабельних ліній	280
9.5 Системи охолодження кабельних ліній.....	296
9.6 Катодний захист і захист кабельних ліній екрануванням	304
9.7 Діагностика та локалізація пошкоджень КЛ.....	308
9.8 Системи моніторингу стану кабелів.....	311
9.9 Перехідні вузли «кабельна лінія – повітряна лінія»	313
9.10 Перехідні вузли «кабель – електрообладнання».....	319
9.11 Економічні та екологічні аспекти підземних кабельних ліній	328
9.12 Особливості кабелів HVDC-мереж	332
9.13 Монтаж, логістика та техніка безпеки при прокладанні кабельних ліній.....	337
9.14 Види пошкоджень кабелів.....	356
9.14.1 Механічні пошкодження	356
9.14.2 Пошкодження ізоляції	358
9.14.3 Пошкодження з'єднання	359
9.15 Майбутні тенденції щодо прокладання кабелю.....	361
9.16 Вимоги до розмірів траншей при прокладанні кабелів та охоронні зони кабельних ліній електропередачі.....	363
Список рекомендованої літератури до розділу 9.....	365

ВСТУП

Лінії електропередачі (ЛЕП) – це фізичний і, водночас, концептуальний «хребет» будь-якої енергосистеми: саме вони роблять можливим географічне відокремлення генеруючих джерел від центрів споживання, перетікання потужності між регіонами та інтеграцію різних видів генерації в єдиний енергобаланс. Жодна національна або міждержавна електронергетична інфраструктура не може функціонувати без сукупності повітряних і кабельних трас, що забезпечують суцільність мережі у масштабах від кількох сотень метрів у сільських кабельних розподільчих системах до тисяч кілометрів у трансконтинентальних магістралях.

Питаннями координації енергосистеми у Європі займається Європейська мережа операторів систем передачі електроенергії (ENTSO-E), яка об'єднує 40 операторів систем передачі та задає загальні технічні та ринкові правила синхронної роботи мережі – зокрема параметри міждержавних перетинів, вимоги до надійності та системи резервів. В Україні регуляторну функцію, співставну з комітетами ENTSO-E з кодексів мережі, забезпечує НКРЕКП (Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг), яка сертифікувала НЕК «Укренерго» за європейською моделлю ISO-TSO. Функції координатора технічного планування, експлуатації та розвитку мережі на національному рівні виконує саме НЕК «Укренерго», яка від 1 січня 2024 року є повноправним членом ENTSO-E. Отже, Україна фактично є частинкою європейського енергетичного сектору і на неї розповсюджуються відповідні міжнародні європейські стандарти, яким приділено значну увагу у цьому навчальному посібнику.

Актуальність тематики, пов'язаної з ЛЕП, зростає щонайменше через три взаємопов'язані виклики. По-перше, енергетичний перехід до зростання частки відновлювальних джерел енергії створює нові профілі навантаження та двосторонні потоки енергії, що вимагають перегляду класичного підходу до пропускну здатності і стабільності ЛЕП. По-друге, урбанізація посилює потребу у підземних та підводних кабелях класу 110–500 кВ, де вже не можна ігнорувати хвильові та теплові процеси, що для повітряних ліній раніше вважалися другорядними. По-третє, кліматичні умови та фізичне старіння значно частини ЛЕП середини ХХ ст. накладають вимогу модернізації з використанням високотемпературних малоприсисних проводів, наприклад, АС490/65А або композитних проводів із вуглецево-скляним композитним осердям, що здатні передавати на 70 % більше струму без заміни опор. Ці тенденції радикально змінюють набір компетенцій, потрібних інженеру-електрику: опір, індуктивність і ємність уже недостатньо знати «каталожно» – потрібно вміти обґрунтовувати їх коригування для підвищених температур, частотних спектрів і нових матеріалів. Також необхідно враховувати, що питання проектування, реконструкції, моделювання та експлуатації ЛЕП перебувають на стику електротехніки, механіки, матеріалознавства, екологічних наук і регуляторної політики. Сучасний інженер-електрик зобов'язаний орієнтуватися принаймні в базових дисциплінах і стандартах кожної з цих галузей.

Посібник починається з історичного огляду, який простежує шлях від перших телеграфних ліній Гевісайда з їх концептом хвильового опору до сучасних ультрависоковольтних трас 1100 кВ, що перетинають континенти. У цьому розвитку чітко виділяються три віхи: «омічна» епоха постійного струму і перших дослідів Фарадея, «синусоїдна» епоха систем змінного струму Вестингауза і Тесли, а далі – «хвильова» епоха, коли на перший план виходять телеграфні рівняння, дисперсія та електромагнітна сумісність. Кожна віха породила свої технічні проблеми: теплові втрати, коронні розряди, перенапруги, відбиття та затухання. Відповідно еволюціонували і методи їх вирішення – від емпіричних допусків ПУЕ до суворо формалізованих розрахунків за ІЕС 60909-0, ІЕС 60071-1 і вимог ENTSO-E.

Роль ЛЕП у національній електроенергетиці можна порівняти з роллю кровоносної системи в організмі: розвинена генерація або сучасний ринок нічого не варті без здатності передати енергію в потрібний час і в потрібне місце. Так само, як артерії повинні підтримувати тиск і еластичність, ЛЕП мають забезпечувати обмеження за напругою, теплову стійкість і динамічну надійність. Кількогадинне відключення міждержавних перетинів Continental Europe у 2021 р. показало, що пропускна спроможність ЛЕП стала системним лімітом гнучкості: у години дефіциту оператори змушені були активувати аварійні резерви на гідроакumuлюючих станціях і навіть застосувати схему відключення промислового навантаження. Отже, компетенція у галузі ЛЕП більше не є вузькопрофільною спеціалізацією; це необхідна умова ефективної роботи інженера-електрика – від експлуатаційника диспетчерського центру до розробника алгоритмів релейного захисту.

Отже, цей посібник ставить за мету системно, але доступно висвітлити теорію, практичні рекомендації і нормативні вимоги, що визначають сучасну інженерію ЛЕП. Він покликаний ознайомити читача не лише з формулами, а також надати інтуїтивне розуміння механізмів, які стоять за ними, а також показати, як класичні методи поєднуються з новітніми цифровими інструментами та матеріалами у відповідь на виклики енергетичного переходу.

Віктор Миколайович КОЗІН
Олександр Юрійович САВОЙСЬКИЙ

ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Навчальний посібник

Суми, РВВ, Сумський національний аграрний університет,
вул. Г. Кондратьєва, 160

Підписано до друку: вересень 2025 р. Формат А5: Гарнітура Times New Roman

Тираж: 60 примірників. Замовлення _____ Ум. друк. арк. 15,4
