



Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Факультет енергетики, робототехніки та
комп'ютерних технологій

Кафедра електропостачання та енерге-
тичного менеджменту

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Методичні вказівки

до виконання лабораторної роботи
«Дослідження ліній електропередавання
великої довжини напругою понад 110 кВ»

для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої
освіти

денної форми навчання

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехні-
ка та електромеханіка»

Харків

2023

Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет енергетики, робототехніки та комп'ютерних технологій
Кафедра електропостачання та енергетичного менеджменту

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Методичні вказівки

до виконання лабораторної роботи
«Дослідження ліній електропередавання
великої довжини напругою понад 110 кВ»
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
денної форми навчання

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

Затверджено рішенням

науково-методичної ради
факультету енергетики,
робототехніки та
комп'ютерних технологій

Протокол № 1 від 31
жовтня 2023 року

Харків

2023

УДК 621. 31

ББК О75

Схвалено на засіданні кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту

Протокол № 3 від 17.10.2023 р.

Рецензенти:

С. О. Тимчук, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ДБТУ;

Ю. М. Хандола, канд. техн. наук, зав. кафедри електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та електротехніки ДБТУ.

О75 Основи електропостачання: метод. вказівки до виконання лабораторної роботи «Дослідження ліній електропередавання великої довжини напругою понад 110 кВ» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної форми навч. зі спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Держ. біотехнол. ун-т; авт.-уклад.: С. А. Попадченко, О. А. Савченко – Харків: [б. в.], 2023. – 36 с.

Методичні вказівки розроблено відповідно до програми навчальної дисципліни. Видання включає теоретичну частину, алгоритм виконання лабораторної роботи, контрольні запитання та перелік рекомендованої літератури. Видання призначена для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної форми навчання зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

УДК 621.31

Відповідальний за випуск: О. О. Мірошник, д-р техн. наук

© Попадченко С. А., Савченко О. А., 2023

© ДБТУ, 2023

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ ВЕЛИКОЇ ДОВЖИНИ НАПРУГОЮ ПОНАД 110 КВ

МЕТА РОБОТИ. Вивчити особливості режимів роботи ліній електропередавання напругою більше 110 кВ.

Дослідити пропускну здатність лінії та виміряти зміну напруги в режимах неробочого стану лінії (холостого ходу) та навантаження

I. ПРОГРАМА ВИКОНАННЯ РОБОТИ.

1. Розрахувати хвильовий опір лінії електропередавання та натуральну потужність, реактивну провідність.

2. Виміряти на фізичній моделі напругу та струми в контрольних точках різних режимів роботи лінії.

3. Використовуючи масштаби для напруги, струму та потужності визначити ці параметри для оригіналу.

4. За даними досліду побудувати залежності зміни напруги та струму для контрольних точок. Порівняйте розрахункові дані з виміряними.

II. ВИМОГИ ДО СКЛАДАННЯ ЗВІТУ.

Звіт по роботі повинен мати:

1. Мету роботи.

2. Принципову електричну схему моделі.

3. Розрахунки напруги, струму, потужності оригіналу.

4. Провести дослід і записати вимірні дані.

5. Побудовані залежності: зарядного струму і напруги лінії моделі і оригіналу в неробочого режиму і при наванта-

ження $I_{зар. мод} = f(l)$; $U_{хх. мод} = f(l)$ в одній системі координат.

6. Зробити висновки по роботі.

III. ПОЯСНЕННЯ ДО РОБОТИ.

Для передавання електричної енергії від електростанцій системи до центрів споживання і для її розподілення в районних мережах енергосистем застосовують повітряні лінії (ПЛ) напругою змінного струму 110, 150, 220 і 330, 500, 750 кВ.

Лінії напругою 500 і 750 кВ застосовують для передачі великої кількості електроенергії і для зв'язку між собою окремих електричних систем і створення замкнутих мереж.

При проектуванні ліній електропередавання заданими вважаються потужності, які передають, і відстань, на яку потрібно передати цю потужність. Визначається номінальна напруга електропередавання, число кіл, переріз проводів, а також заходи що до збільшення пропускної здатності лінії в різних режимах роботи.

При виборі напруги приймається до уваги, що перевищення робочої напруги відносно номінальної за умовами роботи ізоляції не повинно перевищувати 15 % - в мережах 110-220 кВ, 10% - в мережах 330 кВ і 5% - в лініях 500 кВ і вище.

Дані лінії потрібні в першу чергу для того, щоб передавати великі потужності та при цьому мінімізувати втрати (які мають обернено пропорційний зв'язок з величиною напруги).

Заходи щодо підвищення стійкості і безперебійності роботи дальніх ліній електропередач

Стійкість паралельної роботи лінії електропередачі грає найважливішу роль при передачі електричної енергії на великій відстані. Пропускна здатність лінії за умовами стійкості

зростає пропорційно квадрату напруги, а тому підвищення напруги електропередачі є одним з найбільш ефективних способів збільшення навантаження на одне коло, а тим самим і скорочення числа паралельних кіл[2, 12].

У тих випадках, коли мова йде про передачу дуже великих потужностей близько 1 млн. кВт і більше на великі відстані технічно і економічно є недоцільним, то необхідно далеко не останнє підвищення напруги.

При цьому, однак, значно зростають розміри обладнання, його вага і вартість, а також труднощі його виготовлення і освоєння.

У зв'язку з цим за останні роки розроблені **заходи підвищення пропускної спроможності ліній передачі**, які були б недорогі і в той же час досить ефективні[2, 5, 8, 11].

З точки зору надійності передачі електроенергії має **значення як статична, так і динамічна стійкість** паралельної роботи. Деякі з розглянутих нижче заходів мають значення для обох видів стійкості, інші ж переважно для одного з них.

Швидкість відключення пошкодження

Загальноприйнятим і найбільш дешевим засобом збільшення переданої потужності є **зменшення часу відключення пошкодженої елемента** (лінії, окремої її ділянки, трансформатора і т. п.), яке складається з часу дії релейного захисту і часу дії самого вимикача. Цей захід широко застосовується на існуючих лініях електропередач. Відносно швидкодії за останні роки досягнуто дуже великих успіхів як в області релейного захисту, так і вимикачів.

Швидкість відключення має значення тільки для динамічної стійкості і головним чином для пов'язаних електропередач при аваріях на самій лінії передачі. Для блокових ж електропередач, де аварія на лінії призводить до відключення блоку,

динамічна стійкість має значення при аваріях в приймальній (вторинній) мережі, а тому необхідно піклуватися про якнайшвидшу ліквідацію аварії саме в цій мережі[12].

Застосування швидкодіючих регуляторів напруги

При коротких замиканнях в мережі, внаслідок протікання великих струмів, завжди має місце те чи інше зниження напруги. Зниження напруги може наступати і з інших причин, наприклад при швидкому збільшенні навантаження або при відключенні генераторної потужності, в результаті чого відбувається перерозподіл потужності між окремими станціями.

Зниження напруги призводить до різкого погіршення стійкості паралельної роботи. Для усунення цього необхідно швидко підвищення напруги по кінцях електропередачі, що досягається застосуванням швидкодіючих регуляторів напруги, що впливають на збудження генераторів і підвищуючих їх напругу. Цей захід належить до найбільш дешевих і ефективних. Необхідно, однак, щоб регулятори напруги мали безінерційність, а крім того збуджуюча система машини повинна забезпечувати необхідну швидкість підйому напруги і його величину (кратність) по відношенню до нормальної, тобто так званій максимум напруги.

Поліпшення параметрів обладнання

Як зазначалося вище, в сумарну величину опору електропередачі входить опір генераторів і трансформаторів. З точки зору стійкості паралельної роботи має значення реактивний опір (активний же опір, як вище було зазначено, впливає на втрати потужності і енергії).

Падіння напруги в реактивному опорі генератора або трансформатора при його номінальному струмі (струмі, що відповідає номінальній потужності), віднесене до нормальної напруги і виражене у відсотках (або в частках одиниці), є од-

нією з важливих характеристик генератора або трансформатора.

З технічних і економічних міркувань генератори і трансформатори проектується і виготовляються на певні реактивні опори, що є оптимальними для даного типу машини.

Реактивні опори можуть бути змінювані в певних межах, причому зниження реактивності, як правило, супроводжується збільшенням розмірів і ваги, а отже, і вартості. Однак подорожчання генераторів і трансформаторів відносно невелике і економічно цілком виправдовується.

На деяких існуючих електропередачах застосовано обладнання з поліпшеними параметрами. Слід також зазначити, що на практиці в деяких випадках застосовують обладнання зі стандартними (типовими) реактивностями, але дещо більшої потужності, розраховане, зокрема, на коефіцієнт потужності 0,8, тоді як фактично, по режиму електропередачі, його слід очікувати рівним 0,9 - 0,95.

У тих випадках, коли потужність передається від гідро-танції і турбіна може розвивати потужність більшу номінальної на 10%, а іноді і більше, то при тисках, що перевищують розрахунковий, можливе збільшення активної, що віддається генератором.

Перемикальні пости

При аварії однієї з двох паралельних ліній, що працюють по пов'язаній схемі і без проміжного відбору, вона повністю виходить з ладу, а тому опір лінії електропередачі збільшується вдвічі. Передача подвоєної потужності по лінії, що залишилася в роботі буває можлива, якщо вона має відносно невелику довжину.

При лініях ж значної довжини застосовуються спеціальні заходи для компенсації падіння напруги в лінії і підтримки

його постійним на приймальному кінці електропередачі. Для цього на приймальні підстанції встановлюються потужні **синхронні компенсатори**, що посилають в лінію попереджувальну реактивну потужність, яка частково компенсує відстаючу реактивну потужність, зумовлену реактивністю самої лінії і трансформаторів.

Такі синхронні компенсатори не можуть, однак, забезпечити стійкість роботи довгої електропередачі. На довгих лініях, щоб уникнути зниження переданої потужності при аварійному відключенні одного кола, можуть бути застосовані перемикальні пости, які ділять лінію на кілька ділянок.

На перемикальних постах влаштовуються збірні шини, до яких за допомогою вимикачів приєднуються окремі ділянки ліній. При наявності постів при аварії відключається тільки пошкоджена ділянка, а тому загальний опір лінії збільшується незначно, наприклад, при 2-х перемикальних постах воно збільшується лише на 30%, а не вдвічі, як було б при відсутності комутаційних постів.

Стосовно ж до повного опору всієї електропередачі (включаючи опори генераторів і трансформаторів), збільшення опору буде ще менше.

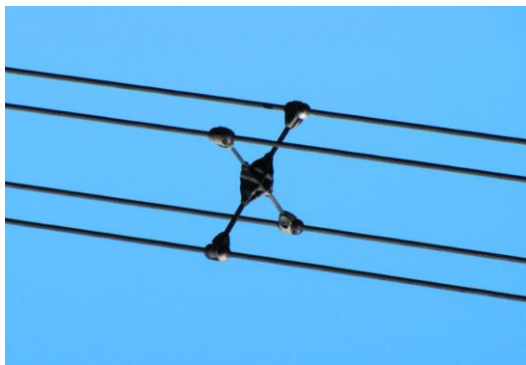
Розщеплення проводів

Реактивний опір проводу залежить від відношення відстані між проводами до радіусу проводу. Зі збільшенням напруги, як правило, збільшується відстань між проводами і їх переріз, а отже, і радіус. Тому реактивний опір змінюється в порівняно вузьких межах і при наближених розрахунках звичайно приймається рівним $x_0 = 0,4 \text{ Ом / км}$.

На лініях напругою 220 кВ і вище спостерігається явище так званої «*корони*». Це явище пов'язане з втратами енергії, особливо значними в погану погоду. Для усунення надмірних

втрат на корону потрібен певний діаметр проводів. При напрузі понад 220 кВ суцільні проводи виходять настільки великого перерізу, що економічно воно не може бути виправдане. З цих міркувань пропонувалися і знайшли відоме застосування порожнисті мідні проводи.

З точки зору корони більш ефективним є застосування замість порожнистих - **розщеплених проводів**. Розщеплений провід складається з 2 - 4 окремих проводів, розташованих один від одного на деякій відстані.



При розщепленні проводу діаметр його як би збільшується і в результаті:

- а) істотно знижуються втрати енергії внаслідок корони,
- б) зменшується його **реактивний і хвильовий опір** і відповідно збільшується натуральна потужність лінії електропередачі. Натуральна потужність лінії орієнтовно зростає при розщепленні на два проводи на 25 - 30%, на три - до 40%, на чотири - до 50%.

Поздовжня компенсація

При збільшенні довжини лінії відповідно зростає її реактивний опір і внаслідок цього суттєво погіршується стійкість паралельної роботи. Зменшення реактивного опору довгої лінії

електропередачі підвищує її пропускну здатність. Таке зменшення найбільш ефективно може бути досягнуто шляхом послідовного (в розріз) включення в лінію статичних конденсаторів.

Такі конденсатори по своєму ефекту протилежні дії самоіндукції лінії, і таким чином в тій чи іншій мірі її компенсують. Тому цей спосіб носить загальну назву *поздовжньої компенсації*. Залежно від числа і розмірів статичних конденсаторів може бути компенсований індуктивне опір на тій чи іншій довжині лінії. Відношення довжини компенсованої лінії до загальної її довжини, виражене в частках одиниці або у відсотках, називається мірою компенсації.

Статичні конденсатори, включені в розріз лінії передачі, піддаються впливу ненормальних режимів, які можуть виникати при коротких замиканнях як на самій лінії передачі, так і поза нею, наприклад, в приймальній мережі. Найбільш важкими є короткі замикання на самій лінії.

При проходженні через конденсатори великих аварійних струмів напруга на них значно підвищується, хоча і короткочасно, але може бути небезпечним для їх ізоляції. Щоб уникнути цього паралельно конденсаторам включається повітряний іскровий проміжок. Коли напруга на конденсаторах перевищує певну, заздалегідь обрану величину, то проміжок пробивається і цим створюється паралельний шлях для проходження аварійного струму. Весь процес відбувається дуже швидко, і після його завершення ефективність конденсаторів знову відновлюється.

Коли ступінь компенсації не перевищує 50%, то найбільш доцільною є установка *батареї статичних конденсаторів* в середині лінії, при цьому трохи зменшується їх потужність і полегшуються умови роботи.

Електричні мережі всіх напруг мають активні і ємнісні провідності, що обумовлює протікання в цих лініях струмів витоку і ємнісних струмів, величина котрих не залежить від навантаження, а визначається тільки конструкцією, довжиною лінії і її робочою напругою.

Розрахунок цих ліній здійснюється з урахуванням провідностей - активної g і реактивної b . В розрахунках приймається, що провідність, як активна, так і реактивна, по фазам рівномірно розподілені і визначаються через активні і реактивні опори. Значення реактивних і активних опорів (при відомій конструкції лінії, марках і перерізах проводів) визначають за довідниками або за допомогою розрахунків.

Індуктивний опір одиниці довжини лінії з поодинокими проводами у фазі може бути визначений за формулою:

$$x_0 = \omega \cdot (4,6 \cdot \ln \frac{2D_{CP}}{d} + 0,5 \cdot \mu) \cdot 10^{-4}, \text{ Ом/км}; \quad (1)$$

де D_{CP} - середня геометрична відстань між всіма проводами;

$$D_{CP} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}}, \text{ м}, \quad (2)$$

D_{12}, D_{23}, D_{31} - дійсна відстань між проводами 1, 2, 3, м;

d - фактичний зовнішній діаметр проводу, визначається по ДСТУ на проводи, мм;

μ - магнітна проникність матеріалу проводу, для проводів із кольорового металу, $\mu = 1$.

З метою підвищення пропускної здатності лінії (зниження реактивного опору) і зменшення втрат енергії на корону, лінії трифазного струму напругою 330, 500, 750 кВ виготовляють

із кольорового металу з розщепленими проводами в фазах(рис 2).

Індуктивний опір, для ліній з розщепленими проводами в фазах, визначається за формулою:

$$x_0 = 0,144 \cdot \lg \frac{D_{CP}}{r_{EKB}} + \frac{0,016}{n}, \text{ Ом/км}; \quad (3)$$

де: D_{CP} - середня геометрична відстань між осями проводів, m ;

$r_{екв}$ – еквівалентний радіус проводів однієї фази, mm ;

n – кількість проводів у розщепленій фазі.

При розміщенні проводів у фазі по колу, рис.1 з радіусом ρ_p (радіус розщеплення) еквівалентний радіус проводів фази $r_{екв}$ для будь-якого числа n проводів може бути визначений за формулою:

$$r_{екв} = \rho_p \cdot \sqrt[n]{n \cdot r / \rho_p}, \text{ мм}; \quad (4)$$

де r – дійсний радіус одного проводу, mm .

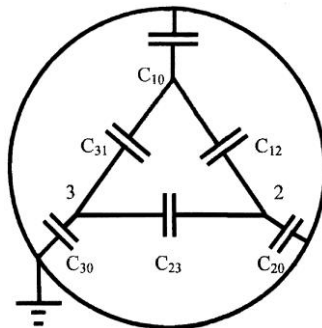


Рисунок 1– Принципова схема розподілення ємності лінії електропередавання.

Для $n = 2$ і $n = 3$ значення $r_{екв}$ визначається за формулою:

$$r_{екв} = \sqrt{n \cdot d_{сер}^{n-1}}, \text{ мм} \quad (5)$$

де $d_{сер}$ - середня геометрична відстань між проводами однієї фази (крок розщеплення), мм.

Аналізуючи формулу визначення радіусу, можна бачити, проте, що ефекту підвищення натуральної потужності лінії великої довжини, а отже, і її пропускної здатності можна домогтися зменшенням міжфазних відстаней при збільшенні радіуса розщеплення фази і числа проводів в фазі [2]. Збільшення відстані між провідниками фази при зменшенні міжфазних відстаней досить швидко досягає межі, якщо проводи в розщепленій фазі розташовувати традиційно по колу.

Одним із способів збільшення пропускної здатності ЛЕП великої довжини може бути застосування так званих компактних ПЛ [8, 10]. До них відносяться лінії зі зближеними фазами і спеціальними конструкціями розщеплення фаз.

Для досягнення ефекту підвищення пропускної здатності компактної ЛЕП великої довжини пропонуються способи вертикального (а), горизонтального (б), симетрично-параболічного (в) і коаксіального (г) розташування фаз (рис. 2).

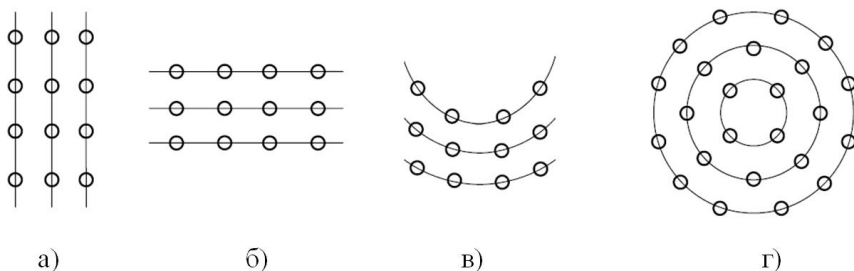


Рисунок 2– Способи розщеплення фаз компактних ПЛ:
 а)вертикальний; б)горизонтальний; в)параболічний;
 г)коаксіальний.

Істотне зближення фаз не знижує ізоляційної міцності ПЛ, якщо забезпечити стійке положення проводів в прогоні ПЛ при дії вітру. ПЛ традиційного виконання мають міжфазні відстані, багаторазово перевищують електричну міцність повітря за умовою недопущення небезпечного зближення проводів при їх розгойдуванні під дією вітру.

Застосування стрижневих полімерних ізоляторів дозволяє запобігти небезпечним зближенням за рахунок установки ізолюючих розпірок між проводами в середині прогону ПЛ.

При цьому майже не зростають механічні навантаження на проводи, так як полімерні ізолятори у багато разів легше традиційних гірлянд скляних або порцелянових ізоляторів. Все це створює хорошу перспективу для застосування компактних ПЛ, особливо для передачі потужності на великі відстані.

В системах електропередавання України прийнятий крок розщеплення:

400 мм - для ліній 330 і 500 кВ при розщепленні відповідно на 2 і 3 проводи(рис.3);

600 мм - для ліній 750 кВ при розщепленні відповідно на 4 проводи,

300 мм - при розщепленні на 5 проводів.

Активна провідність ліній обумовлена протіканням струмів витоку через ізоляцію і появою електричної корони на проводах.

Приймаючи заходи для зниження робочої напруженості електричного поля ліній електропередавання (ЛЕП), проєктують повітряні лінії (ПЛ) таким чином, щоб втрати потужності на корону в них, при сприятливій погоді, не було, а середньорічні втрати були малі.

А так як втрати активної потужності обумовлені струмами витоку по ізоляторам і в матеріалі ізоляторів незначні, то при електричних розрахунках ліній їх активну провідність в схемах заміщення вважають рівною нулю ($g = 0$).

Реактивна провідність лінії обумовлена протіканням в ній ємнісних струмів. Будь-яку пару проводів ПЛ, провід лінії і земля можна розглядати як конденсатор з відповідною частковою ємністю. Робоча ємність лінії складається із часткових ємностей фаза-фаза і фаза-земля.



Рисунок 3 – Розщеплення фазного провода на три ПЛ 500 кВ.

Термін робочої ємності справедливий тільки для симетричних ліній. Робочу ємність лінії визначають з припущенням, що фізична симетрія їх забезпечується транспозицією проводів.

Під *транспозицією* (рис. 4) розуміється циклічна перестановка фаз з метою зниження несиметрії систем векторів струмів і напруг в кінці лінії (при симетричних системах цих векторів на її початку), викликаній різницею реактивних параметрів фаз (індуктивностей і ємностей) внаслідок несиметричного розташування проводів на опорах.

На лініях довжиною до 100 км як правило здійснюється один цикл транспозиції, якщо це допустимо за умовами впливу на провідні лінії зв'язку, які прокладаються паралельно ПЛ.

При цьому провід кожної фази проходить одну третину довжини лінії на одному, другу – на другому і третю – на третьому місці.

Одне таке потрійне переміщення проводів називають **циклом транспозиції**.



Рисунок 4 – Схема циклу транспозиції фаз повітряної лінії: 1 – фаза А; 2 – фаза В; 3 – фаза С.

Згідно ПУЕ, на ПЛ 110-500 кВ довжиною понад 100 км для обмеження несиметрії струмів і напруг повинен виконуватися один повний цикл транспозиції. Крок транспозиції за умовою впливів на лінії зв'язку не нормується. При цьому транспозиція повинна здійснюватися так, щоб сумарні довжини ділянок ПЛ з різним чергуванням фаз були приблизно рівні.

Транспозицію проводів застосовують також з метою зменшення впливу лінії електропередавання на сусідні проводи зв'язку на лініях напругою вище 110 кВ і довжиною більше 100 км.

Робоча ємність визначається як ємність плеча еквівалентної зірки і знаходиться із перетворення трикутника провідностей в зірку (рис. 1, формула 6).

$$C = 3 \cdot C_{12} + C_{10}, \Phi. \quad (6)$$

Робоча ємність залежить від діаметра проводів, їх взаємного розміщення, відстані між ними і діелектричної проникності середовища. Впливом на ємність сусідніх кіл ліній передачі і грозозахисних тросів проводів нехтують. Помилка, обумовлена знехтуванням цього впливу при найбільш несприятливому випадку не перевищує 5 %.

В практичних розрахунках електричних мереж робочу ємність 3-фазної ПЛ з одним проводом на фазу визначають за формулою:

$$C_0 = \frac{0,024}{\lg \frac{D_{cep}}{r}} \cdot 10^{-6}, \Phi/км; \quad (7)$$

а реактивну провідність при $f = 50Гц$:

$$b_0 = \omega \cdot C_0 = \frac{7,58}{\lg \frac{D_{cep}}{r}} \cdot 10^{-6}, См/км. \quad (8)$$

Для визначення робочої ємності повітряної лінії з розщепленими проводами (при 2-х і 3-х проводах на фазу), необхідно в розрахункових формулах (1.67) і (1.68) замінити r на $r_{екв}$.

Наявність ємнісної провідності дозволяє розглядати лінію електропередавання, як генератора реактивної ємнісної потужності

$$Q = U \cdot \omega^2 \cdot C_0 \cdot L = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_C = \sqrt{3} \cdot \frac{U}{\sqrt{3 \cdot b_0}} = \frac{U^2}{b_0}, \quad (9)$$

де U - робоча лінійна напруга, кВ;

$$I_C = \omega \cdot C_0 \cdot L \cdot I_{нат} \cdot \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = 0,001L \cdot I_{нат} - \text{ємнісний струм};$$

$I_{нат}$ - струм зарядної потужності (14).

Зарядна потужність зменшує індуктивну складову потужності навантаження, яка передається по лінії від джерела до споживача. Однорідна ЛЕП представляє собою електричне коло з рівномірно розподіленими параметрами: опором $z_0 = r_0 + jx_0$ і провідністю $y_0 = g_0 + jb_0$ незмінними по довжині кола.

ЛЕП з номінальною напругою ($U_{ном}$) 330 ÷ 750 кВ називають лініями надвисокої напруги, або міжсистемними зв'язками, або дальніми ЛЕП надвисокої напруги. Вони характеризуються великою довжиною (понад 500 км) і великою потужністю, (більше 500 МВ · А) на одне коло.

У лініях надвисокої напруги з'являється необхідність в тій чи іншій мірі враховувати хвильовий характер передачі електроенергії. При цьому аналіз роботи подібних електропередач повинен ґрунтуватися на представленні лінії довжиною як кола з розподіленими параметрами (рис. 4), де кожен малий елемент довжини dl має активний R_{0dl} і індуктивний $X_0 dl$ опори, а також активну G_{0dl} і ємнісну B_{0dl} провідності.

Будемо вважати, що параметри лінії (активний і індуктивний опори, активна і ємнісна провідності) рівномірно розподілені вздовж її довжини.

Схема заміщення лінії електропередач великої довжини представлена на рис. 5.

Струм і напруга в лінії безперервно змінюються по її довжині: струм через наявність провідності, а напруга за рахунок падіння напруги в опорі. Зміни напруги і струму при хвильовому характері передачі енергії по лінії описуються відомими з курсу основ електротехніки рівняннями довгої лінії, які при кінцевій довжині лінії дають співвідношення між напругами U_1 і U_2 і струмами I_1 і I_2 на початку і в кінці лінії:

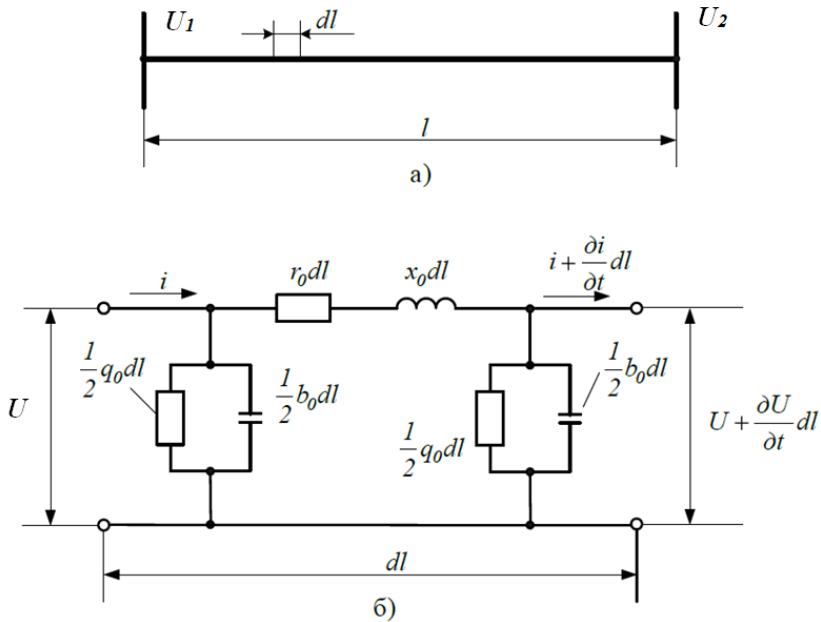


Рисунок 5 - Лінія з розподіленими параметрами:

а - виділення елемента довжини dl ; б - схема заміщення елемента довжини.

Зміни напруги і струму в таких лініях описуються рівностями:

$$U_1 = U_2 \operatorname{Ch} \gamma_0 l + \sqrt{3} I_2 Z_C \operatorname{Sh} \gamma_0 l, \quad (10)$$

$$I_1 = I_2 Ch\gamma_0 l + \frac{I}{\sqrt{3} \cdot Z_C} \cdot U_2 \cdot Sh\gamma_0 l, \quad (11)$$

де l - довжина лінії, км;

Z_C - хвильовий опір лінії, Ом;

γ_0 - коефіцієнт розповсюдження електромагнітної хвилі, 1/км;

α_0 - коефіцієнт затухання хвилі струму або напруги, 1/км;

β_0 - коефіцієнт фази хвилі напруги або струму при її розповсюдженні;

$Sh\gamma_0 l$, $Ch\gamma_0 l$ - гіперболічний синус і косинус (відповідно) аргументу $\gamma_0 l$.

В свою чергу гіперболічний синус і косинус:

$$Sh\gamma_0 l = \frac{1}{2}(e^{\alpha_0 l} e^{\beta_0 l} - e^{-\alpha_0 l} e^{-\beta_0 l});$$

$$Ch\gamma_0 l = \frac{1}{2}(e^{\alpha_0 l} e^{\beta_0 l} + e^{-\alpha_0 l} e^{-\beta_0 l}). \quad (12)$$

Передача електроенергії пов'язана з поширенням результуючих хвиль струму і напруги, що біжать, кожна з яких для зручності представляють двома хвилями, що біжать - прямою і зворотною. При навантаженні, опір якого дорівнює хвильовому, швидкість хвилі близька до швидкості світла. Передача активної потужності по лінії відбувається за рахунок руху результуючих хвиль напруги і струму. Як пряма, так і зворотна хвиля несе активну і реактивну потужність. У реальних лініях перенесення потужності супроводжується її втратами, що знаходить відображення в зміні амплітуди результуючих хвиль струму і напруги при їх пересуванні вздовж лінії зі швидкістю v . Останнє показано на рис. 6.

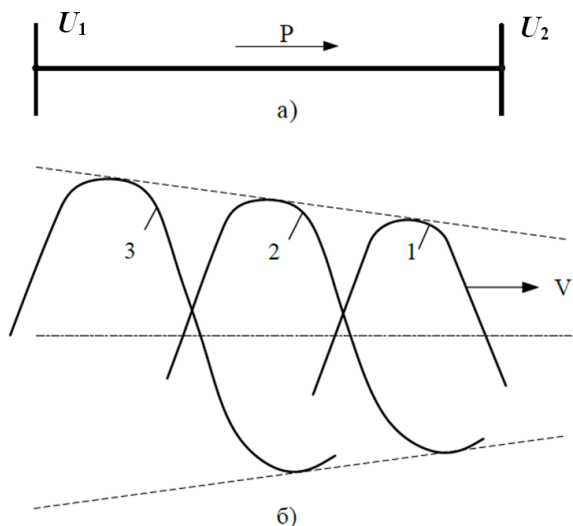


Рисунок 6 - Хвильовий характер передачі електроенергії:
 а - напрям передачі потужності по лінії; б - поширення хвилі струму зі швидкістю v уздовж лінії;

1 - результуюча хвиля в певний момент часу t_1 ;

2 і 3 - відповідно для подальших моментів часу t_2 і t_3 , $t_2 < t_3$.

Пропускна здатність лінії електропередавання збільшується зі збільшенням номінальної напруги лінії. При даній нарузі вона визначається трьома умовами:

а) економічністю електропередавання, яка залежить від величин втрат електричної енергії в лінії;

б) рівнями напруг на початку та в кінці лінії електропередавання, які залежать від величин падіння напруги в лінії;

в) стійкістю паралельної роботи генераторів електростанцій енергосистеми.

Зі збільшенням дальності передавання пропускна здатність лінії знижується, що обумовлюється величинами поз-

довжнього кута δ між напругами, яка передається і яка приймається.

Бажання передавати значні потужності на великі відстані призводить до необхідності підвищення пропускну здатності шляхом застосування спеціальних засобів, як, наприклад, компенсація параметрів лінії, штучне підвищення стійкості паралельної роботи генераторів.

Споживання активної потужності електроприймачами пов'язано зі споживанням ними також і реактивної потужності (трансформатори, електродвигуни).

Передача по лінії реактивної потужності збільшує втрати напруги і енергії.

На величину реактивної потужності при електропередаванні впливає зарядна потужність лінії. В лініях напругою 500, 750 кВ великої довжини вона досягає дуже значних величин, в результаті чого видача реактивної потужності від генераторів енергосистеми в лінію виключається, а надлишкова реактивна потужність в лінії компенсується реакторами.

Як уже відмічалось, зарядна потужність лінії не залежить від навантаження у ній.

Втрати ж реактивної потужності в індуктивному опорі лінії пропорційні квадрату потужності, яка передається. При деякій величині потужності, що передається по лінії, може виникнути такий випадок, коли втрати реактивної потужності в індуктивному опорі лінії і її зарядна потужність будуть повністю компенсувати одна одну, тобто

$$3I^2 x_0 = 3U^2 b_0. \quad (13)$$

Якщо при цьому по лінії буде передаватись тільки активна потужність ($\cos\varphi = 1$), то передача буде відбуватись з найменшими втратами потужності. Такий режим називається

режимом натуральної потужності.

Натуральна потужність ЛЕП - активна потужність, що передається по ЛЕП, при якій зарядна потужність ЛЕП дорівнює втратам реактивної потужності в ній.

Натуральна потужність лінії визначається за формулою:

$$P_{\text{нат}} = \frac{U^2}{Z_{\phi}} = \frac{U^2}{\sqrt{L_0 / C_0}}, \text{ Вт}; \quad (14)$$

де L_0 і C_0 - індуктивність і ємність одиниці довжини лінії, Гн/км , Ф/км ;

Z_{ϕ} - хвильовий опір лінії, Ом .

До параметрів рухомої хвилі відносяться фазова швидкість v , довжина хвилі λ , хвильова довжина лінії $\lambda_{\text{хв}}$, хвильовий опір Z_c . Розглянемо докладніше ці параметри.

1. Фазова швидкість

$$v = \frac{\omega}{\alpha} = \frac{f}{\alpha_0}, \frac{\text{рад} / \text{с}}{\text{рад} / \text{км}} \text{ або } \frac{\text{град} / \text{с}}{\text{град} / \text{км}}, \quad (15)$$

де ω - кутова швидкість;

α_0 - коефіцієнт зміни фази, що характеризує поворот вектора напруги або струму (на одиницю довжини) при поширенні хвилі вздовж лінії

$$\alpha_0 = 0,06 \div 0,065 \text{ град} / \text{км}.$$

2. Довжина хвилі (км) - це відстань між двома сусідніми точками на лінії, фази коливань яких розрізняються на 2π . Приймаючи $\alpha_0 = 0,06$ град / км, можна знайти довжину хвилі напруги і струму:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\alpha_0}; \quad (16)$$
$$\lambda = \frac{360}{0,06} = 6000 \text{ км}.$$

3. Хвильова довжина лінії - (град або радіан) визначається за формулою (якщо виразити α_0 через довжину хвилі λ):

$$\lambda_{XB} = \alpha_0 \cdot l = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot l. \quad (17)$$

Хвильова довжина лінії характеризує зміну фази напруги або струму при поширенні хвилі від кінця до початку ліній довжиною l .

Хвильова довжина λ_{XB} не тотожна її геометричній довжині l і, так само як і α_0 , змінюється при зміні частоти f і швидкості поширення хвилі v .

4. Хвильовий опір

$$Z_{XB} = \sqrt{\frac{R_0 + jX_0}{G_0 + jB_0}} = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} = Z_{XB} \cdot l^{-j^{\xi-c}} \quad (18)$$

де ξ - аргумент хвильового опору [зазвичай негативний (його значення змінюється в межах 1-2 °)].

Хвильовий опір для повітряних високовольтних ліній знаходиться в межах 375...400 Ом/км, а кабельних 35...40 Ом/км. Наприклад, натуральна потужність повітряної лінії напругою 35 кВ – 3 000 кВт, 110 кВ – 30 000 кВт [6].

Натуральна потужність для різних класів ПЛ наведена в таблиці 1. Формула показує, що натуральну потужність можна збільшити за рахунок збільшення ємності і зниження індуктивності лінії.

На практиці цього домагаються наступними заходами:

- додавання додаткових проводів на фазу;
- підвищення розміру пучка для кожної фази ;
- використання асиметричних пучків;
- зменшення відстані між фазами.

Таблиця 1 - Натуральна потужність для різних класів ПЛ

Номинальна напруга, кВ	Натуральна потужність ПЛ, МВт	Граничне значення довжини ПЛ, км
110 (157)	30	80
220	135	250
330	360	400
500	900	500
750	2100	1000

При передаванні по лінії потужності, що більше натуральної, напруга по довжині лінії зменшується, а при потужності менше натуральної - напруга до кінця лінії збільшується.

ЛЕП напругою 500, 750кВ розраховуються на передавання натуральних потужностей, лінії меншої напруги – на передавання потужностей, які перевищують натуральну.

Визначення питомих параметрів схем заміщення повітряних ЛЕП з розщепленими фазами.

Питомий активний поздовжній опір фази:

$$R = \frac{\rho}{n \cdot F}, \quad (15)$$

де n - число проводів у фазі;

F - переріз одного проводу, мм²;

ρ - питомий опір провідника (для сталевалюмінієвих проводів $31,5 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{км}}$).

Питомий індуктивний поздовжній опір фази

$$x_0 = 0,144 \cdot \lg \frac{D_{CP}}{r_{EKB}} + \frac{0,016}{n}, \text{ Ом/км},$$

де D_{CP} - середньо геометрична відстань між фазами (для горизонтального розміщення фаз $D_{cp.z} = \sqrt[3]{2}D = 1,26D$,

де D - відстань між сусідніми фазами;

$r_{екв}$ - еквівалентний радіус фази, що визначається за формулою [2]:

$$r_{екв} = \sqrt[n]{r \prod_{i=2}^n a_{1i}} = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot r_p^{n-1}}, \quad (16)$$

де r - радіус одного провода;

a_{1i} - відстань між проводами 1 та i фази;

r_p - радіус розщеплення (радіус фази).

Відповідна ілюстрація надана на рис. 7.

Питома ємнісна поперечна провідність фази:

$$Y_0 = \frac{7,58}{lg \frac{D_{cp.r}}{r_{екв.}}} \cdot 10^{-6}. \quad (17)$$

У формулах опори виражені в Ом / км, провідності - в См / км.

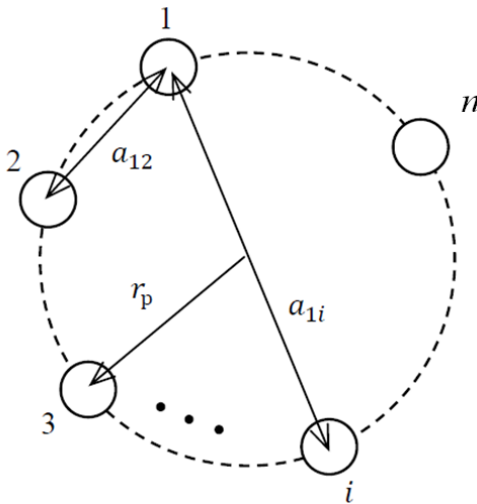


Рисунок 7- Ілюстрація до визначення еквівалентного радіуса фази.

Таблиця 2 - Довідникові дані сталелегуючих проводів

Номінальний переріз, мм ²		Діаметр проводу, мм	Питомий активний опір, Ом / км
алюміній	сталь		
240	39	21,6	0,124
240	56	22,4	0,122
300	39	24,0	0,098
300	67	24,5	0,103
330	30	24,8	0,088
330	43	25,2	0,089
400	18	26,0	0,078
400	51	27,5	0,075
400	93	29,1	0,072
450	56	28,8	0,068
500	27	29,4	0,061
500	64	30,6	0,060

Послідовність виконання роботи.

1. Визначити розрахункові параметри:

($r_{екв}$ (формула 5); x_o (формула3), C_o (формула7), b_o (формула 8).

ЛЕП напругою 150 кВ, яка виконана проводом АС-205/27, діаметр проводу 19,8 мм, $r_o=0,14$ Ом/км.

Довжина лінії 150 км.

Розміщення фаз трикутником, $D_{СЕР}=4м$.

При виконанні розрахунків прийняти:

- масштаб опору моделі ЛЕП $m_z = Z_n : Z_{mod} = 1 : 5 = 0,2$;

- масштаб по напрузі $m_U = U_{фл} : U_{mod} = 500$;

- масштаб по струму і по потужності

$$m_I = m_U : m_Z ; m_P = m_U \cdot m_I .$$

За формулою (14) визначити натуральну потужність, ($\cos\varphi = 1$) і $U_2 = U_H = 150\text{кВ}$;

Визначити величини напруг U_{mod} і струму I_{mod} в окремих точках лінії через кожні 30 км.

Початок замірів здійснювати з кінця лінії для режимів холостого ходу і навантаження, п. 2-4.

Результати занести до таблиці 3.

Таблиця 3 – Відомості про величини струмів і напруг в залежності від довжини.

	Довжина лінії, км					
	150	120	90	60	30	0
$U_{mod}^{x.x}$, В						
$I_{mod}^{x.x}$, МА						
$U_{mod}^{нав.}$, В						
$I_{mod}^{нав.}$, МА						
$U_{op.}^{x.x}$, В						

$I_{op.}^{x.x.}, A$						
$U_{op.}^{нав.}, B$						
$I_{op.}^{нав.}, A$						
$P_{op.}, kBA$						

2. Зняти показники напруги і струму в режимі холостого ходу.

Тумблер S вимкнений. Встановити в кінці моделі лінії $U_{2mod} = 173 B$.

Записати дані приладів.

Заміряти напругу в контрольних точках від кінця лінії - 150, 120, 90, 60, 30, 0 км і занести в таблицю 3.

3. Дослідити зміну напруги при навантаженні. Включити тумблер S , струм навантаження моделі $I_{nm} \approx 94 mA$. Заміряти напругу і струм в контрольних точках. Дані замірів записати в таблицю 3.



Рисунок 8 – Модель лабораторної установки.

4. Побудувати залежність зміни напруги для оригіналу лінії: $U_{ор.}^{x.x.} = f(l), U_{ор.}^{нав.} = f(l),$

$$\text{де } U_{ор} = U_{мод} \cdot m_U.$$

Побудувати залежність зміни струму для оригіналу лінії: $I_{ор.}^{x.x.} = f(l), I_{ор.}^{нав.} = f(l),$

$$\text{де } I_{ор} = I_{мод} \cdot m_I.$$

5. Проаналізувати зміну зарядного струму вздовж лінії в різних режимах (див. табл. 3).

6. Проаналізуйте зміну відношення $P_{ор} / P_{нат}.$

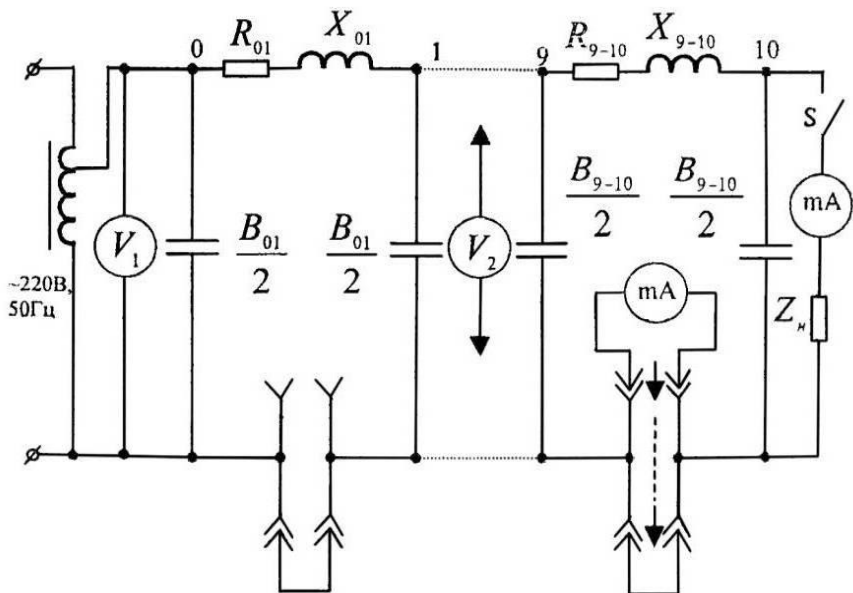


Рисунок 9 – Схема лабораторної установки.

Контрольні питання.

1. Які особливості розрахунку лінії електропередавання великої довжини напругою 110 кВ і вище?
2. Як визначаються питомі поздовжні і поперечні параметри лінії електропередавання?
3. Який вплив на режим роботи лінії дальнього електропередавання створює реактивна провідність?
4. Який характер має реактивна провідність лінії, чим вона обумовлена?
5. Що таке зарядна потужність лінії? Який вплив вона справляє на режим роботи лінії?
6. З якою метою здійснюється розщеплення фаз на ЛЕП високих напруг?
7. Яким чином компенсується надлишкова реактивна потужність ЛЕП?
8. Який режим роботи лінії називається режимом натуральної потужності?
9. Від чого залежить пропускна здатність ЛЕП?
10. Чим пояснюється підвищення напруги в ЛЕП 150 кВ в кінці, при роботі на холостому ході?
11. В яких випадках напруга в кінці лінії збільшується, а в яких зменшується?
12. Що таке транспозиція проводів і для чого вона здійснюється?

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Х.: Видавництво «Форт», 2017. - 760 с.
2. Ананичева С. С. Передача електроенергії на більшіє відстані: Учебне посібне / С. С. Ананичева, П. І. Бартоломей, А. Л. Мызин; изд. 3-є, исправл.– Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 85 с.
3. Бутенко В.А. Техніка високих напруг: учебне посібне/ В. А. Бутенко, В. Ф. Важов, Ю. І. Кузнецов, Г. Е. Куртенков, В. А. Лавринович, А. В. Мытников, М. Т. Пичугина, Е. В. Старцева – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 119 с.
4. Важов В. Ф. Техніка високих напруг: курс лекцій / В. Ф. Важов, В. А. Лавринович. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 150 с.
5. Степанчук К. Ф. Техніка високих напруг/ К. Ф. Степанчук, Н. А. Тиняков: Учебн.посібне для електроенергет. спец. вузов – 2-є изд., перераб. и доп. – Минск: высш. школа, 1982. – 367 с., ил.
6. Будзко И. А. Электроснабжение сельского хозяйства / И. А. Будзко, Н. М. Зуль – М.: Агропромиздат, 1990 – 495 с.
7. Козирський В. В. Електропостачання агропромислового комплексу: підруч. / Козирський В. В., Каплун В. В., Волошин С. М. – К.: Аграрна освіта , 2011. – 448 с.
8. Притака І. П. Електропостачання сільського господарства. – К.: Вища школа. 1983. – 343с.
9. Федін В. Т. Електропередачі перемінного тока підвищеної потужності./ В. Т. Федін, Ю. Д. Головач, Г. І. Селіверстов, М. С. Чернецкий – Минск: Навука і тэхніка, 1993. – 224 с.

10. Черкасова Н. И. Электропитающие системы и электрические сети/ Н. И.Черкасова: Учебное пособие для студентов специальности 140211 всех форм обучения /Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2010. – 202 с.

11. Чехов В. И. Пути и способы повышения пропускной способности линий электропередачи/ В. И. Чехов. – М.: МЭИ, 1991. – 56 с.

12. <http://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/1257-meroprijatija-po-povysheniju.html> Дата звертання 20.08.2020.

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Методичні вказівки

до виконання лабораторної роботи
«Дослідження ліній електропередавання
великої довжини напругою понад 110 кВ»

Автори-укладачі:

ПОПАДЧЕНКО Світлана Анатоліївна
САВЧЕНКО Олександр Анатолійович

Формат 60×84/16. Гарнітура Times New Roman
Папір для цифрового друку. Друк ризографічний.

Ум. друк. арк. 0,6. Наклад 100 пр.

Державний біотехнологічний університет
61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44

