

**ДЕРЖАВНИЙ ЗАКЛАД «ПІВДЕННОУКРАЇНСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ К. Д. УШИНСЬКОГО»**

Фізико-математичний факультет

Кафедра фізики

Волчок Наталя

**НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК ДИСЦИПЛІНИ
«ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І РАДІОТЕХНІКА»**

РОЗРАХУНОК ЛАНЦЮГІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

*для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
спеціальності 014 Середня освіта (Фізика)*

Одеса – 2023

*Рекомендовано до друку вченою радою
Державного закладу «Південноукраїнський національний педагогічний
університет імені К. Д. Ушинського» (протокол № 12 від 25 травня 2023 р.)*

Рецензенти:

Ю. А. Ніцук - доктор фізико-математичних наук, професор, декан факультету математики, фізики та інформаційних технологій Одеського національного університету імені І. І. Мечнікова.

В. Я. Гоцунський - доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри фізики та астрономії Одеського національного університету імені І. І. Мечнікова.

Волчок Н. А. Навчальний посібник з дисципліни «Електротехніка і радіотехніка». Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського, 2023. 71 с.

Навчальний посібник до практичних занять та організації самостійної роботи навчальної дисципліни «Електротехніка і радіотехніка» містять основні закони електричного струму, методи розрахунку, контрольні запитання і задачі.

Рекомендовано для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 014 Середня освіта (Фізика) з метою закріплення, поглиблення й узагальнення знань, одержаних під час навчання.

© Університет Ушинського, 2023

© Волчок Н.А.

ПЕРЕДМОВА

Метою освітньої програми Середня освіта (фізика) в Університеті Ушинського є формування та розвиток загальних та професійних компетентностей у студентів в галузі освіти, фізики, педагогіки та психології, що направлені на здобуття ними знань, вмінь і навичок успішної роботи в сфері викладання фізики у середній школі, технікумах, коледжах, професійних училищах на рівні достатньому, щоб бути відповідальним, соціально мобільним та затребуваним на ринку праці.

Програма дозволяє всебічно вивчити фізичні об'єкти і процеси на всіх структурних рівнях організації матерії, найбільш загальні закономірності, які описують властивості, різні форми руху і будови матерії, методи дидактичної подачі матеріалу з фізики та інформатики, методи тестування знань, комп'ютерні програми для активізації навчального процесу, прикладне програмне забезпечення, як для моделювання фізичних процесів, так і для підготовки документів, презентацій, обробки відеозображень.

Програма розвиває навички практичного опанування сучасних методів викладання фізики за допомогою комп'ютерних технологій, органічно поєднує теоретичний матеріал з практичними та дидактичними методами підготовки учбового матеріалу з фізики та інформатики за допомогою сучасних ІТ технологій.

Дисципліна «Електротехніка», є фундаментальною дисципліною, у зв'язку з якою вивчаються всі інші професійно-орієнтовані дисципліни спеціальності.. Це зумовлено тим, що сучасна електрифікація, починаючи з отримання електричної енергії і закінчуючи її перетворенням у інші види, базується головним чином на застосуванні різноманітних електричних і електромагнітних пристроїв. Тому задачею даного навчального посібника є навчання здобувачів вищої освіти основам електротехніки з метою підготовки їх як до вивчення інших дисциплін електротехнічного спрямування, так і до практичної діяльності.

Особливе значення при вивченні електротехніки мають знання фізичних явищ та законів, зокрема, семи електромагнітних явищ: електризації тіл, взаємодії

зарядів, електричного струму, теплової дії електричного струму, електромагнетизму, електромагнітної індукції, електромагнітної сили. Тому в навчальному посібнику наведені основні відомості про ці явища та закони.

На базі вказаних явищ і законів розглядаються електричні кола постійного та синусоїдного струмів, а також елементарні магнітні кола, які знаходяться у основі будови будь-якого електротехнічного пристрою. Наводяться основні співвідношення між фізичними величинами у зазначених колах та методи розрахунку вказаних кіл.

У навчальному посібнику розглянуто основні види електричних машин постійного та змінного синусоїдного струмів, а також трансформаторів. Наведено їх конструктивні схеми, описано будови та принципи дій, енергетичні діаграми, розглянуто основні принципи керування ними. Розглянуто основні елементи та принципи електропостачання.

Навчальний посібник написаний таким чином, щоб здобувачі вищої освіти мали можливість самостійно вивчати курс електротехніки. Для цього матеріал викладається так, що поряд з теоретичними положеннями наводиться їх практичне застосування для розв'язання задач. В кінці кожного розділу теми даються запитання і завдання для самоконтролю.

Для успішного вивчення курсу електротехніки необхідно послідовно і ритмічно виконувати програму вивчення, прагнучі повного розуміння викладеного матеріалу, не міняючи жодного розділу, тому що курс даної дисципліни є цілним та безперервним.

ВСТУП

Сьогодні без електроенергії ми не можемо уявити своє життя, хоча ще зовсім недавно, за історичними мірками, поняття «електрика» було невідомим і не зрозумілим для людства. Завдяки електроенергії забезпечується нормальний побут в оселях, вирощується врожай на сільській ниві, плавиться метал в печах; без електроенергії не зможе розвиватися практично жодна з сучасних галузей народного господарства: атомні станції, військові комплекси, фабрики, заводи, ферми, дослідні інститути, лікарні – всі вони використовують електричну енергію. Електрична енергія живить ЕОМ, верстати, освітлювальні прилади в хірургічних відділеннях, апарати, які підтримують штучне дихання, електропотяги і міський транспорт, банківська система і зв'язок, телебачення тощо. Раптове зникнення електрики в сучасному світі спричинило б величезну катастрофу.

Перші наукові узагальнення про магнітні та електричні явища, про існування магнітного поля Землі здійснено У. Гілбертом у 1600 році у праці «Про магніт, магнітні тіла та про великий магніт Землю».

У 1650 році Отто Геріке побудував першу електростатичну машину.

Приблизно через століття Дюфе відкрив існування двох родів електричних зарядів: скляного і смоляного, а Е.Ю. фон Клейст і П. ван Мушенбрук створили лейденську банку (перший конденсатор).

Найбільше фундаментальних відкриттів здійснено у 19 сторіччі плеядою науковців різних країн, у тому числі й вітчизняних. У 1785 році Кулон винайшов крутильну вагу, завдяки якій встановив закон взаємодії електричних зарядів (Закон Кулона), Вольта створив гальванічний елемент. 1820 рік можна відзначити цікавими публікаціями Ерстеда про дію магнітного поля на магнітну стрілку; Ампера про взаємодію струмів (закон Ампера); Араго про створення магнітного поля провідником, у якому протікає струм та ін.

Фундаментальні відкриття Фарадея, Ома, Ленца, Якобі, Джоуля, Кірхгофа, Максвелла, Зеебека та ін. створили теоретичне підґрунтя для використання електромагнітних явищ у практичних цілях.

Саме практичному застосуванню законів електромагнетизму присвятили низку відкриттів вітчизняні науковці та інженери, до яких можна віднести Б.С. Якобі, А.Г. Столетов, А.Н. Лодигін, П.Н. Яблочков, М.О. ДоливоДобровольський та ін. Так, Доливо-Добровольський уперше в 1888-1889 р.р. здійснив відкриття системи трифазного струму, створив трифазний трансформатор та асинхронний двигун, якими користується людство по цей день.

Електроенергія має переваги серед інших видів енергії завдяки зручності її виробництва, передачі, керуванню, екологічності та ін. Її використовують у промисловості, сільському господарстві, транспорті, побуті, соціальній сфері тощо. Без електрики неможливі успіхи в медицині, біології, екології інших галузях науки.

Одним з критеріїв за якими визначають рівень розвиненості країни є кількість споживаної електричної енергії. Останніми роками виробництво електричних потужностей на особу в США становить 10 кВт., у світі 5 кВт., в Україні – приблизно 7 кВт., а до кінця століття, за прогнозами фахівців, цифри подвояться.

Виробництво електроенергії здійснюється на електростанціях, що працюють переважно на невідновлювальних джерелах (органічному та ядерному паливі): вугільних, мазутних, газових, газо-мазутних, атомних. Природне паливо вичерпується досить швидкими темпами, тому перспектива за електростанціями, що працюють на відновлювальних джерелах енергії: вітер, Сонце, вода, біовідходи тощо.

Від електростанцій до споживачів електричну енергію доставляють лініями електропередач (ЛЕП). ЛЕП являє собою складну систему керування, розподілу та передачі енергії. До її складу входять провідники, трансформатори та система керування.

Наука, що вивчає питання практичного застосування електромагнітних явищ у процесі виробництва, передачі, розподілу та використання електричної енергії, називається електротехнікою.

В даний час нам добре відомо, що між електричними і магнітними явищами існує нерозривний зв'язок, і це положення лежить в основі всього сучасного навчання про електромагнітні явища. Однак до такого переконання наукова думка прийшла лише в підсумку тривалого нагромадження досвідчених фактів, і протягом довгого часу явища електричні і явища магнітні розглядалися як самостійні, що не мають між собою зв'язку. Перший докладний науковий твір про магнітні й електричні явища, що належить У. Гільберту, вийшов у 1600 р. У цій праці У. Гільберт прийшов, однак, до неправильного висновку, що електричні і магнітні явища не мають між собою зв'язку.

Подібність між механічною взаємодією електрично заряджених тіл і механічною взаємодією полюсів магнітів привело до спроби однаково пояснити ці явища. Виникло представлення про позитивну і негативну магнітні маси, розділених на кінцях магніту і які є причиною магнітних дій. Однак подібне припущення, як тепер відомо, не відповідає фізичній природі магнітних явищ.

Воно виникло історично за аналогією з представленням про позитивну і негативну електрику, що відповідає фізичній сутності електричних явищ. Відповідно до сучасних представлень, електричний заряд будь-якого тіла утворюється сукупністю зарядів, що знаходяться в безупинному русі позитивно або негативно заряджених елементарних часток – протонів, електронів і т.п.

Кількісні співвідношення, що характеризують механічні взаємодії електрично заряджених тіл і механічні взаємодії магнітних мас полюсів магніту, першим опублікував у 1785 р. Ш.О. Кулон. Він же звернув увагу на істотне розходження між магнітними масами й електричними зарядами.

Розкриття дійсної природи магнітних явищ відноситься до початку позаминулого сторіччя. Цей період знаменується рядом чудових відкриттів, що встановили найтісніший зв'язок між явищами електричними і явищами магнітними.

У 1819 р. Х.К. Ерстед здійснив свої досліди, у яких він знайшов механічний вплив електричного струму на магнітну стрілку. У 1820 р. А. М. Ампер показав, що соленоїд зі струмом по своїм властивостям аналогічний магніту, і висловив думку,

що й у випадку постійного магніту дійсною причиною виникнення магнітних дій є також електричні струми, що замикаються по деяких елементарних контурах всередині тіла магніту. Ці ідеї знайшли конкретне вираження в сучасних представленнях, згідно яким магнітне поле постійного магніту обумовлено елементарними електричними струмами, що існують у речовині магніту та еквівалентними магнітними моментами утворюючих речовину елементарних часток. Зокрема, ці елементарні струми є результатом обертання електронів навколо своїх осей, а також обертання електронів по орбітах в атомах.

Усіма згаданими дослідженнями було встановлено найважливіше положення, що рух електрично заряджених часток і тіл завжди супроводжується магнітними явищами. Цим само вже було показано, що магнітні явища не представляють собою, як думав У. Гільберт, чого-небудь самостійного, ніяк не зв'язаного з явищами електричними.

У 1831 р. М. Фарадей повідомив про відкриття явища електромагнітної індукції. Він знайшов виникнення електричного струму в контурі, що рухається відносно магніту чи відносно іншого контуру зі струмом. Таким чином, було показано, що й електричні явища можуть виникати як наслідок процесів, що відносяться до області магнітних явищ.

У 1833 р. російський академік Е. Х. Ленц сформулював вперше надзвичайно важливе положення, у якому встановлювалася спільність і оборотність явищ, відкритих Х.К. Ерстедом і М. Фарадеєм. У цьому положенні була закладена основа важливого принципу оборотності електричних машин. Е. Х. Ленц установив правило визначення напрямку індукованого струму, що виражає фундаментальний принцип електродинаміки – принцип електромагнітної інерції.

У зв'язку з усіма цими відкриттями необхідно особливо відзначити основну ідею, який незмінно керувався у своїх дослідженнях Фарадей і яка була розвита в працях академіка В. Ф. Міткевіча, — ідею про фізичну реальність процесу, що відбувається в просторі між електрично зарядженими тілами і між контурами з електричними струмами. Згідно з цими представленнями взаємодія заряджених тіл,

а також взаємодія контурів зі струмами здійснюється за посередництвом навколишнього їх електромагнітного поля, що є особливим видом матерії.

Заслуга створення теорії електромагнітного поля належить Д.К. Максвеллові, що виклав її в класичній праці "Трактат про електрику і магнетизм", що вийшли в 1873 р. Цей трактат містить виклад у математичній формі і подальше поглиблення і розширення основних фізичних ідей М. Фарадея.

У загальній сукупності теоретичних проблем, що відносяться до області електромагнітних явищ, усе більший розвиток одержує теорія електричних і магнітних ланцюгів. В основі теорії електричних ланцюгів лежать закони, встановлені Г.С. Омом (1827 р.), Д.П. Джоулем (1839 р.), Е.Х. Ленцем (1844 р.) і Г.Р. Кірхгофом (1845 р.).

В даний час, у зв'язку з надзвичайним ускладненням електроенергетичних систем, радіотехнічної й електровиміральної апаратури, систем автоматичного контролю і керування, швидкодіючих електронних обчислювальних машин, виникає необхідність створення узагальнених методів аналізу, при яких цілі комплекси елементів електричного кола, що є частинами цих складних систем і виконуючі визначені функції, розглядаються за допомогою їх узагальнених параметрів. Такими комплексами елементів кіл є, наприклад, генеруючі, передавальні або перетворюючі електромагнітну енергію пристрої в електроенергетичних системах, генератори, підсилювачі і перетворювачі сигналів у системах радіо- і телепередачі дротового зв'язку, електричних вимірів і автоматичного контролю, у блоках, що здійснюють диференціювання, інтегрування і виконуючі логічні операції в електронних обчислювальних машинах тощо.

Мета навчальної дисципліни «Електротехніка і радіотехніка».

- Метою викладання навчальної дисципліни є вивчення теорії електричних та магнітних кіл та полів і їх прояв у різних пристроях техніки, засвоєння сучасних методів моделювання електромагнітних процесів, синтезу і розрахунку електричних кіл, знання яких необхідно для розуміння і успішного розв'язання інженерних проблем майбутньої спеціальності.
- Основними завданнями вивчення дисципліни є змога аналізувати процеси в необхідних електротехнічних пристроях, вміти розрахувати їх кола і правильно експлуатувати.
- прищеплення навичок критичного мислення, необхідних при вирішенні професійних задач;
- формування уміння самостійно здобувати знання і користуватися літературою з електротехніки і радіотехніки;
- формування творчого (нестандартного) підходу до вирішення методичних проблем.

Очікувані результати навчання дисципліни.

знати:

- основні фізичні закони електрики;
- основні закони електричних і магнітних кіл, а також закони в диференціальній формі для електричних і магнітних полів;
- основи теорії електричних і магнітних кіл; - електрофізичні поняття і визначення електромагнітних явищ;
- основи теорії електромагнітного поля;
- методи розрахунку та аналізу усталених і перехідних процесів в електричних і магнітних колах та полях;
- основи синтезу електричних кіл;
- ДСТУ на позначення електричних величин, елементів кіл, а також електротехнічну термінологію та символіку.

уміти:

- виконувати розрахунки електричних та магнітних кіл;
- складати електричні кола за їх принциповими чи монтажними схемами;
- виконувати вимірювання основних електричних величині;
- мати практичні навички вмикання електротехнічних приладів, апаратів;
- знаходити у складних електротехнічних пристроях відомі їм явища і для їх дослідження
- застосовувати отримані ними при вивченні дисципліни знання;
- розуміти принцип роботи електротехнічного пристрою за його схемою;

Міждисциплінарні зв'язки: фізика, диференціальне числення, векторна алгебра, теорія поля, математичний аналіз, диференціальні та інтегральні рівняння, теорія ймовірностей і математична статистика, інформатика.

Засоби діагностування результатів навчання

Оцінювання: індивідуальне опитування, колективна співбесіда, перевірка виконання лабораторних завдань, письмове опитування.

ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

І семестр

Змістовий модуль 1.

Тема 1. ВСТУП. ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ТА ЙОГО СКЛАДОВИХ.

- 1.1. Поняття дисципліни „ТОЕ”.
- 1.2. Основні галузі електротехніки.
- 1.3. Коротка історія розвитку електротехніки (основні етапи).
- 1.4. Струм, напруга, ЕРС та їх позитивні напрямки.
- 1.5. Основні визначення, елементи, параметри електричних кіл.
- 1.6. Класифікація електричних кіл.
- 1.7. Топологічні поняття.

Тема 2. ОСНОВНІ ЗАКОНИ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ. РОЗРАХУНОК КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ОДНИМ ДЖЕРЕЛОМ ЕНЕРГІЇ

- 2.1. Закон Ома
 - 2.1.1 Закон Ома для пасивної ділянки електричного кола.
 - 2.1.2 Закон Ома для ділянки, що містить ЕРС.
 - 2.1.3 Закон Ома для нерозгалуженого електричного кола.
- 2.2. Закони Кірхгофа.
- 2.3. Застосування рівнянь Кірхгофа до розрахунку розгалужених кіл постійного струму.
- 2.4. Розрахунок кіл постійного струму з одним джерелом енергії. Метод еквівалентних перетворень кіл.

Тема 3. МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ. ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ТА ТЕОРЕМИ ДЛЯ ЕЛ. КІЛ

- 3.1. Принцип суперпозиції та метод накладання, що базується на ньому.
- 3.2. Теорема про активний двополюсник та метод розрахунку, що базується на ній.

Тема 4. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ОДНОФАЗНОГО СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

4.1. Опори в колах синусоїдного струму: резистивний, індуктивний та ємнісний елементи у колі з синусоїдною напругою.

4.2. Закони електричних кіл у комплексній формі.

4.3. Зв'язок між опором і провідністю довільної пасивної ділянки кола.

4.4. Потужності довільного кола синусоїдного струму.

4.5. Баланс потужностей. Топографічна діаграма.

Тема 5. РЕЗОНАНСНІ ЯВИЩА В ЕЛЕКТРИЧНИХ СТРУМАХ

5.1. Резонанс напруг.

5.2. Резонанс струмів

Тема 6. ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА

6.1. Визначення трифазного кола, способи одержання та зображення трифазної системи ЕРС.

6.2. З'єднання фазних обмоток генератора за схемою «зірка» та «трикутник». Вихідні напруги трифазного джерела живлення.

6.3. Класифікація трифазних приймачів. З'єднання фаз приймачів за схемою «зірка» та «трикутник».

6.4. Методика розрахунку трифазного кола при з'єднанні фаз приймачів за схемою «зірка» при симетричному та несиметричному навантаженні.

6.5. Призначення нейтрального проводу.

6.6. Розрахунок трифазного кола при з'єднанні фаз приймачів за схемою «трикутник» при симетричному та несиметричному навантаженні.

6.7. Потужності у трифазних колах при симетричному та несиметричному навантаженнях.

6.8. Поняття про метод симетричних складових

Тема 7. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПЕРІОДИЧНОГО НЕСИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

7.1. Умови виникнення і визначення несинусоїдних електричних величин ($n . e . v .$).

7.2. Розкладання періодичних $n . e . v .$ в ряд Фур'є.

7.3. Максимальне, діюче і середні значення $n . e . v .$ 10.4. Потужності кола несинусоїдного струму.

7.5. Коефіцієнти, що характеризують форму кривих $n . e . v .$ 10.6. Метод еквівалентних синусоїд.

7.7. Вплив характеру навантаження на форму кривої струму

Тема 8. НЕЛІНІЙНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ТА МЕТОДИ ЇХ РОЗРАХУНКУ

8.1. Визначення нелінійного кола та нелінійного елемента.

8.2. Класифікація та характеристики нелінійних елементів.

8.3. Параметри нелінійних елементів: статичні, диференціальні, динамічні та еквівалентні.

8.4. Загальна характеристика методів розрахунку нелінійних кіл.

8.5. Метод результуючої вольт -амперної характеристики.

Тема 9. МАГНІТНІ КОЛА ПРИ ПОСТІЙНИХ МАГНІТНИХ ПОТОКАХ ТА МЕТОДИ ЇХ РОЗРАХУНКУ

9.1. Визначення, призначення та класифікація магнітних кіл.

9.2. Основні величини, що характеризують магнітні кола .

9.3. Основні характеристики та класифікація феро - магнітних матеріалів.

9.4. Основні закони магнітних кіл.

9.5. Розрахунок нерозгалуженого магнітного кола

9.5.1. Пряма задача.

9.5.2. Зворотна задача.

9.6. Розрахунок розгалуженого магнітного кола. Пряма задача

Тема 10. НЕЛІНІЙНІ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ

10.1. Нелінійні кола змінного струму з нелінійними резистивними елементами. Кусочно-лінійна апроксимація ВАХ реальних діодів і схеми заміщення, що ним відповідають.

10.2. Нелінійні кола змінного струму з нелінійними реактивними елементами.

10.2.2. Процеси в колі з нелінійним дроселем. 10.2.3. Форма основного магнітного потоку та ЕРС в нелінійному дроселі.

10.2.4. Форма і закон зміни струму в нелінійній котушці без врахування явища гістерезису та активного опору котушки.

10.3. Втрати потужності в осерді нелінійного дроселя. 13.4. Векторна діаграма та схеми заміщення нелінійного дроселя з врахування активного опору котушки та магнітного потоку розсіяння.

Тема 11. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

11.1. Електростатичне поле:

11.1.1. Визначення електростатичного поля.

11.1.2. Закон Кулона у векторній формі.

11.1.3. Напруженість поля.

11.1.4. Потенціал. Градієнт потенціалу. Зв'язок потенціала з напруженістю поля.

11.1.5. Потенціал. Градієнт потенціалу. Зв'язок потенціала з напруженістю поля.

11.1.6. Рівняння Пуассона і Лапласа.

11.2. Електричне поле постійного струму в провідному середовищі:

11.2.1. Види струму. Густина струму

11.2.2. Закон Ома, закони Кірхгофа, закон Джоуля-Ленца в диференціальній формі.

11.2.3. Рівняння Лапласа.

11.3. Магнітне поле постійного струму:

11.3.1. Основні поняття і величини, що характеризують магнітне поле.

11.3.2. Закон повного струму.

11.3.3. Закон безперервності магнітного потоку.

11.3.4. Скалярний потенціал магнітного поля. Рівняння Лапласа.

11.3.5. Поняття про векторний магнітний потенціал. Залежність між магнітним потоком і векторним потенціалом.

11.4. Змінне електромагнітне поле.

11.4.1. Перше та друге рівняння Максвелла.

11.4.2. Повна система рівнянь електромагнітного поля в дійсній і комплексній формах.

11.4.3. Баланс енергії електромагнітного поля. Вектор Умова-Пойнтінга.

11.4.4. Поширення електромагнітної енергії вздовж повітряної лінії

1. Лінійні електричні кола. Загальні поняття

1.1. Електричний ланцюг.

Професор Лейденського університету (Голандія) **Мушенбрек** з Лейдена вирішив «накопичити» електричні заряди в скляній посудині.

У 1745 р. він узяв скляну банку, наповнену водою, опустив в неї мідний дріт, з'єднаний з електростатичною машиною, і, взявши банку у праву руку, попросив свого помічника обертати диск машини. Після того, як, на його думку, у банку «налилося» достатня кількість зарядів, він вирішив лівою рукою від'єднати мідний дріт. При цьому він відчув сильний удар електричним струмом.

Абат Полле продемонстрував дослід Мушенбреку французькому королю. Він утворив ланцюг із 180 гвардійців, які взялися за руки, причому перший тримав банку в руці, а останній торкався дроту, витягаючи іскру. Удар відчувся всіма раптово. Десятки людей миттєво скрикували і робили мимовільні рухи подібні до рухів жаб Гальвані. **Від цього ланцюга солдатів і походить термін «електричний ланцюг».**

Електротехніка – це розділ науки і техніки, що вивчає електричні та магнітні ланцюги та їх використання у практичних цілях. По електричних ланцюгах протікають електричні струми.

Електричний струм - це явище спрямованого руху заряджених частинок. Кількісну міру цього руху визначають як **силу струму**. Але в електротехнічних дисциплінах прийнято говорити просто **струм**. Величина струму (сила струму) i визначається як кількість заряду q , що протікає через поперечний переріз провідника в одиницю часу t :

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (1)$$

В результаті розрахунків струм може бути з різними знаками. Струм є позитивним, якщо його обраний напрямок збігається з напрямом руху позитивних

зарядів. Струм може бути постійним (незмінним) або змінним (що змінюються в залежності від часу). Струм вимірюють в **амперах (А)**.

Людина починає відчувати струм у своєму тілі за його величини 0,005 А. Струм 0,05 А є небезпечним для життя.

У люмінесцентній лампі струм - 0,15 А,

у лампі розжарювання – (0,2–1) А,

у холодильнику – (0,5–0,8) А,

у побутових нагрівальних приладах – (2–8) А,

в електродвигуні трамвайного вагона – від 100 А та вище,

в індукторній печі для плавлення алюмінію – 18000 А.

Напруга або різниця потенціалів це кількість енергії W , витраченої на переміщення одиничного заряду з однієї точки електромагнітного поля з потенціалом φ_1 в іншу, з потенціалом φ_2 :

$$u = \frac{\Delta W}{\Delta q} = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (2)$$

Потенціал φ – кількість енергії, витраченої на переміщення одиничного заряду з нескінченності у якусь точку електромагнітного поля. Величина напруги може набувати позитивних і негативних значень.

Напруга позитивна, якщо потенціал точки 1, з якого спрямована стрілка

(рис. 1), вище за потенціал точки 2. Стрілкою на схемах позначають напрямок руху **позитивно** заряджених частинок.

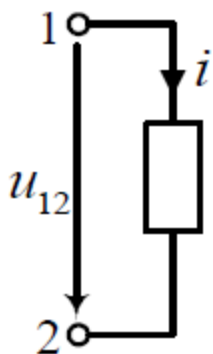


Рис.1. Ділянка електричного ланцюга

Індексація показує напрямок руху заряду від точки з одним індексом до точки з другим індексом (u_{12}) або $(u_{1 \rightarrow 2})$.

Електрорушійна сила (ЕРС) – здатність сил стороннього поля та індуктованого електричного поля викликати електричний струм. Одиниця виміру напруги, потенціалу та ЕРС – **вольт (В)**.

Потужність струму (Р) – це робота струму (А) за одиницю часу:

$$P = \frac{A}{t} = iu$$

(3)

Одиниця виміру потужності (ватт) у загальному випадку: **Вт (W) = В•А**.

Для роботи будь-якого електротехнічного пристрою необхідною умовою є **замкнений контур – електричний ланцюг**. Електричний ланцюг складається з елементів.

Елемент електричного кола – окремий пристрій, який виконує в ланцюзі певну функцію.

Основними елементами електричного ланцюга є **джерела** електричної енергії та її **приймачі** (резистивний, індуктивний та ємнісний елементи) . Крім цих елементів електричний ланцюг може містити **вимірювальні прилади, комутаційну апаратуру, дроти**. Графічно електричний ланцюг зображується як **принципова схема** (circuit diagram) за допомогою умовних символів.

Принципова схема показує взаємозв'язок всіх елементів між собою. На практиці користуються **ідеалізованою принциповою схемою**, що складається з ідеалізованих елементів, і яка відбиває принцип роботи реальної схеми.

Побудова такої схеми проводиться з урахуванням законів електричного струму у їх математичному представленні. Такі схеми називаються **еквівалентними** чи **схемами заміщення**. Елементи електричної схеми поділяються на **активні та пасивні**.

Активними елементами є джерела енергії. Розрізняють джерела ЕРС та джерела струму.

Ідеальне джерело ЕРС – це таке джерело електричної енергії, напруга на затискачах якого не залежить від сили струму, що проходить через нього

(рис. 2а).

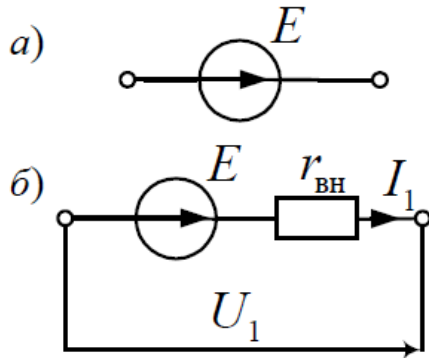


Рис.2. Ідеальне (а) та реальне (б) джерело ЕРС

У реальних джерелах ЕРС сила струму короткого замикання має кінцеве значення, оскільки такі джерела характеризуються наявністю кінцевого внутрішнього опору $r_{вн}$ (рис. 2б).

При рівних значеннях ЕРС джерела з малим внутрішнім опором можуть розвивати в навантаженні потужність більшу, ніж ті, у яких внутрішній опір є великий.

Ідеальне джерело струму – це джерело електричної енергії, сила струму якого залежить від напруги на його затискачах (рисунок 3а).

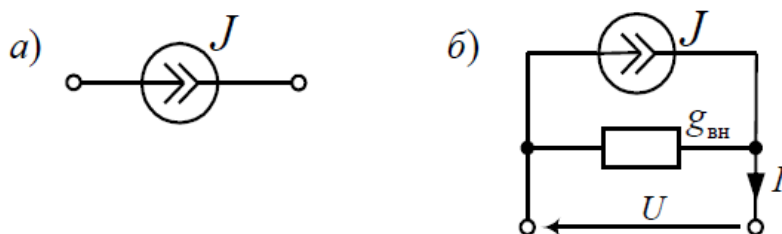


Рис.3. Ідеальне (а) та реальне (б) джерело струму

При розімкнутих затискачах ідеального джерела струму напруга на них досягає нескінченно великого значення. У реальних джерелах струму напруга

холостого ходу на їх затискачі має кінцеве значення, оскільки такі джерела характеризуються кінцевим внутрішнім опором (рис. 3б).

$$r_{вн} = \frac{1}{g_{вн}} . \quad (4)$$

Пасивні елементи – це елементи електричного ланцюга, у яких розсіюється чи накопичується енергія. Розрізняють три ідеалізовані пасивні елементи: **резистивний, індуктивний і ємнісний** (рис. 4).

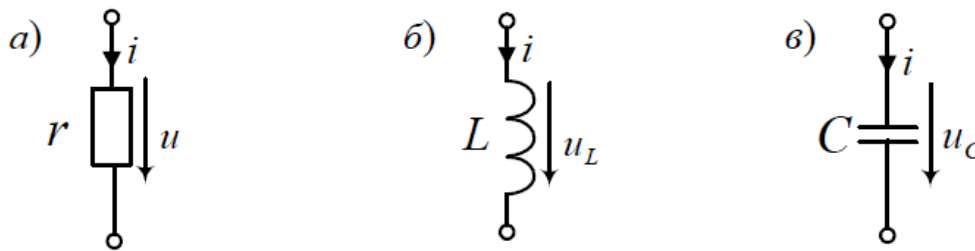


Рис. 4. Пасивні елементи: резистивний (а), індуктивний (б) та ємнісний (в)

Резистивний елемент (опір оммічний), або ідеальний резистор (рис. 4а), перетворює електричну енергію в інші види енергії. **Резистивни** опір r вимірюють в **омах (Ом, Ω)**.

Індуктивний елемент, чи ідеальна індуктивна котушка (рис.4б), враховує енергію магнітного поля котушки, а також ЕРС самоіндукції.

Індуктивність елементу L вимірюють в генрі (Гн).

Пасивні елементи можуть бути лінійними та нелінійними.

Лінійними елементами називають елементи ланцюга, параметри яких не залежать від прикладеної до них напруги і струму, що проходить крізь них (рис.4). Якщо параметри елементів залежать від значення або напрямку діючої напруги і сили струму, то їх називають **нелінійними** (рис. 5а).

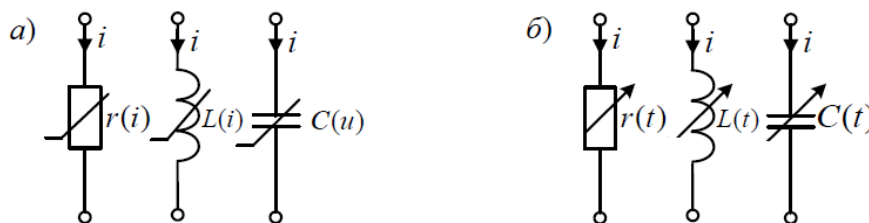


Рис. 5. Нелінійні (а) елементи та елементи зі змінними параметрами (б)

Прикладами нелінійних елементів можуть бути: **напівпровідникові та електронні прилади, котушки індуктивності з феромагнітними сердечниками та ін.**

Елементами з постійними параметрами є лінійні елементи, параметри яких не залежать від часу.

Елементи ланцюга, параметри яких змінюються за законом, називаються елементами зі змінними параметрами (рис.5б).

Електрична схема заміщення визначається наступними геометричними (топологічними) поняттями: гілка, вузол, контур.

Гілка (branch) – ділянка електричного ланцюга, вздовж якого протікає один і той самий струм.

Вузол (Node) - точка у схемі, де сходиться **не менше трьох гілок**. Тоді гілка – ділянка електричного ланцюга від одного вузла до іншого. Лінії, що зв'язують гілки у схемі, представляють сполуки без опорів. Тому схеми на рис. 6а та 6б містять один вузол. Гілки, приєднані до однієї пари вузлів, називаються **паралельними**.

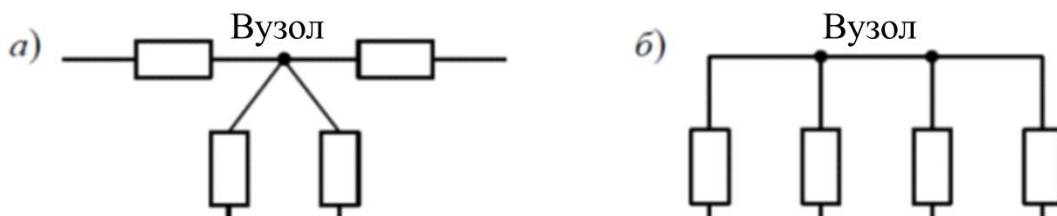


Рис.6. Вузол електричного ланцюга

Контур (contour) - замкнутий шлях, що проходить по кількох гілках так, що жодна гілка і жоден вузол не зустрічається більше одного разу.

Незалежними контурами є такі, при виборі яких до кожного наступного контура входить хоча б одна нова гілка, яка не входила в попередні.

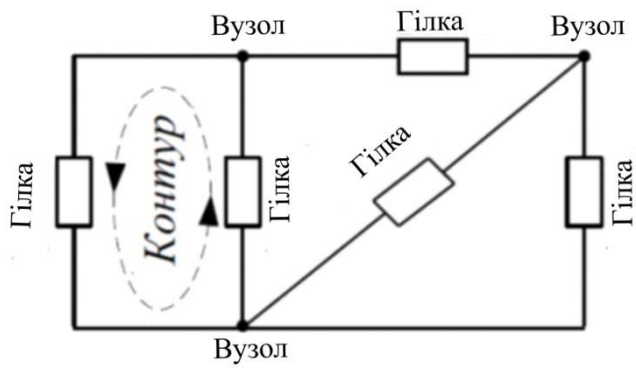


Рис.7. Схема розгалуженого електричного ланцюга

Класифікація електричних ланцюгів здійснюється відповідно характерам елементів, з яких складається ланцюг, та рівнянь, якими він описується. **Ланцюг, на всіх ділянках якого протікає один і той же струм, називається нерозгалуженим (unbranched electric circuit).**

Якщо ланцюг містить ділянки з різними струмами, то він є **розгалуженим (branched electric circuit)**. Схема розгалуженого ланцюга наведено на малюнку 7.

1.2. Основні закони електричного струму

Розрахунки електричних кіл постійного струму проводять за законами Ома і Кірхгофа.

У еквівалентних **схемах заміщення** ланцюгів постійного струму розглядають лише один вид приймачів – резистивний елемент.

Усі електричні величини позначають великими друкованими літерами: I , U , E , крім струму джерела струму, який позначають літерою J .

Закон Ома для ділянки ланцюга

За законом Ома напруга на резистивному елементі (рис. 8) пропорційна струму в ньому;

$$U = rI. \quad (5)$$

Коефіцієнт пропорційності r називається опором.

Перший закон Кірхгофа

Алгебраїчна сума струмів у вузлі дорівнює нулю:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0 \quad (6)$$

Правило знаків: струми, які входять у вузол, розглядають як позитивні, а що витікають – як негативні. Наприклад, для вузла, зображеного малюнку 9а, за першим законом Кірхгофа можна записати: $I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$.

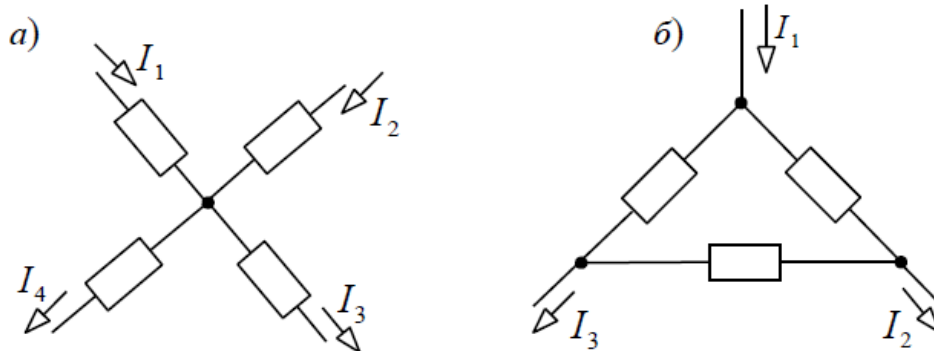


Рис.9. Ілюстрація до першого закону Кірхгофа

Перший закон Кірхгофа виражає закон збереження заряду:

заряд, що приходить за якийсь інтервал часу до вузла, дорівнює заряду, що йде за цей час від вузла, тобто електричний заряд у вузлі не накопичується і не витрачається.

Перший закон Кірхгофа застосовується до будь-якої замкненої поверхні, що охоплює частину ланцюга. Так, наприклад, на схемі малюнку 9б маємо:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0.$$

Другий закон Кірхгофа

Другий закон Кірхгофа відноситься до контуру.

Алгебраїчна сума напруг на приймачах в будь-якому контурі дорівнює сумі ЕРС, що діють у цьому ж контурі:

$$\sum_{i=1}^n E_i = \sum_{k=1}^m r_k I_k. \quad (7)$$

Для складання цього рівняння необхідно позначити стрілкою напрямок обходу контуру. При алгебраїчному підсумовуванні ЕРС і напруги слід брати зі знаком «+» ті з них, напрямки яких збігаються з напрямком обходу, а зі знаком «-», які спрямовані протилежно обходу контуру. Наприклад, для контуру, зображеного на рис. 10, другий закон Кірхгофа можна записати у вигляді:

$$E_1 + E_2 - E_3 = r_1 I_1 + r_2 I_2 - r_3 I_3 \quad (8)$$

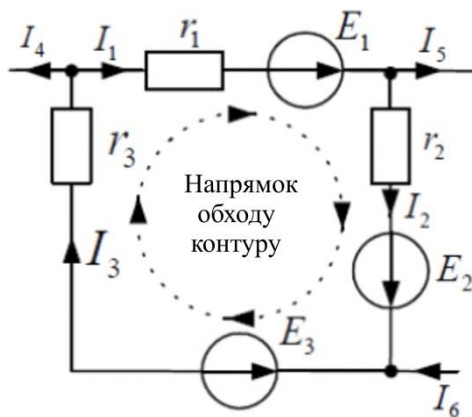


Рис.10. Другий закон Кірхгофа

Другий закон Кірхгофа можна застосовувати і для контурів, що складаються не тільки з ділянок схеми, але і з напруги між якими-небудь точками схеми. Рівняння по другому закону Кірхгофа для ділянки на рис. 2б:

$$U_1 = E - I_1 r_{вн}.$$

2. Методи розрахунку лінійних ланцюгів постійного струму

2.1. Методи еквівалентних перетворень

Еквівалентним перетворенням частини схеми електричного ланцюга називають таку зміну, при якій струми та напруги поза перетвореною її частиною залишаються незмінними.

Метод еквівалентних перетворень застосовують як самостійний для розрахунку струмів у схемах з **одним джерелом** енергії та кількома приймачами. Його можна використовувати і для спрощення частин складної схеми під час розрахунків іншими методами. При цьому усі приймачі замінюють одним із еквівалентним опором. Струми та напруги в частинах схеми, не порушених перетворенням, мають залишатися незмінними.

Далі струми знаходять із згорнутої схеми, а потім повертаються до вихідної схеми для визначення інших струмів. Перетворення схеми проводять поступово, розглядаючи ділянки з послідовними та паралельними сполуками приймачів.

Попередньо потрібно виявити вузли та гілки.

2.1.1. Перетворення схем з послідовним, паралельним та змішаним з'єднанням опорів.

Довільне число послідовно з'єднаних опорів (рис.11а) можна замінити одним еквівалентним опором (рис.11б), значення якого дорівнює сумі опорів:

$$r_{ekv} = \sum_{i=1}^n r_i. \quad (9)$$

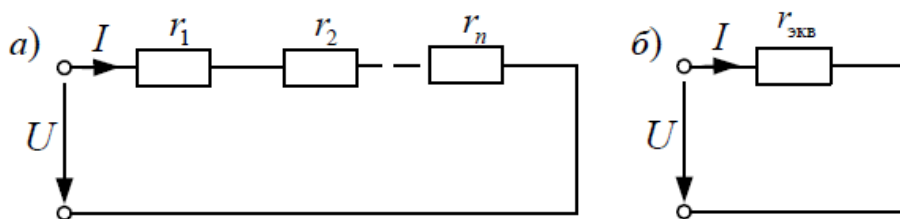


Рис.11. Схема з послідовним з'єднанням резисторів (а) та спрощена схема цього ланцюга з еквівалентним опором (б)

Струм I , що протікає по цих опорах, є один і той же, а напруги на кожному з резисторів - різні.

При паралельному з'єднанні n споживачів (рис.12а) еквівалентна провідність $g_{ekv} = \frac{1}{R_{ekv}}$ (рис. 12б) дорівнює сумі провідностей окремих елементів, включених

паралельно, $g_{ekv} = g_1 + g_2 + \dots + g_n$. (10)

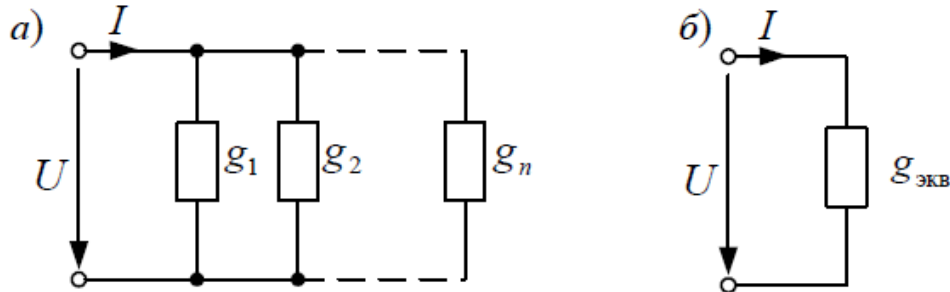


Рис.12. Схема з паралельним з'єднанням резисторів (а) та спрощена схема цього ланцюга з еквівалентним опором (б)

Еквівалентний опір визначають з виразу

$$\frac{1}{r_{ekv}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n r_i}, \quad (11)$$

де r_1, r_2, \dots, r_n – опори кожного з n споживачів, включених паралельно. В окремому випадку, коли паралельно включені два споживачі r_1 і r_2 , еквівалентний опір ланцюга:

$$r_{ekv} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}. \quad (12)$$

Паралельне включення – основний засіб включення різних приймачів (споживачів) електричної енергії, оскільки в паралельно з'єднаних приймачах напруги рівні.

Приклад 2.1. Для заданого ланцюга постійного струму, зображеного на рис.13, визначити струми у гілках, якщо дано: $E = 50$ В, $r_1 = 2$ Ом, $r_2 = 3$ Ом,

$$r_3 = 2,5 \text{ Ом}, r_4 = 0,5 \text{ Ом}, r_5 = 1,5 \text{ Ом}.$$

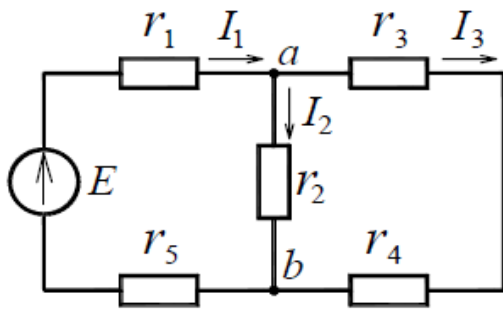


Рис.13. Схема ланцюга постійного струму в прикладі 2.1

Рішення.

Позначимо напрямок струмів усіх гілок на схемі. Стрілка джерела ЕРС показує напрямок збільшення потенціалу. Струм у гілці тече від більшого потенціалу до меншого.

Далі виконуємо еквівалентні перетворення в ланцюзі та послідовно спрощуємо схему. Починаємо із заміни двох послідовно включених резисторів r_3 і r_4 одним еквівалентним.

Схема спрощується і має вигляд, зображений на малюнку 14 а.

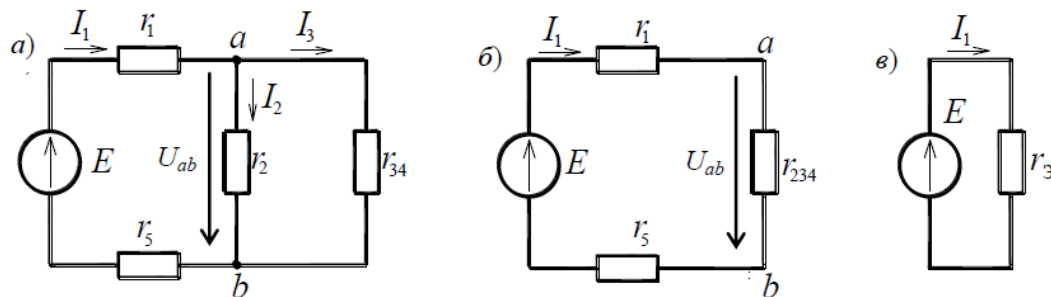


Рис. 14 Еквівалентні схеми ланцюга на рис.13

Еквівалентний опір двох послідовно включених резисторів r_3 і r_4 :

$$r_{34} = r_3 + r_4 = 2,5 + 0,5 = 3 \text{ Ом.}$$

Подальше спрощення схеми відбувається в результаті заміни паралельно включених резисторів r_2 і r_{34} одним r_{234} (рис.14б).

Еквівалентний опір двох резисторів, включених паралельно, можна визначити з виразу:

$$r_{234} = r_2 r_{34} / (r_2 + r_{34}) = 3 \cdot 3 / (3 + 3) = 1,5 \text{ Ом.}$$

Остаточне спрощення ланцюга відбувається після заміни трьох послідовно з'єднаних резисторів r_1 , r_{234} , r_5 одним еквівалентним, що відповідає опору всього ланцюга (рис.14 в):

$$r_{\text{ekv}} = r_1 + r_{234} + r_5 = 2 + 1,5 + 1,5 = 5 \text{ Ом.}$$

Для знаходження сили струму в ланцюгу застосовуємо закон Ома для замкнутого ланцюга:

$$I_1 = E/r_{\text{ekv}} = 50/5 = 10 \text{ А.}$$

Оскільки перетворення були еквівалентними, то струм I_1 буде однаковим для всіх ланцюгів на малюнках 13 і 14. Для визначення струмів I_2 та I_3 на ділянці після розгалуження ланцюга необхідно знайти напругу U_{ab} між точками а і b, а потім, знаючи опір гілок, можна розрахувати струми у гілках, включених паралельно.

Межузлову напругу U_{ab} знаходимо зі схеми, зображеної на малюнку 14б. Тут вона дорівнює падінню напруги на резисторі r_{234} :

$$U_{ab} = I_1 r_{234} = 10 \cdot 1,5 = 15 \text{ В.}$$

Струми після розгалуження на підставі закону Ома для ділянки ланцюга знаходимо з виразів:

$$I_2 = U_{ab} / r_2 = 15 / 3 = 5 \text{ А, } I_3 = U_{ab} / r_{34} = 15 / 3 = 5 \text{ А.}$$

Для випадку паралельного з'єднання резисторів, знаючи вхідний струм I_1 , можна користуватися **формулою розкиду струмів**.

Структура **формули розкиду**: струм однієї з гілок після розгалуження дорівнює струму до розгалуження, помноженого на дріб, де у чисельнику цього дробу – **опір сусідньої** стосовно визначеного струму паралельної гілки,

А в знаменнику – сума опорів гілок, включених паралельно.

Для визначення струму I_2 формула розкиду струмів має вигляд:

$$I_2 = \frac{I_1 \cdot r_{34}}{r_2 + r_{34}} = \frac{10 \cdot 6}{6 + 6} = 5 \text{ А}$$

Відповідно до цієї формули:

$$I_3 = \frac{I_1 \cdot r_2}{r_2 + r_{34}} = \frac{10 \cdot 6}{6 + 6} = 5 \text{ А.}$$

2.1.2. Метод перетворення схем зі з'єднанням опорів у вигляді трикутника та зірки.

У методі еквівалентних перетворень використовується також перетворення пасивного трикутника опорів на еквівалентну зірку чи навпаки— перетворення пасивної зірки опорів на еквівалентний йому трикутник.

Такі перетворення схем зі з'єднанням опорів у вигляді трикутника (рис.15 а) та зірки (рис.15б) іноді можуть призвести до спрощення вирішення задачі з розрахунку ланцюга.



Рис.15. Схеми з'єднання резисторів трикутником (а) та зіркою (б)

На рис. 16а трикутник елементів утворюють споживачі r_1, r_2, r_3 . На рис. 16 б цей трикутник замінений еквівалентними елементами r_a, r_b, r_c , з'єднаними зіркою. Щоб не відбувалася зміна потенціалів у точках a, b, c із схеми, опори еквівалентних споживачів визначаються з виразів:

$$\begin{aligned} r_a &= \frac{r_1 r_3}{r_1 + r_2 + r_3}, \\ r_b &= \frac{r_2 r_3}{r_1 + r_2 + r_3}, \\ r_c &= \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2 + r_3}. \end{aligned} \tag{13}$$

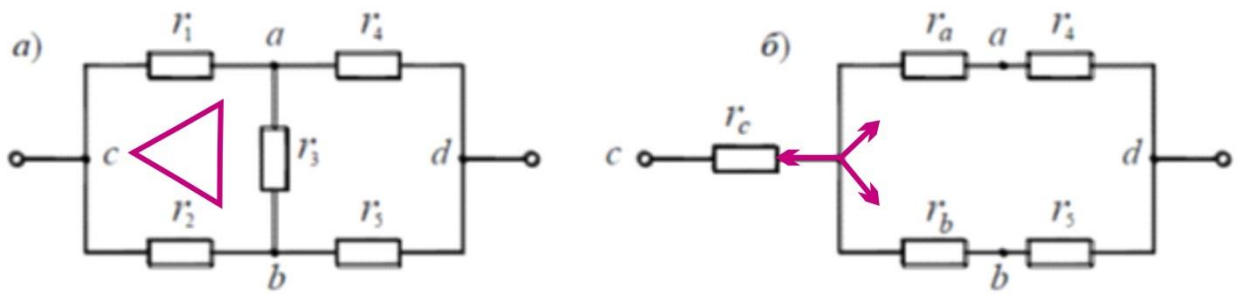


Рис.16. Перетворення елементів ланцюга, з'єднаних трикутником, в еквівалентну зірку

Спрощення вихідного ланцюга можна здійснити заміною елементів, з'єднаних зіркою, схемою, у якій споживачі з'єднані трикутником.

У схемі, зображеній на малюнку 16а, можна виділити зірку, утворену споживачами r_1, r_3, r_4 (трикутник зображений червоним кольором). Ці елементи включені між точками c, b, d . На рис. 16б між цими точками знаходяться еквівалентні споживачі R_{bc}, R_{cd}, R_{bd} , з'єднані трикутником.

Опір еквівалентних споживачів визначається з виразів:

$$\begin{aligned}
 r_{cd} &= r_1 + r_4 + \frac{r_1 r_4}{r_3}, \\
 r_{bd} &= r_3 + r_4 + \frac{r_3 r_4}{r_1}, \\
 r_{bc} &= r_1 + r_3 + \frac{r_1 r_3}{r_4}.
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

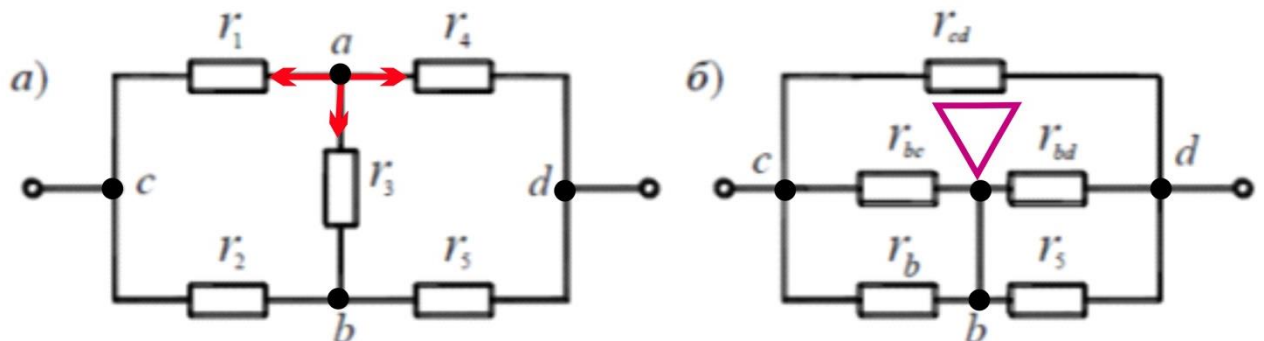


Рис. 17. Перетворення елементів ланцюга, з'єднаних зіркою, в еквівалентний трикутник

Подальше спрощення схем, наведених на малюнках 166 та 176, можна здійснювати шляхом заміни ділянок з послідовним та паралельним з'єднанням елементів їх еквівалентними споживачами.

При практичній реалізації методу розрахунку простого ланцюга за допомогою перетворень виявляються в ланцюзі ділянки з паралельним і послідовним з'єднанням споживачів, а потім еквівалентні опори цих ділянок.

Якщо у вихідному ланцюзі в явному вигляді немає таких ділянок, то, застосовуючи описані раніше переходи від «трикутника до зірки» або від «зірки до трикутника», виявляють їх.

Ці операції дозволяють спростити ланцюг. Застосувавши їх кілька разів, приходять до одноконтурної схеми з одним джерелом та одним еквівалентним споживачем енергії.

Далі, застосовуючи закони Ома та Кірхгофа, розраховують струми та напруги на ділянках ланцюга.

Приклад 2.2. На рис.18 наведена схема ланцюга: з ЕРС та опорамі: $E = 30 \text{ В}$, $r_{12} = 8 \text{ Ом}$, $r_{23} = 12 \text{ Ом}$, $r_{31} = 12 \text{ Ом}$, $r_4 = 5,5 \text{ Ом}$, $r_5 = 7 \text{ Ом}$, $r_6 = 2 \text{ Ом}$.

Визначити силу струму в гілці, яка містить джерело ЕРС.

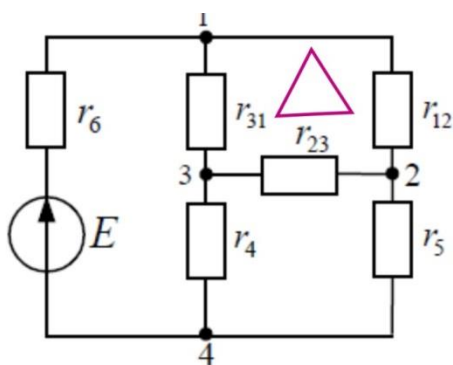


Рис.18. Схема ланцюга задачі 2.2

Рішення.

Замінімо трикутник опорів 123 зіркою опорів.

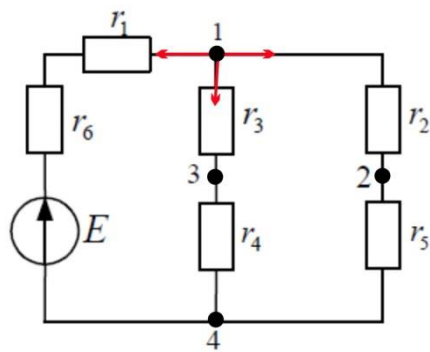


Рис.19. Перетворена схема «трикутник – зірка» ланцюга задачі 2.2

$$r_1 = \frac{r_{12}r_{31}}{r_{12} + r_{23} + r_{31}} = 3\Omega,$$

$$r_2 = \frac{r_{12}r_{23}}{r_{12} + r_{23} + r_{31}} = 3\Omega,$$

$$r_3 = \frac{r_{23}r_{31}}{r_{12} + r_{23} + r_{31}} = 4.5\Omega.$$

Опір між точками 1 та 4

$$r_{14} = \frac{(r_2 + r_3)(r_3 + r_4)}{r_2 + r_3 + r_3 + r_4} = 5\Omega.$$

Остаточне спрощення ланцюга відбувається після заміни трьох послідовно з'єднаних резисторів r_1 , r_{14} і r_6 одним еквівалентним, що відповідає опору всього ланцюга:

$$r_{ekv} = r_1 + r_6 + r_{14} = 10\Omega$$

Сила струму у гілці з джерелом ЕРС:

$$I = \frac{E}{r_{ekv}} = 3A$$

Мета дослідження електричних ланцюгів може бути різною: визначення падіння напруги на затискачах приймача, визначення струму при короткому замиканні в будь-якій точці та ін.

З цих розрахунків знаходять необхідні перерізи провідників або за даних перерізів провідників знаходять падіння напруги.

За даними розрахунків можна вибирати пристрої відключення струму при значному його збільшенні і при короткому замиканні.

Фактично зазвичай розраховують відхилення напруги від номінального значення.

Відхилення напруги у бік зменшення обмежені тим, що при зниженні напруги різко зменшується світловий потік ламп розжарювання; електричні двигуни при цих навантаженнях вимагають струми, що перевищують нормальні.

У разі відхилення напруги у бік збільшення лампи розжарювання можуть швидко вийти з ладу, а двигуни працюють у неприпустимих умовах.

Відхилення напруги у бік зменшення обмежені величиною 2,5–5 %, а в бік збільшення – 5 %.

Для складних ланцюгів розв'язання перелічених завдань вимагає визначення **струмів у гілках ланцюга**, що є найбільш трудоємним завданням. Тому методи дослідження та розрахунку складних ланцюгів є переважно **методами розрахунку розподілу струмів у гілках ланцюга**.

Розглянемо просте електричне коло, що складається з **джерела енергії** (генератора), що має ЕРС E_r і внутрішній опір r_b ; **лінії передачі з опором r_l** та **приймача енергії з опором $r_{пр}$** (Рис. 20).

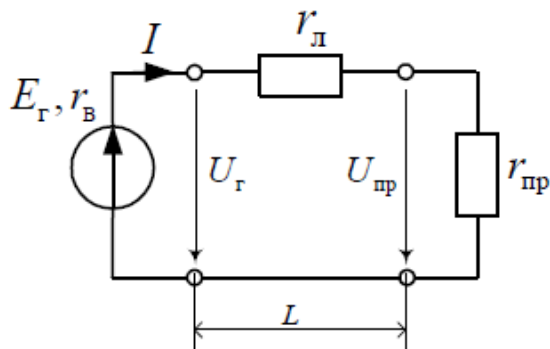


Рис.19. Електричний ланцюг джерела, споживачів та лінії передач

Напруга U_r на початку лінії передачі менша за ЕРС на величину падіння напруги в джерелі енергії:

$$U_r = E_r - I r_b,$$

а напруга $U_{пр}$ на затискачах приймача менше U_r на величину падіння напруги на лінії.

Втрати потужності $P_r = U_r I$ зменшуються при збільшенні напруги джерела та зменшенні струму, тобто:

$$\Delta P = \Delta UI = I^2 r_{\text{л}},$$

при цьому зменшуються також втрати напруги в лінії

$$U_{\text{пр}} = U_r - \Delta U,$$

Враховуючи, що

$$\Delta U = I r_{\text{л}}.$$

передача великих потужностей на далекі відстані повинна здійснюватись лініями високої напруги.

2.2. Баланс потужностей у ланцюгах постійного струму

Баланс потужностей – це інтерпретація закону збереження енергії у електротехниці.

Закон Джоуля-Ленца дозволяє визначити кількість теплової енергії, яка виділяється на опору r при протіканні електричного струму:

$$W = I^2 r t, \tag{15}$$

де I – сила струму,

r – опір,

t – час протікання струму.

Для характеристики швидкості перетворення електричної енергії на теплову використовують потужність P , вираз для якої можна отримати із закону Джоуля-Ленца:

$$P = \frac{W}{t} = I^2 r = \frac{U^2}{r} = UI \tag{16}$$

Якщо в ділянці ланцюга з активним опором під дією прикладеної до нього напруги проходить струм, то потужність, що виділяється на опорі, є:

$$P = I r^2. \tag{17}$$

Ця потужність завжди позитивна.

Потужність джерела ЕРС, по якому протікає струм I :

$$P = E I. \quad (18)$$

Джерело може як виробляти, так і споживати (заряд акумулятора) електричну енергію. Якщо напрямки ЕРС та струму через джерело ЕРС збігаються, потужність джерела записують у рівнянні балансу потужностей із позитивним знаком.

В цьому випадку джерело працює у режимі генератора.

При протилежних напрямках ЕРС та струму потужність у рівнянні балансу враховують із негативним знаком (режим споживача).

Відповідно до закону збереження енергії, в елементах ланцюга споживається стільки енергії, скільки її віддається джерелами, що знаходяться в ньому.

Враховуючи, що потужність - це енергія, яка споживається в одиницю часу, маємо: **алгебраїчна сума потужностей, що віддаються всіма джерелами енергії в ланцюзі, дорівнює сумі потужностей, що споживаються резистивними елементами.** Таким чином:

$$\sum_{i=1}^n E_i I_i = \sum_{k=1}^n r_k I_k^2. \quad (19)$$

Цю рівність називають **рівнянням балансу потужностей.**

Як приклад запишемо рівняння балансу потужностей для схеми ланцюга, наведеної на рис. 20:

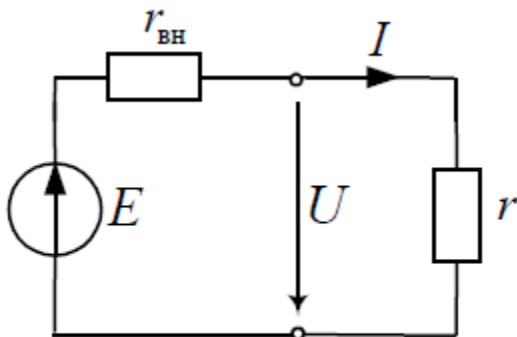


Рис.20. Схема ланцюга загального вигляду

$$EI = r_{\text{вн}} I^2 + r I^2. \quad (20)$$

Потужність EI , що виробляється джерелом ЕРС, називають **повною потужністю**, потужність rI , що споживається навантаженням, – **корисною потужністю**, а потужність $r_{\text{вн}} I$, що витрачається всередині джерела ЕРС, – **потужністю втрат**.

Потужність P у ланцюгах постійного струму вимірюється у ватах (Вт).

У процесі складання балансу потужностей можна з'ясувати, у якому режимі працює джерело живлення.

Якщо його потужність позитивна, він віддає енергію у зовнішній ланцюг (наприклад, як акумулятор у режимі розряду).

При негативному значенні потужності джерела останній споживає енергію з кола (акумулятор у режимі заряду).

Електричні ланцюги можуть працювати у різних режимах.

Узгодженим називається режим, при якому потужність, що віддається джерелом або споживана приймачем, має максимальне значення.

Максимальні значення потужностей виходять при певному співвідношенні (узгодженні) параметрів електричного кола.

Під режимом **холостого ходу (ХХ)** розуміється такий режим, коли через джерело не протікає струм.

Режимом **короткого замикання (КЗ)** називається режим, що виникає при з'єднанні між собою без будь-якого опору (коротко) затискачів джерела або інших елементів електричного ланцюга, між якими є напруга. При короткому замиканні можуть виникнути неприпустимо великі струми. Наприклад, електрична дуга може призвести до тяжких наслідків, тому режим короткого замикання часто є аварійним.

2.3. Контрольні питання

1. Дайте визначення наступним величинам: електричний струм, напруга, потужність.
2. Що таке позитивний напрямок струму?
3. Чи залежить вибір позитивного напрямку напруги від позитивного напрямку струму?
4. Що таке електричний ланцюг?
5. Дайте визначення схеми заміщення та принципової схеми електричного кола.
6. Які елементи електричного кола відносять до пасивних?
7. Які елементи електричного кола відносять до активних?
8. Сформулюйте та запишіть закон Ома.
9. Як формулюються перший та другий закони Кірхгофа?
10. Як визначити еквівалентний опір ділянки ланцюга з послідовним, паралельним та змішаним з'єднанням опорів?
11. Як розподіляються струм і напруга при послідовному та паралельному з'єднанні приймачів електричної енергії?
12. Назвіть умови та методику еквівалентного перетворення схем з'єднання опорів у вигляді трикутника та зірки.
13. Запишіть рівняння балансу потужностей та вкажіть для чого воно використовується.

2.4. Задачі

Задачі з розрахунку електричних ланцюгів постійного струму спрямовані на визначення **сил струмів** I всіх гілок ланцюга і **напруги** U на всіх її елементах.

Для вирішення завдань використовують закони Ома і Кірхгофа, методи еквівалентних перетворень ланцюгів, переходу від з'єднань їх «трикутником» до з'єднання «зіркою», баланс потужностей, інші методи.

Розглянемо деякі типи таких завдань.

2.4.1. Задачі по еквівалентним перетворенням систем опорів.

Приклад розв'язання задачі.

Для ланцюга (рис. 21) задано: $E = 100$ В; $R_0 = 0,5$ Ом; $R_1 = 1$ Ом; $R_2 = 2$ Ом; $R_3 = 3$ Ом; $R_4 = 4$ Ом; $R_5 = 5$ Ом; $R_6 = 6$ Ом; $R_7 = 7$ Ом.

Визначити струми всіх гілок, напруги всіх елементів ланцюга. Перевірити правильність розв'язання задачі щодо рівняння балансу потужності.

Побудувати потенціальну діаграму контуру ABC.

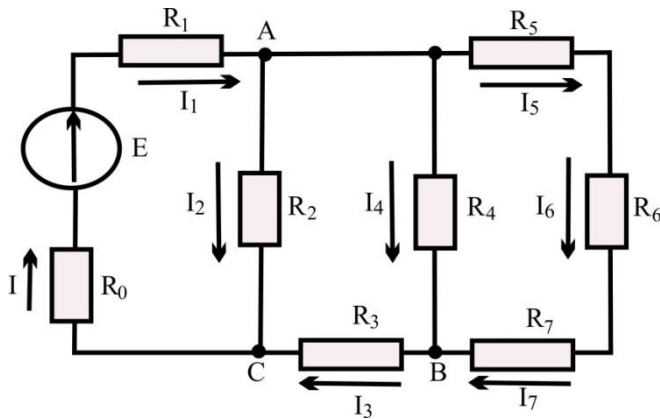


Рис.21. Електричний ланцюг

Крок 1. Визначимо еквівалентний опір гілки з резисторами R_5 , R_6 та R_7 за формулою:

$$R_{5 \rightarrow 7} = R_5 + R_6 + R_7 = 5 + 6 + 7 = 18 \text{ Ом.}$$

Крок 2. Далі визначаємо еквівалентний опір ділянки з резисторами R_4 і $R_{5 \rightarrow 7}$ (паралельне з'єднання):

$$R_{4 \rightarrow 7} = \frac{R_4 \cdot R_{5 \rightarrow 7}}{R_4 + R_{5 \rightarrow 7}} = 4 \cdot 18 / (4 + 18) = 3,27 \text{ Ом.}$$

Крок 3. Еквівалентний опір ділянки ланцюга з резисторами R_3 і $R_{4 \rightarrow 7}$ (послідовне з'єднання) визначимо з виразу:

$$R_{3 \rightarrow 7} = R_3 + R_{4 \rightarrow 7} = 3 + 3,27 = 6,27 \text{ Ом;}$$

Крок 4. Еквівалентний опір ділянки ланцюга з резисторами R_2 і $R_{3 \rightarrow 7}$ (паралельне з'єднання):

$$R_{2 \rightarrow 7} = \frac{R_2 \cdot R_{3 \rightarrow 7}}{R_2 + R_{3 \rightarrow 7}} = 1,52 \text{ Ом.}$$

Крок 5. Еквівалентний опір всієї зовнішньої ділянки ланцюга

$$R_{\text{екв}} = R_l + R_{2 \rightarrow 7} = 2,52 \text{ Ом};$$

Крок 6. Сила току джерела дорівнює силі току на резисторі R_1 —

$$I = I_1 = E / (R_0 + R_{\text{екв}}) = 100 / (0,5 + 2,52) = 33,1 \text{ А};$$

Крок 7. Напруга на зовнішній ділянці ланцюга (на клеммах джерела) —

$$U = E - IR_0 = 100 - 33,1 \times 0,5 = 83,4 \text{ В};$$

Крок 8. Падіння напруги на резисторі R_1 :

$$U_1 = I_1 R_1 = 33,1 \times 1 = 33,1 \text{ В};$$

Крок 9. Напруга між вузлами А і С:

$$U_{AC} = U - U_1 = 83,4 - 33,1 = 50,3 \text{ В};$$

Крок 10. Сила струму у гілці з резистором R_2 :

$$I_2 = U_{AC} / R_2 = 50,3 / 2 = 25,15 \text{ А};$$

Крок 11. Сила струму I_3 і падіння напруги U_3 на резисторі R_3 :

$$I_3 = U_{AC} / R_{3-7} = 50,3 / 6,27 = 8 \text{ А};$$

$$U_3 = U_{BC} = I_3 R_3 = 8 \times 3 = 24 \text{ В}.$$

Крок 12. Напругу між вузлами А та В визначимо за другим законом Кірхгофа для контуру АВС:

$$U_{AB} = U_{AC} - U_{BC} = 50,3 - 24 = 26,3 \text{ В}.$$

Крок 13. Сила струму у гілці з резистором R_4 дорівнює:

$$I_4 = U_{AB} / R_4 = 26,3 / 4 = 6,6 \text{ А};$$

Крок 14. сила струму у гілці з резисторами R_5 , R_6 та R_7 :

$$I_5 = I_6 = I_7 = U_{AB} / R_{5-7} = 26,3 / 18 = 1,46 \text{ А};$$

Крок 15. Падіння напруги на резисторах: R_5 , R_6 і R_7 :

$$U_5 = I_5 R_5 = 1,46 \times 5 = 7,3 \text{ В};$$

$$U_6 = I_6 R_6 = 1,46 \times 6 = 8,8 \text{ В};$$

$$U_7 = I_7 R_7 = 1,46 \times 7 = 10,2 \text{ В}$$

Крок 16. Рівняння балансу потужності для ланцюга матиме вигляд:

$$EI = I^2 R_0 + I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6 + I_7^2 R_7 ;$$

$$100 \times 33,1 = 33,1^2 \times 0,5 + 33,1^2 \times 1 + 25,15^2 \times 2 + 8^2 \times 3 +$$

$$+ 6,6^2 \times 4 + 1,46^2 (5 + 6 + 7);$$

$$3310 = 1643,415 + 1265,045 + 192 + 174,2 + 38,4 = 3313$$

З урахуванням похибки обчислень вважатиметься, що розрахунок виконано правильно. Коефіцієнт корисної дії ланцюга буде дорівнювати:

$$\eta = \frac{I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6 + I_7^2 R_7}{EI} = 0.67;$$

Крок 17. Для побудови потенціальної діаграми заздалегідь визначаємо потенціали вузлів контуру. Приймаємо $\varphi_C = 0$, тоді

$$\varphi_A = \varphi_C + I_2 R_2 = U_{AC} = 50,3 \text{ В};$$

$$\varphi_B = \varphi_A - I_4 R_4 = \varphi_A - U_{AB} = 50,3 - 26,3 = 24 \text{ В};$$

$$\varphi_C = \varphi_B - I_3 R_3 = \varphi_B - U_{BC} = 24 - 24 = 0.$$

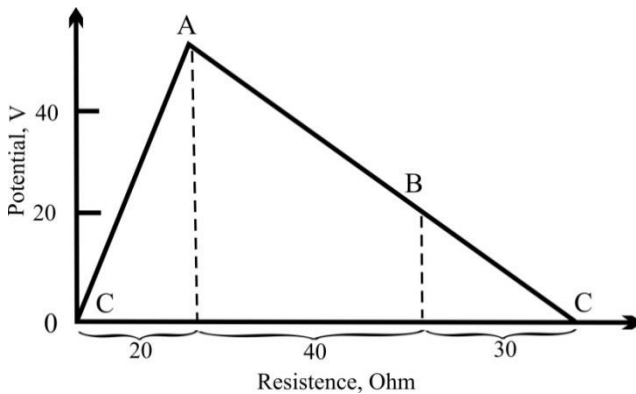


Рис.22. Потенціальна діаграма

Практичне завдання 1.

Визначити ЕРС джерела, струми у гілках ланцюга (рис. 23), потужність на резисторах, ККД ланцюга. Скласти рівняння балансу потужності. Визначити напругу на ділянці АВ, використовуючи вихідні дані таблиці 1.

Таблиця 1

Варіанти практичного завдання

Сила току і опір	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b
I_1, A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_0, Ohm	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
R_1, Ohm	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7
R_2, Ohm	5	4	5	2	4	4	5	5	6	6
R_3, Ohm	3	2	3	4	2	3	4	5	6	7

R_4, Ohm	3	4	2	6	5
R_5, Ohm	5	4	3	2	1

Примітка: завдання має 10 варіантів (таблиця 1), літерами a,b,c,d позначені варіанти схем ланцюгів.

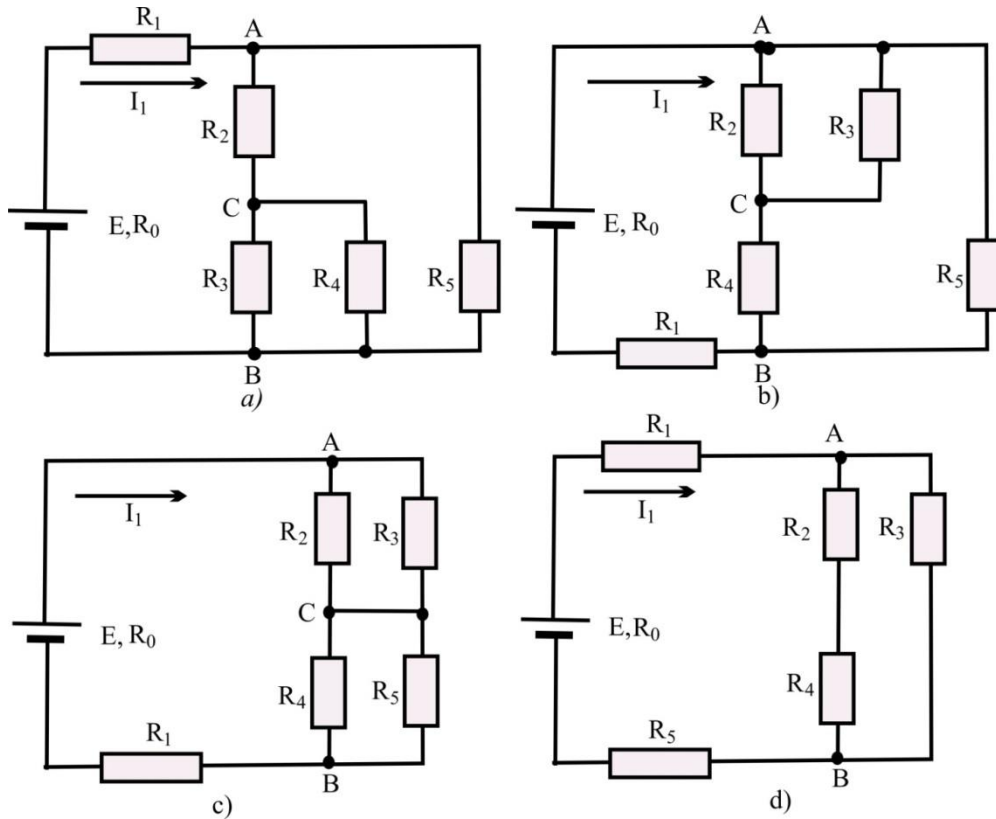


Рис. 23. Схеми ланцюгів для практичного завдання 1

Практичне завдання 2.

Для ланцюга постійного струму (рис. 24) визначити ЕРС, струм та напругу на клеммах джерела, силу струму у всіх гілках ланцюга. Скласти рівняння балансу потужності за допомогою вихідних даних таблиці 3.

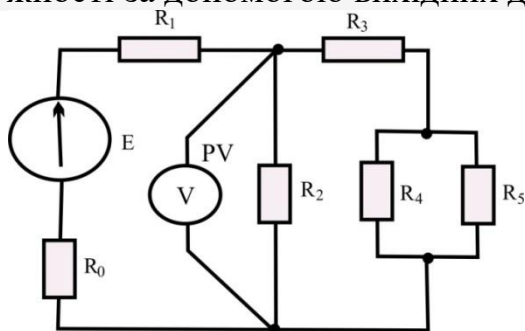


Рис. 24. Схеми ланцюгів для практичного завдання 2

Таблиця 2

Значення параметрів ланцюга практичного завдання 2

Напруга і опір	Варіанти								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U_2, V	60	55	50	45	40	35	30	25	20
R_0, Ohm	2	2	3	3	1	1	4	4	4

R_1, Ohm	4	6	8	10	12	14	16	18
R_2, Ohm	60	50	40	30	20	30	40	50
R_3, Ohm	10	15	20	25	30	35	40	45
R_4, Ohm	120	100	80	60	40	50	70	90
R_5, Ohm	40	50	60	70	80	90	80	70

2.4.2. Задачі по еквівалентним перетворенням систем опорів, що з'єднані «зіркою» і «трикутником».

Приклад розв'язання задачі.

Визначити струми у всіх гілках ланцюга (рис. 25) за наступними вихідними даними:

$$E = 2,2 \text{ В}; R_0 = 0; R_1 = 10 \text{ Ом}; R_2 = 30 \text{ Ом}; R_3 = 60 \text{ Ом}; R_4 = 4 \text{ Ом}; R_5 = 22 \text{ Ом}.$$

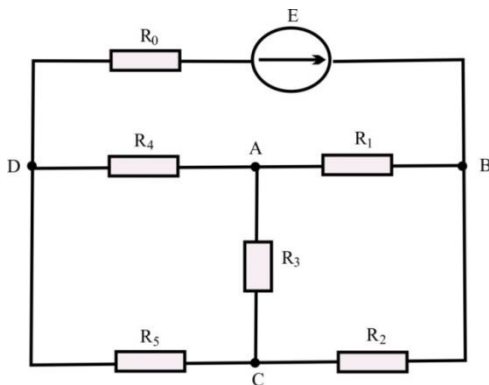


Рис.25. Схема ланцюга зі з'єднанням «трикутник»

Рішення.

Замінімо трикутник опорів, підключених до точок А, В і С, еквівалентною зіркою з опорами R_A , R_B та R_C , підключеної до тих самих точок (рис. 26):

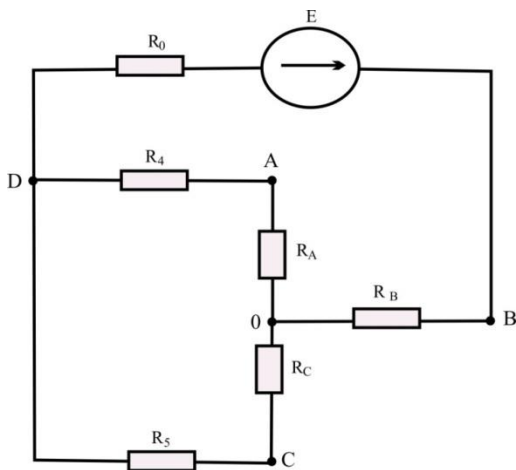


Рис.26. Еквівалентна схема ланцюга зі з'єднанням «зірка»

$$R_A = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = 6\Omega,$$

$$R_B = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + R_3} = 3\Omega,$$

$$R_C = \frac{R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = 18\Omega.$$

Подальший розрахунок ланцюга робимо методом згортання. Опір гілок складає:

$$R_{A4} = R_A + R_4 = 10\Omega;$$

$$R_{C5} = R_C + R_5 = 40\Omega.$$

Загальний опір ділянки BD ланцюга:

$$R_{BD} = \frac{R_{A4} R_{C5}}{R_{A4} + R_{C5}} = 8\Omega;$$

еквівалентний опір всього ланцюга:

$$R_{ekv} = R_B + R_0 + R_{BD} = 11\Omega$$

Визначимо струми I , I_4 та I_5 , які в еквівалентній схемі мають такі самі значення, як і у вихідній схемі. Струм у нерозгалуженій частині ланцюга, який дорівнює струму джерела, складає:

$$I = \frac{E}{R_{ekv}} = 0.2A;$$

напруга на розгалуженій ділянці (на опорі R_{BD})

$$U_{BD} = IR_{BD} = 1.6V$$

або

$$U_{BD} = E - I_0(R_B + R_0) = 1.6V$$

Значення струмів у резисторах R_4 і R_5 :

$$I_4 = \frac{U_{BD}}{R_{A4}} = 0.16A;$$

$$I_5 = \frac{U_{BD}}{R_{C5}} = 0.04A.$$

Для визначення струму I_3 у вихідній схемі для контуру ACD (рис. 25) складаємо рівняння за другим законом Кірхгофа:

$$I_3R_3 + I_5R_5 - I_4R_4 = 0,$$

звідси знаходимо:

$$I_3 = \frac{I_4R_4 - I_5R_5}{R_3} = 0.004A.$$

Тоді за першим законом Кіргофа, для вузлових точок А і С знаходимо струми I_1 і I_2 :

$$I_1 = I_4 + I_3 = 0,16 - 0,004 = 0,156 A;$$

$$I_2 = I_5 - I_3 = 0,04 + 0,004 = 0,044 A.$$

Знак «мінус» перед значенням струму показує, що струм I_3 є спрямованим проти вибраного напрямку, тобто. від точки С до точки А.

Перевірку виконаємо за першим законом Кірхгофа для вузла В:

$$I_1 + I_2 = 0.156 + 0.044 = 0.2A = I$$

Сума струмів, що витікають з вузла, дорівнює струму, що втікає у вузол від джерела. У сумі буде 0.

Значення струмів знайдено правильно. Завдання вирішено правильно.

Практичне завдання 3.

Для ланцюга постійного струму (рис. 26) визначити його еквівалентний опір, обчислити значення струмів і напруг для джерела та всіх резисторів, використовуючи дані таблиці 2

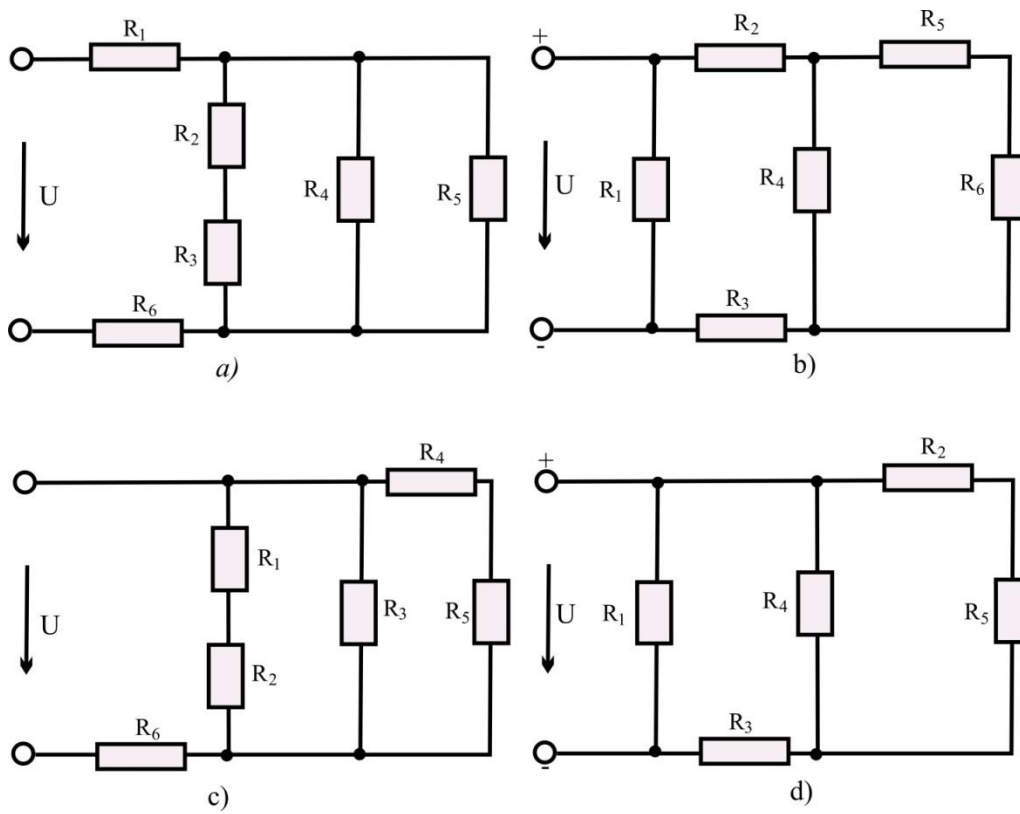


Рис. 27. Схеми ланцюгів для практичного завдання 3

Таблиця 3

Значення параметрів ланцюгів для практичного завдання 3.

Сила току і опір	варіанти								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	a	b	c	d	a	b	c	d	a
R_1, Ohm	3		4	5		6		5	
R_2, Ohm	4		5	6		7		8	
R_3, Ohm	5		6	7		8		9	
R_4, Ohm	6		7	8		9		3	
R_5, Ohm	3		4	5		6		7	
R_6, Ohm	4		5	6		7		8	
I_1, A	1		-	-		-		-	
I_2, A	-		2	-		-		-	
I_3, A	-		-	2		-		-	

I_4, A	-	-	-	3	
I_5, A	-	-	-	-	4

Примітка:: завдання має 10 варіантів (таблиця 3), літерами a,b,c,d позначені варіанти схем ланцюгів.

2.4.3. Задачі по визначенню сил току мостових схем.

У електротехніці часто зустрічаються ланцюги, що містять «мостові схеми» (рис.28). Вони використовуються у вимірювальній апаратурі (місток Уїтстона), у випрямлячах (діодні мости), при зміні частот коливань, багатьох інших пристроях.

Мостова схема з'єднання опорів є врівноваженою, якщо струм у діагоналі мосту $I_5 = 0$, для чого необхідне виконання умови: $R_1 R_3 = R_2 R_4$.

За допомогою цієї формули вирішуються багато завдань із «мостовими схемами».

Практичне завдання 4.

Визначити силу струму джерела, а також струм на вказаному резисторі мостової схеми (рис. 28), використовуючи вихідні дані таблиці 4.

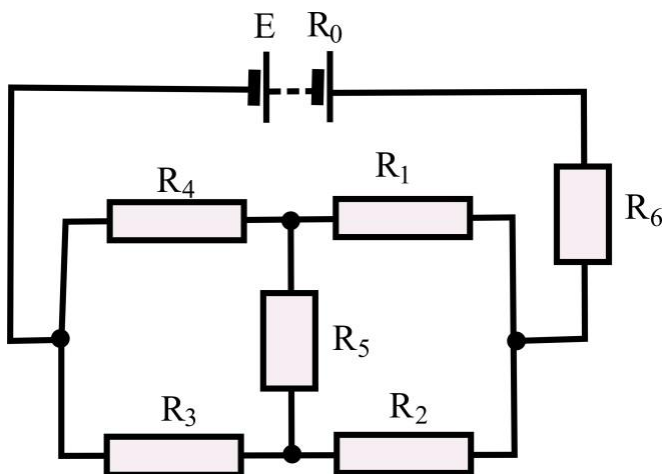


Рис. 28. Ланцюг з «мостовою схемою»

Таблиця 4

Значення параметрів ланцюгів для практичного завдання 4.

ила току і опір	варіанти							
	1	2	3	4	5	6	7	8
I, A	22	11	33	44	55	33	44	22
R ₁ , Ohm	10	15	20	-	10	15	20	-
R ₂ , Ohm	30	30	-	40	50	50	-	60
R ₃ , Ohm	60	-	50	30	30	-	45	55
R ₄ , Ohm	-	50	40	15	-	35	60	15
R ₆ , Ohm	22	33	44	22	33	44	55	40
R ₀ , Ohm	0,0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.8	1.0

3. Розрахунок лінійних ланцюгів з двома та більше джерелами енергії.

Метод накладання

Метод накладання застосовується для розрахунку ланцюгів із двома та більше джерелами енергії. Він передбачає незалежну дію струмів, зумовлених різними джерелами. Перевагами методу є простота та наочність. До недоліків слід віднести значне збільшення обсягу розрахунків при великій кількості джерел, а також вимогу підвищеної точності щодо чисельних значень величин.

Приклад розв'язання задачі методом накладання

Обчислити струми у всіх гілках складного ланцюга (рис. 29), зазначити їх напрями на схемі. Перевірити розрахунок за допомогою рівняння балансу потужностей. Вихідні дані: $E_1 = 50$ В; $E_2 = 70$ В; $R_1 = 16$ Ом; $R_2 = 20$ Ом;

$R_3 = 6$ Ом; $R_4 = 40$ Ом; $R_5 = 60$ Ом; $r_{01} = 2$ Ом; $r_{02} = 2$ Ом.

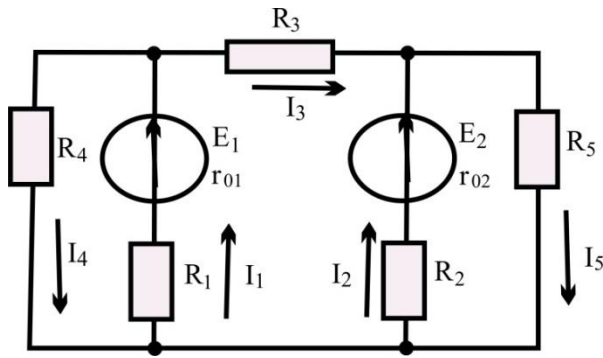


Рис.29. Схема складного ланцюга із двома джерелами струму

Кількість джерел у ланцюзі дорівнює двом, тому завдання вирішимо в три етапи.

1. Визначимо струми на ділянках ланцюга при умові, що $E_2 = 0$. (рис. 30). Позначимо величин цього етапу верхнім індексом (1).

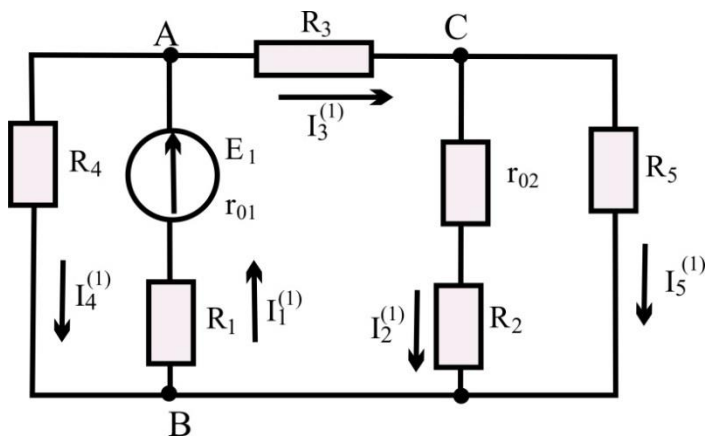


Рис.30. Схема ланцюга при $E_2 = 0$

Попередньо визначимо опори ділянок ланцюга: опір ділянки з резисторами R_2 , R_5 и r_{02} :

$$R_{25} = \frac{(R_2 + r_{02}) \cdot R_5}{(R_2 + r_{02}) + R_5} = 16.1 \Omega.$$

опір ділянки з резисторами R_2 , R_3 и R_5 и r_{02} :

$$R_{235} = R_{25} + R_3 = 22.1 \Omega;$$

опір ділянки з резисторами R_2, R_3, R_4, R_5 и r_{02} :

$$R_{2345} = \frac{R_{235} \cdot R_4}{R_{235} + R_4} = 14.2\Omega;$$

еквівалентний опір ланцюга щодо джерела E_1 :

$$R_{ekv}^{(1)} = R_{2345} + R_1 + r_{01} = 32.2\Omega;$$

сила струму в першій гілці :

$$I_1^{(1)} = \frac{E_1}{R_{ekv}^{(1)}} = 1.55A;$$

напруга між вузлами А і В :

$$U_{AB}^{(1)} = E_1 - I_1^{(1)}(R_1 + r_{01}) = 22.1V;$$

струм у четвертій гілці :

$$I_4^{(1)} = \frac{U_{AB}^{(1)}}{R_4} = 0.55A;$$

струм у третій гілці :

$$I_3^{(1)} = \frac{U_{AB}^{(1)}}{R_{235}} = 1A;$$

напруга між вузлами С і В :

$$U_{CB}^{(1)} = U_{AB}^{(1)} - I_3^{(1)}R_3 = 16.1V;$$

струми у гілках з резисторами R_2 і R_5 .

$$I_2^{(1)} = \frac{U_{CB}^{(1)}}{(R_2 + r_{02})} = 0.73A$$

$$I_5^{(1)} = \frac{U_{CB}^{(1)}}{R_5} = 0.27A$$

2. Визначимо струми на ділянках ланцюга при умові, що $E_1 = 0$ (рис. 31).

Величини в цьому випадку – з верхнім індексом (2).

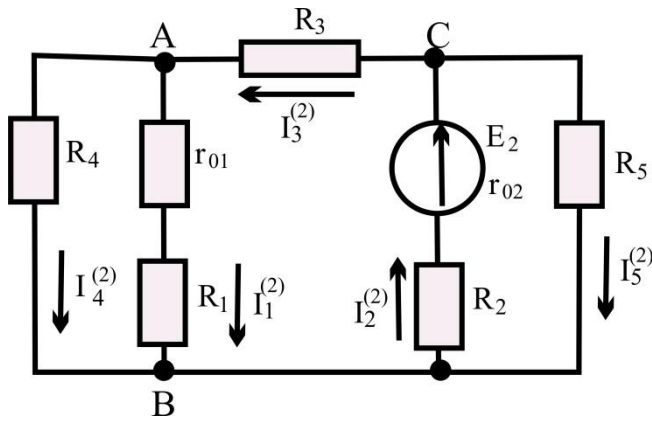


Рис.31. Схема ланцюга при $E_1=0$

Попередньо визначимо опори ділянок ланцюга: опір ділянки ланцюга з опорами R_1, R_3, R_4 и r_{01} :

$$R_{134} = R_{14} + R_3 = 19.85\Omega;$$

опір ділянки ланцюга з опорами $R_1, R_3, R_4, R_5,$ і r_{01} :

$$R_{1345} = \frac{R_{134} \cdot R_5}{R_{134} + R_5} = 14.9\Omega;$$

еквівалентний опір ланцюга щодо джерела E_2 :

$$R_{ekv}^{(2)} = R_{1345} + R_2 + r_{02} = 36.9\Omega;$$

струм джерела E_2 :

$$I_1^{(2)} = \frac{E_2}{R_{ekv}^{(2)}} = 1.9A;$$

напруга між вузлами C і B:

$$U_{CB}^{(2)} = E_2 - I_1^{(2)} (R_2 + r_{02}) = 28.2V;$$

сила струму на опорі R_5 :

$$I_5^{(2)} = \frac{U_{CB}^{(2)}}{R_5} = 0.47A;$$

сила струму на опорі R_3 :

$$I_3^{(2)} = \frac{U_{CB}^{(2)}}{R_{134}} = 1.42A;$$

напруга між вузлами A та B :

$$U_{AB}^{(2)} = U_{CB}^{(2)} - I_3^{(2)} R_3 = 19.68V ;$$

сила струму у гілках із опорами R_4 , R_1 і r_{01} :

$$I_4^{(2)} = \frac{U_{AB}^{(2)}}{R_4} = 0.49A$$

$$I_1^{(2)} = \frac{U_{AB}^{(2)}}{(R_1 + r_{01})} = 1.09A$$

3. Використовуючи принцип суперпозиції, визначимо дійсні струми у гілках ланцюга:

$$I_1 = I_1^{(1)} - I_1^{(2)} = 0.46A;$$

$$I_2 = -I_2^{(1)} + I_2^{(2)} = 1.17A;$$

$$I_3 = I_3^{(1)} - I_3^{(2)} = -0.42A;$$

$$I_4 = I_4^{(1)} - I_4^{(2)} = 1.04A;$$

$$I_5 = I_5^{(1)} - I_5^{(2)} = 0.74A.$$

Для перевірки правильності розрахунку складемо рівняння балансу потужності:

$$E_1 I_1 + E_2 I_2 = I_1^2 (R_1 + r_{01}) + I_2^2 (R_2 + r_{02}) + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5;$$

$$104.9 \text{ W} = 104.8 \text{ W}$$

Похибка обумовлена заокругленням розрахункових значень величин під час обчислень.

Практичне завдання 5.

. Вказати напрями струмів на схемі (рис. 32). Обчислити струми у всіх частинах ланцюга. Перевірити розрахунок рівнянням балансу потужності.

Скласти потенціальну діаграму зовнішнього контуру ланцюга, використовуючи дані таблиці 5.

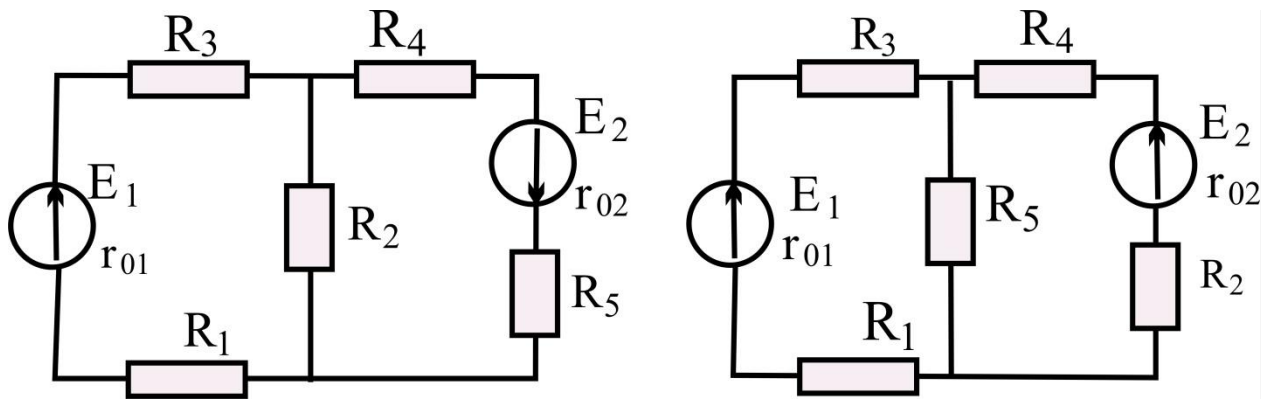


Рис.32. Схема складного ланцюга із двома джерелами струму

Таблиця 5

Значення параметрів ланцюгів практичного завдання 5.

ЕРС і опір	варіанти							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	a	b	a	b	a	b	a	b
E_1, V	10	20	30	40	50	60	50	40
R_{01}, Ohm	0	0.5	1.0	1.5	2.0	1.5	1.0	2.0
E_2, V	50	40	30	20	10	20	30	40
R_{02}, Ohm	0.2	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
R_1, Ohm	3	4	5	6	7	8	9	10
R_2, Ohm	4	5	6	7	8	9	10	11
R_3, Ohm	5	6	7	8	9	10	11	12
R_4, Ohm	6	7	8	9	10	11	12	14
R_5, Ohm	3	4	5	6	7	8	9	10

Тематика лабораторних занять

1	Ознайомлення з електрообладнанням та електровимірювальними приладами. Основне обладнання лабораторії. Правила проведення лабораторних робіт. Правила техніки безпеки. Вимірювання та обчислення опору трьома методами: – вольтметра-амперметра; – ватметра-амперметра; – вольтметра-ватметра.
2	Розрахунок кіл постійного струму.
3	Дослідження розгалуженого кола постійного струму. Ознайомлення з поняттями геометричних параметрів розгалуженого кола. Перевірка дослідним шляхом законів Ома та Кірхгофа.
4	Дослідження схеми з'єднання несиметричного трифазного навантаження зіркою.
5	Дослідження схеми з'єднання несиметричного трифазного навантаження трикутником.
6	Дослідження індуктивно зв'язаних електричних кіл
7	Розрахунок кіл синусоїдного струму у режимі резонансу.
8	Розрахунок кіл синусоїдного струму зі взаємоіндукцією.
9	Розрахунок трифазних електричних кіл.
10	Розрахунок нелінійних кіл постійного струму
11	Розрахунок магнітних кіл при постійних магнітних потоках
12	Розрахунок нелінійних кіл змінного струму

Критерії оцінювання

Критерії оцінювання за різними видами роботи

Вид роботи	бали	Критерії
Лабораторн і заняття	0 балів	Здобувач відтворює незначну частину навчального матеріалу, має поверхові уявлення про об'єкт вивчення, виявляє здатність елементарно висловити думку. Результати вимірювань отримує лише з допомогою викладача.
	1 бал	Знання освіти є достатньо повними, самостійно застосовує вивчений матеріал під час виконання лабораторної роботи, уміє аналізувати, робити висновки. Відповідь його повна, логічна, обґрунтована, але з деякими неточностями. Користується необхідною довідковою інформацією, що передбачена програмою. Звіт з виконання лабораторної роботи має незначні помилки.
	2 бали	Здобувач володіє глибокими, міцними знаннями і здатний усебічно використовувати їх при виконанні лабораторних робіт. Користується довідковою інформацією, що передбачена програмою. Звіт з лабораторної роботи виконаний на високому рівні.
Самостійна робота	0 балів	Здобувач розпізнає деякі об'єкти вивчення та називає їх (на побутовому рівні), може описувати деякі об'єкти вивчення; розпізнає інструменти та обладнання для виконання лабораторних робіт, знає їх призначення, має фрагментарні уявлення з предмета вивчення.
	1 бал	Здобувач знає окремі факти, що стосуються навчального матеріалу; виявляє здатність елементарно висловлювати думку; самостійно та за допомогою

		викладача може виконувати частину практичних завдань; знає послідовність виконання завдання; лабораторні роботи містять багато суттєвих відхилень від установлених нормативних показників та дотримується послідовності виконання лабораторних робіт, при їх виконанні потребує систематичної допомоги викладача.
	2 бали	Здобувач самостійно і логічно відтворює фактичний і теоретичний матеріал та наводить приклади; володіє навчальним матеріалом і використовує набуті знання, уміння у стандартних ситуаціях; самостійно виконує практичну роботу відповідно до інструкцій викладача; користується необхідною довідковою документацією.
	3 бали	Здобувач володіє глибокими знаннями, уміннями з дисципліни, аргументовано використовує їх у нестандартних ситуаціях, самостійно використовує інформацію у відповідності з поставленими завданнями; може систематизувати та узагальнювати навчальний матеріал; самостійно користується додатковими джерелами інформації.
Письмова робота	0-1	Здобувач не менше ніж на 50% контрольних завдань надав правильну відповідь – початковий рівень знань
	2-4	Здобувач на 51% - 70% контрольних завдань надав правильну відповідь – середній рівень знань
	5-7	Здобувач на 71% - 90% контрольних завдань надав правильну відповідь – достатній рівень знань
	8-10	Здобувач на 91% - 100% контрольних завдань надав правильну відповідь – високий рівень знань

Індивідуальне навчально-дослідне завдання (<i>тези</i>)	1 бал	Представлений текст не є по формі тезами (підміняється рефератом, доповіддю).
	2-3 бали	Тези не відповідають необхідному обсягу, змістовні зв'язки тексту тез з цитованими науковими текстами відсутні, внутрішня логіка есе порушена (текст є аплікацією з власної думки і «цитат» з наукових текстів). Представлено власну позицію за визначеною проблематикою на побутовому рівні без аргументації.
	4-5 балів	Тези відповідають необхідному обсягу, власна позиція здобувача формально підкріплена посиланнями на наукову літературу за відсутності змістовних зав'язків з цитованими науковими текстами. Проблема розкрита при формальному використанні фахових термінів. Власна думка не достатньо аргументована практичними фактами.
	6-7 балів	Тези відповідають необхідному обсягу, власна позиція викладена. Проблема розкрита з використанням основних термінів і понять у контексті відповіді (теоретичні зв'язки й обґрунтування не присутні або явно не простежуються). Наведено аргументацію своєї думки з опорою на факти. Проте наукове обґрунтування виконано схематично, позиція здобувача і наукові тексти формально узгоджені, при цьому внутрішня логіка тексту розмита.
	8-9 балів	Тези відповідає необхідному обсягу, власна позиція викладена аргументовано. Проблема розкрита на теоретичному рівні, з обґрунтуваннями, з достатнім

		використанням фахових термінів і понять у контексті відповіді. Власна думка аргументована практичними фактами.
	10 балів	Тези відповідають необхідному обсягу, власна позиція викладена грамотно і самостійно. Проблема розкрита на теоретичному рівні, у зв'язках і з обґрунтуваннями, з точним і повним використанням фахових термінів і понять у контексті відповіді. Робота логічна, послідовна, композиційно чітка. Дано аргументацію своєї думки з опорою на практичні факти.
Індивідуальне навчально-дослідне завдання (доповідь)	0	Завдання не виконано; доповідь має компеллятивний характер; висловлювання не відповідає (за змістом і формою) вимогам. Презентація відсутня.
	1 – 2	Зміст доповіді відповідає заявленій темі, проте тема розкрита частково. Наведені дані і факти обґрунтовують чи ілюструють сформульовані тези частково (не більше 3 зауважень). Достовірність інформації у доповіді має зауваження щодо двох вимог з трьох (точності, обґрунтованості, наявності посилань на джерела первинної інформації). Робота характеризується змістовою цілісністю, зв'язністю і послідовністю викладу, допущено не більше 1 логічної помилки. Композиційна структура промови витримана. Недоліки спостерігаються під час аргументації основних положень, встановленні причинно-наслідкових зв'язків. Здобувач переважно дотримується лексичних, граматичних, стилістичних норм усного мовлення, проте

		<p>припускається помилок різного характеру. Здобувач відчуває себе скуто, невпевнено і напружено. Ефективність промови невисока через відсутність контакту з аудиторією, недоцільне використання прийомів зацікавлення і утримання уваги слухачів, добір недостатньої кількості аргументів, небагатий арсенал лінгвістичних та екстралінгвістичних засобів. Мультимедійна презентація значною мірою не відповідає вимогам: відсутній титульний слайд, список використаних джерел, відсутнє логічне завершення презентації у вигляді висновків, змістовного узагальнення. Створено так званий «реферат з малюнками», тобто використано слайди з текстовою інформацією, переписаною з підручників, посібників, інтернету, замість формулювання тез чи ключових, опорних слів та фраз. Порушення вимог щодо дизайну презентації: відсутність стильової єдності в оформленні всіх слайдів презентації; невідповідність кольору фону та тексту; невдалий вибір кольорової гами, використання в дизайні більше 3-х базових кольорів; використання шрифтів, що утруднюють сприйняття тексту; відсутність відступів від краю слайду (поля). Наявність граматичних помилок.</p>
	3 – 4	<p>Зміст доповіді відповідає заявленій темі, проте тема розкрита не повно / наявні фрагменти, які не відповідають темі. Наведені дані і факти обґрунтовують чи ілюструють сформульовані тези</p>

		<p>частково (не більше 2 зауважень). Достовірність інформації у доповіді має зауваження щодо однієї з вимог (точності, обґрунтованості, наявності посилань на джерела первинної інформації). Здобувач демонструє сформованість умінь і навичок правильного (не більше 2 помилок) і переконливого мовлення, володіє навичками доцільної побудови промови, аргументованого доведення тез, проте відтворює завчений текст, не враховуючи особливості усного мовлення, обмежено послуговується ораторськими прийомами зацікавлення і утримання уваги слухачів, втрачає контакт з аудиторією. Засоби виразності використовуються не завжди доцільно. Під час виступу здобувач почувається достатньо впевнено. Не дотримано всіх вимог до створення мультимедійної презентації: спостерігається незначна інформаційна надмірність тексту презентації, чи/та перевантаженість ілюстративним матеріалом. Ілюстрації та графічні елементи органічно доповнюють текст, проте є незначні недоліки дизайну презентації.</p>
	5	<p>Зміст доповіді відповідає заявленій темі. Здобувач глибоко, повно й обґрунтовано розглядає предмет дослідження, посилається на джерела первинної інформації, подає узагальнення альтернативних теоретичних підходів в межах досліджуваної проблеми. Наведені дані й факти адекватно обґрунтовують чи ілюструють тези доповіді. Текст</p>

		<p>характеризується цілісністю та композиційною грамотністю. Використано достатній обсяг високоякісних інформаційних джерел. Здобувач демонструє вміння будувати розгорнутий монолог з фахової проблематики, логічно, правильно, точно, етично й емоційно висловлювати думку відповідно до змісту, умов комунікації й адресата, застосовуючи основні закони риторики і прагнучи при цьому виробити індивідуальний стиль. Студент володіє технікою і культурою мовлення, демонструє слухачам процес зародження і розвитку думки, використовує цитування, прийоми драматизації виступу, вдало імпровізує. Доповідь викликала велике зацікавлення й жваве обговорення у студентському середовищі, наявні позитивні коментарі. Навчальна презентація виконана з дотриманням усіх вимог: наявні усі структурні елементи; інформацію ретельно структуровано, представлено лаконічно, максимально інформативно, дотримано принципів науковості, послідовності у відборі текстового матеріалу; гармонійний дизайн; дотримано правил використання шрифтів, кольорового поєднання, стильової єдності оформлення; ілюстрації відповідають змісту презентації; дотримано норм літературної мови. Презентація вповні ілюструє й унаочнює доповідь.</p>
Індивідуальне навчально-	0 балів	Завдання не виконано; есе має компілятивний характер; висловлювання не відповідає (за змістом

дослідне завдання		і формою) вимогам, які висуваються до жанру академічного есе.
(есе)	1 – 3 бали	Здобувач демонструє неглибоку обізнаність з темою, її інтерпретація поверхова, судження подеколи компеллятивні. У роботі простежується комунікативний задум автора, представлений традиційний або обмежений набір ідей, відсутня діалогова (дискусійна) основа. Композиційна структура есе загалом витримана, проте наявні суттєві недоліки в аргументації основних положень, встановленні причинно-наслідкових зв'язків (не більше 2 логічних помилок), фрагменти іноді не пов'язані між собою, опущений аналіз суттєвих характеристик явища, не аналізуються альтернативні погляди на проблему. Спостерігається невдале поєднання теорії з фактичним матеріалом, використання риторики (тверджень) замість аргументації (доказів). Здобувач демонструє бідний словниковий запас, одноманітність граматичного ладу мови; спостерігається порушення мовностилістичних норм наукового стилю, зокрема наявне недоречне використання засобів виразності, неточне вживання термінології тощо; порушуються орфографічні й пунктуаційні норми.
	4 – 6 балів	Здобувач демонструє розуміння проблеми, чітко її формулює, проте розкриває її на низькому теоретичному рівні / заявлена тема розкрита не повно / наявні фрагменти, які не відповідають темі. Авторська модальність і оцінність виявляється

		<p>невизначено. Здобувач загалом володіє навичками створення академічного тексту, аргументованого доведення тез, загальна форма викладу відповідає жанру академічного есе, проте стиль викладу, використана лексика і термінологія не завжди відповідає академічним стандартам. Робота характеризується змістовою цілісністю і послідовністю викладу, проте логічно упорядковані думки не пов'язані між собою мовними засобами; вказані наявні альтернативні погляди на проблему без їх адекватної оцінки; спостерігаються порушення у використанні прийомів порівняння й узагальнення. Використано змішаний стиль викладу з переважанням неформального. Здобувач переважно дотримується лексичних, граматичних норм наукового стилю, проте наявні окремі орфографічні і синтаксичні помилки.</p>
	<p>7 – 9 балів</p>	<p>Здобувач демонструє розуміння проблеми, розкриває її на достатньому теоретичному рівні, присутня авторська модальність, оцінність, проте інтерпретація теми недостатньо глибока і самостійна. Здобувач загалом володіє навичками створення академічного тексту, аргументованого доведення, проте тези й приклади не завжди переконливі, здобувач переважно використовує традиційні форми доведення. Загальна форма викладу відповідає жанру академічного есе, проте стиль викладу, використана лексика і термінологія не завжди відповідає академічним стандартам;</p>

		<p>виклад зрозумілий і чіткий; наявні незначні порушення логіки чи послідовності викладу; пояснюються альтернативні погляди на проблему та їх оцінка; використовуються прийоми порівняння, зіставлення й узагальнення. Текст загалом оформлено правильно, але трапляються поодинокі порушення орфографічних чи пунктуаційних норм.</p>
	<p>10 балів</p>	<p>Здобувач демонструє глибоке розуміння проблеми, чітко її формулює, розкриває на високому теоретичному рівні, обґрунтовано використовує відомості з наукових джерел. Інтерпретація теми глибока й самостійна, переважає авторська модальність й оцінність. Загальна форма викладу відповідає жанру академічного есе; виклад зрозумілий і чіткий; стиль викладу відповідає академічним стандартам. Багатий словниковий запас, лексичні (зокрема термінологічні) та стилістичні засоби використовуються повністю адекватно й виразно. Наведені доведення логічні і обґрунтовані; сформульовані тези переконливі, супроводжуються грамотною аргументацією власної позиції; подаються альтернативні погляди на проблему та їх особиста оцінка автором; доречно й грамотно використовуються прийоми порівняння, зіставлення й узагальнення; судження свідчать про самостійність мислення і широту кругозору автора. Текст повністю відповідає вимогам точності й правильності мовлення; допущені окремі (1-2) мовленнєві або стилістичні огріхи.</p>

Критерії оцінювання підсумкового контролю (заліку)

Для навчальної дисципліни «Електротехніка і радіотехніка» навчальним планом передбачено підсумковий контроль у формі заліку. Кількість балів, необхідних для заліку (не менше 60), студент отримує під час участі у практичних заняттях, виконання всіх видів самостійної роботи

Бали	Критерії
0 балів	Здобувач не може дати відповіді на запитання.
1-5 балів	Здобувач володіє матеріалом на рівні окремих фрагментів, що становлять незначну частину навчального матеріалу.
6-10 балів	Здобувач вміє узагальнювати, систематизувати інформацію під керівництвом викладача, самостійно застосовувати її на практиці, контролювати власну діяльність, виправляти помилки.
11-15 балів	Здобувач вільно володіє вивченим обсягом матеріалу, застосовує його на практиці, вільно розв'язує вправи і задачі, самостійно виправляє допущені помилки, кількість яких незначна.
16-20 балів	Здобувач має міцні знання, впевнено відповідає на запитання, вміє застосовувати нестандартні підходи до розв'язання задач, вміє самостійно виконувати поставлені завдання і давати аргументовано правильну відповідь.

Критерії оцінювання за всіма видами контролю

Сума балів	Критерії оцінки
Відмінно (90 – 100 А)	Здобувач має глибокі, міцні й систематичні знання всіх положень теорії, може не тільки вільно сформулювати, але й самостійно довести закони, теореми, принципи, використовує

	<p>здобуті знання і вміння в нестандартних ситуаціях, здатний вирішувати проблемні питання. Відповідь студента відрізняється точністю формулювань, логікою, достатній рівень узагальненості знань</p> <p>Здобувач самостійно розв'язує типові задачі різними способами, стандартні, комбіновані й нестандартні проблемні задачі, здатний проаналізувати й узагальнити отриманий результат. Виконуючи практичні й лабораторні роботи, студент дотримується всіх вимог, передбачених програмою курсу. Крім того, його дії відрізняються раціональністю, вмінням оцінювати помилки й аналізувати результати</p>
<p>Добре (82-89 В)</p>	<p>Здобувач знає і може самостійно сформулювати основні закони, теореми, принципи та пов'язати їх з реальними явищами, може привести як словесне, так і математичне формулювання основних положень теорії, навести приклади їх застосування в практичній діяльності, але не завжди може самостійно довести їх. Студент може самостійно застосовувати знання в стандартних ситуаціях, його відповідь логічна, але розуміння не є узагальненим</p> <p>Здобувач самостійно розв'язує типові (або за визначеним алгоритмом) вправи й задачі, володіє базовими навичками з виконання необхідних математичних операцій та перетворень, може самостійно сформулювати типову задачу за її словесним описом, скласти розрахункову схему та обрати раціональний метод розв'язання, але не завжди здатний провести аналіз і узагальнення результату. Виконуючи практичні або лабораторні роботи, студент може самостійно підготувати робоче місце, виконати роботу в повному обсязі й зробити правильні висновки</p>
<p>Добре (74-81 С)</p>	<p>Здобувач добре володіє навчальним матеріалом, знає основні теоретичні положення, що відповідають програмі</p>

	<p>навчальної дисципліни, аналізує можливі практичні ситуації та вирішує їх, але припускається помилок які усуває за підтримки з боку викладача або однокурсників. Пояснює основні положення, дає правильні відповіді по сутності складання електричного кола за їх принциповими схемами. Помилки у відповідях не є системними, впевнено працює за алгоритмом.</p>
<p>Задовільно (64-73 D)</p>	<p>Здобувач відтворює основні поняття й визначення курсу, але досить поверхово, не виділяючи взаємозв'язок між ними, може сформулювати з допомогою викладача основні положення теорії (аксіоми, закони, принципи), знає умовні позначення основних величин та їх розмірність, може записати окремі математичні вирази теоретичного положення за словесним формулюванням і навпаки; допускає помилки, які повною мірою самостійно виправити не може</p> <p>Здобувач може розв'язати найпростіші типові задачі за зразком, виявляє здатність виконувати основні елементарні операції та перетворення, але не спроможний самостійно сформулювати задачу за словесним описом і визначити метод її розв'язання. Лабораторні роботи студент виконує за зразком (інструкцією), але з помилками; робить висновки, але не розуміє достатньою мірою мету роботи</p>
<p>Задовільно (60-63 E)</p>	<p>Здобувач поверхнево опанував навчальний зміст, передбачений програмою навчальної дисципліни, володіє основними положеннями на мінімально допустимому рівні. Знання щодо електротехніки несистемні, фрагментарні. Виконання практичних завдань, формалізоване: є відповідність алгоритму, виконує практичні завдання за підтримки з боку викладача зі значними труднощами; відсутнє розуміння внутрішньої логіки розуміння принципів роботи електротехнічного пристрою за його схемою</p>

<p>Незадовільно (35-59 FX)</p>	<p>Відповідь студента під час відтворення навчального матеріалу елементарна, фрагментарна, зумовлена нечіткими уявленнями про закони і явища. У відповіді цілком відсутня самостійність. Студент знайомий лише з деякими основними поняттями та визначеннями курсу, з допомогою викладача може сформулювати лише деякі основні положення теорії (аксіоми, теореми, принципи, закони)</p> <p>Здобувач знає умовні позначення та вміє розрізняти основні величини, вміє розв'язувати задачі лише на відтворення основних формул, здійснювати найпростіші математичні дії. Виконуючи практичні (лабораторні) роботи, студент вміє користуватися окремими приладами, але не може самостійно виконати роботу і зробити висновки</p>
--------------------------------	--

ПІСЛЯМОВА

У посібнику розглянуто широке коло питань, з якими учням доводиться стикатися при вивченні курсу електрики в загальному курсі фізики, при вирішенні різноманітних завдань, пов'язаних з ремонтом, налагодженням та роботою електричного обладнання на автотранспорті, різних будівельних та сільськогосподарських машин, при роботі в лабораторіях, та й просто у повсякденному житті. Існує ще багато методів розв'язання електричних схем. Студент зможе з ними легко розібратися, володіючи розглянутими методами розрахунків схем у цьому посібнику.

Література

1. Гуржій А.М., Сільвестров А.М., Поворознюк Н.І. Електротехніка з основами промислової електроніки: Підручник.-К.: Форум, 2002.
2. Шаповаленко , О.Г. Бондар В.М. Основи електричних вимірювань: Підручник.-К.: Либідь, 2002.
3. Бондар В.М. , Гаврилюк В.А., Духовний А. Х.та інш. Практична електротехніка: Підручник.- К.- Веселка,1997
4. Гордієнко , Ю.О., Гуржій А.М., Бородин О.В. та інш. Напівпровідникові прилади, інтегральні мікросхеми та технологія їх виробництва: Підручник.- Х.: Компанія СМІТ, 2004
5. Принц М.В., Цимбалістий В.М. Електричні мережі. Монтаж, обслуговування та ремонт: Підручник.- Львів: Оріяна Нова, 2003
6. Анисимов М.В. Електротехніка з основами промислової електроніки: Посібник.- К.: Вища школа, 1997
7. Ачкасов А.С., Лушкін В.А., Охріменко В. М., Кузнецов А. І., Чернявська М.В., Воронкова Т. Б. Електротехніка у будівництві: Навчальний посібник. - Харків: ХНАМГ, 2009
8. Клименко Б.В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: навчальний посібник. – Харків: Вид-во «Точка», 2012.
9. “Основи електротехніки та електроніки”. Конспект лекцій для студентів базового напрямку “ / Укл. В.С. Мадай. – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2005.
10. В.Д. Юхимчук, М.О. Осташевський, Т.П. Павленко. За ред. В.І.Мілих.Дослідження машин постійного струму: Лабораторний практикум / Харків: НТУ «ХП», 2008.
Source: <https://formula.kr.ua/dovidniki-posibniki-pidruchniki/pidruchnyky-z-elektrotekhniky.html>
11. Вовк О. Ю. Електротехніка: Навчальний посібник для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка

та електромеханіка» / О. Ю. Вовк, ТДАТУ. – Мелітополь : ВПЦ «Люкс», 2021. – 203 с.

