

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

В. М. Кичак, Ю. В. Крушевський, Д. В. Гаврілов

ОСНОВИ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2010

УДК 621.3.01
ББК 32
К46

Рецензенти:

М. М. Климаш, доктор технічних наук, професор

О. А. Серков, доктор технічних наук, професор

В. П. Манойлов, доктор технічних наук, професор

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом підготовки "Радіоелектронні апарати". Лист № 1/11-8814 від 22.09.2010.

Кичак, В. М.

К46 Основи радіоелектроніки : навчальний посібник / В. М. Кичак, Ю. В. Крушевський, Д. В. Гаврілов. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 368 с.
ISBN 978-966-641-387-4

В навчальному посібнику розглянуті фундаментальні основи теорії кіл та сигналів, такі як: вивчення властивостей і параметрів електричних кіл постійного і гармонічного струмів, що складаються з основних пасивних елементів, утворюючи вузли і пристрої, де протікають фізичні процеси; аналіз детермінованих радіотехнічних сигналів; кодування повідомлень і елементарні відомості з теорії інформації; проходження радіотехнічних сигналів через лінійні кола; нелінійні перетворення сигналів і принципи реалізації процесів: випрямлення, детектування, множення частоти, модулювання перетворення частоти.

УДК 621.3.01
ББК 32

ISBN 978-966-641-387-4

© В. Кичак, Ю. Крушевський, Д. Гаврілов, 2010

ЗМІСТ

Вступ.....	9
1 Кола постійного струму.....	13
1.1 Електричне коло.....	13
1.2 Вибір напрямку протікання струму та напрямку напруги	14
1.3 Резистор і опір. Закон Ома.....	16
1.4 Енергія і потужність електричного струму.....	18
1.5 Генератор напруги (е. р. с.) та генератор струму	19
1.6 Основні поняття електричної схеми	22
1.7 Лінійні, нелінійні та параметричні кола.....	24
1.8 Розподіл потенціалів вздовж електричного кола	26
1.9 Закони Кірхгофа.....	27
1.10 Еквівалентні перетворення електричних схем методом згортання.....	29
1.11 Взаємне перетворення трикутника і зірки опорів	33
Запитання та задачі для закріплення.....	35
2 Гармонічний струм	37
2.1 Генерування гармонічних е. р. с. та струму.....	37
2.2 Математична і графічні моделі та параметри гармонічного струму.....	39
2.3 Середнє та діюче значення гармонічного струму	44
2.4 Резистор і активний опір	46
2.5 Котушка індуктивності та індуктивність	50
2.6 Конденсатор і електрична ємність	54
Запитання та задачі для закріплення	58
3 Кола гармонічного струму і символічний метод їх розрахунку.....	59
3.1 Комплексні числа та прості математичні операції над ними.....	59
3.2 Подання обертового вектора комплексною функцією	62
3.3 Закони Ома та Кірхгофа у комплексній формі	63
3.4 Застосування законів Ома і Кірхгофа для комплексних амплітуд при розрахунку електричних кіл	66
3.5 Комплексна потужність та її складові	74
3.6 Баланс потужностей.....	75
3.7 Комплексно-спряжене узгодження генератора і приймача енергії	77
Запитання та задачі для закріплення.....	79

4	Перетворення схем електричних кіл гармонічного струму.....	81
4.1	Послідовне, паралельне та змішане з'єднання.....	81
4.2	Еквівалентні схеми реальних котушки індуктивності і конденсатора.....	85
4.3	Взаємне перетворення трикутника та зірки комплексних опорів.....	88
4.4	Еквівалентні генератор струму та генератор напруги	89
4.5	Перетворення схем з паралельно увімкненими генераторами	91
4.6	Перетворення схем з електричною симетрією	92
	Запитання та задачі для закріплення.....	94
5	Одиничний коливальний контур	95
5.1	Вільні коливання в ідеальному контурі.....	95
5.1.1	Рівняння коливань і його розв'язування	95
5.1.2	Процес коливань та його механічна модель	97
5.1.3	Параметри ідеального контуру.....	99
5.2	Вільні коливання в реальному контурі.....	102
5.2.1	Рівняння коливань та його розв'язування.....	102
5.2.2	Параметри реального контуру.....	104
5.3	Вимушені коливання у послідовному коливальному контурі.....	108
5.3.1	Вхідний опір та його складові.....	108
5.3.2	Векторні діаграми. Резонанс напруг.....	110
5.3.3	Вплив опору навантаження на параметри контуру.....	112
5.3.4	Вхідний опір контуру при невеликих розстроюваннях.....	113
5.3.5	Амплітудно-частотні характеристики за напругою	116
5.3.6	Фазочастотні характеристики за напругою	117
5.3.7	Настроювальні криві	118
5.3.8	Рівняння вибірності та смуга пропускання при невеликих розстроюваннях.....	120
5.4	Вимушені коливання у паралельному контурі	124
5.4.1	Паралельний контур загального виду.....	124
5.4.2	Паралельний контур I виду.....	126
5.4.2.1	Вхідний опір.....	127
5.4.2.2	Частотні характеристики вхідного опору	128
5.4.2.3	Векторні діаграми і еквівалентні схеми контуру при розстроюванні.....	130
5.4.2.4	Резонанс струмів.....	132
5.4.2.5	Енергетичне пояснення характеру вхідного опору паралельного контуру.....	133
5.4.2.6	Вплив внутрішнього опору генератора та навантаження на параметри контуру	134

5.4.2.7	Амплітудно-частотна характеристика за напругою.....	136
5.4.2.8	Вибірність і смуга пропускання.....	137
5.4.2.9	Порівняння послідовного і паралельного контурів	138
5.4.3	Паралельний контур II виду	139
5.4.4	Паралельний контур III виду	142
	Запитання та задачі для закріплення.....	144
6	Симетричні кола трифазного струму	146
6.1	Трифазні електричні кола	146
6.2	З'єднання зіркою.....	148
6.3	З'єднання трикутником.....	150
	Запитання та задачі для закріплення.....	152
7	Деякі методи аналізу складних електричних кіл	153
7.1	Застосування законів Кірхгофа	153
7.2	Метод накладання	154
7.3	Коефіцієнт передачі напруги і струму.....	157
7.4	Метод еквівалентного генератора.....	158
	Запитання та задачі для закріплення.....	160
8	Кола зі взаємною індуктивністю	161
8.1	Взаємна індуктивність.....	161
8.2	Полярність індуктивно зв'язаних котушок. Е. р. с. взаємної індукції	162
8.3	Взаємоіндуктивність при послідовному і паралельному ввімкненні індуктивно зв'язаних котушок	164
8.4	Рівняння та схема заміщення трансформатора без феромагнітного осердя.....	167
8.5	Автотрансформатор.....	171
	Запитання та задачі для закріплення.....	172
9	Вимушені коливання у системі зв'язаних контурів.....	173
9.1	Основні схеми систем зв'язаних контурів	173
9.2	Коефіцієнт зв'язку	175
9.3	Вхідний опір системи двох контурів з трансформаторним зв'язком.....	177
9.4	Внесені опори та їх фізичний зміст.....	178
9.5	Настроювання системи двох зв'язаних контурів	182
9.5.1	Перший частинний резонанс	183
9.5.2	Другий частинний резонанс	184
9.5.3	Повний резонанс	185
9.5.4	Амплітудно-частотні характеристики двох трансформаторно зв'язаних контурів.....	190
9.5.5	Вибірність зв'язаних контурів	195
	Запитання та задачі для закріплення.....	196

10	Електричні фільтри	198
10.1	Призначення та класифікація фільтрів	198
10.2	Реактивні фільтри типу k	202
10.2.1	Фільтри нижніх частот	202
10.2.2	Фільтри верхніх частот	205
10.2.3	Смугові та загороджувальні фільтри	207
10.3	Реактивні фільтри типу m	209
10.4	Резистивно-ємнісні фільтри	211
10.4.1	RC-фільтри верхніх частот	212
10.4.2	RC-фільтри нижніх частот	214
10.4.3	Смугові та загороджувальні RC -фільтри	215
10.5	Фільтри зосередженої селекції	216
	Запитання та задачі для закріплення	219
11	Радіотехнічні процеси та задачі радіоелектроніки	220
11.1	Поняття інформації, повідомлення, сигналу	220
11.2	Телефонія	221
11.3	Основні радіотехнічні процеси	222
11.4	Радіотелефонія і радіотелеграфія	225
11.5	Радіолокація	227
	Запитання та задачі для закріплення	229
12	Сигнали	230
12.1	Класифікація сигналів	230
12.2	Амплітудно– і фазочастотний спектри	236
12.3	Спектральний аналіз сигналів	238
12.3.1	Спектральний аналіз періодичної послідовності прямокутних імпульсів	238
12.3.2	Спектральний аналіз неперіодичних сигналів	243
12.4	Кореляційний аналіз сигналів і їх енергія	247
12.4.1	Енергія сигналу	247
12.4.2	Кореляційна функція сигналу	248
12.4.2.1	Кореляційні функції скінченних сигналів	248
12.4.2.2	Кореляційна функція періодичного сигналу	252
12.4.2.3	Кореляційна функція дискретного сигналу	253
12.4.3	Зв'язок між кореляційною функцією і спектраль- ною характеристикою сигналу	256
	Запитання та задачі для закріплення	257
13	Радіосигнали	258
13.1	Загальні визначення	258
13.2	Амплітудно-модульовані сигнали	259
13.3	Частотний спектр однотонально амплітудно- модульованого сигналу	261

13.4	Частотний спектр АМ сигналу при модуляції складним сигналом.....	264
13.5	Потужність АМ сигналу.....	267
13.6	Сигнал з кутовою модуляцією.....	269
13.7	Частотний спектр однотонального ЧМ сигналу при $M \ll 1$	271
13.8	Частотний спектр однотонального ЧМ сигналу при довільному значенні індексу модуляції.....	272
13.9	Потужність сигналів з кутовою модуляцією	274
13.10	Спектр коливання при змішаній амплітудно-частотній модуляції	275
	Запитання та задачі для закріплення.....	276
14	Перехідні процеси	277
14.1	Поняття про перехідні процеси	277
14.2	Неперервність енергії. Закони комутації.....	278
14.3	Увімкнення котушки індуктивності на постійну напругу.....	279
14.4	Увімкнення RC-кола на постійну напругу	284
14.5	Перехідні процеси у колах з R, L та C	289
14.6	Перехідні процеси в RLC-колі при дії на нього прямокутних відеоімпульсів.....	291
14.7	Перехідні процеси в RLC-колі при дії на нього прямокутних радіоімпульсів.....	293
14.8	Одинична функція та перехідна характеристика кола.....	296
14.9	Імпульсна функція та імпульсна характеристика кола.....	297
	Запитання та задачі для закріплення.....	298
15	Проходження сигналів через лінійні кола	299
15.1	Диференціувальні кола.....	299
15.2	Інтегрувальні кола.....	303
15.3	Проходження амплітудно-модульованих сигналів через коливальні кола	305
15.4	Проходження частотно-модульованих сигналів через коливальні кола	310
	Запитання та задачі для закріплення.....	311
16	Нелінійні процеси в радіотехніці	312
16.1	Зовнішні характеристики нелінійних елементів і способи їх описування.....	312
16.2	Спектральний склад струму у нелінійному елементі при гармонічній зовнішній дії.....	316
16.3	Нелінійні перетворення суми двох гармонічних сигналів	323
	Запитання та задачі для закріплення.....	329

17	Елементи теорії інформації і кодування	330
17.1	Загальні зауваження.....	330
17.2	Дискретизація та квантування сигналів	331
17.2.1	Рівномірна дискретизація за частотним критерієм Котельникова.....	331
17.2.2	Равномірне квантування за рівнем.....	333
17.3	Кодування сигналів.....	334
17.3.1	Коди, види кодів та їх параметри.....	334
17.3.2	Системи числення і прості цифрові коди.....	335
17.3.3	Складені коди	337
17.3.4	Кодування дискретних та неперервних повідомлень	338
17.4	Кількість інформації і ентропія	342
17.4.1	Кількісна оцінка інформації	342
17.4.2	Ентропія як міра невизначеності.....	346
17.4.3	Надмірність повідомлень	348
17.5	Швидкість передачі інформації.....	351
17.5.1	Об'єм сигналу і ємність інформаційного каналу	351
17.5.1	Швидкість передачі сигналу та пропускна здатність каналу	353
17.6	Методи підвищення надійності передачі інформації.....	354
17.6.1	Коди з виявленням помилок	354
17.6.2	Коди з виправленням помилок.....	357
	Запитання та задачі для закріплення.....	360
	Глосарій.....	361
	Словник найбільш уживаних термінів.....	363
	Література	366

ВСТУП

Життя сучасного суспільства практично неможливе без радіоелектронних засобів. Радіомовлення (broadcasting), телебачення (television), телефон (telephone), телеграф (telegraph), телетайп, радіолокація, промислова, медична та аграрна електроніка – далеко не повний перелік електронних засобів, які широко використовуються у нашому житті.

Але будь-яка система забезпечується сукупністю електричних і електронних пристроїв різної складності, які складаються з елементів, до яких прикладені електричні напруги (voltages) або протікають електричні струми (currents). Будь-які складні радіоелектронні пристрої складаються з різноманітних електричних кіл (circuits), які мають певні електричні властивості. Таким чином, щоб розробляти, виготовляти, грамотно експлуатувати різноманітну радіоелектронну апаратуру, необхідно, перш за все, знати процеси, які протікають в електричних колах за певних умов, а також закони, за якими ці процеси протікають; основні з таких законів вивчаються в дисципліні "Основи радіоелектроніки".

Вже в кінці 60-х років минулого століття стало зрозумілим, що знання з основ електротехніки, які повинні мати фахівці у галузі передачі інформації, значно відрізняються від відомостей, необхідних фахівцям у галузях електроенергетики, електромеханіки і т. ін. Енергетика базується, перш за все, на постійному або періодичному струмі промислової частоти і займається виробленням, передаванням та використанням електричної енергії для нагрівання, освітлення, роботи електричних моторів тощо. Для радіоспеціалістів основними задачами є отримання та використання електричних сигналів з певним спектром частот з метою передавання та обробки інформації, забезпечуючи при цьому мінімальне її спотворення.

Посібник "Основи радіоелектроніки" включає розділи, які розглядалися в різних дисциплінах, у тому числі – в електротехніці, радіотехніці, теорії зв'язку і в деяких інших. Ця теорія не мала б сучасного вигляду, якби численні дослідники не внесли свій вклад в науку про властивості електромагнітних полів, електричних кіл та їх технічного застосування. Згадаємо лише деяких з них. Серед багатьох виділимо відкриття англійським фізиком-самоучкою Майклом Фарадеєм у 1831 році явища електромагнітної індукції (electromagnetic induction). Його співвітчизник, блискучий теоретик Джеймс Клерк Максвелл, розробив теорію електромагнітних явищ, передбачивши існування електромагнітних хвиль (1883 рік), а німецький вчений Генріх Герц у 1888 році експериментально довів їх існування. Петербурзький професор О. С. Попов у 1895 році винайшов радіо, побудував перший радіоприймач, у 1897 році встановив можливість радіолокації, а в 1900 році організував перший радіозв'язок острова Гогланд з материком. Подальші численні роботи з теорії і практики радіоприймальних, радіопередавальних пристроїв на базі

досягнень електроніки, радіотехнічних систем і т. ін, породили цілий світ, який ми сьогодні називаємо радіоелектронікою.

Радіоелектроніка продовжує інтенсивно розвиватися та вдосконалюватися і сучасному спеціалісту у цій галузі прийдеться займатися пристроями, які сьогодні знаходяться ще у стадії розробки або проектування, а до цього потрібно бути готовим.

Місце радіотехніки у галузях сучасної науки і техніки

Важливе місце у галузях сучасної науки і техніки, досягнення яких безпосередньо сприяють зростанню економічного і культурного рівня суспільства, належить радіотехніці.

Радіотехніка – це науково-технічна галузь, задачами якої є:

1) вивчення принципів генерування (generation), підсилення (amplification), випромінювання і приймання електромагнітних коливань, які відносяться до радіодіапазону;

2) практичне використання цих коливань з метою передавання, зберігання і перетворення інформації.

На початковому етапі свого розвитку слідом за винаходом радіо (О. С. Попов, 1895 р.) радіотехніка розв'язувала переважно проблеми електрозв'язку, використовуючи електромагнітні коливання з довжинами хвиль у декілька сотень чи тисяч метрів. На теперішній час царина застосування радіотехніки незрівнянно зросла. Радіозв'язок, телебачення, радіолокація, радіоуправління, радіонавігація, радіотехнічні методи в біології, медицині, сільському господарстві – такий неповний перелік галузей радіотехніки.

Проникнення радіотехніки у суміжні наукові і технічні галузі (електроніку, обчислювальну техніку) зумовило виникнення широкої науково-технічної галузі, яка отримала узагальнену назву радіоелектроніка.

Як відомо із загального курсу фізики, передавання інформації від її джерела до споживача за допомогою радіотехнічних засобів здійснюється по радіоканалу. Основні елементи радіоканалу – передавальний пристрій, приймальний пристрій та фізичне середовище, яке їх розділяє і у якому відбувається поширення радіохвиль. Середовищем поширення може бути як вільний простір, так і спеціальні технічні пристрої: хвилеводи, кабелі та інші лінії передавання.

Сигнал, який надходить від первинного джерела повідомлення, на передавальному боці радіоканалу за допомогою мікрофону, передавальної телевізійної камери чи інших подібних пристроїв перетворюється в електричні коливання. Ці коливання не можуть бути безпосередньо використаними для збудження електромагнітних хвиль через їх відносно низькочастотність. Тому у радіотехніці застосовують способи передавання сигналів, за якими низькочастотні коливання (low-frequency oscillations), що містять вихідне повідомлення, за допомогою спеціальних пристроїв керують параметрами достатньо потужного несучого коливання, частота

якого лежить у радіодіапазоні. Процес подібного перетворення сигналів називають модуляцією (modulation) несучого коливання.

Модульований сигнал випромінюється антеною передавального пристрою. Збуджені при цьому електромагнітні хвилі досягають приймальної антени і збуджують в ній радіосигнал, рівень якого дуже малий. Після частотної фільтрації (filtration) і підсилення прийнятий сигнал підлягає демодуляції (demodulation) (детектуванню) – операції, протилежній відносно модуляції. У результаті на виході приймального пристрою виникають коливання, які є копією переданого вихідного повідомлення.

Наведений опис принципу функціонування найпростішого радіоканалу підкреслює, що передавання повідомлень по радіоканалу супроводжується різноманітними перетвореннями сигналів. Ці перетворення здійснюються у відповідних радіотехнічних пристроях: підсилювальних, фільтрувальних, частотно-вибірних, частотоперетворювальних, модуляторів, детекторів і багатьох інших.

У будь-якому реальному радіоканалі окрім корисного сигналу обов'язково присутні завади, які виникають з багатьох причин, – через хаотичність руху електронів в елементах кіл, вплив сусідніх радіоканалів, промислових завод, сонячного і іншого космічного випромінювання і т.ін. Здатність радіотехнічних засобів передавання інформації протидіяти шкідливому впливу завод і забезпечувати високу правильність передавання називають заводостійкістю.

У наш час радіотехніка є науково-прикладною галуззю, яка дуже швидко розвивається. Говорячи про найближчі перспективи її розвитку, слід зазначити тенденцію переходу до усе більш високочастотних діапазонів електромагнітних коливань. Так, коливання надвисокочастотного діапазону (НВЧ) (super high frequency), який раніше застосовувався в основному у радіолокації, став широко використовуватись в телевізійних системах, наприклад, супутникове побутове телебачення. Практика професійного радіозв'язку широко використовує лазерні джерела несучих частот і оптично-волоконні лінії зв'язку, які працюють у світловому і інфрачервоному діапазонах.

Швидкими темпами розвивається елементна база радіоелектроніки шляхом наукового дослідження та запровадження у практику функціональних пристроїв, які виконують обробку сигналів за рахунок специфічних хвильових і коливальних явищ у твердих тілах – напівпровідниках, діелектриках і магнітних матеріалах. Величезну роль у сучасній радіотехніці відіграють виробники мікроелектронної технології. Доступні, недорогі, надійні і швидкодіючі інтегральні мікросхеми рішуче змінили вигляд технічних засобів багатьох галузей радіоелектроніки. Мікроелектроніка зумовила широкий перехід до принципово нових цифрових способів обробки і перетворення радіотехнічних сигналів.

Маємо усі підстави сподіватись, що галузі радіотехніки будуть і у подальшому розширюватись і розвиватись на базі прогресу у багатьох суміжних галузях науки і техніки.

Задачі курсу

Основною задачею курсу є вивчення властивостей і параметрів електричних кіл постійного (direct) і гармонічного (harmonious) струмів, що складаються з основних пасивних елементів (R, L, і C), утворюючи вузли і пристрої, де протікають фізичні процеси, характерні в радіоелектроніці.

Відповідно до такої постановки задачі курс включає в себе:

- 1) аналіз детермінованих (регулярних) коливань – детермінованих радіотехнічних сигналів;
- 2) кодування повідомлень і елементарні відомості з теорії інформації;
- 3) проходження радіотехнічних сигналів через лінійні кола;
- 4) нелінійні перетворення (transformation) сигналів і принципи реалізації процесів: випрямлення, детектування, множення частоти, модулювання перетворення частоти.

Царина застосування радіоелектроніки

Окрім уже згаданих радіотелефонного і радіотелеграфного зв'язку, радіомовлення і радіолокації до радіоелектроніки відносяться: **радіонавігація** – водіння кораблів, літальних апаратів, сухопутного транспорту за допомогою радіозасобів; **телебачення** – передача світлових зображень; **радіокерування** – керування об'єктами за допомогою радіотехнічних засобів; **радіотелеметрія** – передавання з віддаленого об'єкта даних вимірювань, які там виконуються автоматично; **радіометеорологія** – отримання даних про погоду за допомогою радіотехнічних засобів; **радіоастрономія** – дослідження небесних тіл радіотехнічними методами та засобами; **промислова радіоелектроніка** – електронні пристрої, які застосовуються у промисловості і на транспорті; **радіоелектроніка** в науці, медицині, сільському господарстві і т. ін.

Класифікація радіозасобів за їх складністю

З радіоелементів (резисторів, котушок індуктивності, конденсаторів, діодів, транзисторів і т. ін.) складаються каскади, з каскадів – вузли, далі слідуєть блоки (високочастотний, низькочастотний, блок живлення і т. ін.), радіоапарати або радіопристрої (власне антена, передавач, приймач і т. ін.), радіосистеми і, нарешті, радіотехнічні комплекси.

Радіозв'язок, радіомовлення, телебачення здійснюються системами передачі інформації, а радіолокація по відбитих від цілі хвилях здійснюється системами добування інформації про параметри об'єкта.

Радіотехнічний комплекс (велика радіосистема), розв'язує у повному обсязі задачу дуже складну за допомогою групи радіосистем. Так, комплекс протиракетної (ПРО) та протиповітряної (ППО) оборони складається з систем добування, передачі, обробки (з допомогою ЕОМ, як правило) і руйнування інформації, а також системи радіокерування бойовими засобами ПРО та ППО.

1 КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1.1 Електричне коло

Електричне коло – це сукупність пристроїв, призначених для передачі електричної енергії від її джерела (transmitter) до споживача (receiver). Функціонально усі пристрої, що складають електричне коло, можна поділити на три групи: перша група – це **джерела** електричної енергії, друга – проміжні пристрої, третя – **споживачі** електричної енергії.

Прикладами джерел електричної енергії є гальванічні елементи, акумулятори, термоелементи, електричні генератори, тобто будь-які пристрої, в яких відбувається перетворення хімічної, теплової, механічної чи будь-якого іншого виду енергії в електричну. Джерелом енергії є і приймальна антена лінії радіозв'язку, але в ній не відбувається перетворення одного виду енергії в інший.

Прикладами споживачів (приймачів) електричної енергії є електричні лампи, електронагрівні прилади (електроплити, електропраски), електричні двигуни, радіоприймачі та будь-які інші пристрої, де електрична енергія перетворюється у будь-який інший вид енергії. До приймачів електричної енергії можна віднести і передавальні антени, де електрична енергія випромінюється у вільний простір без її перетворення в інший вид.

Проміжні пристрої є безпосередніми приймачами енергії від її джерела і призначені для передавання цієї енергії у потрібній кількості кінцевому споживачеві. Прикладами проміжних пристроїв є електродроти, трансформаторні підстанції тощо.

Усі електричні кола можна розділити за видом струму, який у них протікає: кола постійного струму та кола змінного струму. У даному розділі будемо розглядати лише кола постійного струму.

Окремі прості пристрої, які входять до складу електричного кола і виконують у ньому певні функції, називаються елементами цього електричного кола. Усі елементи електричних кіл розділяються на **активні** (active) і **пасивні** (passive) елементи.

Активними елементами вважаються джерела електричної енергії: генератори напруги (e. p. c.) або генератори струму. Пасивними елементами електричного кола є резистори, котушки індуктивності (inductor), конденсатори (capacitor) тощо. Відповідно розрізняють **активні і пасивні кола**. Активні кола – це електричні кола, які містять джерела енергії, а пасивні електричні кола складаються лише з пасивних елементів.

Зрозуміло також, що в електричному колі джерело енергії можна назвати генератором (напруги або струму), а споживача – навантаженням цього генератора.

Слід зауважити, що поняття "джерело" ("генератор") і "споживач" ("навантаження") не є строго прив'язаним до певних елементів електричного кола. Для прикладу розглянемо просте електричне коло (рис. 1.1), яке складається з джерела електричної енергії 1, проміжного пристрою 2 (дроти лінії електропередачі) та кінцевого споживача електричної енергії 3.

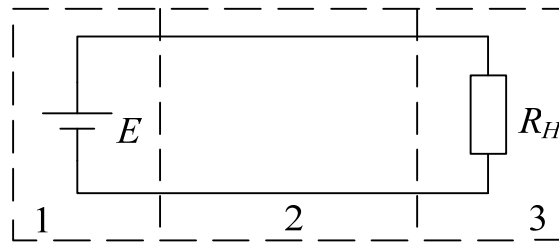


Рисунок 1.1 – Схема простого електричного кола

На границі між джерелом і лінією електропередачі, лінія 2 є навантаженням (споживачем) джерела (генератора) 1, але, у свою чергу, на границі лінії електропередачі 2 та кінцевого споживача 3 лінія електропередачі виступає у ролі джерела (генератора) для споживача (навантаження). Тобто складне електричне коло можна розділити на пари: генератор – навантаження, де навантаження у попередній парі буде генератором у наступній. Такий підхід дозволяє швидше розібратися і з'ясувати принцип дії досить складних вузлів радіотехнічних пристроїв.

1.2 Вибір напрямку протікання струму та напрямку напруги

Відомо, що електричний струм провідності у металах є спрямованим рухом негативних зарядів (електронів), а струм провідності в електролітах та газах – спрямованим рухом позитивних зарядів (позитивних іонів) і негативних зарядів (негативних іонів). При цьому позитивні та негативні іони рухаються у протилежних напрямках. За позитивний напрямок протікання електричного струму було прийнято напрямок руху позитивних іонів. Отже, у металах напрямок протікання електричного струму є протилежним напрямку руху електронів, негативних зарядів, напрямлений рух яких власне і є електричним струмом. Подібна ситуація спостерігається, наприклад, в електровакуумному приладі, де електричний струм вважається напрямленим від анода до катода, хоча фактично потік електронів (electrons) спрямований від катода (cathode) до анода (anode).

Кількісно постійний електричний струм визначається як відношення кількості електричного заряду, що проходить через провідник деякого поперечного перерізу за певний проміжок часу, до величини цього часового проміжку. Якщо йдеться про провідник (conductor) з чисто електронною провідністю (conductivity) (носіями струму є тільки електрони), то ця кількість заряду q визначається відповідно кількістю електронів. Коли ж йдеться про провідник з іонною провідністю (носіями струму є позитивні і негативні заряди, що рухаються у протилежних напрямках), то ця кількість заряду $q = q^+ + q^-$ дорівнюватиме сумарній кількості заряду, що пройшов через переріз за визначений відрізок часу t . Тоді струм (сила струму) I через цей переріз дорівнюватиме:

$$I = q / t. \quad (1.1)$$

Нагадаємо, що кількість заряду (charge) q визначається у кулонах (Кл), час – в секундах (с), а сила струму (струм) – в амперах (А).

Напрямок струму характеризується знаком струму. Поняття позитивний струм чи негативний струм мають смисл тільки тоді, коли порівнюється напрямок струму у провіднику з деяким заздалегідь вибраним напрямком, який назовемо позитивним напрямком.

Умовний позитивний напрямок струму вибирається довільно і позначається стрілкою. Якщо після розрахунків виявиться, що струм має знак плюс ($I > 0$), то це означає, що його напрямок збігається з вибраним позитивним напрямком. У протилежному випадку, коли струм матиме знак мінус ($I < 0$), він напрямлений у протилежному напрямку.

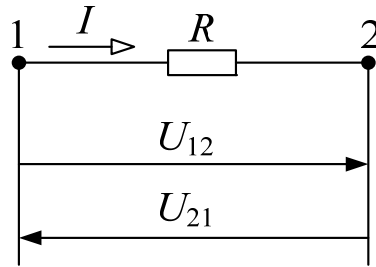


Рисунок 1.2 – Ділянка електричного кола 1-2 з елементом R

Розглянемо деяку ділянку кола (рис. 1.2), через яку протікає електричний струм I . Різниця електричних потенціалів між кінцями цієї ділянки 1 і 2 є напругою (спадом напруги) на цій ділянці. Вона є скалярною величиною і дорівнює роботі електричних сил із перенесення одиничного позитивного заряду з точки 1 в точку 2. Якщо точка 1 має потенціал вищий за потенціал точки 2, то ця робота є позитивною і дорівнює напрузі U_{12} . Очевидно, робота виконана у протилежному напрямку буде негативною, тобто $U_{21} = -U_{12}$.

Різниця потенціалів вважається позитивною, коли на ділянці кола напрямок вищий – нижчий потенціал збігається з позитивним напрямком струму, тобто, на будь-якій ділянці кола електричний струм буде протікати у напрямку від точки з більшим потенціалом до точки з меншим потенціалом. Це виправдовує і термін спад напруги на ділянці 1-2 від більш високого потенціалу точки 1 до меншого потенціалу точки 2.

У подальшому вираз "позитивний напрямок протікання електричного струму" будемо для скорочення замінювати виразом "напрямок струму".

На закінчення зауважимо, що напруга (різниця потенціалів) вимірюється у вольтах (В).

При силі струму 1 ампер через поперечний переріз провідника за 1 секунду переноситься 1 кулон заряду.

$$q = I \cdot t.$$

Спад напруги на ділянці кола дорівнює роботі електричних сил джерела енергії із перенесення 1 кулона позитивного електричного заряду через цю ділянку і вимірюється у вольтах.

1.3 Резистор і опір. Закон Ома

Електричний опір – це властивість провідного матеріалу чинити опір електричному струму, який через нього протікає. За законом Ома, експериментально установленим у 1826 р. фізиком Георгом Омом, сила електричного струму I прямо пропорційна напрузі U , що діє на ділянці кола, і обернено пропорційна опорю R цієї ділянки:

$$I = U / R.$$

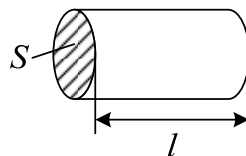
Тобто, при незмінному значенні напруги U струм буде тим менший, чим більший буде опір R цієї ділянки протіканню струму.

Виходячи із закону Ома опір R дорівнюватиме:

$$R = U / I. \quad (1.2)$$

Одиницею вимірювання опорю є ом (Ом). Ділянка кола матиме опір 1 Ом, коли при напрузі на цій ділянці 1 вольт (В) через неї протікатиме електричний струм із силою 1 ампер (А). Отже:

$$\text{Вольт (В) / ампер (А) = ом (Ом).}$$



Якщо взяти відрізок провідника довжиною l , наприклад циліндричної форми з поперечним перерізом S , виготовленого з матеріалу з питомим опором ρ , то, як відомо з курсу фізики, опір R такого відрізка буде дорівнювати:

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (1.3)$$

де ρ має розмірність у системі СІ – 1 Ом · м.

На практиці прийнято виражати довжину провідника (металевого дроту, наприклад), у метрах, поперечний переріз в мм^2 , тому у довідниках питомий опір дається – в Ом·мм²/м.

Величина обернена опорю R провідника електричного струму називається його провідністю G :

$$G = \frac{1}{R} = \sigma \frac{S}{l}. \quad (1.4)$$

σ – питома провідність провідника, яка вимірюється в системі СІ у сіменсах (См)/метр (м), а у довідниках, для зручності практичного використання, у м/Ом·мм².

Резистор (resistor) – елемент електричного кола, радіодеталь, основною функцією якого є зменшити силу струму, що протікає в ділянці кола з певною різницею потенціалів. Опір (resistance) же цього резистора є його основним параметром, який оцінюється в омах.

При збільшенні температури провідника збільшується хаотичний (тепловий) рух, що збільшує кількість зіткнень і утруднює упорядкований рух електронів. Цим пояснюється збільшення питомого електричного опору металів зі зростанням температури.

В металах при робочих температурах питомий опір зі зростанням температури зростає за законом:

$$\rho(t) = \rho_0[1 + \alpha(t - t_0)]. \quad (1.5)$$

де $\rho(t)$ – питомий опір при заданій температурі t ,

ρ_0 – питомий опір при початковій температурі t_0 ,

α – температурний коефіцієнт опору (ТКР), величина стала для даного металу.

Для резисторів будь-яких номіналів за аналогією до формули (1.5) можна записати:

$$R(t) = R_0[1 + \alpha(t - t_0)]. \quad (1.6)$$

Залежність між струмом і напругою $I = GU$ називається вольт-амперною характеристикою резистора.

Якщо провідність (опір) резистора не залежить від прикладеної напруги та струму, що протікає через нього, то залежність $I = GU$, $I = U/R$ є лінійним рівнянням, графік якого подано на рис. 1.3 для двох значень провідностей G_1 , G_2 . При одному і тому ж значенні напруги U у резисторі з більшою провідністю G_1 (меншим опором R_1) протікатиме струм I_1 більший від струму I_2 , який протікає у резисторі з меншою провідністю G_2 (більшим опором R_2).

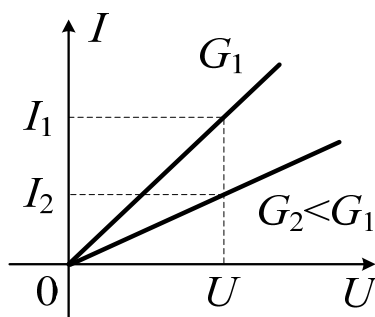


Рисунок 1.3 – Вольт-амперна характеристика лінійних резисторів

Струм у провіднику дорівнює добутку напруги на ділянці провідника і електричної провідності цієї ділянки.

$$I = U \cdot G.$$

На практиці крім вольт, ампера та ома зручно користуватися кратними їх значеннями:

$10^3 \text{ В} = 1 \text{ кіловольт (кВ)}$, $10^{-3} \text{ В} = 1 \text{ мілівольт (мВ)}$, $10^{-6} \text{ В} = 1 \text{ мікровольт (мкВ)}$;

$10^3 \text{ A} = 1 \text{ кілоампер (кА)}$, $10^{-3} \text{ A} = 1 \text{ міліампер (мА)}$, $10^{-6} \text{ A} =$
 $= 1 \text{ мікроампер (мкА)}$;
 $10^3 \text{ Ом} = 1 \text{ кілоом (кОм)}$, $10^6 \text{ Ом} = 1 \text{ мегаом (МОм)}$, $10^9 \text{ Ом} =$
 $= 1 \text{ гігоом (ГОм)}$.

1.4 Енергія і потужність електричного струму

При проходженні електричного струму через коло можуть відбуватися різні дії: нагрівання провідника, хімічні зміни в електролітах, механічне переміщення магнітної стрілки або провідника, по якому тече струм, виконуючи при цьому певну механічну роботу.

У дослідах Джеймса Джоуля та Емілія Ленца (1842 р.) струм проходив через нерухомі металеві провідники. Тому єдиним результатом роботи струму було нагрівання цих провідників, а за законом збереження енергії уся робота, виконана електричним струмом, перетворилася на тепло.

Якщо на ділянці кола зі струмом I діє різниця потенціалів U , то за час t , згідно із законом Джоуля-Ленца, на цій ділянці кола буде виконана **робота**:

$$A = U \cdot I \cdot t \text{ джоулів (Дж)}. \quad (1.7)$$

Скориставшись законом Ома для цієї ділянки кола вираз (1.7) можна переписати:

$$A = I^2 \cdot R \cdot t \text{ або } A = \frac{U^2}{R} \cdot t.$$

Підкреслимо, що застосування виразу $A = U \cdot I \cdot t$, який дає роботу струму, для оцінки тепла, яке виділяється в провідниках, можливе тільки у тих випадках, коли уся ця робота переходить у тепло $A = Q = 0.24 U \cdot I \cdot t$ (кал), тобто, коли на цій ділянці кола відбувається нагрівання, але не виконується механічна робота (у моторах, наприклад) і не йдуть інші процеси, які супроводжуються виділенням чи поглинанням енергії (роботи).

Отже, у результаті протікання електричного струму I через ділянку кола з опором R за час t на цій ділянці кола виділиться **енергія** (energy), $W = I^2 \cdot R \cdot t$, яка витратиться на нагрівання.

Знаючи роботу, яка виконується електричним струмом за деякий проміжок часу, можна розрахувати і **потужність** (power) струму, під якою розуміють роботу (затрачену енергію) за одиницю часу. Очевидно потужність P дорівнюватиме:

$$P = \frac{W}{t} = U \cdot I. \quad (1.8)$$

$$P = I^2 \cdot R \text{ або } P = U^2/R.$$

Таким чином, потужність постійного струму на будь-якій ділянці кола виражається добутком сили струму на напругу між кінцями ділянки кола.

Коли ми говоримо про потужність електричного струму, який споживається в електромережі, то розуміємо, що саме цим струмом

виконується робота електромоторами, світять електролампи, нагріваються електроплити і т. ін.

На ділянці кола виділиться потужність в один ват (Вт), коли в ній протікатиме електричний струм із силою 1 ампер (А) при різниці потенціалів на кінцях ділянки один вольт (В), тобто

$$1 \text{ Вт} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А} = 1 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot \text{с} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{с}.$$

Енергія електричного струму є та робота, яку виконає електричний струм I , який протікатиме через ділянку кола протягом часу t , при різниці потенціалів на її кінцях U .

$$W = U \cdot I \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t.$$

Потужність електричного струму – це є робота (енергія) виконана (затрачена) цим струмом за одиницю часу.

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}.$$

На практиці часто зручно користуватися одиницями енергії або потужності, кратними 1 джоулю або вату:

$$10^3 \text{ Дж} = 1 \text{ кілоджоуль} = 1 \text{ кДж}, \quad 10^6 \text{ Дж} = 1 \text{ мегаджоуль (МДж)}$$

$$10^{-6} \text{ Вт} = 1 \text{ мікроват (мкВт)}, \quad 10^{-3} \text{ Вт} = 1 \text{ міліват (мВт)},$$

$$10^3 \text{ Вт} = 1 \text{ кіловат (кВт)}, \quad 10^6 \text{ Вт} = 1 \text{ мегават (МВт)}.$$

1.5 Генератор напруги (е. р. с.) та генератор струму

Розглянемо електричне коло, яке складається з джерела електричної енергії з е. р. с. E , внутрішнім опором R_i , навантаженого резистором з опором R_H (рис. 1.4).

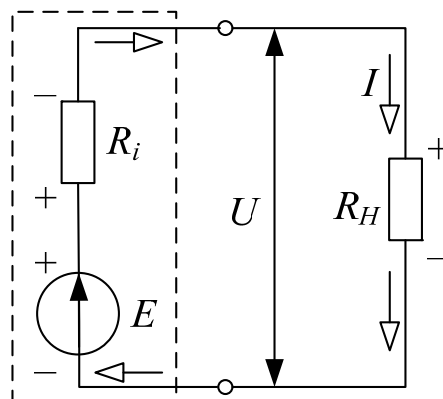


Рисунок 1.4 – Схема джерела енергії з підімкненим до нього навантаженням

Відповідно до закону Ома для повного кола, струм I у цьому колі прямо пропорційний е. р. с. E та обернено пропорційний сумі внутрішнього R_i та зовнішнього R_H опорів кола, тобто:

$$I = \frac{E}{R_i + R_H}. \quad (1.9)$$

Або $E = I \cdot R_i + I \cdot R_H$ – е. р. с. дорівнює сумі спаду напруг на внутрішньому ($I \cdot R_i$) і зовнішньому опорах. Іншими словами, е. р. с. дорівнює сумі спаду напруги на внутрішній та зовнішній ділянках кола, відповідно.

Тоді напруга на виході джерела енергії у точках підмикання опору навантаження буде напругою на зовнішній ділянці кола і дорівнюватиме:

$$U = I \cdot R_H = E - I \cdot R_i. \quad (1.10)$$

Тобто, напруга на виході джерела енергії буде меншою від е. р. с. E , бо частина останньої спала на внутрішньому опорі R_i .

Припустимо тепер, що ми працюємо з навантаженнями, опори R_H яких набагато (у десять і більше разів) більші за внутрішній опір R_i . Тоді у виразі (1.9) у знаменнику ($R_i + R_H$) можна знехтувати малим R_i у порівнянні з великим R_H і отримати:

$$I \approx E / R_H, \quad (1.11)$$

звідки напруга на виході джерел енергії:

$$U = I \cdot R_H \approx E, \quad (1.12)$$

дорівнюватиме наближено е. р. с. Це сталося через те, що спад напруги на внутрішній ділянці кола $I \cdot R_i$ буде набагато (у десять і більше разів) меншим від спаду напруги на зовнішній ділянці R_H , знехтувавши у виразі (1.10) дуже малим $I \cdot R_i$ у порівнянні з дуже великим $I \cdot R_H$, отримаємо, що $U \approx E$.

Отже, за обставини, що $R_i \ll R_H$ джерело енергії генеруватиме напругу $U \approx E$, яка майже не залежатиме від опору навантаження, тобто від параметра зовнішньої ділянки кола. У такому разі кажуть, що мова іде про генератор напруги (майже генератор е. р. с.).

Ідеальним генератором е. р. с., тобто пристроєм напруга на виході якого дорівнює точно E , є джерело енергії, внутрішній опір у якому дорівнює нулю ($R_i = 0$). Коли за такої умови зменшувати опір R_H до нуля, то струм у колі (теоретично) збільшиться до нескінченності, але напруга на виході залишатиметься незмінною і рівною е. р. с. E .

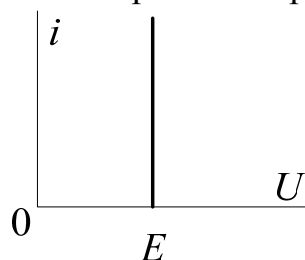


Рисунок 1.5 – Вольт-амперна характеристика ідеального генератора е. р. с.

ЛІТЕРАТУРА

1. Атабеков Григорий Иосифович. Основы теории цепей : учеб. для вузов / Г. И. Атабеков. – Изд. 2-е испр. – С-Пб. : Лань, 2006. – 432 с. – ISBN 5-8114-0699-1.
2. Евдокимов Федор Евдокимович. Теоретические основы электротехники : учеб. для студентов образоват. учреждений сред. проф. образования / Ф. Е. Евдокимов. – Изд. 9-е стер. – М. : Академия, 2004. – 560 с. – ISBN 5-7695-1106-0.
3. Белецкий Александр Федорович. Теория линейных электрических цепей : учеб. для вузов / А. Ф. Белецкий. – Изд. 2-е стер. – С-Пб. : Лань, 2009. – 544 с. – ISBN 978-5-8114-0905-1.
4. Игорь Николаевич Добротворский. Теория электрических цепей : учебник для техникумов / И. Н. Добротворский. – М. : Радио и связь, 1989. – 472 с. – ISBN 5-256-00266-X.
5. Зернов Николай Викторович. Теория радиотехнических цепей : учеб. для вузов / Н. В. Зернов, В. Г. Карпов. – Изд. 2-е перераб. и доп. – Л. : Энергия, 1972. – 816 с.
6. Лосев Алексей Константинович. Теория линейных электрических цепей : учеб. для вузов / А. К. Лосев. – М. : Высшая школа, 1987. – 512 с.
7. Матханов Платон Николаевич. Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи : учеб. для вузов / П. Н. Матханов. – Изд. 3-е перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1990. – 400 с. – ISBN 5-06-000679-4.
8. Попов Вадим Петрович. Основы теории цепей: учеб. для вузов / В. П. Попов. – Изд. 6-е перераб. и испр. – М. : Высшая школа, 2007. – 575 с. – ISBN 978-5-06-003949-8.
9. Попов Петр Александрович. Теория связи по проводам : учеб. для техникумов связи / П. А. Попов. – М. : Связь, 1978. – 272 с.
10. Шебес Михаил Романович. Задачник по теории линейных электрических цепей : учеб. пособие / М. Р. Шебес, М. В. Каблукова. – Изд. 4-е перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1990. – 544 с. – ISBN 5-06-000678-6.
11. Баскаков Святослав Иванович. Радиотехнические цепи и сигналы : учеб. для вузов / С. И. Баскаков. – Изд. 4-е перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 2003. – 462 с. – ISBN 5-06-003843-2.
12. Белоцерковский Григорий Бенционович. Основы радиотехники и антенны. В 2 ч. Ч. 1. Основы радиотехники : учеб. для радиотехн. сред. спец. учеб. заведений / Г. Б. Белоцерковский. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М. : Советское радио, 1979. – 366 с.
13. Власов Виктор Федорович. Курс радиотехники : учеб. для вузов / В. Ф. Власов. – М. : Госэнергоиздат, 1962. – 928 с.

14. Гоноровский Иосиф Семенович. Радиотехнические цепи и сигналы : учеб. пособие для вузов / И. С. Гоноровский, М. П. Демин. – Изд. 5-е перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1994. – 480 с. – ISBN 5-256-01068-9.

15. Калашников Анатолий Михайлович. Основы радиотехники и радиолокации. Колебательные системы : учеб. для курсантов радиотехн. училищ / А. М. Калашников, Я. В. Степук. – М. : Воениздат, 1962. – 366 с.

16. Кузьмин Иван Васильевич. Основы теории информации и кодирования : учеб. для студ. вузов / И. В. Кузьмин, В. А. Кедрус. – Изд. 2-е перераб. и доп. – К. : Вища школа. Головное изд-во, 1986. – 238 с.

17. Темников Федор Евгеньевич. Теоретические основы информационной техники : учеб. пособие для вузов / Федор Евгеньевич Темников, Владимир Александрович Афонин, Владимир Иванович Дмитриев. – Изд. 2-е испр. и доп. – М. : Энергия, 1979. – 512 с.

18. Цымбал Владимир Петрович. Теория информации и кодирования : учебник / В. П. Цымбал. – Изд. 4-е перераб. и доп. – К. : Вища школа, 1992. – 263 с. – ISBN 5-11-001943-6.

Навчальне видання

**Василь Мартинович Кичак
Юрій Володимирович Крушевський
Дмитро Володимирович Гаврілов**

Основи радіоелектроніки

Навчальний посібник

Редактор В. Дружиніна
Коректор З. Поліщук
Оригінал-макет підготовлено Д. Гавріловим

Підписано до друку 08.12.2010 р.
Формат 29,7x42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 23,4.
Наклад 300 прим. Зам. № 2010-190

Вінницький національний технічний університет,
Науково-методичний відділ ВНТУ.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.