

**Міністерство аграрної політики України**

**Харківський національний технічний університет  
сільського господарства імені Петра Василенка**

**Свергун Ю.Ф.**

# **АНАЛІЗ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ НА ПЕРСОНАЛЬНОМУ КОМП'ЮТЕРІ**

**Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний  
посібник для студентів вищих навчальних закладів**

**Харків «Факт»  
2008**

**ББК 31.2я73**  
**УДК 621.3 (075.8)**  
**С24**

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів (Лист №1-4/18-Г-1061 від 14.05.08)*

**Рецензенти:**

**А.Г. Сосков,**

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Електротехніка»  
Харківської національної академії міського господарства

**И.О. Фурман,**

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Автоматизація і  
комп'ютерні технології» Харківського національного технічного  
університету сільського господарства ім. Петра Василенка

**С24 Свергун Ю.Ф.**

Аналіз електричних кіл на персональному комп'ютері: Навчальний посібник. – Х.:Факт, 2008.– 296 с.

ISBN 978-966-637-624-7

У зв'язку зі значним скороченням аудиторних занять однієї з можливих форм підготовки студентів по окремим розділам дисципліни «Теоретичні основи електротехніки» є використання пакету програм «Electronics Workbench» у навчальному процесі. Цей пакет програм дозволяє проводити віртуальні дослідження схем електричних і електронних пристроїв, тому його також можна широко використовувати при вивченні дисципліни «Електроніка й мікросхемотехніка». Особливо ефективна ця технологія при дистанційному навчанні.

У навчальному посібнику наведені деякі санітарно-гігієнічні норми роботи за комп'ютером, основи теорії електричних кіл, основні команди Windows, методики побудови й аналізу елементарних електричних схем з використанням версії 5.12 програми EWB.

Посібник призначений для студентів електротехнічних спеціальностей, а також неелектротехнічних, у навчальних планах яких передбачене вивчення дисципліни «Електротехніка».

**ББК 31.2я73**

ISBN 978-966-637-624-7

© Свергун Ю. Ф. 2008.

© Видавництво «Факт», 2008.

## ЗМІСТ

ЛІТЕРНІ ПОЗНАЧЕННЯ .....	7
ВВЕДЕННЯ .....	8
1. ОСНОВИ РОБОТИ НА ПЕРСОНАЛЬНОМУ КОМП'ЮТЕРІ .....	8
1.1 Санітарно-гігієнічні норми при роботі на ПК .....	8
1.2 Робота з операційною системою Windows .....	14
1.3 Робота з текстовим редактором Microsoft Word .....	34
1.4 Архівування даних .....	41
2 ДЕЯКІ ВІДОМОСТІ З ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ .....	47
2.1 ЛІНІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ .....	47
2.1.1 Активні і пасивні елементи електричного кола .....	47
2.1.2 Вольт-амперна характеристика кола .....	50
2.1.3 Розгалужені та нерозгалужені електричні кола .....	50
2.1.4 Струм на ділянці кола .....	51
2.1.5 Напруга на ділянці кола .....	51
2.1.6 Закон Ома .....	52
2.1.7.1 Послідовне і паралельне з'єднання опорів .....	53
2.1.7.2 Закони Кірхгофа .....	57
2.1.8 Енергетичний баланс в електричних колах .....	57
2.1.9. Методи розрахунку складних електричних кіл постійного струму.....	58
2.1.9.1 Метод рівнянь Кірхгофа .....	58
2.1.9.2 Метод контурних струмів.....	60
2.1.9.3 Метод накладення .....	64
2.1.9.4 Метод вузлових потенціалів .....	66
2.1.9.5 Метод еквівалентного генератора .....	69
2.1.10 Перетворення трикутника опорів в еквівалентну зірку опорів або навіпаки .....	72
2.1.11 Заміна декількох паралельних віток однією еквівалентною .....	73
2.1.12 Теорема компенсації .....	75
2.2 ЛІНІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ОДНОФАЗНОГО СИНУСОЇДАЛЬНОГО СТРУМУ .....	76
2.2.1 Періодичні синусоїдальні ЕРС, напруги і струми .....	76
2.2.2. Одержання синусоїдної ЕРС .....	78
2.2.3 Середнє й діюче значення синусоїдальних величин .....	79
2.2.4 Відображення синусоїдальних функцій векторами .....	81
2.5 Зображення синусоїдальних функцій часу векторами і комплексними числами на комплексній площині .....	82
2.6 Множення вектора на $+j$ й $-j$ .....	85
2.7 Параметри і елементи електричних кіл однофазного синусоїдального струму .....	86
2.8 Миттєва потужність .....	88
2.9 Резистор у колі синусоїдального струму .....	88
2.10 Індуктивність у колі синусоїдального струму .....	90

2.11	Ємність у колі синусоїдального струму .....	92
2.12	Символічний метод розрахунку електричних кіл з послідовним з'єднанням елементів .....	94
2.13	Комплексний опір .....	96
2.14	Комплексна провідність .....	97
2.15	Символічний метод розрахунку електричних кіл з паралельним з'єднанням елементів .....	98
2.16	Трикутники напруг та опорів .....	100
2.17	Трикутник струмів та провідностей .....	101
2.18	Закони Кірхгофа у символічній формі .....	102
2.19	Активна, реактивна та повна потужність у колах змінного струму .....	103
2.20	Вираз потужності у символічній формі .....	104
2.21	Розрахунок електричних кіл при послідовному з'єднанні активних і реактивних опорів .....	105
2.22.	Розрахунок електричних кіл при паралельному з'єднанні активних та реактивних опорів .....	106
2.23	Розрахунок електричних кіл при змішаному з'єднанні активних та реактивних опорів .....	107
2.24	Резонанс в електричних колах .....	108
2.24.1	Резонанс напруг .....	108
2.24.2	Частотні характеристики кола з послідовним з'єднанням елементів $R, L, C$ .....	111
2.24.3	Резонанс струмів .....	116
2.24.4	Частотні характеристики паралельного контуру .....	119
2.24.5	Резонанс у складних колах .....	121
2.25	Електричні кола з індуктивно зв'язаними елементами .....	125
2.25.1	Послідовне з'єднання двох індуктивно зв'язаних елементів .....	127
2.25.2	Визначення коефіцієнта взаєміндукції двох індуктивно зв'язаних елементів експериментально .....	129
2.25.3	Паралельне з'єднання двох індуктивно зв'язаних елементів .....	130
2.25.4	Розрахунок розгалужених кіл при взаємній індукції .....	131
2.25.5	Еквівалентна заміна індуктивних зв'язків .....	132
2.25.6	Повітряний трансформатор .....	134
2.25.7	Ідеальний трансформатор .....	137
2.3	ЛІНІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА З ПЕРІОДИЧНИМИ НЕСИНУСОЇДАЛЬНИМИ НАПРУГАМИ Й СТРУМАМИ .....	139
2.3.1	Тригонометрична форма ряду Фур'є .....	139
2.3.2	Деякі властивості періодичних кривих, що володіють симетрією .....	141
2.3.3	Графо-аналітичний метод визначення гармонік ряду Фур'є .....	142
2.3.4	Розрахунок струмів і напруг при несинусоїдальних джерелах живлення .....	145
2.3.5	Діюче значення несинусоїдального струму і несинусоїдальної напруги .....	146
2.3.6	Активна і повна потужність несинусоїдального струму .....	147
3	ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ .....	147

3.1	Загальні відомості про трифазні системи .....	147
3.2	З'єднання трифазного генератора або трифазного навантаження за схемою “зірка – зірка” .....	152
3.3	Розрахунок симетричних трифазних електричних кіл при з'єднанні приймачів енергії зіркою .....	154
3.4	З'єднання приймачів енергії трифазного кола трикутником .....	155
3.5	Розрахунок симетричних трифазних електричних кіл при з'єднанні приймачів енергії трикутником.....	156
3.6	Розрахунок складних трифазних електричних кіл при симетричному навантаженні .....	158
3.7	Розрахунок несиметричних режимів трифазних електричних кіл при з'єднанні приймачів енергії зіркою .....	160
3.8	Розрахунок складних трифазних кіл при несиметричному режимі ....	165
3.9	Активна, реактивна й повна потужності в трифазній системі .....	167
4	<b>ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ З ЗОСЕРЕДЖЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ</b> .....	169
4.1	Загальні принципи аналізу перехідних процесів .....	169
4.2	Перехідні процеси в активно-індуктивних електричних колах .....	171
4.3	Перехідні процеси в активно-ємнісних електричних ланцюгах коротке замикання активно-ємнісного кола .....	177
4.4	Перехідні процеси в нерозгалуженому активно-індуктивно-ємнісному колі .....	181
5.	<b>ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ПРОГРАМИ ELECTRONICS WORKBENCH</b> .....	187
5.1	Структура вікна і система меню .....	187
5.1.1	Меню File .....	188
5.1.2	Меню Edit.....	189
5.1.3	Меню Circuit .....	189
5.1.4	Меню Analysis .....	193
5.1.5	Меню Window.....	210
5.1.6	Меню Help.....	210
5.2	<b>ТЕХНОЛОГІЯ ПІДГОТОВКИ СХЕМ</b> .....	211
5.2.1	Група Favorites – допоміжні компоненти .....	213
5.2.2	Група Sources – пасивні елементи .....	213
5.2.3	Група Basic – активні елементи .....	215
5.2.4	Група Diodes .....	218
5.2.5	Група Transistors .....	218
5.2.6	Група Indicators.....	218
5.3.	<b>КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ</b> .....	224
5.3.1	Мультиметр (Multimeter) .....	225
5.3.2	Функціональний генератор (Function Generator) .....	226
5.3.3	Осцилограф (Oscilloscope).....	227
5.3.4	Вимірник АЧХ і ФЧХ (Bode Plotter) .....	229
6	<b>ЗАСТОСУВАННЯ EWB В ЕЛЕКТРОПТЕХНІЦІ</b> .....	231

6.1	Схеми на комп'ютері .....	231
6.2	Структура схем .....	237
6.3	Сигнали .....	249
6.4	Діодні схеми.....	252
6.5	Однопівперіодний випрямляч.....	254
6.6	Схеми з понижуючим трансформатором.....	255
6.7	Двопівперіодні випрямлячі .....	256
7	ВПРАВИ.....	257
	ДОДАТОК.....	291
	ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЗНИК.....	292
	ЛІТЕРАТУРА.....	295

## ЛІТЕРНІ ПОЗНАЧЕННЯ основних електричних та магнітних величин

Літерні позначення встановлені стандартами. Для позначення застосовуються букви латинської та грецької абетки з нижніми і верхніми індексами при необхідності.

1. Позначення літерами латинської абетки:

$A$  – потенціал магнітний, векторний;  
 $B$  – магнітна індукція;  
 $\nu$  – реактивна провідність;  
 $C$  – ємність;  
 $c$  – швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль;  
 $D$  – зміщення електричне;  
 $E, e$  – електрорушійна сила;  
 $F$  – магніторушійна сила;  
 $f$  – частота коливань;  
 $G, g$  – активна провідність;  
 $H$  – напруженість магнітного поля;  
 $I, i$  – струм;  
 $k$  – коефіцієнт зв'язку;  
 $L$  – індуктивність;  
 $M$  – взаємна індуктивність;  
 $N$  – кількість віток;  
 $P$  – потужність активна;  
 $Q$  – потужність реактивна добротність;  
 $S$  – потужність повна;  
 $p$  – миттєва потужність, кількість пар полюсів;  
 $q$  – заряд;  
 $R$  – опір електричний, опір активний;  
 $T$  – період коливань;  
 $U, u$  – напруга;  
 $W$  – електромагнітна енергія;  
 $\varpi$  – кількість витків;  
 $X, x$  – реактивний опір;  
 $Y, y$  – повна провідність;  
 $Z, z$  – повний опір;  
 $j$  – оператор оберту.

2. Позначення літерами грецької абетки:

$\beta$  – коефіцієнт фази;  
 $\gamma$  – коефіцієнт розповсюдження;  
 $\delta$  – коефіцієнт затухання, кут втрат;  
 $\varepsilon$  – діелектрична проникність;  
 $\lambda$  – довжина електромагнітної хвилі, коефіцієнт потужності;  
 $\mu$  – магнітна проникність;  
 $\tau$  – густина електричного заряду лінійна, стала часу;  
 $\Phi$  – магнітний потік;  
 $\varphi$  – електричний потенціал, зсув фаз між напругою і струмом;  
 $\Psi$  – потокозчеплення;  
 $\omega$  – кутова частота коливань.

## ВВЕДЕННЯ

Збільшення кількості навчального матеріалу, що засвоюється студентами самостійно при вивченні дисципліни «Теоретичні основи електротехніки», вимагає значної зміни технології навчального процесу, передбачаючи використання персональних комп'ютерів для моделювання процесів в електричних колах. У цей час для цих цілей використовують програми Micro-CAP, DesignLAB, MatLAB і Electronics Workbench.

Найбільш зручна для використання в навчальних цілях програма Electronics Workbench [1, 2], що дозволяє творчо вирішувати завдання аналізу електричних кіл, скорочуючи час на виконання лабораторних робіт, при цьому кожний студент виконує їх індивідуально, що заборонено при роботі в електричних установках правилами техніки безпеки, крім того зникає ймовірність ушкодження приладів і лабораторного устаткування. Після виконання моделювання електричних кіл на комп'ютері студент повинен виконати підсумкову лабораторну роботу на реальних елементах або фізичних моделях.

## 1. ОСНОВИ РОБОТИ НА ПЕРСОНАЛЬНОМУ КОМП'ЮТЕРІ

### 1.1 Санітарно-гігієнічні норми при роботі на ПК

Користувач персонального комп'ютера ставиться до категорії працівників розумової праці і піддається впливу шкідливих факторів, обумовлених особливостями виробничого процесу. Відповідність комп'ютерів санітарно-гігієнічним нормам регулюється безліччю міжнародних стандартів [3]. Розвиток сучасних технологій приводить до того, що комп'ютер стає усе більше й більше безпечним для людини.

Недавні дослідження показали, що приблизно 20% порушень здоров'я, пов'язаних з роботою за комп'ютером, викликані не "шкідливістю" комп'ютера як такого, а незнанням основних правил роботи з ним, а також неправильною організацією робочого місця. Сидяча тривала робота шкідлива для людині взагалі. Тривале перебування в одній і тій же позі змушує м'язи працювати безупинно без відпочинку. При цьому в них накопичуються продукти розпаду, що викликають хворобливі відчуття. Гіпокінезія, або малорухомість, – головне лихо користувачів ПК. При зниженні рівня фізичної активності, викликаній сидячим способом життя, різко зростає ризик виникнення багатьох захворювань, таких як остеохондроз, ожиріння, геморої, цукровий діабет.

Якщо, працюючи за комп'ютером, ви до того ж сидите в неправильній позі – наприклад, сутулитесь або подаєтеся вперед, – ваш хребет деформується, травмуючи диски. Ви піднімаєте плечі й згинаєте руки, тримаючи їх у напрузі, і вони починають боліти. Подібні навантаження, що повторюються щодня, приводять до мікротравм організму. На відміну від мікротравм - переломів ноги, руки і т.п. – мікротравми не виникають раптом,



а накопичуються поступово, день у день, приводячи згодом до серйозних порушень в організмі. Перш ніж ви відчуєте біль, пройде кілька тижнів або місяців. Біль може відчуватися як легке печіння або поколювання в суглобах і м'язах.

Як відомо, профілактика – кращий спосіб лікування хвороби. Щоб запобігти захворюванням, пов'язаним з повторюваними впливами, що травмують, необхідно правильно організувати ваше робоче місце за комп'ютером, постійно стежити за поставою, а також регулярно робити перерви на відпочинок і виконувати фізичні вправи.

**Як правильно організувати робоче місце.** Щоб знизити шкідливий вплив різних виробництв на здоров'я людини, медики розробляють норми й вимоги, обов'язкові до виконання. Ці вимоги мають назву санітарних правил і норм, містять детальні рекомендації, як правильно працювати за комп'ютером. Існує також кілька міжнародних санітарно-гігієнічних стандартів.

Перелічимо основні вимоги до організації роботи за комп'ютером і рекомендації з їхнього виконання.

**Приміщення і освітлення.** У приміщенні, призначеному для роботи на комп'ютері, повинне бути як природне, так і штучне освітлення. Тому розташування робочих місць у підвальних приміщеннях не допускається. Найкраще, якщо вікна в кімнаті виходять на північ або північний схід. Приміщення необхідно обладнати не тільки опалювальними приладами, але й системами кондиціонування повітря або ефективною вентиляцією. Стіни і стелі варто офарблювати матовою фарбою: блискучі й тим більше дзеркальні поверхні стомлюють зір і відволікають від роботи. У приміщеннях щодня повинна проводитися вологе прибирання.

Бажано, щоб площа робочого місця становила не менш 6 квадратних метрів, а об'єм – 20 кубометрів. Стіл варто поставити збоку від вікна так, щоб світло падало ліворуч. Найкраще освітлення для роботи за комп'ютером – розсіяне непряме світло, що не дає відблисків на екрані. У поле зору користувача не повинне бути різких перепадів яскравості, тому вікна бажано закривати шторами або жалюзі, штучне освітлення повинне бути загальним і рівномірним: використовувати тільки одні настільні лампи неприпустимо.

На **робочому столі** повинні вільно розміщатися монітор, клавіатура, миша, а також документи, книги, папери. Якщо ви хочете розмістити в ряд кілька столів з моніторами, то варто поставити їх таким чином, щоб відстань у ряді становила не менш 2 метрів, а між рядами – 1,2 метри. Лікарі думають, що при виконанні творчої роботи, що вимагає значної розумової напруги або високої концентрації уваги, робочі місця бажано ізолювати друг від друга перегородками висотою 1,5-2 метра.

Для роботи на комп'ютері необхідний **стілець**, що дозволяє не тільки підтримувати правильну позу з урахуванням особливостей фігури, але й змінювати її для зниження статичної напруги м'язів шийно-плечової області й спини. Тому стілець повинен регулюватися по висоті, кутам нахилу сидіння й спинки, а також по відстані спинки від переднього краю сидіння. Поверхні

сидіння, спинки й підлокітників повинні бути напівм'якими, з покриттям, що не сковзає, не електризується й пропускає повітря.

Щоб визначити найбільш підходящу висоту стільця, сядьте на нього й покладіть руки на клавіатуру: ноги повинні повністю торкатися підлоги, стегна – повинні бути трохи вище колін, спина – почувати упор, а передпліччя – бути паралельними підлозі.

**Монітор** варто розміщати на столі прямо перед собою приблизно на відстані витягнутої руки так, щоб верхня границя монітора перебувала на рівні очей або нижче не більше ніж на 15 сантиметрів.

Правильне положення рук при роботі з **клавіатурою і мишею**: лікті розташовуються паралельно поверхні стола й під прямим кутом до плеча. Зап'ястя не повинні бути зігнутими, інакше можливо їхнє ушкодження. Бажано, щоб під час роботи зап'ястя на що-небудь опиралися. Конструкція сучасних клавіатур і мишей передбачає для них опору. Однак ви легко можете самі виготовити її, наприклад, взявши вузьку смужку пінопласту й поклавши її перед клавіатурою або мишею. Клавіатура повинна розташовуватися в 10-15 сантиметрах від краю стола.

Іноді корисно користуватися **підставкою для ніг**. Вона просто необхідна для людей невисоких на зріст, у яких ноги не дістають до підлоги. Розроблені медиками санітарно-гігієнічні норми повинні враховуватися при конструюванні комп'ютерних і офісних меблів, а також при проектуванні приміщень офісів.

Яким же повинен бути стіл для роботи за комп'ютером?

Важлива категорія у визначенні придатності стола - його робоча зона. Та частина стільниці, до якої працююча людина дотягується рукою із притиснутим до тулуба ліктем, становить ближню зону охвата, а місце, куди він може добратися, витягнувши руку повністю, утворить границю далекої зони. Природне бажання працюючого - діставати до будь-якої точки стола.

Наступний принциповий момент - можливість правильно розташувати монітор. Як уже говорилося, монітор повинен стояти напроти користувача так, щоб перед ним залишалось досить місця для клавіатури й паперових документів.

**Правильна постава.** Правильно організоване робоче місце – лише перший крок до профілактики можливих захворювань. Щоб робота за комп'ютером не шкодила здоров'ю, необхідно постійно стежити за положенням тіла в процесі роботи, тобто за поставою. Правильна постава максимально розвантажує м'язи і дозволяє працювати довше, менше утомлюючись.

Вважається, що при правильній поставі вуха розташовуються точно в площині плечей, а плечі – точно над стегнами. Голову варто тримати рівно стосовно обох плечей. Коли ви дивитесь вниз, голова не повинна нахилитися вперед.

Якщо в процесі роботи ви постійно горбитесь, навантаження на хребет збільшуються, приводячи до надмірного розтягання м'язів. Згорблене

положення може стати причиною синдрому зап'ястного каналу, грижі міжхребцевих дисків поперекового й шийного відділів.

Багато хто, дивлячись на екран монітора, витягають шию вперед. Часто це пов'язане з тим, що монітор відсунутий занадто далеко. У результаті навантаження на м'язи підстави голови і шиї зростає приблизно в три рази, судини шиї здавлюються, погіршуючи кровопостачання голови. Крім того, людині, що сидить у такій позі, доводиться щораз відкидати голову назад, щоб розглянути, наприклад, що лежить прямо перед ним паперовий документ. Це підсилює прогин шийного відділу хребта. Згодом це може привести до головних болів і болів у руках, оскільки нерви, що відходять від спинного мозку в області шиї, доходять до кінчиків пальців.

Сутулість – положення, при якому лінія плечей розташовується не точно над лінією стегон і під лінією вух, – викликає надмірне навантаження на плечові сухожилля й м'язи плеча. Тривала робота в такій позі може приводити до розвитку синдромів зап'ястного каналу й обмеження плеча. Отже, не горбитесь, не сутультеся, не витягайте шию. Можливо, що, почавши сидіти із правильною поставою, ви раптом відчуєте біль у м'язах. Не турбуйтеся: окремим м'язам потрібно якийсь час, щоб пристосуватися до нових навантажень. Однак після того, як м'яза звикнуть до нового положення тіла, болі пройдуть самі собою.

**Режим праці й відпочинку.** Навіть абсолютно правильна постава не допоможе, якщо весь день сидіти в одній позі. Тривале нерухоме положення приведе до м'язової втоми. Якщо вам доводиться весь день сидіти, вставляйте час від часу або злегка змінюйте висоту крісла або кришки стола, щоб змінити загальне положення тіла.

Відповідно до вимог, розробленим Держсанепідназором, сумарний час безпосередньої роботи з персональним комп'ютером не повинен перевищувати шести годин за зміну. Протягом робочого дня варто влаштовувати перерви тривалістю 10-20 хвилин. Робота без перерви не повинна перевищувати двох годин. Під час перерв рекомендується виконувати комплекси фізичних вправ.

**Деякі захворювання, викликані неправильним положенням тіла при роботі за комп'ютером.** Якщо після тривалої роботи за клавіатурою ваші долоні й зап'ястя німіють і опухають, якщо ви відчуваєте біль або поколювання великого, вказівного й середнього пальців, вам необхідно проконсультуватися з лікарем або з фізіотерапевтом. Подібні симптоми можуть бути ознакою травми зап'ястя, називаної **синдромом зап'ястного каналу (СЗК)**.

Через зап'ястя проходять сухожилля м'язів кисті й серединний нерв, що забезпечує рухи великого, вказівного й середнього пальців. Синдром зап'ястного каналу виникає в результаті обмеження серединного нерва, викликаного розпуханням сухожилля кисті. Причиною цього може стати багатогодинна робота з неправильною поставою.

Однак не всі випадки хвороб у зап'ясті пояснюються СЗК. Схожі симптоми можуть спостерігатися й при таких захворюваннях, як грижа

міжхребцевих дисків шийного відділу, синдрому верхньої апертури грудної клітки й обмеження плеча.

**Грижа міжхребцевих дисків шийного або поперекового відділів** може розвинути в результаті неправильної постави при роботі за комп'ютером. Якщо ви постійно сутулитесь, горбитесь або витягаєте шию, желейна речовина міжхребцевих дисків може випинатися в хребетний канал і защемляти нервові волокна. У результаті виникають сильні болі, причому не тільки в спині, але й в інших частинах тіла.

Неправильна постава може також стати причиною розвитку **синдрому верхньої апертури грудної клітки** – перенапруги м'язів шиї, плеча й грудної клітки, що приводить до погіршення кровопостачання й проведення нервових імпульсів у руки і долоні. Це викликає оніміння рук, поколювання і болю.

**Обмеження плеча** виникає, коли сухожилля або м'язи плечового суглоба стискаються або защемляються між голівкою плечової кістки й відростком лопатки.

**Тендовагініт де Кервена** – набряк і хворобливість в області сухожилля великого пальця кисті – нерідко виникає в результаті частого натискання на клавішу "пробіл" більшим пальцем однієї руки. Щоб запобігти розвитку цього захворювання, необхідно щогодини міняти руку, даючи сухожиллям час на відпочинок.

**"Тенісний лікоть"** – професійне захворювання тенісистів – виникає в результаті запалення загального сухожилля м'яз, розташованих біля ліктя, внаслідок їхнього надмірного навантаження. "Тенісний лікоть" може розвинути в результаті неправильного положення рук при роботі за комп'ютером.



*Універсальна стійка для комп'ютерного устаткування*



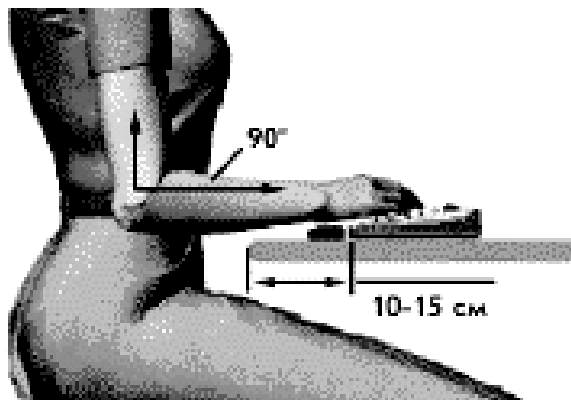
*Зона охопту при роботі за звичайним офісним столом. Мала робоча зона, голова постійно повернена до монітора.*



*Зона охопту при роботі за Г-образним офісним столом. Багато не використовуваного простору. Дошка, що не пристосована, для клавіатури*



*Робота за звичайним офісним столом, що має висувну дошку для клавіатури. Кут між ліктем і кистю викликає постійна напруга сухожиль і м'язів, що веде до хронічних розтягань кисті*



*Клавіатура на краю стола - вірний шлях до хронічних розтягань кисті. Відстань від краю стола до клавіатури повинне становити 10-15 см*



*Правильне положення рук при роботі з клавіатурою. Лікоть і кисть повинні становити одну лінію, перпендикулярну до лінії плеча*

## 1.2 Робота з операційною системою Windows

При освоєнні принципів роботи варто враховувати, що того самого результату можна досягти різними способами: використовуючи маніпулятор типу "миша" (надалі – просто мишу), клавіатуру (сполучення одночасно натиснутих клавіш), панелі інструментів і т.д.

Натисніть на кнопку включення процесорного блоку (не забудьте включити і монітор). Завантаження операційної системи займе якийсь час, тому треба трохи почекати.

**Важливе зауваження: приступаючи до освоєння комп'ютера, головне – не боятися. Адже всім нам не один раз у житті доводилося робити щось уперше.**

Розглянемо структуру стандартного екрана, що з'являється на моніторі після завантаження операційної системи (Рис. 1.1).

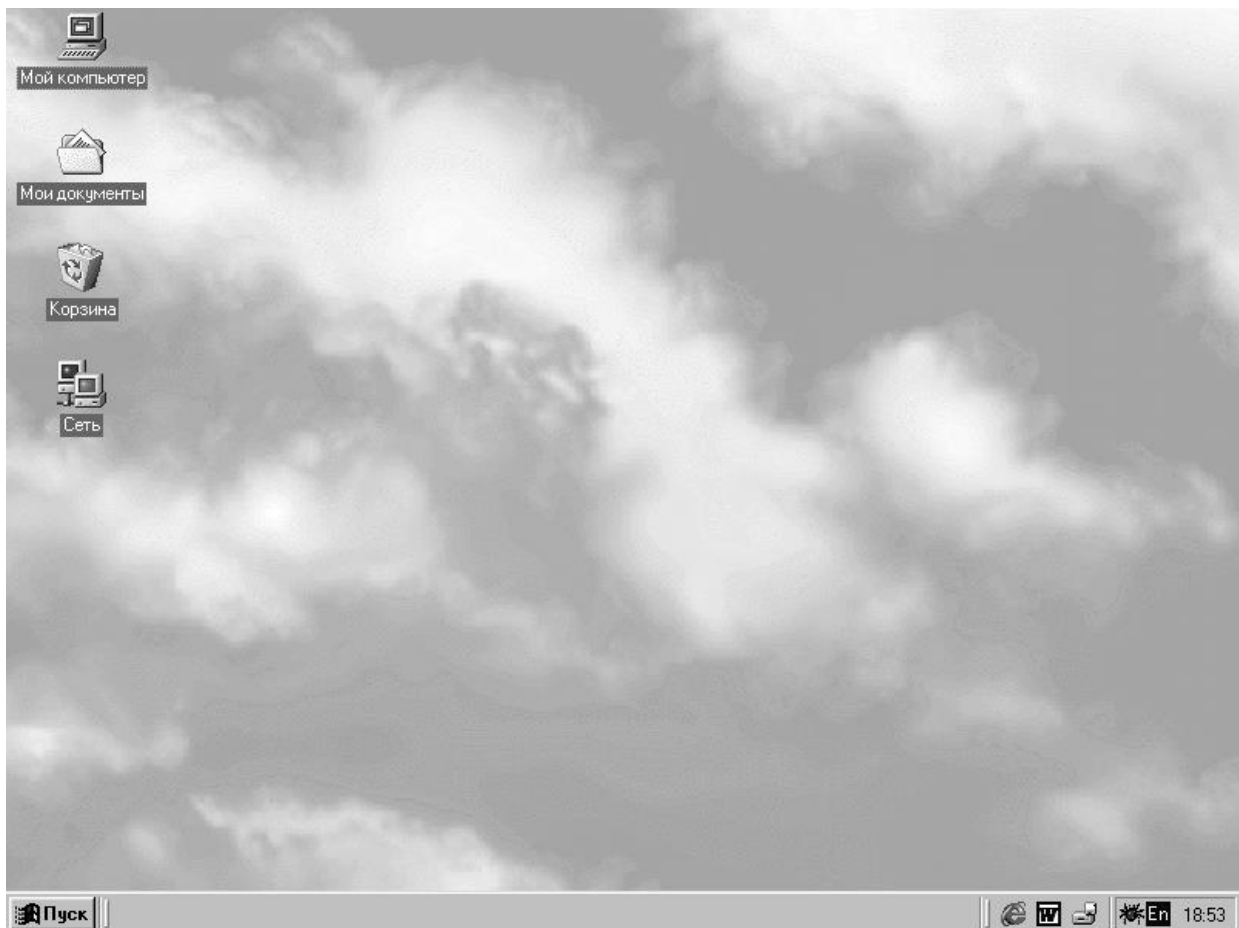


Рис. 1.1. Робочий стіл

Центральна частина екрана має назву робочого стола. Розміщені на ньому "картинки" – це ярлики (піктограми) програм, що найбільш часто використовуються при роботі. Установивши покажчик миші на потрібному ярлику і два рази швидко натиснувши на ліву кнопку, ви можете запустити програму, з якою зв'язаний даний ярлик.

У нижній частині екрана розташований рядок панелі завдань і кнопка **Пуск**.

Для початку, розглянемо основні установки, які можна зробити, щоб працювати на персональному комп'ютері було зручно.

**Установка часу і дати.** У правому нижньому куті екрана (Рис. 1.1) відображається поточний час. Якщо підвести маркер миші до цих цифр, то незабаром тут же з'явиться маленьке віконце, у якому відображена поточна дата. Як правило, установку системних годин комп'ютера (а саме їхньою роботою визначаються цифри на екрані) доводиться робити досить рідко.

Операція зміни параметрів нагадує настроювання звичайних електронних годинників.

Насамперед, встановлюємо маркер миші на цифрах, що відображають час, і два рази підряд натискуємо на ліву кнопку миші. Ця дія відкриє на екрані монітора панель настроювання дати й часу (Рис. 1.2). Потім починається настроювання.



Рис. 1.2 Установка дати й часу

Перший її етап - **зміна дати**. Дата, як відомо, містить у собі рік, місяць і число. Щоб установити потрібне значення **місяця**, підведіть маркер миші до стрілки праворуч від рамки, де знаходиться назва місяця, що влаштовує вас, натисніть на ліву кнопку миші і виберіть зі списку, що з'явився, те, що потрібно. (Обраний місяць висвітлиться у віконці.)

Для зміни **року** в більшу сторону - підведіть маркер миші до спрямованої нагору стрілочці праворуч від рамки, у якій відображений рік, і натискаючи на стрілочку лівою кнопкою миші встановите рік.

При установці **числа** підведіть маркер миші до потрібного його значення і виділите його однократним натисканням на ліву клавішу.

Для **зміни поточного часу** у віконці, що відображає час, сполучите маркер миші з лівою парою цифр (годинник) і два рази натисніть на ліву кнопку. У результаті дві цифри, що відображають годинник, виділяються кольорами. Потім, натискаючи на стрілки, розташовані праворуч від віконця, що відображає годинник, ви можете змінити виділені цифри, установивши потрібне значення. Аналогічно встановлюємо хвилини й секунди, тобто другу й третю пари цифр: (підводимо маркер миші, два рази натискаємо на ліву кнопку й змінюємо значення за допомогою стрілочок).

*Після того як потрібна пара цифр (години, хвилини або секунди) виділена, замість того, щоб натискати на стрілочку праворуч від вікна, можна просто набрати на цифровій клавіатурі необхідне значення.*

Коли установка дати й часу зроблена, необхідно зберегти зроблені зміни. Для цього натисніть у правому нижньому куті екрана кнопку **Застосувати (Применить)**, однократно клацнувши по ній лівою кнопкою миші. Якщо ж ви захочете відмовитися від зроблених змін, натисніть на кнопку **Скасування (Отменить)**.

Урахуйте, що в момент натискання кнопки **Застосувати** зроблені зміни набувають чинності й скасовувати їх стане пізно.

**Вибір мови.** За вибір російської, української або англійської мови відповідає так званий **індикатор мови**. Він розташовується на панелі завдань лівіше цифр, що відображають час (Рис. 1.1), і виглядає кольоровим квадратиком з білими буквами. Підвівши маркер миші до індикатора мови й натиснувши один раз на ліву клавішу миші, ви робите потрібний вибір.

Переміняти використовувану мову можна і за допомогою клавіатури. При стандартній установці **Windows** для цього варто одночасно натиснути клавішу **Alt** (ліворуч) і клавішу **Shift** (<Alt > + <Shift>). Індикатор мови й розкладка клавіатури змінять своє значення так само, як і при використанні миші.

За бажанням сполучення клавіш для зміни мови можна змінити. Для цього встановите маркер миші на індикатор клавіатури й натисніть на праву кнопку. Потім підведіть маркер до рядка **Властивості (Свойства)...** і клацніть лівою клавішею миші.

За допомогою вкладки, що **відкрилася, Властивості: Клавіатура** (Рис. 1.3) можна додати мову, нажавши на кнопку **Додати...**, подивитися



властивості обраної мови (кнопка **Властивості** ), видалити обрану мову (кнопка **Видалити ( Удалить )** ).

*На початкових етапах освоєння комп'ютера треба з обережністю ставитися до можливості видалити що-небудь, оскільки видалення того або іншого елемента може привести до непоправного для роботи наслідкам.*

Крім уже перерахованих можливостей ця ж вкладка дозволяє вибрати мову, користуючись системою за замовчуванням, тобто ту, що буде автоматично "включатися" при початку роботи різних програм.

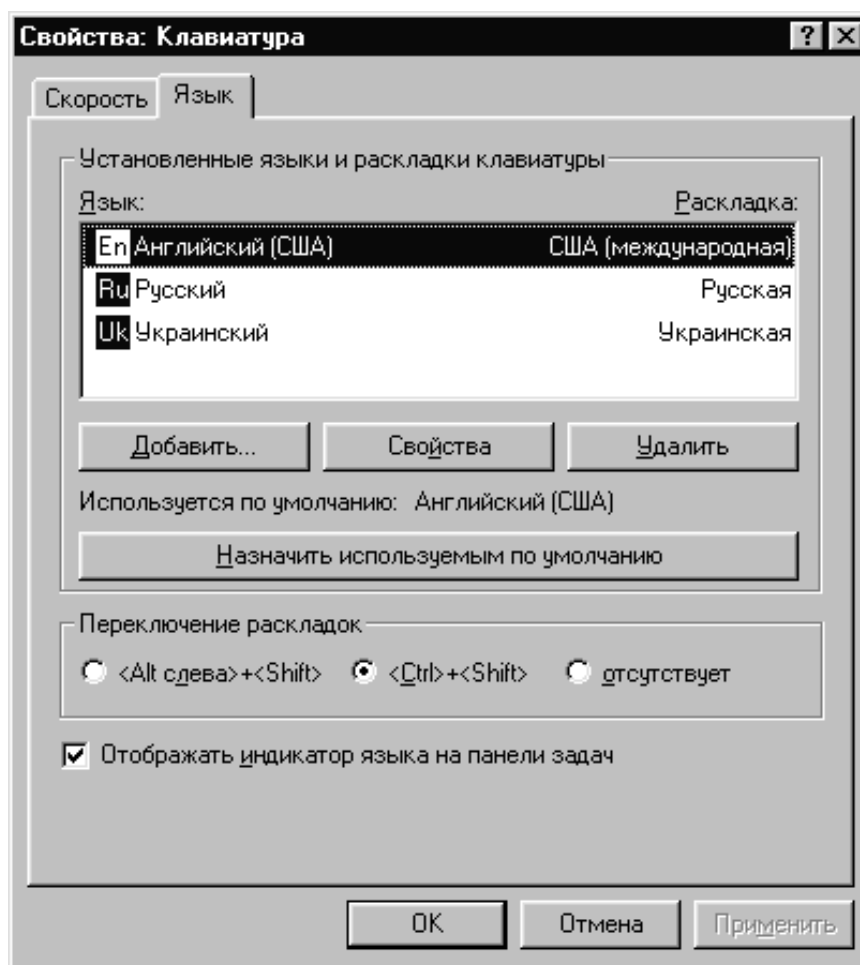


Рис. 1.3 Властивості клавіатури

Для вибору мови за замовчуванням встановіть маркер миші на назву потрібної мови, виділіть її одноразовим натисканням лівої клавіші. Потім пересуньте маркер на кнопку **Призначити використовуваним за замовчуванням** і натисніть на неї за допомогою лівої клавіші миші. Напис в інформаційному рядку над кнопкою вибору мови за замовчуванням відіб'є зроблені зміни.

Тепер подивимося трохи нижче. Блок **Перемикання розкладок** дозволяє вибрати одне із двох сполучень клавіш для "перемикання" мови. (Незалежно від вибору натискати обидві клавіші треба одночасно). Існує й

третя можливість: зовсім відмовитися від використання клавіатури для зміни мови (за цей варіант відповідає кнопка **відсутня** ).

Який би з варіантів не був обраний, для його здійснення досить однократно натиснути лівою клав'яшею миші на обраному режимі або кнопку вибору режиму, що перебуває ліворуч від нього. Поява точки в її центрі означає, що вибір зроблено.

Ще нижче на панелі **Властивості: Клавіатура** розташована напис: **Відображати індикатор мови на панелі завдань**. Галочка в маленькому віконці ліворуч від її вказує на те, що індикатор мови буде висвічуватися на панелі завдань. "Зняти" цю галочку можна, установивши на неї маркер миші й нажавши один раз на ліву клав'яшу.

Тепер індикатор мови висвічуватися не буде, а розкладку клавіатури й мова прийде міняти "наосліп" за допомогою клавіатури (якщо, звичайно, ви не вибрали опцію **відсутній** у блоці **Перемикання розкладок**).

Для того щоб всі зроблені зміни в настроюванні набули чинності, необхідно натиснути кнопку **Застосувати**. Якщо ж ви не хочете зберегти зроблені зміни й залишити вже існуючі, натисніть кнопку **Скасування**.

**Оформлення фону екрана.** Для оформлення фону екрана **Windows** надає стандартні можливості. Установлюємо маркер миші в будь-якій вільному місці екрану, натискаємо на праву кнопку і, вибравши рядок **Властивості** в таблиці, що відкрився (Рис. 1.4), натисніть на неї.

Вид вікна, що відкриється перед вами (Рис. 1.5), вимагає деяких пояснень. У верхній частині, можна побачити назви різних вкладок. Клацаючи по них покажчиком миші, ви будете попадати на різні вкладки, відповідальні за настроювання екрана й об'єднані загальною назвою: **Властивості: Екран**.

*Принцип об'єднання вкладок використовується в **Windows** досить часто. Потрапляючи в подібне інформаційне вікно, ви вибираєте саме ту вкладку, що потрібна.*

За допомогою вкладки **Фон** нескладно вибрати фон екрану, виділивши один з рядків, запропонованих у списку. Як правило, це маленькі фрагменти орнаменту, які можна помістити у **центрі** (вибравши зі списку, розташованого під рядком **Помістити**), розмножити на весь екран (рядок **Поруч** із того ж списку) або розтягти на весь екран (**Розтягти**). Використовується як фон і візерунок (кнопка **Візерунок**). Коли ж результат вас задовольнить, для збереження досягнутого натисніть кнопку **Застосувати**.



Рис. 1.4 Меню Властивості

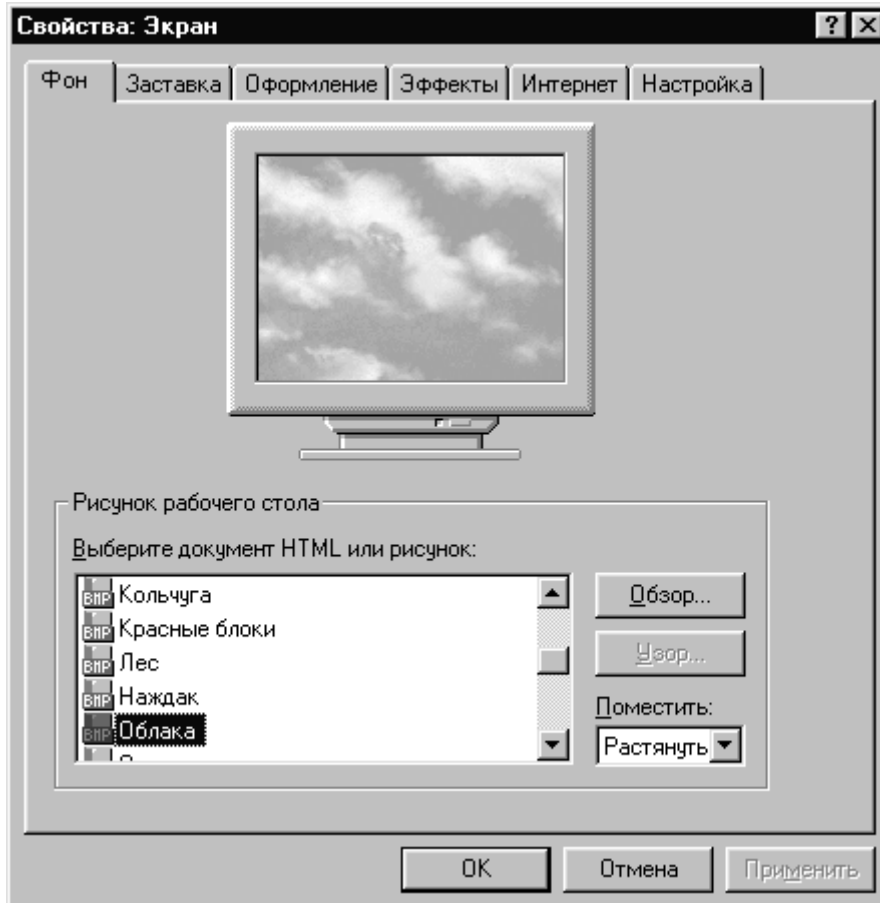


Рис. 1.5 Вибір фона екрана

Перейдемо до вкладки **Заставка** (Рис. 1.6). Для її виклику встановите на відповідну назву вкладки курсор, і натисніть ліву клавішу миші.

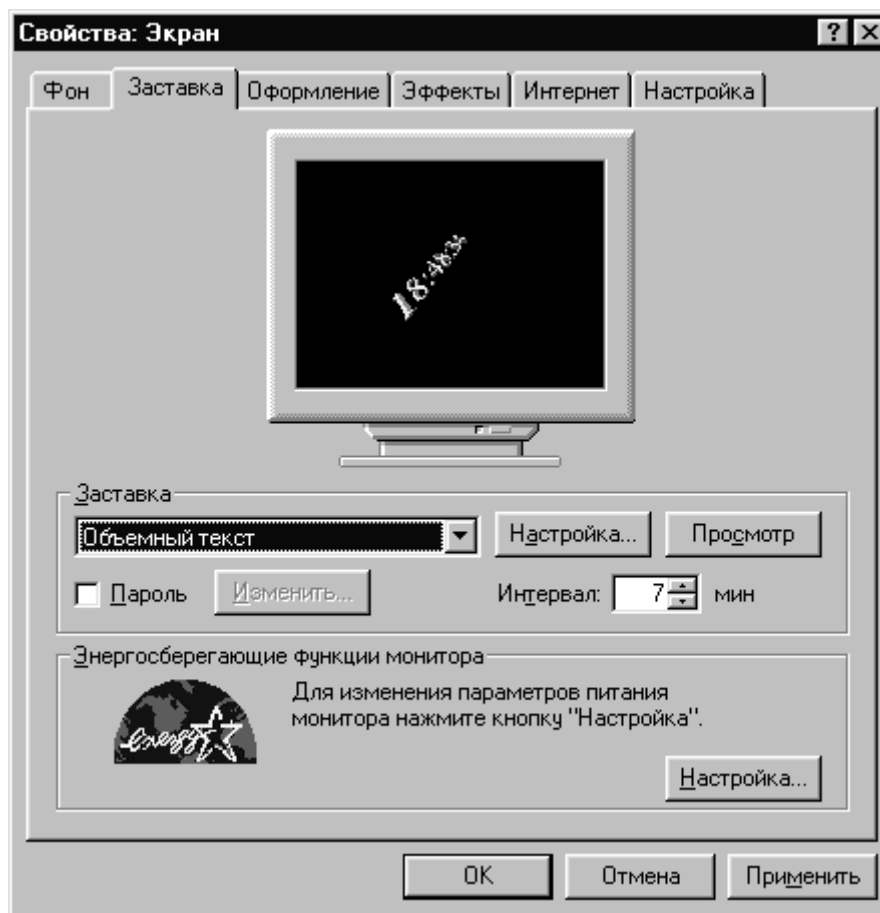


Рис. 1.6 Вибір заставки екрана

За допомогою цієї вкладки задається режим так названого **хоронителя екрана** (save screener), що охороняє монітор від псування при тривалому відображенні статичного зображення. Інакше кажучи, зовсім не зайвим буде встановити цей режим, якщо у вас трапляються тривалі перерви в роботі з комп'ютером і ви дорожите своїм монітором. Висвічування заставки переривається натисканням будь-якої клавіші клавіатури або переміщенням миші.

Установка "охоронного" режиму проводиться в кілька етапів. Необхідно спочатку вибрати тип заставки зі списку **Заставка**, потім встановити інтервал, через який вона буде активована. Так, якщо обраний час становить 5 хвилин і протягом цього часу ви не нажали жодної клавіші й не переміщали миша, то на екрані з'явиться обрана динамічна заставка. Режим її висвічування (елементи, швидкість і т.д.) дозволяє настроїти кнопка **Настроювання**.

Підбираючи тип і швидкість відображення заставки, постарайтеся, щоб вони принаймні вас не дратували.

Визначитися з остаточним вибором допоможе кнопка **Перегляд**, натиснувши на яку ви побачите, як буде виглядати заставка.

Використати динамічну заставку можна й з іншими захисними цілями. Установивши "галочку" ліворуч від слова **Пароль** (Рис. 1.6), ви активізуєте кнопку **Змінити**, що дозволяє задати пароль виходу з режиму заставки. Інакше кажучи, якщо у вас на екрані перебуває конфіденційна інформація або ви не хочете, щоб під час вашої відсутності хтось міг працювати на вашому комп'ютері, треба встановити пароль на заставку. Запам'ятаєте його або запишіть у недоступному для сторонніх місці, оскільки без введення даного пароля вийти з режиму заставки буде неможливо.

І на закінчення не забудьте натиснути кнопку **Застосувати** (можна, звичайно, натиснути й кнопку **Скасування**, якщо не шкода своїх праць по установці заставки).

Наступна вкладка **Оформлення** дозволяє вибрати один із запропонованих **Windows** стилів оформлення.

За допомогою ще однієї вкладки: **Ефекти** можна, зокрема, змінювати відображення стандартних значків робочого стола. Використання того або іншого значка - справа смаку, але тих, кому доводиться працювати на різних комп'ютерах, установка нестандартних значків здатна іноді вводити в оману.

Окремої уваги заслуговує вкладка **Настроювання** (Рис. 1.7).



Рис. 1.7 Вибір настроювання екрана

Використання цієї вкладки дозволяє встановити дозвіл екрана. Максимальне значення цього параметра залежить від типу монітора і відеокарти, установлені на комп'ютері.

Працюючи із кнопкою **Колірна палітра** і "повзунком" **Область екрану**, можна встановити режим роботи, найбільш прийнятний для сприйняття. А натиснувши на кнопку **Додатково** на вкладці **Загальні** в групі **Екран - Розмір шрифту**, ви встановлюєте зручний розмір шрифту в тексті під значками робочого стола (Рис. 1.8).

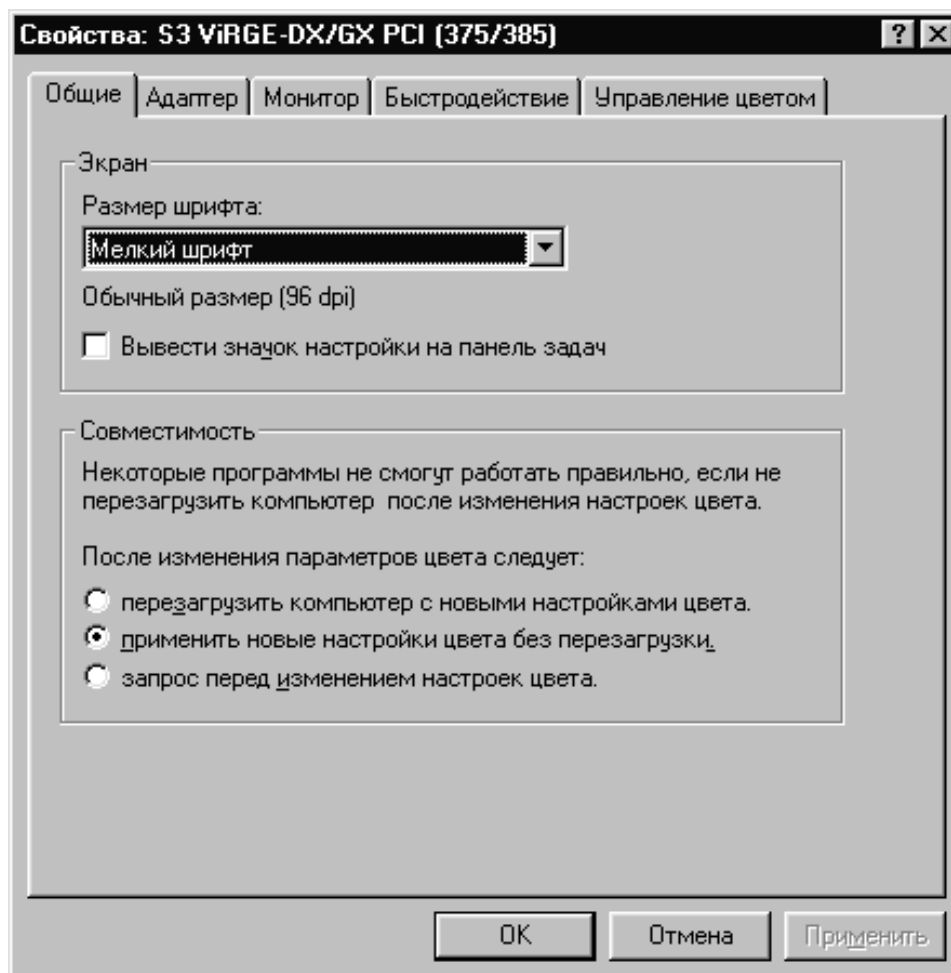


Рис. 1.8 Вибір колірної палітри і розміру шрифту

*При зміні параметрів екрана комп'ютер може запропонувати перезавантажити його. Бажано зробити це відразу, щоб зроблені вами установки набули чинності.*

**Ярлик.** Виглядає він як маленька картинка, дворазово клацнувши по якій лівою клавішею миші ви запуснете пов'язану з даним ярликом програму. Але ярлик - це не сама програма, а лише посилання на неї. Тобто ярлик "запам'ятовує" місце, де перебуває програма. Розміщаючи ярлики програм на робочому столі, ми забезпечуємо легкий спосіб запуску найбільше часто використовуваних програм.

Для створення ярлика встановите маркер на потрібну програму (Рис. 1.9) і натисніть праву кнопку миші. У контекстному меню, що відкрилося, виберіть **рядок Відправити**, а потім **Робочий стіл (створити ярлик)**. Після

того як система повідомить вас, що ярлик буде розміщений на робочому столі, натисніть кнопку **ОК**.

Коли ярликів на робочому столі накопичується багато, виникає необхідність упорядкувати їхнє розміщення. Це робиться "штучно": встановивши маркер на ярлик, натискаємо один раз ліву кнопку миші і, не відпускаючи її, пересуваємо ярлик у будь-яке місце робочого стола.

А от "підрівняти" ярлики по горизонталі і вертикалі можливо і "оптом": поміщаємо курсор у будь-яким вільному місці робочого стола, натискаємо праву кнопку миші і вибираємо з контекстного меню рядок: **Вибудувати значки**.

Із цього ж меню можна вибрати рядок **Упорядкувати значки і критерій сортування**. Найбільше "затребувані" (але не всі, розміщені на робочому столі) ярлики можна помістити й на панелі завдань. Наскільки це зручно, ви оціните дуже швидко, як тільки в процесі роботи з якою-небудь

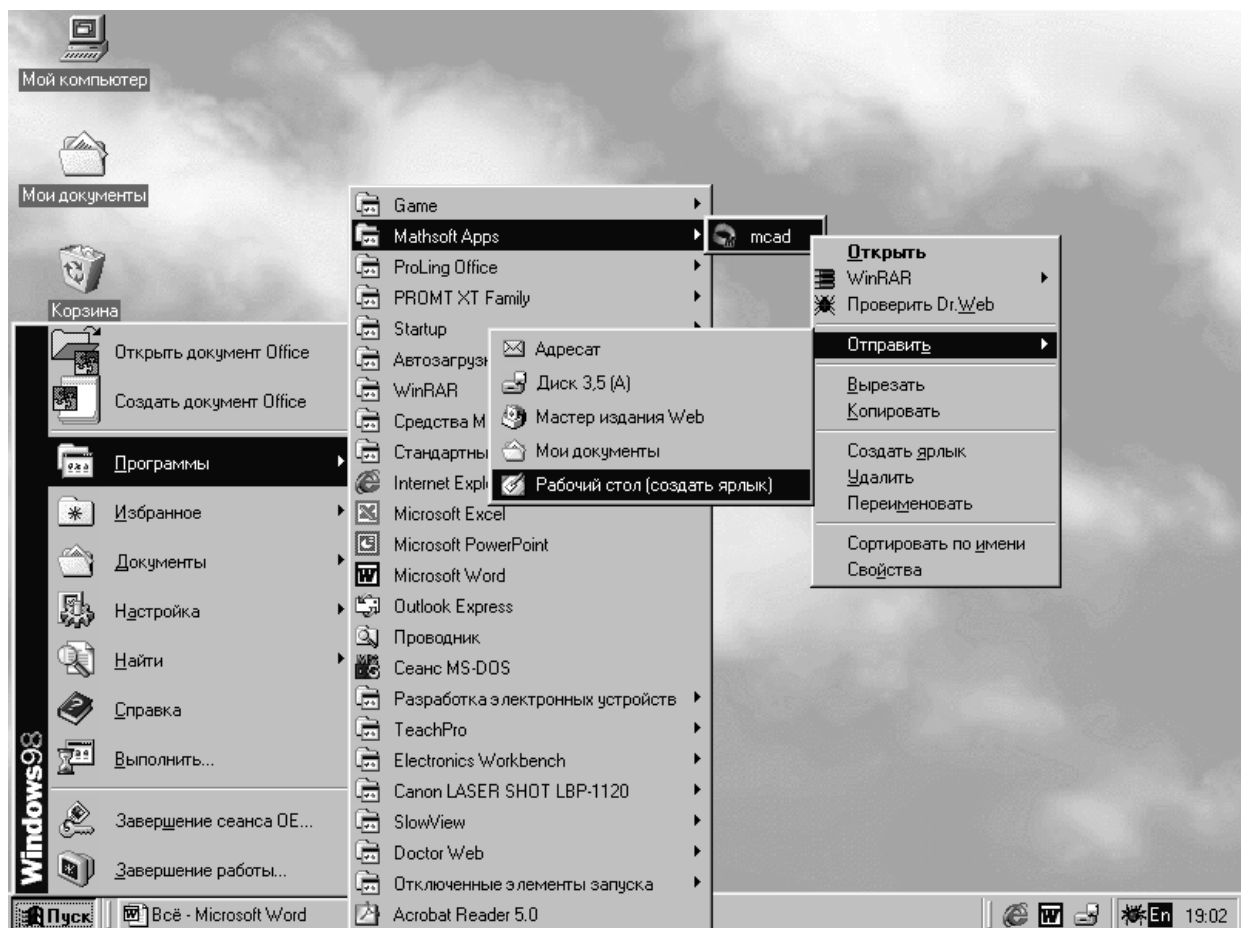


Рис. 1.9 Створення ярлика на робочому столі

програмою, коли робочий стіл не видно, виникне необхідність запуснути інші додатки. Можна, звичайно, "згорнути" вікно активної програми, натиснувши на значок " – " у правому верхньому куті вікна, але простіше "клацнути" по потрібній піктограмі на панелі завдань, що видна практично завжди.

Щоб забезпечити собі таку зручність, встановлюємо маркер на обраний значок на робочому столі, натискаємо на ліву кнопку миші й "протягаємо" цей значок на вільне місце панелі завдань справа від кнопки **Пуск** (положення значка на панелі відображається вертикальною смугою), потім відпускаємо кнопку миші. "Перетаскуючи" у такий же спосіб значки вже на самій панелі завдань, можна поміняти їхнє взаємне розташування, тобто скомпонувати зручним для себе образом. Мовою професіоналів пророблена нами робота називається формуванням панелі швидкого запуску.

Використовуючи панель завдань, можна забезпечити собі і ще одна зручність: активувати на ній панель робочого стола. Для цього встановите маркер миші на вільне місце панелі завдань, натисніть праву кнопку миші, виберіть рядок меню **Панелі інструментів** і активуйте панель **Робочий стіл** (клацніть лівою кнопкою миші до появи галочки ліворуч від рядка). Тепер ви в будь-який момент зможете побачити всі ярлики програм, самі програми й файли (якщо вони збережені на робочому столі).

**Кнопка пуск.** За допомогою кнопки меню Пуск необхідно закінчувати роботу, запускати програми, знаходити файли й папки, відкривати робочі документи, встановлювати принтери і робити багато інших корисних дій у середовищі Windows. Можливостей у меню Пуск закладено настільки багато, що ми розглянемо лише частину з них.

Щоб при кожному запуску комп'ютера не "насолоджуватися" картиною сканування дисків комп'ютера і виправлення помилок, **необхідно раз і назавжди запам'ятати: закінчувати роботу в середовищі Windows простим вимиканням електроживлення - НЕ МОЖНА!** Рано або пізно це може привести до збоїв у роботі операційної системи й необхідності її переустанови.

Для вимикання комп'ютера, потрібно закрити всі активні додатки. Потім підвести маркер миші до кнопки **Пуск** і один раз натиснути ліву кнопку миші. У меню **Пуск**, що **відкрилося**, (Рис. 1.10) виберіть рядок **Завершення роботи** і знову однократно натисніть ліву кнопку. Залежно від того, чого ви хочете: виключити комп'ютер, перезавантажити його або призупинити роботу ПК, виберіть за допомогою миші потрібний рядок і натисніть **ОК** (Рис. 1.11).

У випадку "зависання" комп'ютера можна скористатися так названими "трьома кнопками": одночасно натиснути на клавіатурі <Ctrl>+<Alt>+<Del > і у вікні, що відкрилося, клацнути по **кнопці Завершити роботу**. У цьому ж вікні можна завершити роботу й тільки однієї, "завислої", програми: для цього в списку програм треба вибрати потрібну й також нажати на кнопку **Завершити завдання**. У результаті даний додаток буде знято і роботу можна продовжувати.



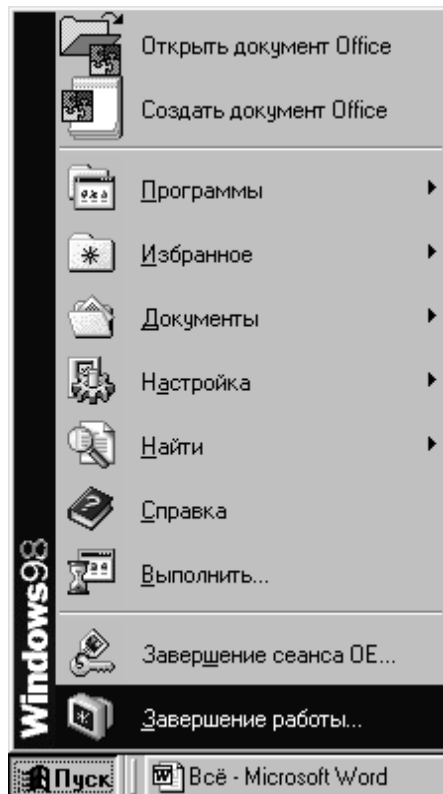


Рис. 1.10 Вибір меню **Завершення роботи**

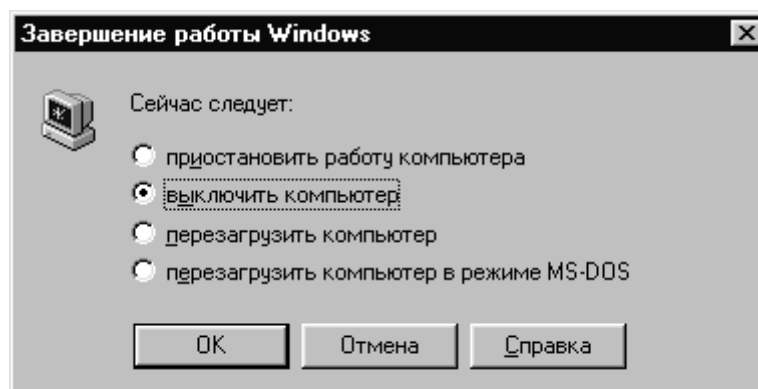


Рис. 1.11 Вибір режимів вимикання і перезавантаження

Для запуску програми необхідно у меню **Пуск** (Рис. 1.10) підвести маркер миші на рядок **Програми**. Зі списку програм, що висвітився, установлених на вашому комп'ютері, виберіть потрібну. Підвівши маркер до потрібного рядка й натиснувши один раз на ліву кнопку миші, ви запустите цю програму на виконання.

Наявність стрілочки праворуч від назви програми, що цікавить вас, говорить про існування підкаталогу, що відкриється при підведенні до нього маркера миші (Рис. 1.9). У цьому випадку для запуску програми варто вибрати рядок з підкаталогу.

Натиснувши у меню **Пуск** рядок **Документи**, ви відкриєте список документів, з якими недавно працювали. Клацнувши один раз лівою кнопкою миші на імені потрібного документа, ви відразу відкриєте його для роботи.

Кожному з нас доводилося що-небудь губити, іноді - непоправно. На щастя, втрата збереженого в комп'ютері файлу до непоправного не приводить (якщо ви його не видалили з комп'ютера в "кошик").

Щоб відновити втрату, виберіть рядок **Знайти - Файли й папки** в меню **Пуск**. Далі треба хоч що-небудь згадати про загублений файл: його тип, назву (або фрагмент імені), коли він був створений або змінений, де був збережений, і заповнити вікно, що відкрилося (Рис. 1.12). (У найгіршому разі можна зажадати пошук на кожному з логічних дисків.) Потім натисніть кнопку **Знайти** й почекайте.

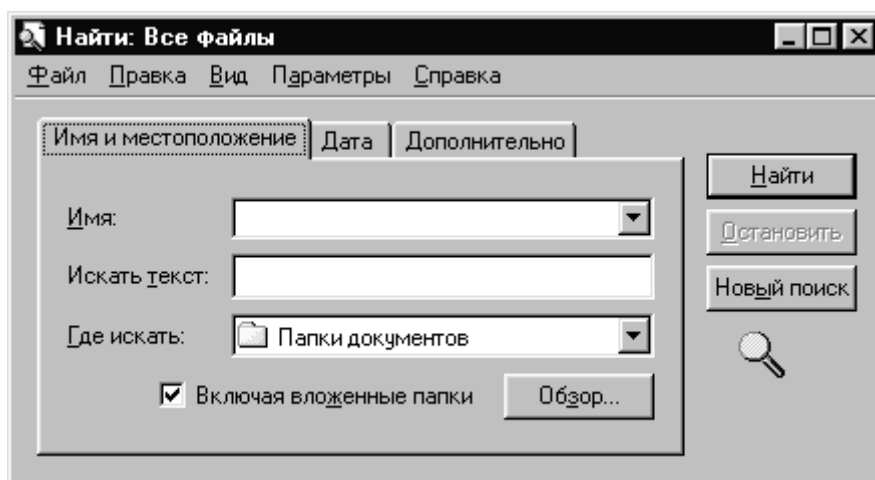


Рис. 1.12 Вікно пошуку

У списку файлів, що підходять під уведені параметри може виявитися і шуканий. Подивившись, де він збережений, можете відразу відкрити його, два рази клацнувши лівою кнопкою миші по імені файлу у списку, що відкрився. Якщо ж список виявиться порожнім, подумайте, що ще можна згадати про зниклий файл, щоб змінити параметри пошуку.

Вибравши рядок **Довідка** в меню **Пуск**, можна знайти відповіді на багато питань, що виникають при роботі з операційною системою. Користуватися довідковою системою досить просто.

**Провідник**. Жоден користувач ПК не може обійтися без **Провідника**, програми, чия назва повною мірою відбиває її суть.

Рекомендується розмістити ярлик цієї програми не тільки на робочому столі, але й на панелі завдань.

Розглянемо структуру вікна й основні принципи роботи провідника. У меню **Пуск** виберіть рядок **Програми** й знайдіть рядок **Провідник**.

Потім запустите програму одним з наступних способів:

меню **Пуск - Програми - Провідник** (один щиглик лівою кнопкою миші по цьому рядку);

натисніть два рази на ярлик програми на робочому столі лівою кнопкою миші;

натисніть один раз на ярлик на панелі завдань лівою кнопкою миші.

У всіх цих випадках на екрані відкриється стандартне вікно провідника (Рис. 1.13). Розглянемо його структуру. (До речі, така ж, як правило, структура всіх програм, що функціонують у середовищі **Microsoft Windows**.)

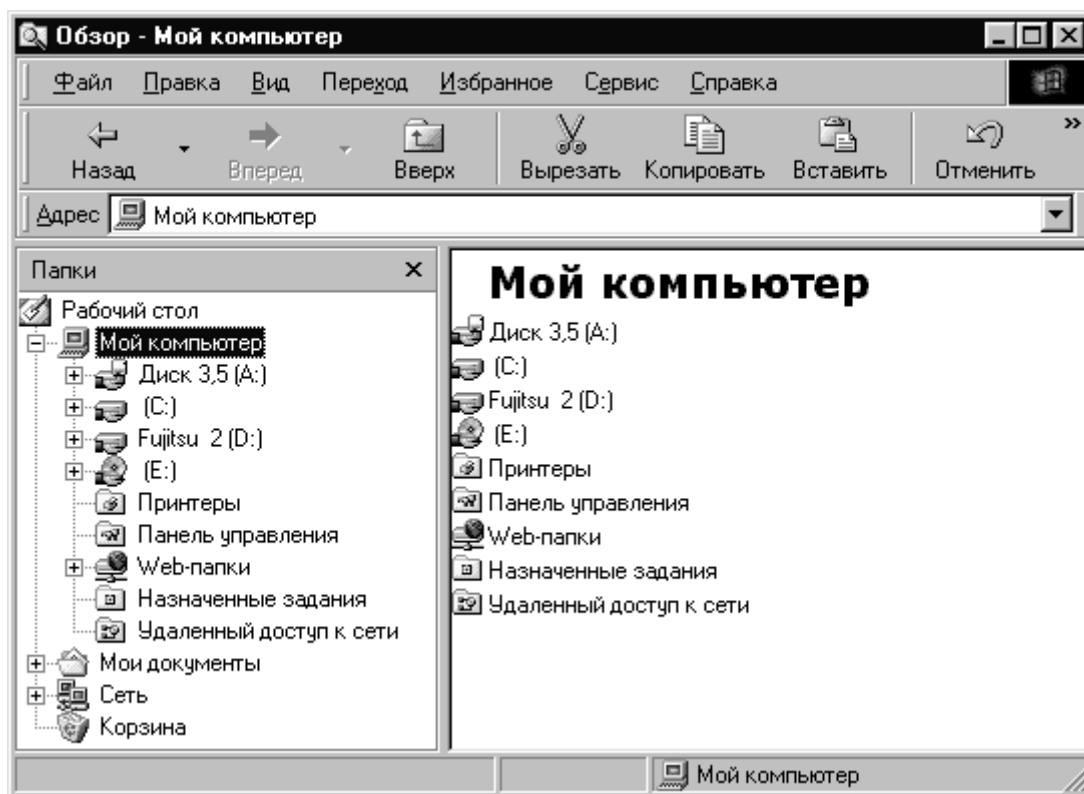


Рис. 1.13 Вікно провідника

У верхньому рядку, що має синій фон (при виборі схеми оформлення екрана звичайна **Windows**), відображається назва програми й активного елемента (у цьому випадку - логічного диска **З**). У правому верхньому куті розташовуються три кнопки, які "відповідають" за розмір вікна.

Сама ліва "звертає" дану програму. При цьому програма залишається активною, про що говорить відповідна кнопка на панелі завдань. Натиснувши на останню, можна знову "розгорнути" додаток.

Середня або дозволяє "розгорнути" додаток на повний екран або "згорнути" його у віконний режим перегляду.

Права кнопка закриває даний додаток (припиняє його роботу).

Нижче розташовані панелі інструментів, від яких залежить вид додатка. Але, як правило, у них завжди присутні рядок меню й стандартна панель інструментів.

Говорячи про провідника, необхідно сказати кілька слів про принцип зберігання інформації в середовищі **Windows**. Всі програми і робочі документи зберігаються на жорсткому диску (вінчестері) комп'ютера, що може бути розбитий на один або кілька логічних дисків (**C**, **D**, **E** і т. д), у вигляді файлів. Для зручності файли групують у так називані папки. Грамотно організована структура дерева папок робить роботу зручною і дозволяє рідко звертатися до опції пошуку файлів.

У лівій частині вікна (Рис. 1.13) відображається структура дисків (і папок). У правій частині - структура папок і вміст обраного елемента. Залежно від того, у якій частині (лівої або правої) ви будете "клацати" по імені диска або папки, там і буде відображатися структура.

Маленький знак "плюс" у лівому вікні означає, що дана папка, як мотрійка, містить у собі інші папки. "Клацнувши" по плюсі, ви розгорнете вміст папки (і у зворотному порядку, "клацнувши" по мінусі, - згорнете її вміст). Можна також подивитися дерево файлів і вибрати в ньому потрібний елемент для перегляду, натиснувши у рядку **Адреса** на стрілочку праворуч.

Крім того, ви можете активувати додаток, що породив даний файл (відкрити файл для перегляду і редагування), якщо два рази натиснете на ліву кнопку миші, установивши маркер на ім'я файлу. У такий же спосіб можна запустити програму, що виконується.

У лівій частині рисунка (Рис. 1.13) представлені два логічних диски (C і D) і CD-ROM (E). Для перегляду вмісту логічного диска **D** клацніть два рази лівою клавішею миші по букві **D** або по розташованій лівише піктограмі.

**Створення папки.** Розглянемо основні можливості рядка **меню провідника** (Рис. 1.14). (Відзначимо, що залежно від ситуації склад активних - яскраво висвітлених - рядків може змінюватися.).

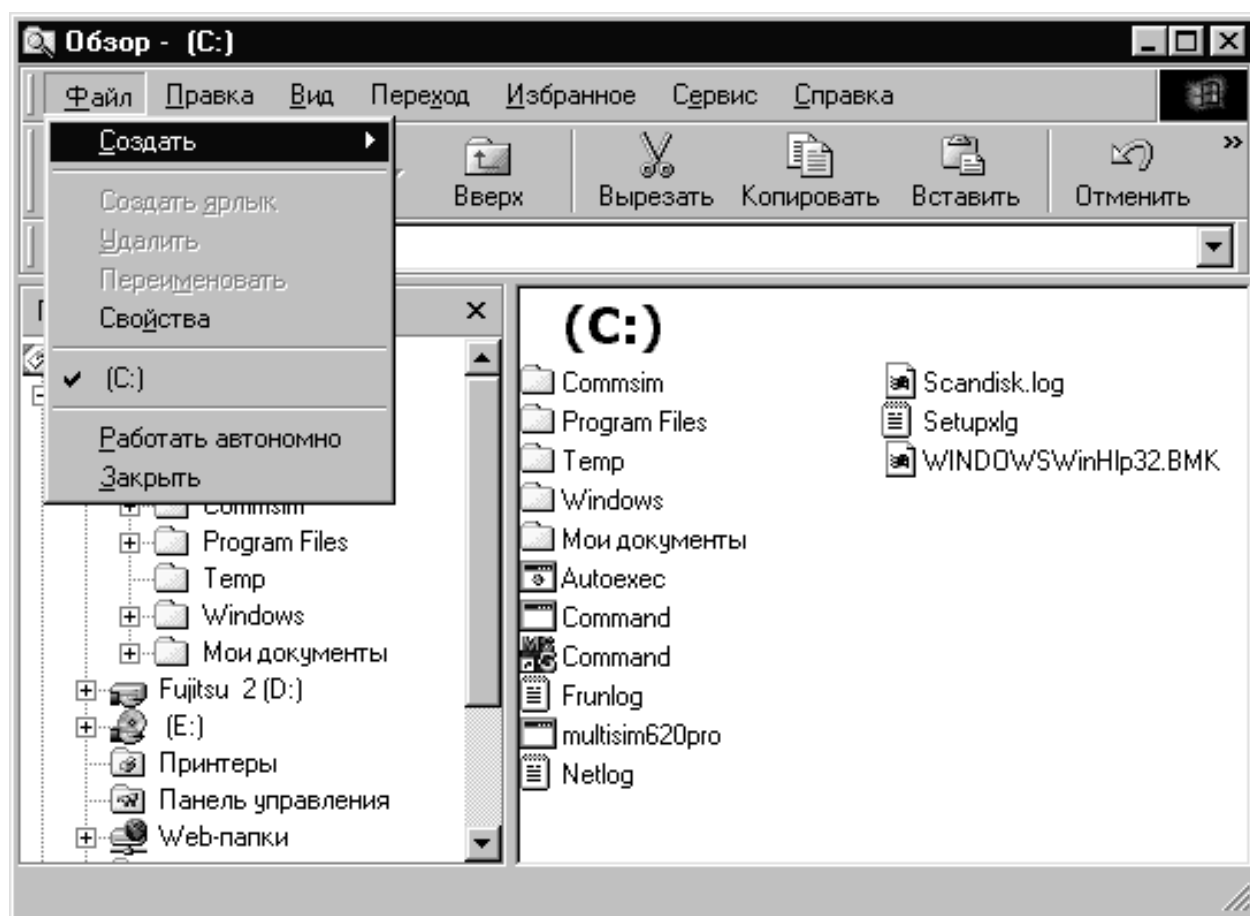


Рис. 1.14 Створення папки в Провіднику

Установлюємо маркер на слово **Файл** у рядку меню й натискаємо на ліву кнопку миші. Далі, виділивши за допомогою миші рядок **Створити**,

можна створити нову папку в активній папці, ярлик для програми або файлу, нові документи.

Найбільше часто використовується режим створення папки. При створенні краще відразу надати потрібне ім'я папки (замість стандартного **Нова папка**).

*Намагайтеся привласнювати файлам і папкам осмислені імена, які згодом зможуть підказати вам, що містить дана папка або файл (документ).*

На символи, придатні для найменування папок і файлів, операційною системою накладаються деякі обмеження:

- не використовується в іменах символ крапки, тому що вона є роздільником між ім'ям файлу й розширенням, що визначає тип файлу. Замість крапки зручно використати знак підкреслення;
- максимально припустима довжина імені файлу становить 255 символів, включаючи пробіли. Однак дуже довгі імена використовувати незручно, тому що у провіднику їх однаково читати буде важко;
- імена не повинні містити наступних символів: \ / : \* ? " < > |.

Якщо виділити об'єкт у правій частині провідника, зміст меню **Файл** стане трохи іншим (Рис. 1.15). Отут перед вами виникнуть наступні можливості: відкрити виділену папку або файл, подивитися вміст папки, знайти файл або папку, заархівувати папку або файл (за умови, що у вас встановлена програма-архіватор), зробити папку доступною для спільного використання (якщо комп'ютер перебуває в локальній мережі), перевірити комп'ютер на наявність вірусів (якщо встановлено антивірусну програму), відправити в те або інше місце, створити, видалити або перейменувати ярлик, подивитися властивості виділеного об'єкта.

**Видалення файлів або папок у кошик і їхнє відновлення.** Якщо ви виділите об'єкт і виберете рядок **Видалити**, система висвітлить на екрані попередження про видалення об'єкта (файлу або папки). Ви можете відмовитися від видалення або погодитися, і тоді об'єкт буде переміщений у "кошик". Але це не означає, що файл вилучений з пам'яті комп'ютера безповоротно. **Кошик (RECYCLED)** – це системна папка, у якій зберігаються вилучені файли.

Піктограма кошика розміщується на робочому столі. Клацнувши по ній два рази лівою кнопкою миші й вибравши вилучений файл, ви можете відновити його, вибравши в меню **Файл** рядок **Відновити**. Об'єкт буде відновлений і повернеться в те ж місце, звідки був вилучений.

Для очищення кошика необхідно переконатися, що файли, що зберігаються в ньому, і папки більше не потрібні, **виберіть** в меню **Файл кошика** рядок **Очистити кошик**. **Треба** ставитися до цього процесу уважно, тому що відновити вилучені файли вдається тільки спеціальними засобами, та й то не завжди.

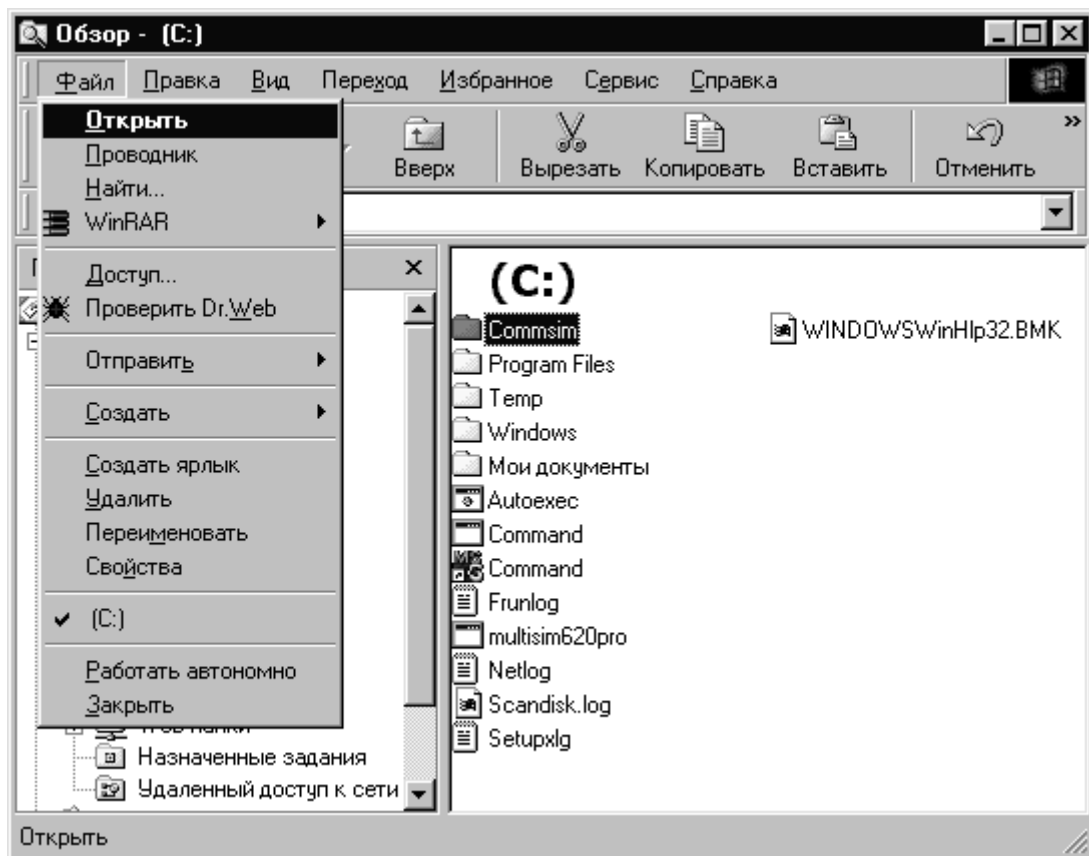


Рис. 1.15 Меню **Файл** у **Провіднику**

У тих випадках, коли ви повністю впевнені, що даний файл або папка зовсім не потрібні, можна зробити видалення, не поміщаючи об'єкт у кошик. Для цього одночасно з вибором опції видалення натисніть на клавіатурі клавішу **Shift**.

Для переміщення і копіювання файлів та папок в основному використовується меню **Виправлення** (команди для редагування) (Рис. 1.16).

Щиглик по рядку **Вирізати** – і виділений об'єкт буде вилучено з даного місця, а звертання до команди **Копіювати** створює копію папки або файлу.

Потім виберіть за допомогою провідника нове місце для об'єкта, натисніть меню **Виправлення** й у ньому рядок **Вставити**. Це перемістить файл або папку в зазначене місце.

*Якщо ви виділите об'єкт і натиснете праву кнопку миші, то побачите контекстне меню, що містить всі основні дії, які можна зробити над об'єктом. Так що, вибираючи потрібний рядок, цілком вдається обійтися без меню провідника.*

**Настроювання зображення.** Заголовок **Вид** (команди для керування зображенням) **меню провідника** повністю відбиває функції, які можуть реалізовуватися за допомогою даного меню. Спробуйте попрацювати із цим меню самостійно: підберіть вид вікна провідника, найбільш підходящого для вашої роботи.

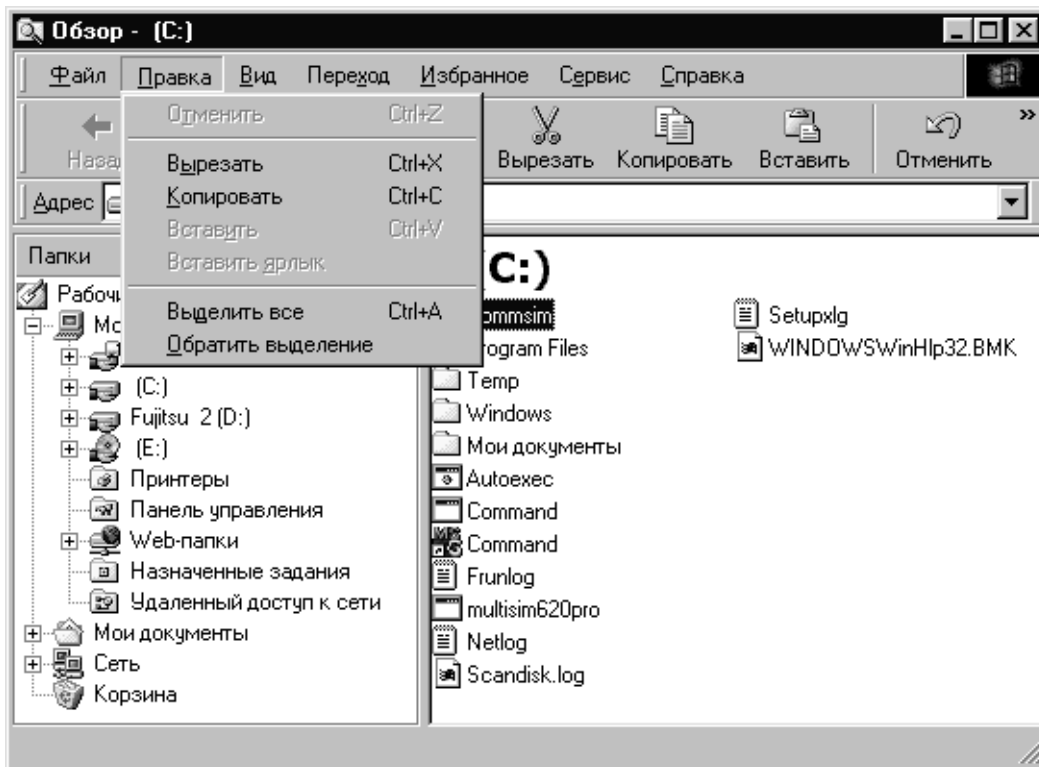


Рис. 1.16 Меню **Виправлення** в Провіднику

Зупинимося на останньому рядку меню **Властивості папки**. Вкладка **Загальні** (Рис. 1.17) визначає відображення вікна провідника.

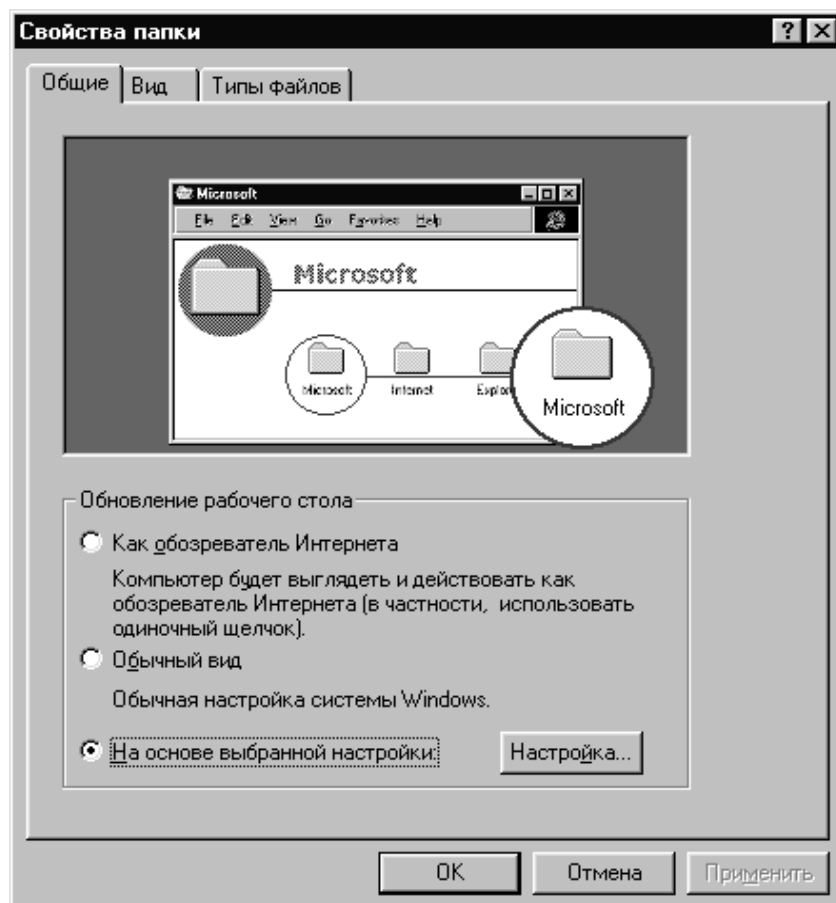


Рис. 1.17 Властивості папки

Вкладка **Вид** визначає, яким образом і які будуть вісвічуватися файли (Рис. 1.18). Розставте галочки відповідно до власних бажань. Якщо ж "по дорозі" ви передумали або накоїли що вас зовсім не влаштовує, натисніть кнопку **Відновити значення за замовчуванням**.

Поглянете, як нові настроювання позначаються на відображенні папки. А якщо ви захочете, щоб всі папки відображалися саме таким чином, як "настроєна" поточна, натисніть кнопку **Як у поточної папки**. Тільки не забувайте натискати кнопку **ОК**, якщо настроювання вас задовольняють, або **Скасування**, якщо самі не зрозуміли, що навстановлювали.

Вкладка **Типи файлів** визначає відповідність між розширенням файлу й батьківським додатком. Зміна вмісту цієї вкладки "під силу" тільки досвідченим користувачам і, як показує практика, потрібно рідко.

При роботі із провідником переважно використати контекстне меню, що висвічується при натисканні правої кнопки миші. Але це, як кажуть, "справа смаку", і кожному користувачеві при роботі у середовищі **Windows** зручніше звертатися до того набору надаваних системою можливостей, до якого він звик.

**Використання клавіатури замість миші.** Використання клавіатури для службових функцій - справа спірна і залежить від ситуації та звички. Люди, що багато працюють із текстами і відповідно із клавіатурою, воліють не відривати від її рук, користуючись спеціальними сполученнями клавіш.

Уважно подивившись на кожне меню, ви побачите, що деякі букви в рядках підкреслені або праворуч від рядка написано щось начебто **Ctrl+A**. Це означає, що для виконання даної дії потрібно натиснути зазначене сполучення клавіш. Кількість таких сполучень велика, і освоювати їх краще на практиці.

Для прикладу створимо папку на диску **C**, перейменуємо її й видалимо за допомогою клавіатури:

<**Alt+П**> активація меню **Пуск**

<?> або < > переміщення до рядка **Програми**

<**Enter**> вибір рядка **Програми**

<?> переміщення вниз до рядка **Провідник**

<**Enter**> вибір рядка **Провідник**

<?> або < > вибір місця розташування нової папки (переміщення між елементами вікна **Провідник** можна здійснювати за допомогою клавіші <**Tab**>)

<**Alt+Ф**> активація меню **Файл** (за допомогою клавіші <**Tab**> повинне бути активоване праве вікно провідника). За допомогою клавіш <←><**®**> можна переміщатися по рядку меню провідника

<**Enter**> вибір рядка **Створити**

<**Enter**> вибір рядка **Папку**



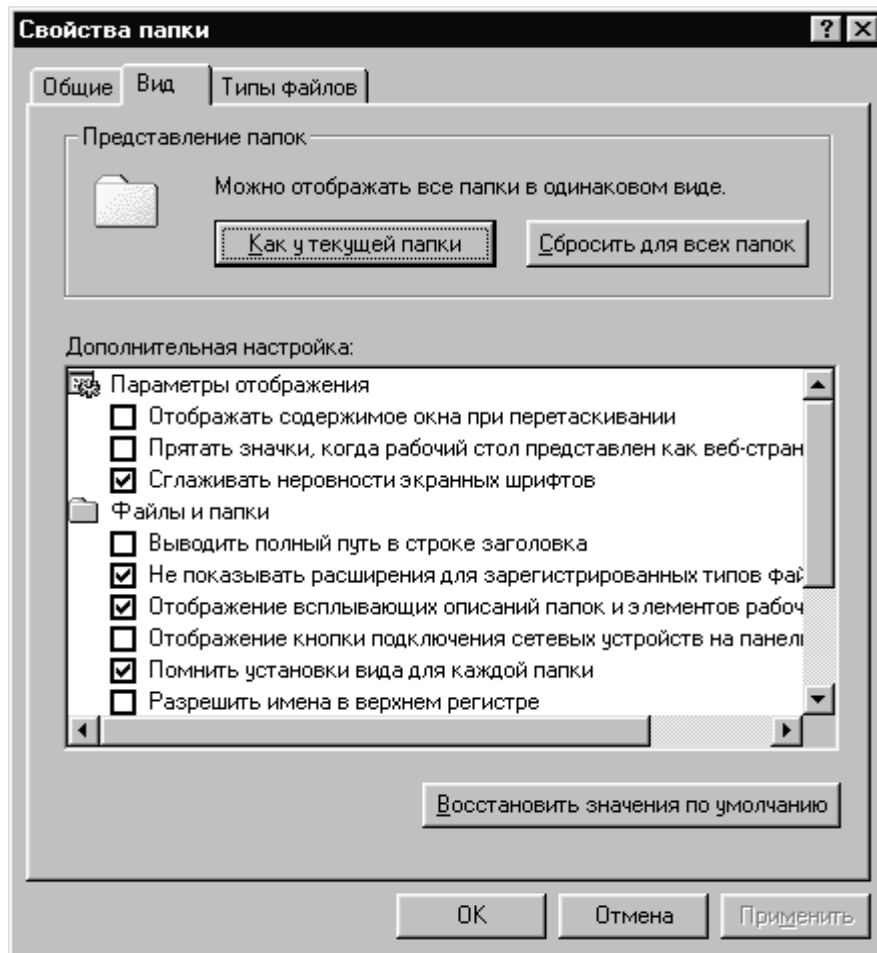


Рис. 1.18 Закладка **Вид** у вікні **Властивості папки**

Уведіть ім'я папки

<Enter> кінчене створення папки

<?> або <> вибір місця розташування папки для перейменування

<Alt+Ф> активація меню **Файл**

<?> або <> вибір рядка **Перейменувати**

<Enter> вибір рядка **Перейменувати**

Уведіть нове ім'я папки

<Enter> кінчене перейменування папки

<?> або <> вибір місця розташування папки для видалення

<Alt+Ф> активація меню **Файл**

<?> або <> вибір рядка **Видалити**

<Enter> вибір рядка **Видалити**

<Alt+Ф> активація меню **Файл**

<?> або <> вибір рядка **Закрити** або <Alt+З>

<Enter> вибір рядка **Закрити**

Частіше ж усього клавіатурою доводиться користуватися для завершення роботи (перезавантаження) **Windows**, коли в результаті "збою" програми або з інших причин миша перестає реагувати на впливи.

Послідовність дій у цьому випадку така:

<Alt+П> активація меню **Пуск**

<?> або <> переміщення до рядка **Завершення роботи**

<Enter> вибір рядка **Завершення роботи**

<?> переміщення вниз до рядка **Перезавантажити комп'ютер**

<Enter> вибір рядка **Перезавантажити комп'ютер**

Якщо при роботі одночасно активовано кілька додатків, то для переміщення з однієї активної програми в іншу можна скористатися сполученням клавіш <Ctrl>+<Tab>.

На закінчення необхідно згадати про клавішу <Esc>, що перериває даний режим роботи. Вона зручна для виходу з різних режимів і закриття активних вікон.

### 1.3 Робота з текстовим редактором Microsoft Word

Для створення текстового документа за допомогою Word 2000 спочатку необхідно задати параметри аркуша паперу, на який потім будемо виводити текст. Для цього варто вибрати команду **Параметри сторінки** з меню **Файл** і в діалоговому вікні, що з'явилося (рис. 1.19) клацнути вкладку **Розмір паперу**.

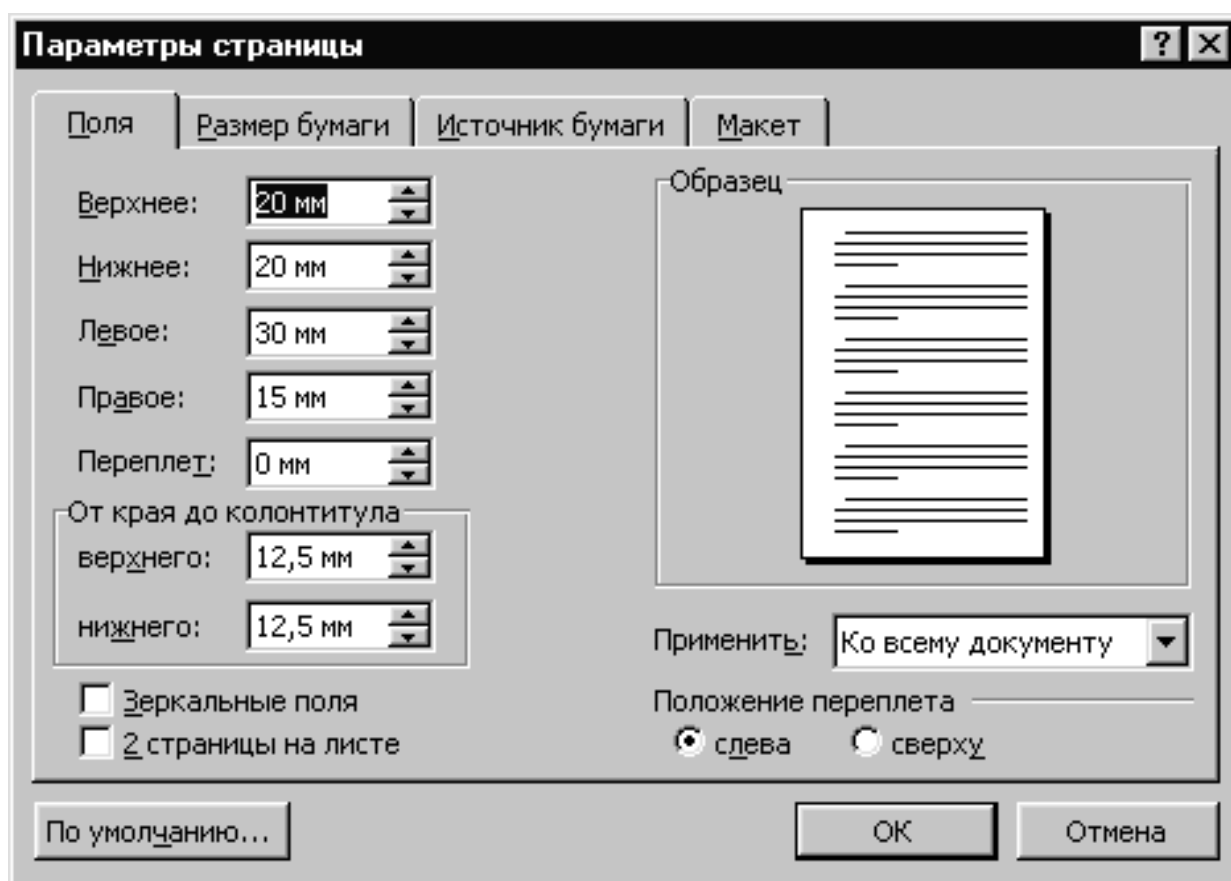


Рис. 1.19. Вікно **Параметри сторінки**. Вкладка **Поля**

Потім зі списку, що розкривається, з тією назвою вибираємо найпоширеніший розмір паперу **формат А4 (210x297 мм)** і встановлюємо

перемикач у положення: **орієнтація книжкова** (рис. 1.21). Жирна чорна крапка в білому кружку, в іншому варіанті (наприклад **альбомна**) крапки немає. На відміну від прапорця тут можна вибрати тільки один варіант.

Клацнувши кнопки-стрілки праворуч від **поля Розмір паперу** зі списку, що розкривається (рис. 1.20), вибираємо **формат А4 (210x297 мм)**.

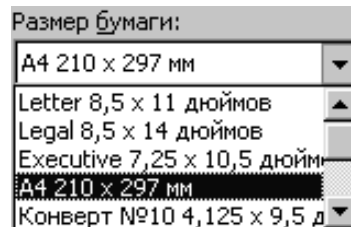


Рис. 1.20. Список, що розкрився, **Розмір паперу** вікна **Параметри сторінки**

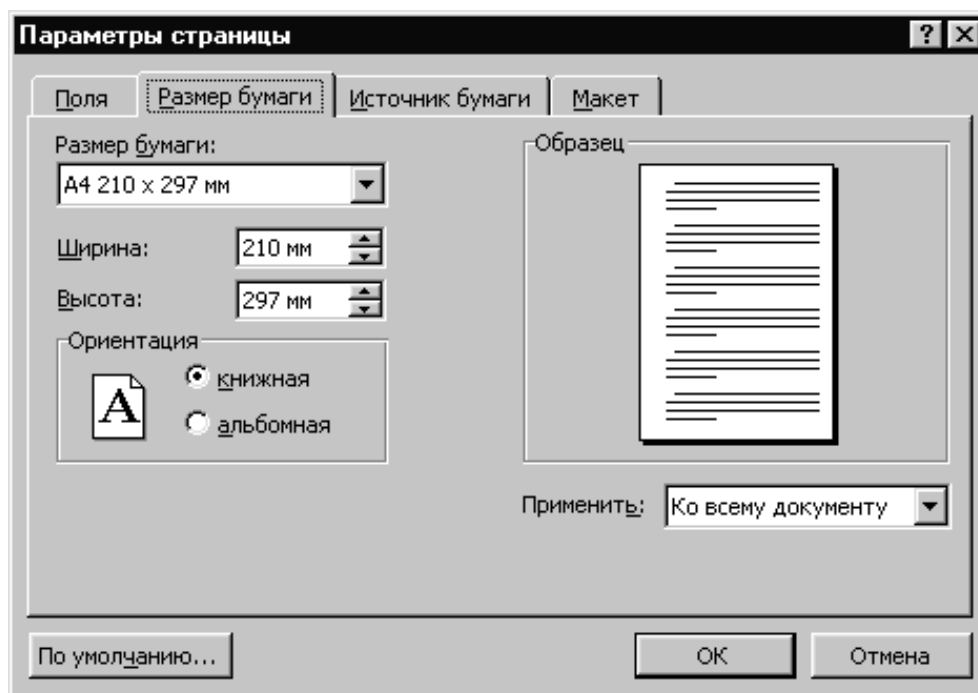


Рис. 1.21. Вікно **Параметри сторінки**. Вкладка **Розмір паперу**

Клацнувши вкладку **Поля** можна встановити **Верхнє, Нижнє, Ліве й Праве поля** документа (відстань від краю аркуша паперу до тексту), що визначають **смугу набору**.

До речі, зверніть увагу на **комбіновані списки** цієї вкладки. Для установки полів можна клацати кнопки-стрілки або клацнувши віконце списку, увести потрібне значення. По закінченні всіх установок не забудьте клацнути кнопку **ОК**, а якщо хочете залишити попередні, скористайтеся кнопкою **Скасування**.

Смуга набору – прямокутна область на аркуші паперу, що обмежує набраний текст. Для відображення границі варто вибрати **Параметри**, з меню **Сервіс**, і у діалоговому вікні, що з'явилося, у **вкладці Вид** установити **прапорець границі** тексту (рис. 1.22). Тут її можна, наприклад, установити або зняти смуги прокручування, рядок стану і вертикальну лінійку (рис. 1.23), зручну для роботи з документами. Правда, нею можна користуватися тільки в режимі **Розмітка границі**.

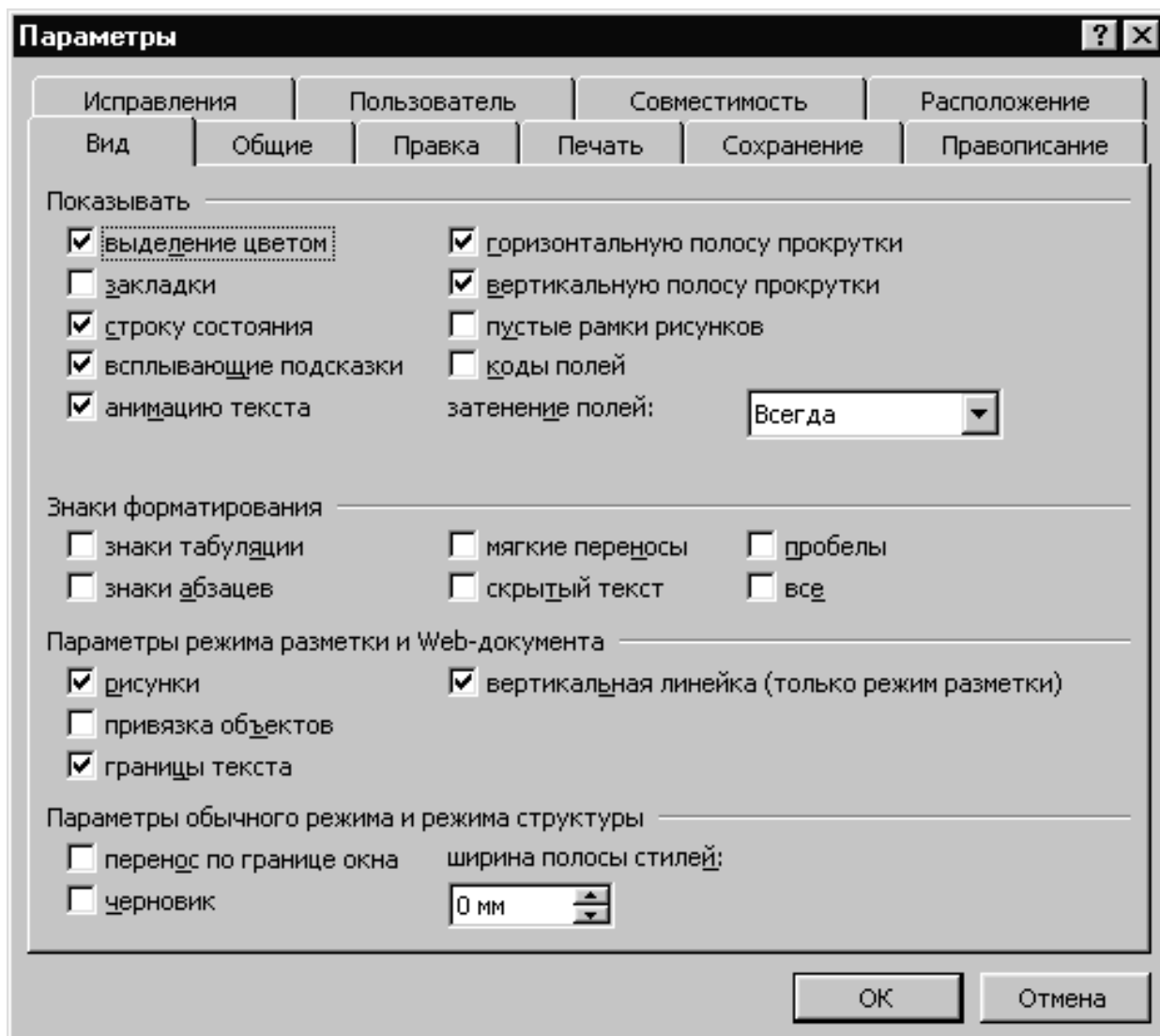


Рис. 1.22. Вікно **Параметри**. Вкладка **Вид**.

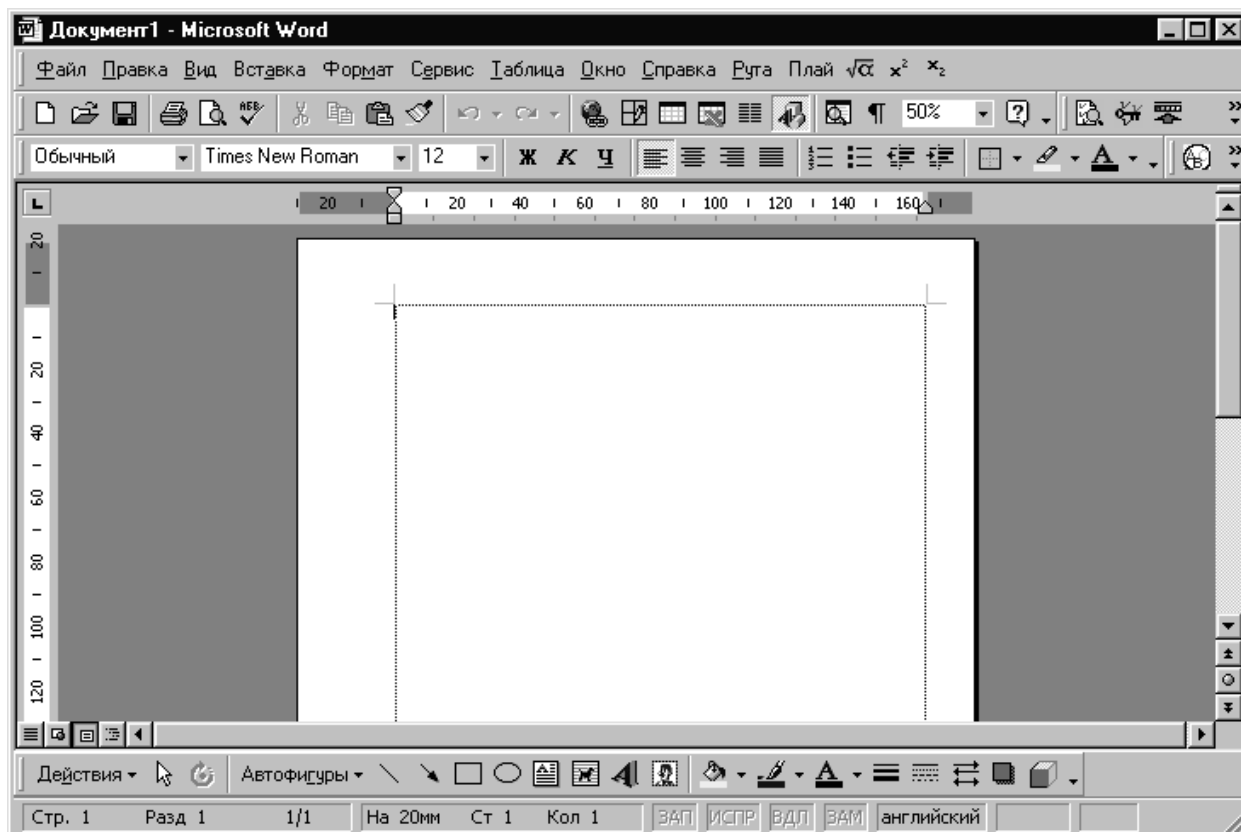


Рис. 1.23. У вікні документа з'явилися **граничі області** тексту  
Для виходу з Word, необхідно клацнув кнопку закриття вікна.

**Настроювання Microsoft Word.** Популярний останнім часом редактор Word досить простий в освоєнні. У принципі це вірно, однак найчастіше користувачі зіштовхуються із ситуацією, типовою для Word: один невірний рух мишею або стрільцями-курсорами, особливо при виправленні, і Word "збивається" із встановленого в тексті розміру шрифту і формату абзацу. Те ж відбувається при копіюванні фрагмента тексту з інших текстових файлів або додатків.

Виправити помилку нескладно, однак більшість користувачів Word, як правило - не знають, як це зробити. Що ж відбувається з Word і як його настроїти?

Коли ви відкриваєте новий документ, Word починає роботу із читання файлу **Normal.dot**. У різних версіях Windows і Word цей файл перебуває в різних папках: Word-97 в Windows-98 зберігає його в **C:\Program Files\Microsoft Office**; Word-98 - в **C:\Program Files\Microsoft Office\Templates** (шаблони); Word-XP - у **3:\Windows\Application Data\Microsoft\Templates**; Word-2000 у системі Windows-2000/NT - у **3:\Documents and Settings\User\Application Data\Microsoft\Templates** і т.д. У всякому разі, файл **Norton.dot** можна знайти, наприклад, за допомогою програми "Пошук" у меню "Пуск". У цьому файлі зберігаються всі початкові установки, зокрема формат стилю "звичайний", на який, властиво, і "збивається" Word. У різних версіях Word формат цього стилю різний: в Word-98 встановлений шрифт **Times** розміром 10 пунктів, вирівнювання по

лівому краї; в Word-2000 і XR - те ж, але розмір шрифту 12 пунктів. Крім того, в **Normal.dot** за замовчуванням установлена заборона переносів, зберігається перелік меню і безліч інших установок (опцій).

Щоб раз і назавжди настроїти редактор Word на "свій улюблений розмір", запустите його, **новий документ**, що відкрився, відразу ж закрийте. Виберіть пункт **"відкрити файл"**, а в поле **"тип файлу"** укажіть **.dot**. Зайдіть у папку, де перебуває **Normal.dot**. Переконайтеся, що в ній немає файлу **~Normal.dot** (цей тимчасовий файл може залишитися від першого документа). Видалите його, наприклад, за допомогою **Explorer** (провідника). Відкрийте **Normal.dot**.

Тепер самий час установити для всіх майбутніх документів опції, з якими ви хочете працювати. Спочатку - стиль **Normal** ("звичайний"). Відкрийте меню **"Формат" - "Стиль"** (див. рисунок). У цьому вікні натисніть кнопку **"настроїти"**, а в новому вікні - кнопку **"формат"**. Виберіть тип і розмір шрифту, для абзацу встановите вирівнювання по ширині і задайте абзацний відступ у першому рядку, рівний 1см (він приблизно відповідає прийнятому в старих стандартах: п'ять символів шрифту розміром 12 пунктів). Подивіться, чи влаштовують вас інші установки в стилі **"звичайний"**. При бажанні можна настроїти й інші стилі (скажемо, заголовки) і користуватися ними надалі. Корисно зайти в меню **"Сервіс" - "Мова"**, задати розміщення переносів і скасувати задані за замовчуванням переноси слів із прописних букв.

У пункті **"Автозаміна"** цього ж меню можна порадити зробити наступні операції:

- скасувати заміну букви, що впливає після крапки, на прописну (інакше, скажемо, в економічних документах будуть зустрічатися словосполучення "тис.грн."). Це простіше, ніж робити скасування, натискаючи **Ctrl + Z** або бігаючи мишею в меню виправлення;
- скасувати автоматичну нумерацію абзаців, знявши прапорець **"Застосувати до списків"** (згадаєте, чи доводилося вам коли-небудь, правити номер абзацу?);
- додати заміну двох дефісів при наборі тексту на тирі. Не всі знають, що тире варто ставити за допомогою клавіш **Ctrl + "сірий мінус"** (на цифровій клавіатурі вгорі праворуч) або через меню **"Вставка" - "Символ"**, а тому і не використовують його;
- уважно вивчити інші заміни і вирішити, чи потрібні вони.

Корисно встановити поля сторінки, а також вставити нумерацію сторінок там, де вона потрібна, наприклад угорі сторінки, в центрі. Краще відразу мати таку нумерацію в документі, чим згадувати про неї, починаючи кожену нову сторінку.

Тим, хто часто відкриває файли з дискети або використає старі файли як шаблони для створення нових документів, варто відключити режим **"Автозбереження"**. У першому випадку дефектні сектори або відсутність вільного місця для копії файлу на дискеті можуть привести до збою в роботі Word або навіть до втрати файлу. (До речі, ніколи не діставайте дискету з

дисководу до закриття Word: це приведе до "блакитного" екрану з повідомленням про збій програми). У другому - зміни будуть періодично зберігатися, але первісна версія файлу-шаблону втратиться. Якщо ви боїтеся втрати інформації через збої електромережі, то краще придбати пристрій безперебійного живлення.

В іншому, варто нагадати, що установки Word за замовчуванням були введені для американських користувачів і стилів їхніх документів. Ніякого відношення до стандартів, прийнятим до діловодства в нас, вони не мають. Крім того, багато досвідчених користувачів не люблять, коли їм нав'язують стиль документа й метод набору тексту.

Нарешті, проведіть заключні операції: закрийте файл **Normal.dot**, відкрийте новий документ і перевірте установки Word. От ви й навчилися налаштувати Word і, сподіваюся, скористаетесь цим надалі (Рис. 1.24).

Варто помітити, що нові налаштування Word будуть діяти тільки при створенні нових документів. Старі документи збережуть колишні налаштування, і при їхньому завантаженні стиль "звичайний" залишиться в старому виді. Якщо ви захочете застосувати нові установки до старих документів, з якими прийдеться багато працювати, виділіть весь текст (**Ctrl + A**), скопіюйте його (**Ctrl + C**), потім відкрийте новий документ, виберіть "спеціальну вставку" і укажіть опцію "неформатований текст".

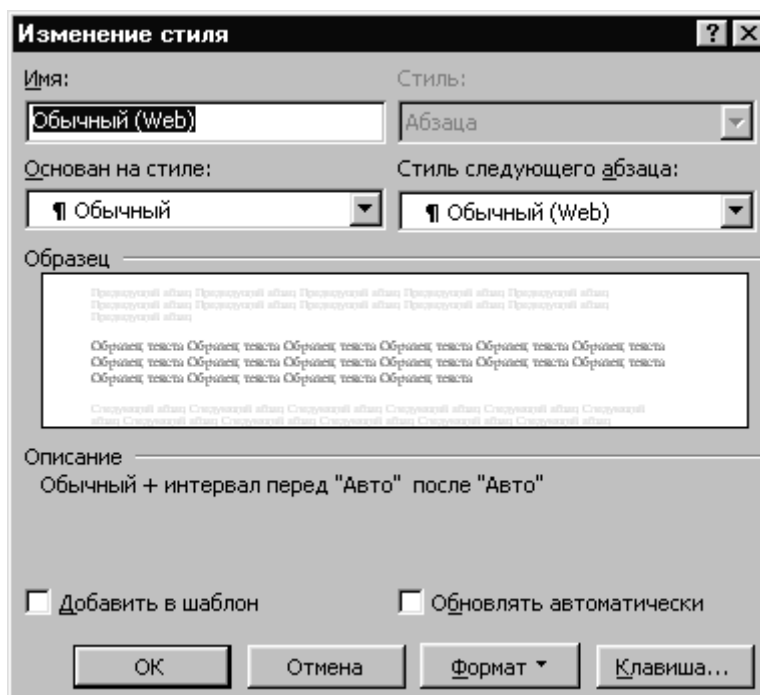


Рис. 1.24. Вікно для зміни стилю "звичайний". Кнопка "формат" дозволяє встановлювати потрібні розміри шрифту і формат абзацу.

Тоді весь текст встановиться в стилі "звичайний", при цьому заміняться і стилі заголовків. Однак цей стиль буде застосований і до таблиць, що, швидше за все, приведе до небажаних змін, і їх прийдеться переформатувати.

Таку ж спеціальну вставку варто робити при копіюванні фрагментів з інших документів.

**Збереження файлу.** Проробіть експеримент: відкрийте новий документ і відразу ж збережіть його. Відкрийте ще раз новий документ, наберіть яку-небудь фразу й зітріть її. Збережіть документ під іншим ім'ям. По змісту ці документи збігаються (у них немає ніякого тексту), але зрівняєте їхні розміри: другий документ виявиться майже вдвічі більше. Не очікували? Справа в тому, що Word – це інтерпретатор, він запам'ятовує не тільки зміст документа, але й всі команди, якими ви користувалися, у тому числі команди "**набрати текст**" і "**видалити**". Цей факт може мати значення у двох випадках: коли ви копіюєте документ на дискету і коли пересилаєте файл по електронній пошті. У першому випадку зайві кілобайти файлу розміром ледве більше 1,4 Мбайт перешкоджають його збереженню, у другому - крім цього виникне небезпека того, що ваш адресат при бажанні може прочитати стерті фрази й довідатися, що ви захотіли сховати від нього. Отже, **перша рада**: перед остаточним збереженням готового документа вкажіть "**виділити все**" (**Ctrl + A**) і скопіюйте весь текст у новий документ. Ця операція значно скоротить розмір файлу і видалить всі виправлення.

**Копіювання.** Часто доводиться вставляти в Word графіки з Excel або малюнки з PowerPoint. Звичайно для цього використовують команди "**копіювати**" і "**вставити**". Але спробуйте двічі клацнути мишею на такому графіку в Word: відкриється повна таблиця Excel з усіма аркушами і даними. Те ж відбувається й із презентаціями. Справа в тому, що в Microsoft Office діє технологія **OLE** (узгодження об'єктів). Це дозволяє автоматично вносити зміни в Word при зміні даних, скажемо, в Excel. Чи дуже це необхідно? У більшості випадків досить графік увести у файл, однак розмір його не виправдано зростає. Тому **друга порада**: робіть вставку за допомогою команди "**спеціальна вставка**", у якій укажіть опцію "**метафайл Windows**".

**Система скорочень** . Якщо вам часто доводиться набирати тексти на ту саму тему, можна порадити розробити систему скорочень, наприклад: кп – комп'ютер; бд - база даних і т.д. Важливо, щоб саме скорочення не було словом. Якщо задати такі скорочення в меню "**Автозаміна**", то можна значно прискорити введення тексту. Подібні комбінації букв Word буде автоматично замінити на зазначені слова, якщо після них треба пробіл або розділовий знак. При цьому введення прописних букв, наприклад БД, дасть заміну на прописні – БАЗА ДАНИХ. У середині слів ці комбінації не замінюються. Правда, прийдеться натискати клавішу **Backspace** (стрілка вліво), щоб увести граматичні закінчення слів, але до цього, якщо вже вводити подібну "автоматизацію", можна звикнути. Автозаміна буде діяти для всіх нових документів і не зажадає налаштування файлу **Normal.dot**.



**Індекси.** Якщо у ваших текстах часто зустрічаються позначення типу  $m^2$  або індекси, для зручності варто створити окрему панель інструментів "Індекси". Для цього виберіть у меню "Сервіс" пункт "Настроювання", потім, використовуючи пункт "Створити", можна задати нову панель. Далі відкрийте закладку "Команди" і в категорії "Всі команди" знайдіть значки для нижнього й верхнього індексів **Subscript** і **Superscript**. Перетягніть за допомогою миші відповідні значки в нову панель. Можна, щоправда, обійтися і без панелі, а просто перетягнути значки в існуючу панель інструментів.

Загалом кажучи, чим більше в документі таблиць, рисунків і інших об'єктів, тим менш "керованим" стає Word і редагування буде створювати не технічні, а скоріше психологічні проблеми. Вам однаково прийдеться ламати голову над тим, куди пропав малюнок, чому змінився формат абзацу, і над іншими подібними питаннями.

## 1.4 Архівування даних

При роботі на персональному комп'ютері досить часто виникає необхідність зменшити розмір файлу з метою економії місця на диску. Наприклад, потрібно перенести файли з одного комп'ютера на інший на дискетах. Або потрібно переслати великий файл по електронній пошті - зменшивши його розмір, можна заощадити й час і гроші. Краще рішення в таких випадках - створити так званий *архівний файл*, або, простіше говорячи, *архів*. Це єдиний файл, у який для компактного зберігання інформації поміщені в стисломому виді один або кілька вихідних файлів.

Для роботи з архівами призначені спеціальні програми, які називаються *архіваторами*. За допомогою архіваторов можна впаковувати файли в архіви й розпаковувати їх, а також переглядати вміст архівів. Упакування файлів в архів називаються *архівуванням* або *архівацією*, а їхнє добування - *розархівуванням*.

Існують різні формати архівів: ZIP, ARJ, RAR, CAB, TAR, LZH і ін. Коли створюється архівний файл, йому привласнюється розширення, що збігається з форматом архіву. Наприклад, файл із ім'ям MyDoc.zip - це архів формату ZIP. Формат впливає на ефективність стиску файлів; приміром, архів формату RAR займає на диску менше місця, чим архів формату ZIP, що містить ті ж самі вихідні файли. Крім того, ефективність залежить від типу файлів, що впаковують в архів. Файли картинок, що мають розширення BMP, документи Microsoft Word вдається стиснути у два-чотири разів, текстові файли - приблизно у два рази. Трохи гірше піддані стиску виконують файли,

що (з розширенням EXE), а графічні файли, що мають розширення TIF, практично не стискаються.

Майже всі сучасні програми-архіватори для Windows дозволяють працювати з архівами різних форматів. Принципи керування цими програмами багато в чому схожі.

**Архіватор WinRAR.** Прийоми роботи з архіваторами зручно розглянути на прикладі програми WinRAR (рис. 1.25). Ця програма має більші можливості. Постараємося перелічити ті з них, які можуть придатися починаючому користувачеві. WinRAR дозволяє створювати архіви двох форматів - RAR і ZIP. Крім того, він підтримує основні операції (розпакування, перегляд умісту) з архівами інших форматів: CAB, ARJ, LZH, TAR, GZ, ACE, UUE.

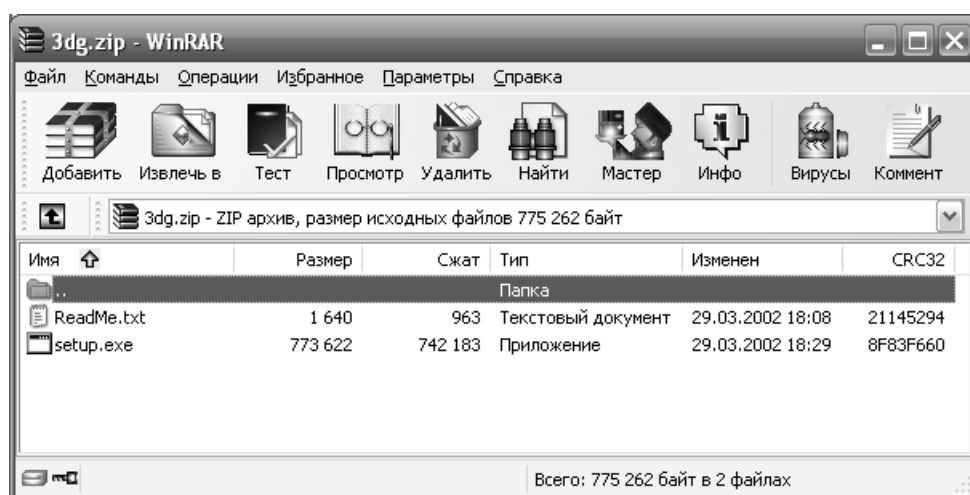


Рис. 1.25. Загальний вид програми WinRAR

**Перегляд умісту архіву.** Запустіть програму WinRAR, наприклад, командою **Пуск - Програми - WinRAR - WinRAR**. При запуску відображається головне вікно програми. Виділивши в цьому вікні архівний файл і нажавши кнопку **Перегляд** у панелі інструментів, можна побачити, що перебуває в архіві.

Можна оцінити, наскільки ефективно стислий той або інший файл, зрівнявши числа в стовпцях **Розмір** і **Стислий**. З файлами, що перебувають в архіві, програма WinRAR може виконувати будь-які дії: переглядати їх, вносити в них зміни, запускати на виконання виконують файли, що (мають розширення EXE, COM, BAT). При цьому WinRAR сам подбає про розпакування необхідних файлів у тимчасову папку, що по закінченні роботи програми буде автоматично вилучена. У цьому ж вікні можна видаляти файли з архіву й додавати нові.

Щоб додати файли, натисніть у панелі інструментів кнопку **Додати**, у діалоговому вікні, що з'явилося, виберіть потрібні файли й закрийте діалогове вікно **кнопкою ОК**.

Для видалення файлів, що втримуються в архіві, виділіть їх і натисніть у панелі інструментів кнопку **Видалити** (або клавішу **Delete** на клавіатурі). Перед видаленням файлів програма WinRAR запитує підтвердження.

**Створення архіву.** Виділіть потрібні файли. Групу файлів зручно виділяти мишею, утримуючи натиснутої клавішу Ctrl. Натискання Ctrl+A приводить до виділення всіх файлів, відображуваних у вікні. Можна також користуватися відповідними пунктами меню **Файл**. Натисніть кнопку **Додати** в панелі інструментів (або комбінацію клавіш **Alt+A**). З'явиться вікно **Ім'я й параметри архіву**. У цьому вікні варто ввести повне ім'я створюваного архівного файлу. Для цього зручно скористатися діалоговим вікном **Пошук архіву**, що викликається натисканням кнопки **Огляд**. У вікні **Ім'я й параметри архіву** також можна вибрати формат створюваного архіву: RAR або ZIP. За замовчуванням установлений формат RAR, і в більшості випадків немає необхідності змінювати його, тому що він забезпечує значно кращий стиск, чим ZIP. Якщо ви збираєтеся передати архів іншому користувачеві, поцікавтеся, є чи в нього архіватор, що підтримує даний формат.

Коли потрібно зберегти великий архів на дискетах, доводиться створювати *багатотомний* архів, тобто складається з декількох частин, названих *томами*. Кожний том являє собою окремий файл. Якщо хочете створити такий архів, у поле **Розмір тому** виберіть опцію **1475500** (це розмір тридюймової дискети). Рекомендується також установити прапорець **Інформація для відновлення**. Це потрібно для того, щоб архів можна було відновити у випадку ушкодження даних, оскільки дискета - ненадійний носій інформації. Багатотомний архів зручно створити на жорсткому диску, а згодом копіювати тому на дискети. Перш ніж створювати багатотомний архів, урахуйте одне важливе обмеження: він не допускає змін, тобто файли, що втримуються в ньому, не можна змінювати або видаляти, не можна також їх додавати. Якщо користувач все-таки намагається внести зміни в багатотомний архів, на екран виводиться вікно, що повідомляє про неможливість даної операції.

Якщо ви збираєтеся передати архів іншому користувачеві, але не впевнені, що в нього є відповідний архіватор, можна створити архів, що саморозпаковується. Для цього потрібно встановити прапорець **створити SFX archive** (SFX – від англ. Sel eXtractor). Такий архів являє собою файл, що виконує, він має розширення .EXE, і архіватор для його розпакування не потрібний. архів, Що Саморозпаковується, займає на диску більше місця в порівнянні зі звичайним. Багатотомний архів також може бути що саморозпаковується.

Після того як ви встановили необхідні параметри на вкладці **Загальні**, бажано перейти на вкладку **Файли**.

Переконайтеся, що імена всіх файлів, які ви хочете заархівувати, присутні в полі **Додають файли, що**. Якщо це не так, скористайтеся спеціальним діалоговим вікном, що викликається кнопкою **Додати**.

Натисніть кнопку **ОК**, і програма приступиться до створення архіву. На екрані при цьому з'являється спеціальний індикатор, що інформує користувача про процес архівації.

**Розпакування архіву.** Архів можна розпакувати весь цілком, а можна - тільки окремі файли, що втримуються в ньому. У першому випадку треба виділити заархівований файл, у другому – перейти в режим перегляду архіву за допомогою кнопки **Перегляд** і потім виділити потрібні файли. Натисніть у панелі інструментів кнопку **Витягти в** (або комбінацію клавіш **Alt+E**), з'явиться вікно **Шлях і параметри добування**, у ньому при необхідності можна вказати папку, у якій будуть збережені розпаковані файли. За замовчуванням задана папка, у якій перебуває архів. Клацніть по кнопці **ОК**, і програма почне розархівувати файли.

Простіше всього стоїть справа з архівом, що саморозпаковується. Його потрібно запустити із провідника Windows, як звичайну програму, при цьому з'явиться діалогове вікно, у якому варто вказати папку, призначену для збереження файлів.

Але як бути, якщо вам потрібно переглянути вміст SFX-архіву або витягти не всі файли, а тільки частина з них? WinRAR дозволяє працювати з архівом, що саморозпаковується, так само, як і з будь-яким іншим.

Розпаковувати багатотомний архів буде зручніше, якщо попередньо скопіювати всі томи на жорсткий диск в одну папку. Якщо цього не зробити, то, закінчивши розпаковувати черговий том, архіватор буде виводити на екран діалогове вікно з вимогою вказати повне ім'я наступного тому. Починати розпакування потрібно з першого тому, його ім'я (якщо це архів формату RAR) - або "ім'я\_тому.part01.rar", або "ім'я\_тому.r00". Перший том багатотомного SFX-архіву має розширення .EXE.

**Майстер.** Режим майстра з'явився в WinRAR 3-й версії. Майстер викликається однойменною кнопкою в панелі інструментів. Він призначений для починаючих користувачів і дозволяє гранично спростити виконання основних операцій архівування й розпакування за допомогою простої покрокової процедури.

**Архіватор WinZIP.** Ще одна популярна програма-архіватор для Windows. Орієнтована в першу чергу на роботу з архівами у форматі ZIP (рис. 1.26). Головне вікно програми нагадує вікно WinRAR, але прийоми роботи із цими двома архіваторами трохи відрізняються.

**Перегляд архіву.** Спочатку архів потрібно відкрити, для цього натисніть кнопку **Open** у панелі інструментів. Можна також скористатися комбінацією клавіш **Ctrl+O**. У діалозі, що з'явився, виберіть архівний файл і натисніть кнопку **ОК**. Список умісту архіву відобразиться в головному вікні.

Якщо хочете переглянути який-небудь файл, виділіть його й натисніть кнопку **View**. Буде запущена та програма, що асоційована з даним типом файлу. Того ж результату можна домогтися подвійним щикликом по значку файлу.

**Добування й видалення файлів.** Якщо потрібно видалити файли з архіву, виділіть їх і натисніть клавішу **Delete**, у наступному діалоговому вікні підтвердіть видалення.

Перед розпакуванням архіву вирішите, чи збираєтеся ви витягати всі файли або тільки деякі з них. У другому випадку потрібні файли варто виділити. У панелі інструментів натисніть кнопку **Extract**, з'явиться діалогове вікно, у якому потрібно вказати папку для розміщення витягнутих з архіву об'єктів. Закрийте це вікно, нажавши в ньому кнопку **Extract**.

**Створення архіву в WinZip.** Скопіюйте всі файли, що підлягають архівуванню, у окрему папку на жорсткому диску. Клацніть по кнопці **New**, відкриється діалогове вікно **New archive**.

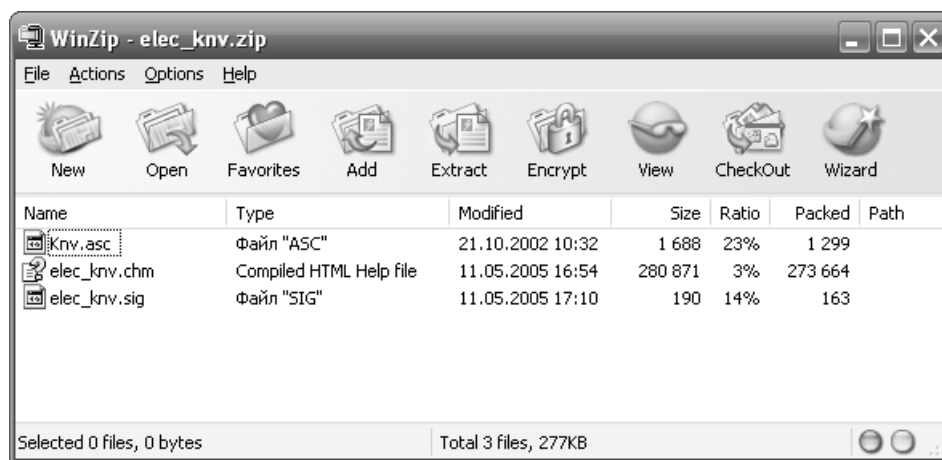


Рис. 1.26. Загальний вид програми WinZip

Виберіть папку, у яку буде поміщений архівний файл. Якщо вам потрібний багатотомний архів, урахуйте, що він може бути сформований тільки на дискетах – на відміну від WinRAR WinZIP не дозволяє зберегти такий архів на жорсткому диску. У поле **Ім'я файлу** введіть ім'я архіву. Простежте, щоб був установлений прапорець **Add dialog** (це потрібно для подальшого визначення файлів, що архівуються). Закрийте вікно кнопкою **ОК**.

У наступному діалоговому вікні користувач повинен вибрати папку, що містить вихідні файли. У поле **Ім'я файлу** за замовчуванням є присутнім маска **"\*.\*"**. Це означає, що в архів будуть включені всі файли, що втримуються в обраній папці. Якщо такий варіант вас не влаштовує, виберіть потрібні файли щигликами миші при натиснутій клавіші **Ctrl**.

Якщо ви створюєте багатотомний архів, розкрийте список **Multiple disk spanning** (Розбивка на кілька дисків) і відзначте позицію **Automatic** (Автоматичне). WinZip привласнює всім томам те саме ім'я, тому на етикетках дискет бажано проставити номери.

Натисніть кнопку **Add** у діалоговому вікні. У головному вікні програми відобразиться вміст тільки що створеного архіву (якщо це не багатотомний архів). Коли створюється багатотомний архів, програма час від часу виводить

на екран вікно, вимагаючи замінити дискету в дисководі. Якщо на дискеті вже є якісь файли, які ви хочете видалити, перш ніж записувати черговий тім, установите прапорець **Erase any existing files on the new disk before continuing**. Замініть дискету й натисніть **ОК**.

Звичайний архівний файл із розширенням ZIP можна перетворити в архів, що саморозпаковується. Щоб зробити це, відкрийте архів у головному вікні програми. Увійдіть у меню **Actions** і виконаєте команду **Make .exe file**, після чого з'явиться діалогове вікно. Поле Default "UnZip To" folder (папка для розпакування, обирається за замовчуванням) заповнювати необов'язково. Якщо залишити його порожнім, буде обрана папка **C:\Windows\Temp**. Клацніть по кнопці **ОК**, програма створить SFX-архів і запропонує протестувати його. Під тестуванням тут мається на увазі просте розпакування: ви можете перевірити тільки що створений архів "у дії". Якщо хочете виконати таку перевірку, виберіть **Так**, з'явиться ще одне вікно, у якому варто натиснути кнопку **Unzip**. У протилежному випадку клацніть по кнопці **Немає**.

**Інтеграція із провідником Windows.** Створювати й розпаковувати архіви можна у вікні програми Провідник або Мій комп'ютер за допомогою контекстного меню. Наприклад, якщо на вашому комп'ютері встановлений WinRAR, то, клацнувши правою кнопкою миші по значку файлу-архіву, ви побачите наступні опції:

**Extract files** - розпакування архіву в довільну папку;

**Extract to ім'я\_папки\** – у поточній папці буде задана папка з даним ім'ям, і в неї розпакується вміст архіву.

Щоб створити архів, у контекстному меню файлу (або папки, або групи файлів) виберіть один з наступних пунктів:

**Add to archive...**—упакування файлів в архів з довільним ім'ям;

**Add to "ім'я\_архіву.rar"** – створення в поточній папці архіву формату RAR з даним ім'ям.

### **Підтримка Drag-and-Drop**

Абсолютна більшість програм для Windows підтримують технологію Drag-and-Drop (перенести й покласти), і архіватори - не виключення. Щоб переконатися в цьому, проробіть "експеримент". Запустіть архіватор у режимі перегляду архіву. Відкрийте вікно **Мій комп'ютер**, а в ньому - яку-небудь папку, наприклад **Мої документи**. Розмістіть обоє вікон так, щоб кожне з них займало приблизно половину екрана й не закривало інше. Помістіть курсор на значок одного з файлів, що втримуються в архіві, натисніть ліву кнопку миші й, не відпускаючи її, перемістіть курсор у вікно **Мій комп'ютер**. Тепер відпустіть кнопку. Файл, витягнутий з архіву, з'явиться в папці, уміст якої показано у вікні **Мій комп'ютер**. Аналогічним образом "перетягнете" який-небудь файл із вікна **Мій комп'ютер** у вікно архіватора. Архіватор відобразить діалогове вікно, запитуючи, чи дійсно ви збираєтесь змінити вміст архіву. Якщо відповісте ствердно, в архів буде доданий новий файл.

## 2. ДЕЯКІ ВІДОМОСТІ З ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

### 2.1. ЛІНІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

#### 2.1.1. Активні і пасивні елементи електричного кола

Сукупність з'єднаних один з одним елементів, по яким може протікати електричний струм, називають *електричним колом*.

Електричні кола, у яких отримання електричної енергії, передача і її перетворення відбувається при незмінних у часі струмах і напругах, називають *колами постійного струму*.

*Постійний струм* являє собою направлений упорядкований рух часток, які несуть електричні заряди. Як відомо з курсу фізики, носіями зарядів у металах є вільні електрони, а у рідинах – іони. Упорядкований рух носіїв зарядів у провідниках утворюється електричним полем, яке утворюється в них джерелами електричної енергії. У джерелах електричної енергії відбувається перетворення хімічної, механічної і інших видів енергії у електричну, ці елементи називаються *активними*.

Основною метою розрахунку електричних кіл є аналіз різноманітних режимів, на основі яких можна оцінити умови і ефективність роботи електротехнічного обладнання і пристроїв на всіх ділянках електричного кола. Якщо відомі струми, неважко визначити напруги і потужності окремих елементів.

Розрахунок електричних кіл і дослідження процесів, що відбуваються в них, засновані на деякій ідеалізації реальних елементів електричних кіл.

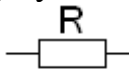
Під *елементами* в теорії електричних кіл *розуміються* не реально існуючі частини електротехнічних пристроїв, а їхні *ідеалізовані моделі*, яким “теоретично” приписуються відповідні електричні і магнітні властивості так, що моделі з достатнім ступенем точності відображають явища, що відбуваються в реальних пристроях.

Відповідно розрізняють *активні і пасивні кола*. Кола, що містять джерела енергії, називаються активними, кола, що не містять джерел енергії і в яких електрична енергія перетворюється в тепло, називаються пасивними. Зображення електричного кола за допомогою умовних позначок називають *електричною схемою*.

*Всі елементи, що приєднані до джерела енергії, називаються зовнішнім колом*.

У зовнішньому колі струм тече від затискача “плюс” джерела енергії до затискача “мінус”, а усередині джерела напрямок зворотний.

*Параметрами пасивних* елементів електричного кола постійного струму є опори і провідності. Термін опір і відповідне йому позначення

23  застосовуються в електротехніці для позначення як самого елемента, у якому відбувається незворотній процес поглинання електромагнітної енергії, так і для кількісної оцінки його величини.

Передбачається, що позитивні напрямки струму і напруги збігаються за напрямом.

Величина  $G = \frac{1}{R}$ , зворотна опору, називається **провідністю**.

У системі СІ опір  $R$  вимірюється в омах (Ом), а провідність  $G$  – у сименсах (См).

При розрахунку електричних кіл реальне джерело електричної енергії можна замінити ідеалізованим джерелом електричної енергії:

а) джерелом **ЕРС** з послідовно з'єднаним з ним опором  $R_в$ , який дорівнює внутрішньому опору реального джерела енергії (рис. 2.1);

б) джерелом **струму** з паралельно з'єднаним з ним опором  $R_в$ , що дорівнює внутрішньому опору реального джерела енергії (рис. 2.2).

При заміні реального джерела енергії ідеальним струм у всіх елементах кола залишається незмінним.

На розрахункових схемах джерело енергії може бути представлено **джерелом ЕРС** без внутрішнього опору, якщо цей опір малий у порівнянні з опором частини кола, що живиться від цього джерела. При  $R_в = 0$  падіння напруги на ньому  $U_в = 0$ , тому напруга на затискачах джерела при будь-якому

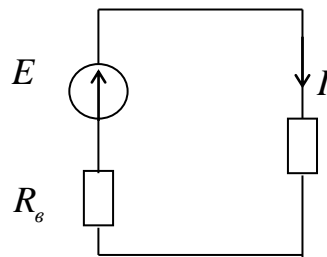
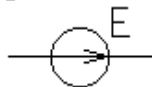


Рис. 2.1

значенні струму дорівнює ЕРС ( $U = E = const$ ).

**Таке джерело енергії з незмінною напругою на його затискачах, яка не залежить від внутрішнього опору, називається джерелом ЕРС.** Внутрішній опір цього ідеалізованого джерела живлення дорівнює нулю, тому проходження через нього струму не викликає падіння напруги.

Упорядкований рух позитивних зарядів у джерелі від меншого потенціалу до більшого відбувається за рахунок сторонніх сил. Джерело електричної енергії характеризується значенням і напрямом ЕРС, а також значенням внутрішнього опору і позначається кружком зі стрілкою усередині, що вказує позитивний напрям дії ЕРС.



У деяких випадках джерело електричної енергії на розрахунковій схемі замінюють іншою, еквівалентною схемою (рис.2.2), де замість ЕРС джерело характеризується його струмом короткого замикання  $I_k$ , а замість



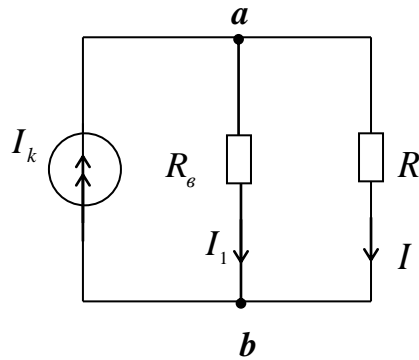


Рис. 2.2

внутрішнього опору у розрахунок вводиться внутрішня провідність:  $G_g = \frac{1}{R_g}$ .

*Під джерелом струму розуміють таке ідеалізоване джерело живлення, що дає струм, який не залежить від величини опору навантаження і дорівнює частці від ділення ЕРС реального джерела на його внутрішній опір  $I_k = \frac{E}{R_g}$ .*

На схемі джерело струму зображають у вигляді кружка з подвійною стрілкою, що показує позитивний напрямок струму. Поруч ставиться позначення  $I$  з індексом "k".

Графіки залежності струму, що протікає через ідеалізоване джерело енергії, від напруги на його затисках представлені на рис.2.3 для джерела ЕРС та 2.4 для джерела струму.

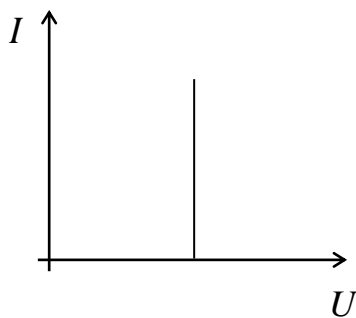


Рис. 2.3

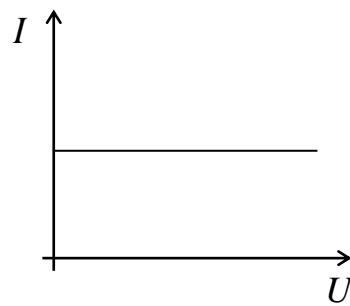


Рис. 2.4

Як було показано раніше, і джерело *ЕРС* і джерело *струму* є ідеалізованим джерелом. Фізично здійснити їх точно не можна, тому що внутрішній опір реальних джерел не може дорівнювати нулю і при кінцевому значенні струму не може бути рівний нескінченності.

Але, якщо внутрішній опір  $R_g$  реального джерела живлення малий у порівнянні з опором  $R$  зовнішнього кола, то джерело живлення буде працювати в режимі, близькому до режиму, характерному для джерела ЕРС.

Аналогічно, якщо внутрішній опір реального джерела живлення у всіх можливих режимах роботи схеми буде значно більше опору зовнішнього кола, то останнє буде працювати в режимі, близькому до режиму джерела струму.

Струм у опорі  $R$  буде однаковий в обох еквівалентних схемах:

$$I = \frac{E}{R + R_g}; \quad (2.1)$$

$$I = I_k \frac{R_g}{R + R_g} = \frac{E}{R_g} \times \frac{R_g}{R + R_g} = \frac{E_g}{R + R_g}. \quad (2.2)$$

### 2.1.2. Вольт-амперна характеристика кола

Залежність струму, що протікає крізь опір, від напруги на цьому опорі прийнято називати **вольт-амперною характеристикою**.

Вольт-амперні характеристики можуть бути зображені графічно. По осі абсцис у масштабі відкладають напругу, а по осі ординат у масштабі струму відкладають струм.

Розрізняють дві принципово різних типи вольт-амперних характеристик: у першому випадку вольт-амперна характеристика являє собою пряму лінію (рис.2.5), у другому - деяку криву (рис 2.6). Опори, вольт-амперні характеристики яких є прямі лінії (рис. 2.5), називаються **лінійними опорами**, а електричні кола, що містять тільки лінійні опори, називаються **лінійними електричними колами**.

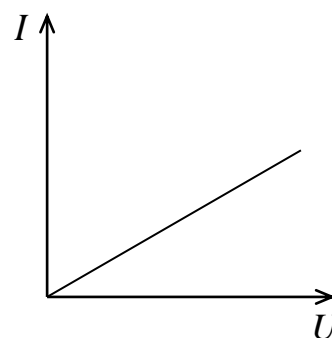


Рис.2..5

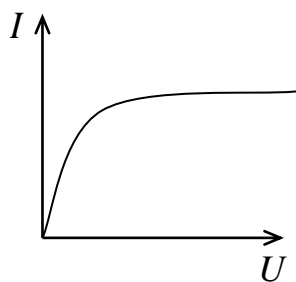


Рис 2.6

Опори, вольт-амперні характеристики у яких не є прямі лінії (рис. 2.6), називаються **нелінійними опорами**, а електричні кола, що містять хоча б один нелінійний елемент, - **нелінійними електричними колами**.

### 2.1.3. Розгалужені та нерозгалужені електричні кола

Електричні кола розділяються на розгалужені і нерозгалужені.

**Нерозгалуженим** називається коло, у всіх елементах якого тече однаковий струм рис. 1.1. Найпростіше розгалужене коло наведено на рис.2.7 і має два вузли і три вітки.

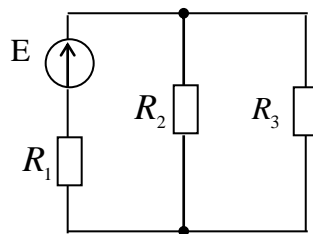


Рис. 2.7

**Вітка** – ділянка електричного кола, у всіх перетинах якої струм однаковий.

**Вузол** – точка кола, у якій сходиться не менше трьох віток.

### 2.1.4. Струм на ділянці кола

Електричному струмові приписують напрямок, за який прийнятий напрямок руху позитивних зарядів. Напрямок струму характеризується знаком струму. Поняття “позитивний струм” або “негативний струм” має сенс лише при порівнянні напрямку струму у провіднику з заздалегідь обраним орієнтиром – так званим позитивним напрямком. Позитивний напрямок струму вибирається довільно, він вказується стрілкою. Якщо в результаті розрахунку, струм має знак “+”, то це означає, що його напрямок збігається з обраним позитивним напрямком, у протилежному випадку струм негативний. У міжнародній системі одиниць струм вимірюється в амперах (А).

### 2.1.5. Напряга на ділянці кола

*Під напругою на деякій ділянці електричного кола розуміють різницю потенціалів між крайніми точками цієї ділянки.*

Зобразимо ділянку електричного кола, через яку тече струм, у вигляді прямокутника (рис.2.8).

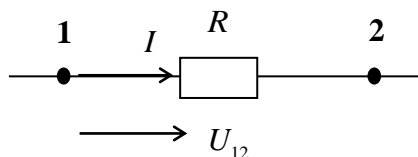


Рис. 2.8

Різниця електричних потенціалів між точками 1 і 2 є напруга на цій ділянці:  $\varphi_1 - \varphi_2 = U_{12}$ .

*Різниця потенціалів є величиною скалярною і визначається роботою, що витрачається на перенос одиничного позитивного заряду з точки 1 у точку 2.*

У системі СІ напруга вимірюється у вольтах (В).

Для визначення знаку напруги на розглянутій ділянці кола довільно вибирається позитивний напрямок. Звичайно, його вибирають співпадаючим з позитивним напрямком струму і вказують стрілкою. Позначимо напрям напруги стрілкою, спрямованою від точки 1 до точки 2. Коли потенціал точки 1 вище потенціалу точки 2 - вона позитивна, якщо потенціал точки 1 нижче потенціалу точки 2 – напруга негативна. Можна замість стрілки користуватися позначенням за допомогою індексів. Стосовно до рис.1.8 напруга, відлічена в позитивному напрямку, запишеться як  $U_{12}$ , а напруга, відлічена в зворотному напрямку, має протилежний знак:  $U_{21} = -U_{12}$ .

### 2.1.6. Закон Ома

Цей закон визначає зв'язок між струмом і напругою. Для кола, що містить тільки опір (рис. 2.9), він має вигляд:

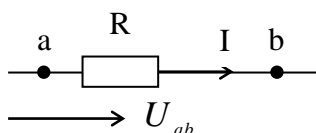


Рис. 2.9

$$U_{ab} = IR; \quad (2.3)$$

або 
$$I = \frac{U_{ab}}{R} = \frac{(\varphi_a - \varphi_b)}{R}. \quad (2.4)$$

Розглянемо ділянку кола, яка має опір  $R$  і ЕРС  $E$  (рис. 2.10):

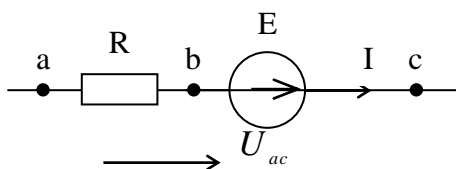


Рис. 2.10

Різниця потенціалів між точками "a" і "c" дорівнює:  $U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c$ . Виразимо потенціал точки "a" через потенціал точки "c". При переміщенні від точки "c" у точку "b" йдемо зустрічно ЕРС  $E$ , тобто у бік зниження потенціалу. Тому потенціал у точці "b" нижче потенціалу точки "c" на величину ЕРС:  $\varphi_b = \varphi_c - E$ .

При переміщенні від точки "b" до точки "a" йдемо у бік підвищення потенціалу, тому що на ділянці кола без ЕРС. (ділянка a-b) струм тече від вищого потенціалу до нижчого. Тому:  $\varphi_a = \varphi_b + IR = \varphi_c - E + IR$ . Звідки:  $U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c = IR - E$ .

Рівняння для струму  $I$  одержимо у вигляді:

$$I = \frac{U_{ac} + E}{R}. \quad (1.5)$$

Отримане рівняння є законом Ома для ділянки кола, що містить опір і ЕРС.

Міркуючи аналогічно, знайдемо рівняння згідно закону Ома для кола рис. 2.11:

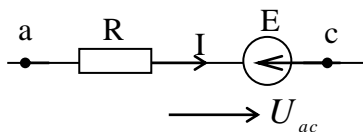


Рис. 2.11

$$I = \frac{U_{ac} - E}{R}. \quad (2.6)$$

Для ділянки кола, що містить декілька ЕРС і декілька опорів, закон Ома має вигляд:

$$I = \frac{U_{ac} \pm \sum_{k=1}^n E_k}{\sum_{k=1}^n R_k}, \quad (2.7)$$

де під знаком суми зі знаком ”+“ записують ЕРС, що збігаються за напрямком зі струмом і навпаки. Формула (2.7) є *узагальненим законом Ома*.

У замкненому одноконтурному колі напруга  $U_{ac} = 0$  і закон Ома має вигляд:

$$I = \frac{\sum_{k=1}^n E_k}{\sum_{k=1}^n R_k} \quad (2.8)$$

де  $\sum_{k=1}^n E_k$  - алгебраїчна сума ЕРС всього кола;

$\sum_{k=1}^n R_k$  - арифметична сума всіх зовнішніх і внутрішніх опорів кола.

При розв’язанні задачі визначення струму за заданими ЕРС джерел і опорами треба, насамперед, довільно вибрати позитивний напрям обходу кола. Якщо ЕРС збігаються за позитивним напрямком, то вони входять під знак алгебраїчної суми зі знаком ”+“, а ЕРС, які спрямовані зустрічно входять під знак суми зі знаком ”-“.

### 2.1.7.1. Послідовне і паралельне з’єднання опорів

*Послідовним з’єднанням опорів називається таке з’єднання, при якому через всі опори кола проходить один і той же струм.*

Розглянемо коло, що складається з ряду послідовно з'єднаних опорів (рис. 2.12):

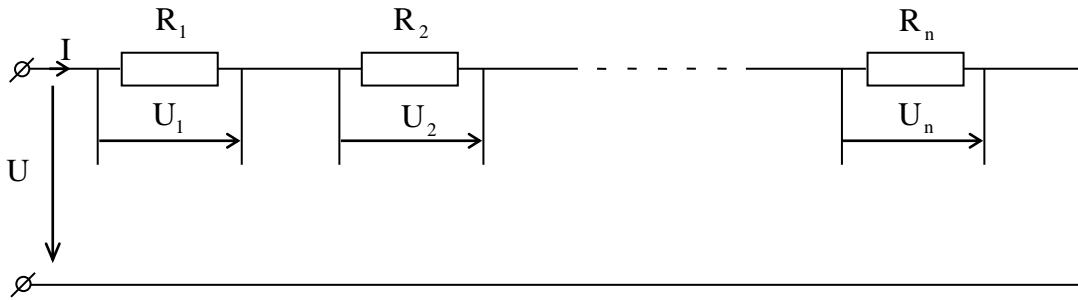


Рис. 2.12

Нехай до затискачів кола прикладена напруга  $U$ . Опори елементів мають позначення:  $R_1, R_2, \dots, R_n$ . Напруга  $U$  дорівнює сумі падінь напруг на окремих приймачах:

$$U = IR_1 + IR_2 + \dots + IR_n. \quad (2.9)$$

Якщо винести значення струму  $I$  за дужки, отримаємо:

$$U = I(R_1 + R_2 + \dots + R_n) \quad (2.10)$$

Введемо позначення:  $R_1 + R_2 + \dots + R_n = R_e$ , отримаємо:

$$U = IR_e. \quad (2.11)$$

Таким чином, еквівалентний опір  $R_e$  кола, що складається з послідовно з'єднаних елементів, дорівнює арифметичній сумі опорів:

$$R_e = \sum_{k=1}^n R_k.$$

**Паралельним з'єднанням елементів електричного кола називається таке з'єднання, при якому всі елементи знаходяться під однією напругою.**

Розглянемо коло, що складається з "n" числа паралельно з'єднаних елементів (рис. 2.13). До затискачів прикладена напруга  $U$ .

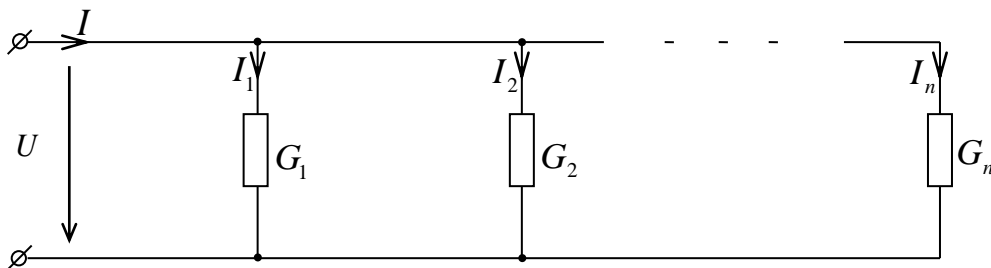


Рис. 2.13

За першим законом Кірхгофа для струму в нерозгалуженій частині кола запишемо рівняння:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n. \quad (2.12)$$

Струми у вітках можна виразити через напругу між вузлами і провідності віток:

$$I_1 = G_1 U; I_2 = G_2 U; I_3 = G_3 U, \quad (2.13)$$

$$\text{де } G_1 = \frac{1}{R_1}; G_2 = \frac{1}{R_2}; G_3 = \frac{1}{R_3}.$$

$$I = G_1 U + G_2 U + \dots + G_n U = U(G_1 + G_2 + \dots + G_n). \quad (2.14)$$

Розділимо це рівняння на  $U$ :

$$\frac{I}{U} = G_1 + G_2 + \dots + G_n. \quad (2.15)$$

Відношення  $\frac{I}{U}$  є провідністю  $G_e$ , яка відповідає загальному струму кола і загальній напрузі:

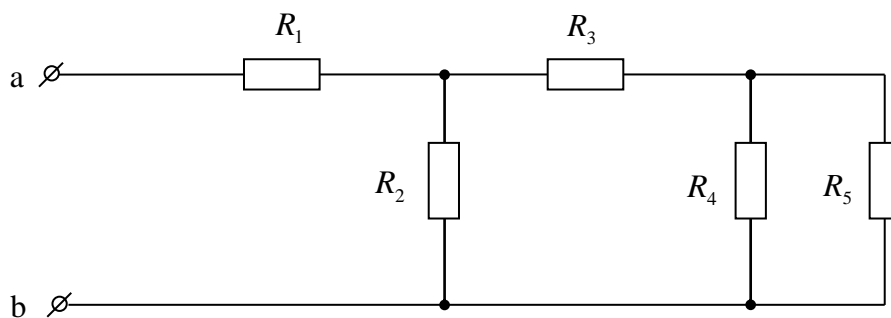
$$G_1 + G_2 + \dots + G_n = G_e. \quad (2.16)$$

Цей висновок можна застосовувати до будь-якого числа  $n$  паралельних віток:

$$G_e = \sum_{k=1}^n G_k.$$

При паралельному з'єднанні елементів еквівалентна провідність  $G_e$  дорівнює арифметичній сумі провідностей віток.

### Приклад 2.1.



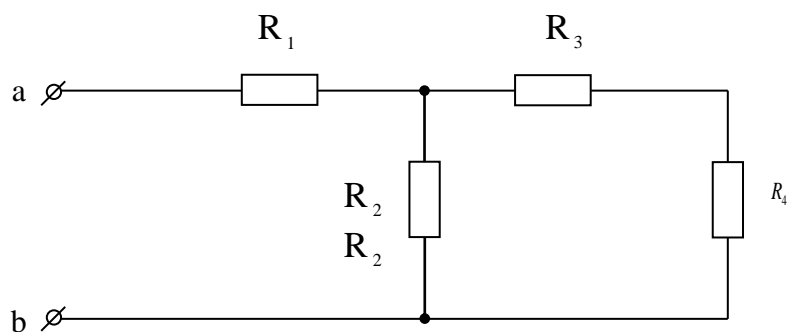
Знайти еквівалентний опір кола, якщо:  $R_1 = R_5 = 6 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = 15 \text{ Ом}$ ;  $R_3 = 5 \text{ Ом}$ ;  $R_4 = 30 \text{ Ом}$ .

#### Розв'язання.

1. Визначаємо еквівалентний опір ділянки кола з паралельно з'єднаними опорами  $R_4$  і  $R_5$ :

$$R_{4,5} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} = \frac{30 \cdot 6}{30 + 6} = 5 \text{ Ом.}$$

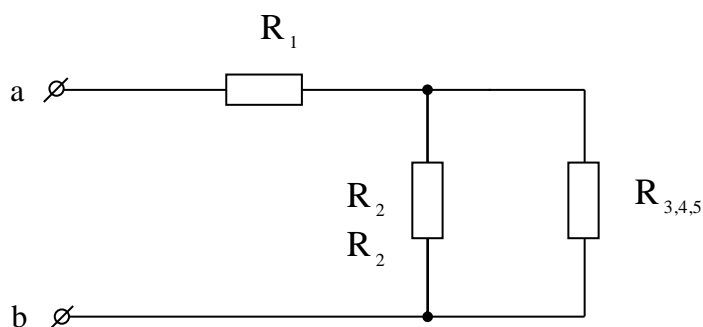
Схема при цьому спрощенні приймає вигляд:



2. Еквівалентний опір двох послідовно з'єднаних опорів  $R_{4,5}$  та  $R_3$  дорівнює:

$$R_{345} = R_3 + R_{45} = 5 + 5 = 10 \text{ Ом.}$$

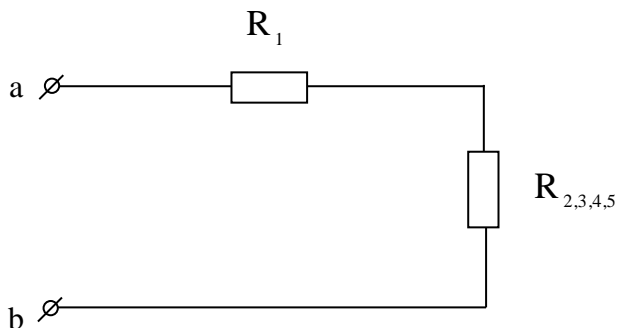
Схема приймає вигляд:



3. Визначаємо еквівалентний опір ділянки кола з паралельним з'єднанням  $R_2$  і  $R_{345}$ .

$$R_{2345} = \frac{R_2 R_{345}}{R_2 + R_{345}} = \frac{15 \cdot 10}{15 + 10} = 6 \text{ Ом.}$$

Схема приймає вигляд:



4. Еквівалентний опір  $R_{ab}$  дорівнює:

$$R_{ab} = R_1 + R_{2345} = 6 + 6 = 12 \text{ Ом.}$$



### 2.1.7.2. Закони Кірхгофа

Методи розрахунку за допомогою законів Кірхгофа дозволяють розрахувати електричне коло будь-якої конфігурації і важкості, тобто є основними.

**Перший закон Кірхгофа** формулюється стосовно вузла електричного кола і виражає баланс струмів в ньому: **алгебраїчна сума струмів у будь-якому вузлі електричного кола дорівнює нулю:**

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0. \quad (2.17)$$

В цю суму струми входять з різними знаками в залежності від їх напрямку по відношенню до вузла. Струми, спрямовані до вузла, умовно є позитивними, а струми, направлені від вузла, - негативними.

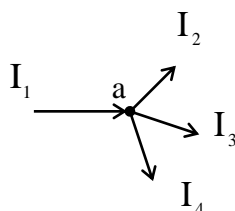


Рис. 2.14

Наприклад, для вузла “а” (рис. 2.14) рівняння має вигляд:

$$I_1 - I_2 - I_3 - I_4 = 0.$$

Фізично перший закон Кірхгофа свідчить про те, що рух зарядів у колі відбувається так, що в жодному з вузлів заряди не накопичуються.

**Другий закон Кірхгофа** стверджує, що **алгебраїчна сума падінь напруг у будь-якому замкнутому контурі електричного кола дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС вздовж цього контуру:**

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{k=1}^n E_k. \quad (2.19)$$

### 2.1.8. Енергетичний баланс в електричних колах

З закону збереження енергії випливає, що кількість тепла, що виділяється за одиницю часу в опорах елементів кола, дорівнює кількості енергії джерел живлення кола.

**Рівняння енергетичного балансу** при наявності в колі тільки джерел ЕРС має вигляд:

$$\sum_{k=1}^n I_k^2 R_k = \sum_{k=1}^n E_k I_k. \quad (2.20)$$

Якщо напрямок струму і напрямок ЕРС джерела ЕРС збігаються, то джерело ЕРС надає у коло енергію і добуток  $EI$  входить у рівняння енергетичного балансу зі знаком плюс. Якщо ж напрямок струму зустрічний

напрямку ЕРС, то елемент кола споживає електричну енергію, а добуток  $EI$  входить під знак суми зі знаком мінус.

Якщо в електричному колі є джерело струму, то рівняння енергетичного балансу має вигляд:

$$\sum_{k=1}^n I_k^2 R_k = \sum_{k=1}^n E_k I_k + \sum_{k=1}^n U_{ab} I_k, \quad (2.21)$$

де  $I_k$  - струм джерела струму,

$U_{ab}$  - напруга джерела струму.

У системі СІ робота, енергія, кількість тепла вимірюється в Джоулях, а потужність - у Ватах ( $Вт = Дж/с$ ).

## 2.1.9. Методи розрахунку складних електричних кіл постійного струму

### 2.1.9.1. Метод рівнянь Кірхгофа

*Електричні кола, які не можуть бути представлені тільки послідовним і паралельним з'єднанням елементів, називаються складними.*

Розрахунок електричних кіл за допомогою рівнянь, складених за законами Кірхгофа, є класичним методом розрахунку складних електричних кіл.

Розглянемо застосування законів Кірхгофа для визначення струмів у вітках кола. Так як у кожній вітці тече свій струм, то кількість невідомих струмів дорівнює числу віток схеми.

Перед складанням рівнянь необхідно:

а) довільно вибрати позитивний напрям струмів у вітках і позначити їх на схемі кола стрілкою;

б) довільно вибрати позитивний напрям обходу контурів для складання рівнянь за другим законом Кірхгофа.

Рекомендується позитивний напрям обходу контурів вибрати однаковим для всіх контурів (наприклад, за годинниковою стрілкою).

Введемо позначення:  $N_{віт}$  - кількість віток схеми,  $N_{вуз}$  - кількість вузлів,  $N_e$  - кількість джерел струму. Кількість незалежних рівнянь за першим законом Кірхгофа дорівнює кількості вузлів без одиниці:  $N_{рів} = N_{вуз} - 1$ .

Розглянемо схему (рис. 2.15):

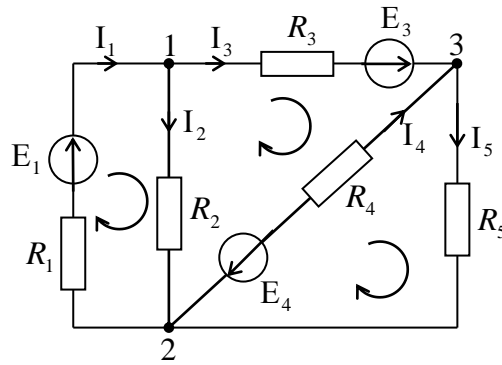


Рис. 2.15

Дане коло має  $N_{\text{вим}} = 5$ ,  $N_{\text{вуз}} = 3$ .

Складемо рівняння для вузлів за першим законом Кірхгофа.

1 вузол:  $I_1 - I_2 - I_3 = 0$ ;

2 вузол:  $I_2 - I_1 - I_4 + I_5 = 0$ ;

3 вузол:  $I_3 + I_4 - I_5 = 0$ .

Просумуємо перші два рівняння і отримаємо рівняння:  $-I_3 - I_4 + I_5 = 0$ , яке є рівнянням для третього вузла і не є незалежним, а є наслідком двох перших. Тому за першим законом Кірхгофа можна записати  $N_{\text{вуз}} - 1$  рівнянь.

Застосовуючи другий закон Кірхгофа, можна скласти стільки рівнянь, скільки є замкнених контурів у колі. Однак, при цьому одні рівняння можуть виявитися наслідком інших, тобто не будуть незалежними.

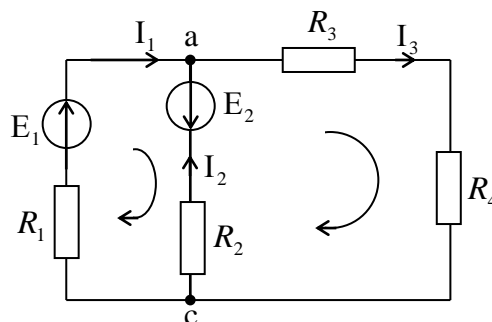
Для одержання незалежних рівнянь контури варто вибирати так, щоб кожен наступний відрізнявся від попередніх не менш ніж однією новою віткою.

Кількість незалежних контурів в загальному вигляді складає:

$$N_m = N_{\text{вим}} - N_{\text{вуз}} + 1 - N_e.$$

Справедливість цього рівняння очевидна для кола з двома вузлами і трьома вітками.  $N_{\text{вим}} = 3$ ,  $N_{\text{вуз}} = 2$ :  $3 - 2 + 1 - 0 = 2$ .

### Приклад 2.2.



Дано:  $E_1 = 80$  В;  $R_1 = 6$  Ом;  $R_2 = 4$  Ом.  $E_2 = 64$  В;  $R_3 = 3$  Ом;  $R_4 = 1$  Ом.  
Знайти струми у вітках схеми за допомогою законів Кірхгофа.

### Розв'язання:

1. Довільно вибираємо позитивний напрям струмів у вітках.

2. У схемі  $N_{\text{вуз}} = 2$ , тому за першим законом Кірхгофа запишеться

одне рівняння (для вузла «а»):  $I_1 + I_2 - I_3 = 0$ .

3. Кількість незалежних контурів дорівнює двом.

За другим законом Кірхгофа складемо два рівняння:

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 = E_1 + E_2.$$

$$I_2 R_2 + I_3 (R_3 + R_4) = -E_2.$$

Знак «+» перед  $I_1 R_1$  взятий тому, що напрямок струму  $I_1$  збігається з напрямком обходу контуру, знак «-» перед  $I_2 R_2$  відповідає тому, що напрямок струму  $I_2$  в опорі  $R_2$  зустрічний напрямку обходу контуру.

Напрямок ЕРС  $E_1$  і  $E_2$  збігаються з напрямком обходу контуру, тому у формулу вони входять зі знаком «+».

4. Розв'язуємо спільно систему рівнянь:

$$\begin{cases} I_1 R_1 - I_2 R_2 = E_1 + E_2. \\ I_2 R_2 + I_3 (R_3 + R_4) = -E_2. \\ I_1 + I_2 - I_3 = 0 \end{cases}$$

Підставимо в систему рівнянь значення опорів та ЕРС і отримаємо:

$$6I_1 - 4I_2 + 0 = 144$$

$$0 + 4I_2 + 4I_3 = -64$$

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

Складемо визначник системи:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 6 & -4 & 0 \\ 0 & 4 & 4 \\ 1 & 1 & -1 \end{vmatrix} = -24 - 16 - 24 = -64$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 144 & -4 & 0 \\ -64 & 4 & 4 \\ 0 & 1 & -1 \end{vmatrix} = -4 \cdot 144 + 64 \cdot 4 - 4 \cdot 144 = -896$$

$$I_1 = \Delta_1 / \Delta = -896 / -64 = 14 \text{ A}$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 6 & 144 & 0 \\ 0 & -64 & 4 \\ 1 & 0 & -1 \end{vmatrix} = 6 \cdot 64 + 144 \cdot 4 = 960$$

$$I_2 = \Delta_2 / \Delta = 960 / -64 = -15 \text{ A}$$

$$I_3 = I_1 + I_2 = 14 - 15 = -1 \text{ A}$$

Так як напрямки струмів були прийняті довільно, то в результаті розрахунку який-небудь зі струмів або декілька можуть виявитися негативними. Це означає, що в дійсності струми  $I_2$  і  $I_3$  мають напрямки, протилежні прийнятим.

### **2.1.9.2. Метод контурних струмів**

При розрахунках методом контурних струмів припускають, що в кожному незалежному контурі кола тече свій контурний струм і за невідомі

приймають контурні струми. Після їх визначення визначають струми у вітках. Кількість невідомих в цьому методі дорівнює кількості рівнянь, які треба було б скласти для схеми за другим законом Кірхгофа.

Нехай задані значення опорів і ЕРС. Визначимо струми у вітках (рис. 2.16).

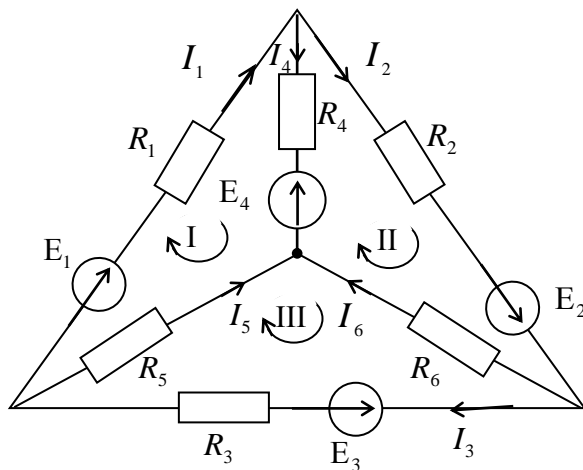


Рис. 2.16

У даному колі (рис.2.16) три незалежних контури. Довільно вибираємо напрямки контурних струмів. Далі для кожного з контурів складаємо рівняння за другим законом Кірхгофа:

$$\begin{aligned} I_I (R_1 + R_4 + R_5) - I_{II} R_4 - I_{III} R_5 &= E_1 - E_4 \\ -I_I R_4 + I_{II} (R_2 + R_4 + R_6) - I_{III} R_6 &= E_2 + E_4 \\ -I_I R_5 - I_{II} R_6 + I_{III} (R_3 + R_5 + R_6) &= -E_3 \end{aligned}$$

Алгебраїчна сума ЕРС у контурі називається контурною ЕРС і позначається індексом за номером контуру:

$$\begin{aligned} E_1 - E_4 &= E_I \\ E_2 + E_4 &= E_{II} \\ -E_3 &= E_{III} \end{aligned}$$

Сума опорів усіх віток, що входять у контур називається власним опором контуру і є величиною завжди позитивною.

$$\begin{aligned} R_1 + R_4 + R_5 &= R_{I1} \\ R_2 + R_4 + R_6 &= R_{II2} \\ R_3 + R_5 + R_6 &= R_{III3} \end{aligned}$$

$-R_4 = R_{I2} = R_{21}$  - це опір суміжної вітки між першим і другим контурами, який береться зі знаком «мінус», якщо контурні струми у цій вітці направлені назустріч один одному;

$-R_5 = R_{I3} = R_{31}$  - суміжний опір першого і третього контурів, взятий зі знаком «мінус»;

$-R_6 = R_{II3} = R_{32}$  - суміжний опір другого і третього контурів, взятий зі знаком «мінус».

У загальному випадку опір суміжної вітки між « $k$ » і « $m$ » контурами « $R_{km}$ » входить у рівняння зі знаком «-», якщо напрямки контурних струмів  $I_k$  і

$I_m$  вздовж цієї вітки зустрічний, і знак «+», якщо вони сходяться за напрямком.

Рівняння приймуть вигляд:

$$\begin{cases} R_{11}I_I + R_{12}I_{II} + R_{13}I_{III} = E_I \\ R_{21}I_I + R_{22}I_{II} + R_{23}I_{III} = E_{II} \\ R_{31}I_I + R_{32}I_{II} + R_{33}I_{III} = E_{III} \end{cases}$$

Розв'язуючи одержану систему рівнянь, визначаємо контурні струми  $I_I, I_{II}, I_{III}$ .

$$I_I = \frac{\Delta_I}{\Delta}; I_{II} = \frac{\Delta_{II}}{\Delta}; I_{III} = \frac{\Delta_{III}}{\Delta}.$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{vmatrix}$$

$$\Delta_I = \begin{vmatrix} E_I & R_{12} & R_{13} \\ E_{II} & R_{22} & R_{23} \\ E_{III} & R_{32} & R_{33} \end{vmatrix}$$

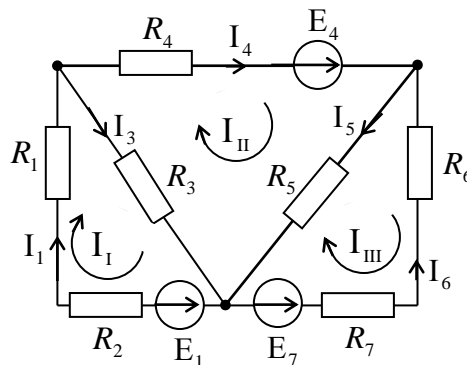
$$\Delta_{II} = \begin{vmatrix} R_{11} & E_I & R_{13} \\ R_{21} & E_{II} & R_{23} \\ R_{31} & E_{III} & R_{33} \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{III} = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & E_I \\ R_{21} & R_{22} & E_{II} \\ R_{31} & R_{32} & E_{III} \end{vmatrix}$$

Контурні струми і є струмами відповідних несуміжних віток, тобто  $I_1 = I_I; I_2 = I_{II}; I_3 = I_{III}$ .

Струми суміжних віток визначаються як алгебраїчна сума контурних струмів:  $I_4 = I_I - I_{II}; I_5 = I_{III} - I_I; I_6 = I_{II} - I_{III}$ .

### Приклад 2.3.



Дано:

$$\begin{array}{lll} R_1 = 5 \text{ Ом} & & E_1 = 10 \text{ В} \\ R_2 = 4 \text{ Ом} & R_5 = 2 \text{ Ом} & E_4 = 10 \text{ В} \\ R_3 = 5 \text{ Ом} & R_6 = 2 \text{ Ом} & E_7 = 8 \text{ В} \\ R_4 = 10 \text{ Ом} & R_7 = 1 \text{ Ом} & \end{array}$$

Порядок розв'язання задачі:

1. Вибираємо позитивний напрям струмів у вітках.
2. Виділяємо незалежні контури, позначаємо позитивний напрямок контурних струмів (наприклад, за годинниковою стрілкою).
3. Записуємо систему рівнянь, у яких невідомими є контурні струми.

$$\begin{cases} R_{11}I_I + R_{12}I_{II} + R_{13}I_{III} = E_I \\ R_{21}I_I + R_{22}I_{II} + R_{23}I_{III} = E_{II} \\ R_{31}I_I + R_{32}I_{II} + R_{33}I_{III} = E_{III} \end{cases}$$

де  $R_{11}, R_{22}, R_{33}$  – власні опори контурів:

$$\begin{aligned} R_{11} &= R_1 + R_2 + R_3 = 14 \text{ Ом} \\ R_{22} &= R_3 + R_4 + R_5 = 17 \text{ Ом} \\ R_{33} &= R_5 + R_6 + R_7 = 5 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Опори  $R_{12}=R_{21}, R_{13}=R_{31}, R_{23}=R_{32}$  є суміжними опорами віток між відповідними контурами і дорівнюють (з огляду на напрямок контурних струмів у них):

$$\begin{aligned} R_{12} &= R_{21} = -R_3 = -5 \text{ Ом} \\ R_{13} &= R_{31} = 0 \\ R_{32} &= R_{23} = -R_5 = -2 \text{ Ом} \end{aligned}$$

ЕРС  $E_I, E_{II}, E_{III}$  знаходяться як суми ЕРС, що входять у відповідний контур. ЕРС, що сходяться за напрямком з контурним струмом, беруться зі знаком «+», а ті, що не сходяться, - зі знаком «-»:

$$\begin{aligned} E_I &= -E_1 = -10 \text{ В} \\ E_{II} &= E_4 = 10 \text{ В} \\ E_{III} &= -E_7 = -8 \text{ В}. \end{aligned}$$

Підставимо цифрові значення в систему рівнянь і розв'яжемо її щодо контурних струмів.

$$\begin{cases} 14I_I - 5I_{II} + 0 = -10 \\ -5I_I + 17I_{II} - 2I_{III} = 10 \\ 0 - 2I_{II} + 5I_{III} = -8 \end{cases}$$

Складаємо визначники:

Головний визначник системи рівнянь:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 14 & -5 & 0 \\ -5 & 17 & -2 \\ 0 & -2 & 5 \end{vmatrix} = 14 \cdot 17 \cdot 5 - (-2) \cdot (-2) \cdot 14 - 5 \cdot (-5) \cdot (-5) = 1190 - 56 - 125 = 1009$$

Частинні визначники:

$$\Delta_I = \begin{vmatrix} -10 & -5 & 0 \\ 10 & 17 & -2 \\ -8 & -2 & 5 \end{vmatrix} = -640$$

$$\Delta_{II} = \begin{vmatrix} 14 & -10 & 0 \\ -5 & 10 & -2 \\ 0 & -8 & 5 \end{vmatrix} = 226$$

$$\Delta_{III} = \begin{vmatrix} 14 & -5 & -10 \\ -5 & 17 & 10 \\ 0 & -2 & -8 \end{vmatrix} = -1524$$

Знаходимо контурні струми:

$$I_I = \Delta_I / \Delta = -640 / 1009 = -0,63 \text{ A}$$

$$I_{II} = \Delta_{II} / \Delta = 226 / 1009 = 0,223 \text{ A}$$

$$I_{III} = \Delta_{III} / \Delta = -1524 / 1009 = -1,51 \text{ A}$$

Струми у вітках будуть відповідно дорівнювати:

$$I_1 = I_I = -0,63 \text{ A}$$

$$I_4 = I_{II} = 0,223 \text{ A}$$

$$I_3 = I_I - I_{II} = -0,853 \text{ A}$$

$$I_5 = I_{II} - I_{III} = 1,733 \text{ A}$$

$$I_6 = -I_{III} = 1,51 \text{ A}$$

Струми  $I_1$ ,  $I_3$ ,  $I_6$  мають від'ємні знаки, тому вони спрямовані у напрямках, протилежних від обраних довільно раніше.

### 2.1.9.3. Метод накладання

Розрахунок кіл даним методом виконують наступним чином: по черзі розраховують струми, які викликані дією кожної ЕРС, умовно виключаючи інші зі схеми, але залишаючи в схемі внутрішні опори джерел, а потім знаходять струми у вітках алгебраїчним додаванням частинних струмів.

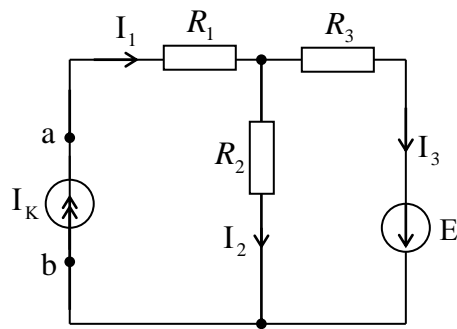
Методом накладання не можна користуватись для підрахунку потужностей як суми потужностей від частинних струмів, так як потужність є квадратичною функцією струму ( $P = I^2 R$ ).

Порядок розрахунку кіл методом накладання.

1. Залишаємо в колі одне джерело енергії, вилучивши всі інші, але залишивши їхні внутрішні опори.
2. Визначаємо струми у вітках, викликані цим джерелом енергії.
3. Аналогічно визначаємо струми у вітках кола, викликані кожним джерелом енергії окремо.
4. Струми у вітках визначаються як алгебраїчна сума частинних струмів.



### Приклад 2.4.

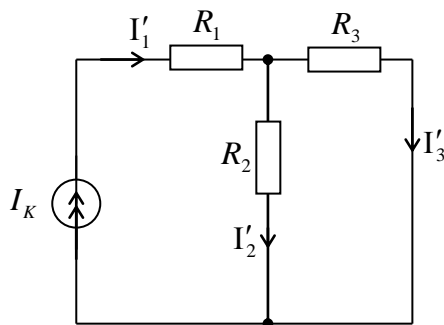


Дано:  $R_1=2 \text{ Ом}$ ;  $R_2=4 \text{ Ом}$ ;  $R_3=6 \text{ Ом}$ ;  $E=20 \text{ В}$ ;  $I_k=5 \text{ А}$ .

Методом накладання визначити струми у вітках.

Розв'язання:

1. Визначаємо струми у вітках, викликані дією джерела струму.

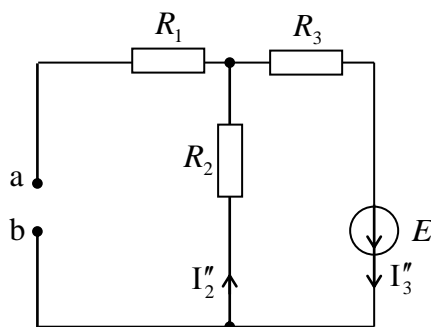


$$I'_1 = I_k = 5 \text{ А}; \quad I'_2 = I'_1 \cdot \frac{R_3}{(R_3 + R_2)} = 5 \cdot \frac{6}{10} = 3 \text{ А};$$

$$I'_3 = I'_1 \cdot \frac{R_2}{(R_3 + R_2)} = 5 \cdot \frac{4}{10} = 2 \text{ А};$$

або  $I'_3 = I'_1 - I'_2 = 5 - 3 = 2 \text{ А}$ .

2. Визначаємо струми у вітках, викликані дією джерела ЕРС. Джерело струму ми умовно вилучили, залишивши його  $R_{вн.} = \infty$ .



$$I_1'' = 0; I_2'' = I_3'' = \frac{E}{R_2 + R_3} = \frac{20}{10} = 2 \text{ A.}$$

3. Струми у вітках визначаємо як алгебраїчну суму частинних струмів цих двох режимів.

$$I_1 = I_1' = 5 \text{ A}$$

$$I_2 = I_2' - I_2'' = 3 - 2 = 1 \text{ A};$$

$$I_3 = I_3' + I_3'' = 2 + 2 = 4 \text{ A.}$$

У вихідній схемі покажемо стрілкою напрям струмів.

#### 2.1.9.4. Метод вузлових потенціалів

У цьому методі розрахунку електричних кіл за невідомі прийняті потенціали вузлів кола. Даний метод є більш економічним у витратах часу на розрахунки у порівнянні з методом контурних струмів, якщо в схемі кола кількість вузлів без одиниці менше кількості незалежних контурів.

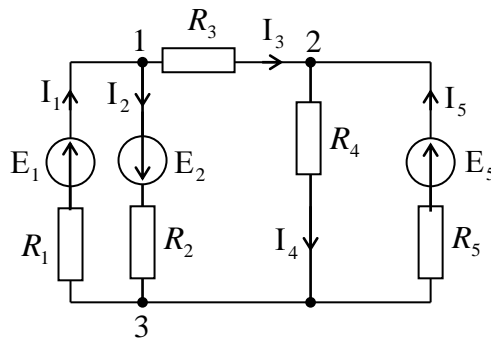


Рис.2.17

Розглянемо схему кола (рис.2.17), що має 5 віток і 3 вузли. Якщо один з вузлів схеми заземлити, тобто прийняти потенціал цього вузла, що дорівнює  $\varphi = 0$ , то необхідно буде визначити тільки потенціали двох вузлів. Визначивши потенціали вузлів схеми, визначаємо напруги між цими вузлами і за законом Ома визначаємо струми у вітках схеми.

Порядок розрахунку:

1. Заземлюємо вузол 3, тобто приймаємо  $\varphi_3 = 0$ .

2. Довільно позначаємо позитивний напрям струмів у вітках і за першим законом Кірхгофа складаємо рівняння для 1-го вузла:

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

3. Виразимо струми через ЕРС у вітках і потенціали у вузлах:

$$I_1 = (\varphi_3 - \varphi_1 + E_1) \cdot G_1$$

$$I_2 = (\varphi_1 - \varphi_3 + E_2) \cdot G_2$$

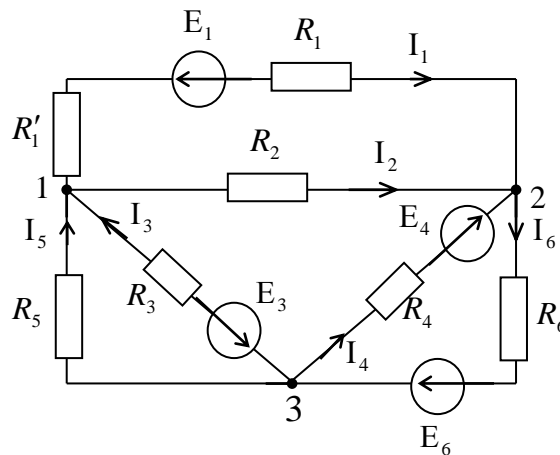
$$I_3 = (\varphi_1 - \varphi_2) \cdot G_3$$

Врахуємо, що  $\varphi_3 = 0$ . Одержимо:

$$-\varphi_2 G_3 + \varphi_1 (G_1 + G_2 + G_3) = E_1 G_1 - E_2 G_2.$$



**Приклад 2.5.**



Дано:

$$R_1 = 20 \text{ Ом}; R'_1 = 10 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 15 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 8 \text{ Ом}$$

$$R_4 = 30 \text{ Ом}; R_5 = 40 \text{ Ом}; R_6 = 6 \text{ Ом};$$

$$E_1 = 30 \text{ В}; E_3 = 56 \text{ В}; E_4 = 10 \text{ В}; E_6 = 200 \text{ В}.$$

Визначити всі струми методом вузлових потенціалів.

Розв'язання:

1. У схемі 3 вузли. Потенціал 3-го вузла приймаємо рівним нулю:  $\varphi_3 = 0$ .

2. Записуємо систему з двох рівнянь:

$$\varphi_1 G_{11} + \varphi_2 G_{12} = I_{11}$$

$$\varphi_1 G_{21} + \varphi_2 G_{22} = I_{22}$$

3. Підраховуємо провідності:

$$G_{11} = G_1 + G_2 + G_3 + G_5 = 1/(R_1+R'_1) + 1/R_2 + 1/R_3 + 1/R_5 = 1/30+1/15+1/8+1/40 = 0,25 \text{ См};$$

$$G_{22} = 1/(R_1+R'_1) + 1/R_2 + 1/R_4 + 1/R_6 = 1/30+1/15+1/30+1/6 = 0,30 \text{ См};$$

$$G_{12} = G_{21} = - [1/(R_1+R'_1) + 1/R_2] = -(1/30+1/15) = -0,10 \text{ См};$$

$$I_{11} = E_1 G_1 - E_3 G_3 = 30 \cdot 1/30 - 56 \cdot 1/8 = -6 \text{ А};$$

$$I_{22} = E_4 G_4 - E_1 G_1 - E_6 G_6 = 10 \cdot 1/30 - 30 \cdot 1/30 - 200 \cdot 1/6 = -34 \text{ А}.$$

4. Розв'язуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \varphi_1 0,25 - \varphi_2 0,1 = -6 \\ -\varphi_1 0,1 + \varphi_2 0,3 = -34 \end{cases}$$

$$\varphi_1 = -80 \text{ В}, \varphi_2 = -140 \text{ В}$$

5. За законом Ома визначаємо струми віток, для чого довільно задаємося позитивним напрямом струмів.

$$I_1 = \frac{U_{12} - E_1}{R_1 + R'_1} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 - E_1}{R_1 + R'_1} = \frac{-80 + 140 - 30}{20 + 10} = 1 \text{ А}$$

$$I_2 = \frac{U_{12}}{R_2} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_2} = \frac{-80 + 140}{15} = 4 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{U_{31} - E_3}{R_3} = \frac{\varphi_3 - \varphi_1 - E_3}{R_3} = \frac{80 - 56}{8} = 3 \text{ A}$$

$$I_4 = \frac{U_{32} + E_4}{R_4} = \frac{\varphi_3 - \varphi_2 + E_4}{R_4} = \frac{140 + 10}{30} = 5 \text{ A}$$

$$I_5 = \frac{U_{31}}{R_5} = \frac{\varphi_3 - \varphi_1}{R_5} = \frac{80}{40} = 2 \text{ A}$$

$$I_6 = \frac{U_{31}}{R_6} = \frac{\varphi_2 - \varphi_3 + E_6}{R_6} = \frac{-140 + 200}{6} = 10 \text{ A}$$

### 2.1.9.5. Метод еквівалентного генератора

В розрахунках кіл часто треба визначити струм, напругу або потужність однієї окремої вітки. Для цього можна скористатися одним із раніше описаних методів розрахунку.

Але при розрахунку складного електричного кола треба виконувати велику обчислювальну роботу і в тому випадку, коли треба визначити струм в одній вітці. Обсяг цієї роботи в декілька разів збільшується, коли необхідно встановити зміну струму, напруги та потужності при зміні опору даної вітки, так як обчислення треба проводити декілька разів, задаючись різними значеннями опорів.

Розв'язання такої задачі значно спрощується при використанні метода еквівалентного генератора.

При використанні цього методу частину електричного кола позначають прямокутником, який має назву двополюсника. Двополюсники, що не мають у своїх вітках електричної енергії, називаються *пасивними*, а двополюсники, що містять джерела електричної енергії, називаються *активними*. Активні двополюсники позначаються прямокутником з буквою **A**, а пасивні - з буквою **П** або без позначення.

#### Теорема про еквівалентний генератор.

Активний двополюсник, який виділено прямокутником, при розрахунку можна замінити еквівалентним генератором, ЕРС якого дорівнює напрузі холостого ходу на затискачах виділеної області, а внутрішній опір дорівнює вхідному опору двополюсника.

Нехай задано складне електричне коло і треба визначити струм в одній його вітці. Уявимо всю схему у вигляді активного двополюсника, виділивши з неї тільки вітку, у якій потрібно визначити струм  $I$  (рис.2.18).

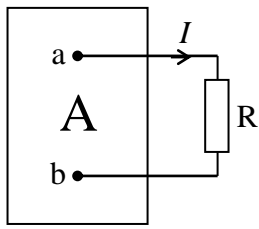


Рис.2.18

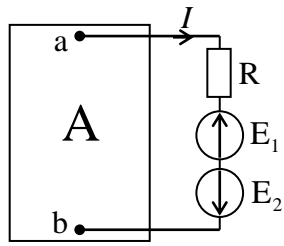


Рис.2.19

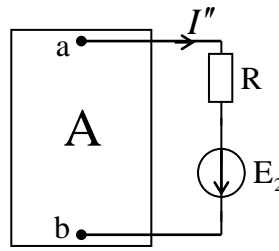


Рис.2.20

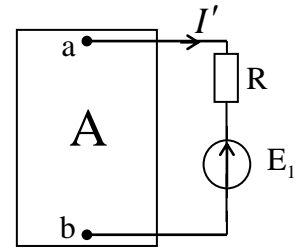


Рис.2.21

Струм  $I$  не зміниться, якщо у вітку “ $ab$ ” включити дві рівні і протилежно спрямовані ЕРС:  $E_1 = -E_2$  (рис.2.19). На підставі принципу накладання струм можна записати у вигляді суми струмів:  $I = I' + I''$  (рис.2.20 і 2.21). Під струмом  $I'$  будемо розуміти струм, викликаний ЕРС  $E_1$  і усіма ЕРС активного двополюсника. Струм  $I''$  викликаний тільки дією ЕРС  $E_2$ .

За законом Ома для ділянки кола запишемо:

$$I' = (U_{ab} - E_1) / R.$$

Виберемо  $E_1$  так, щоб  $I' = 0$ , тобто  $E_1 = U_{ab}$ . Це еквівалентно розмиканню вітки “ $ab$ ”.

Позначимо напругу на затисках “ $ab$ ” при розімкнутій вітці  $U_{abxx}$ . У цьому випадку струм:

$$I = E_2 / (R + R_{ex}),$$

де  $R$  – опір вітки “ $ab$ ”;

$R_{ex}$  - вхідний опір двополюсника стосовно затисків “ $ab$ ”.

Рівнянню  $I = E_2 / (R + R_{ex}) = U_{abxx} / (R + R_{ex})$  відповідає еквівалентна схема, де замість двополюсника зображено джерело, ЕРС якого дорівнює  $U_{abxx} = E_2$  і опір  $R_{ex}$ .

Сукупність джерела ЕРС і  $R_{ex}$  можна розглядати як деякий еквівалентний генератор, ЕРС якого дорівнює  $U_{abxx}$ , а його внутрішній опір дорівнює  $R_{ex}$ , тобто активний двополюсник можна замінити еквівалентним генератором (рис.2.22).

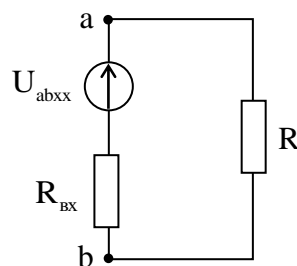


Рис.2.22

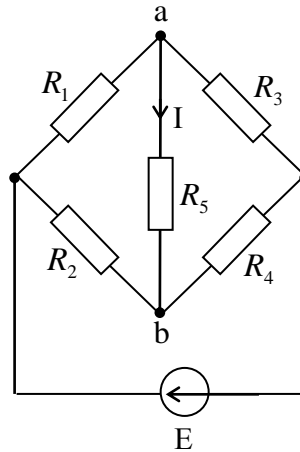
Метод визначення струму в одній вітці електричного кола, заснований на заміні активного двополюсника еквівалентним генератором, прийнято називати *методом еквівалентного генератора* або *методом активного двополюсника*.

Послідовність розрахунку кіл методом еквівалентного генератору:

1. Розмикаємо вітку, струм у якій необхідно визначити.
2. Визначаємо напругу  $U_{abxx}$  на затисках розімкнутої вітки “ $ab$ ”.
3. Визначаємо  $R_{ex}$  усієї схеми стосовно затисків “ $ab$ ” при закорочених джерелах ЕРС (якщо є джерело струму, то вітка з ними вважається розімкнутою, тому що внутрішній опір джерела нескінченно великий).
4. Підраховуємо струм за формулою:  

$$I = U_{abxx}/(R+R_{ex}).$$

### Приклад 2.6.

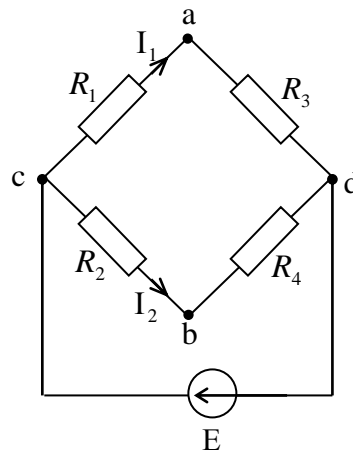


Дано:  $R_1 = 2 \text{ Ом}$   
 $R_2 = 4 \text{ Ом}$   
 $R_3 = 6 \text{ Ом}$   
 $R_4 = 4 \text{ Ом}$   
 $R_5 = 1,5 \text{ Ом}$   
 $E = 10 \text{ В.}$

Визначити струм у діагоналі мостової схеми.

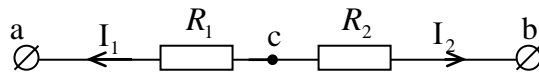
#### Розв'язання:

1. Розмикаємо коло у вітці, струм якої треба розрахувати.



2. Визначаємо  $U_{abxx}$ .

$$U_{abxx} = \varphi_a - \varphi_b;$$



$$\varphi_c = \varphi_b + I_2 R_2;$$

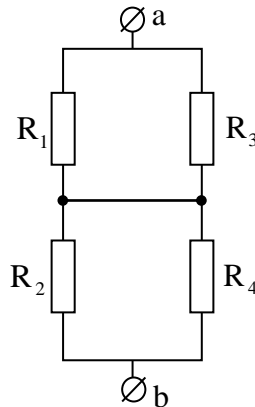
$$\varphi_a = \varphi_c - I_1 R_1;$$

$$\varphi_a = \varphi_b + I_2 R_2 - I_1 R_1;$$

$$\varphi_a - \varphi_b = I_2 R_2 - I_1 R_1;$$

$$U_{abxx} = \frac{E}{R_2 + R_4} \cdot R_2 - \frac{E}{R_1 + R_3} \cdot R_1 = 10 \cdot \frac{4}{4+4} - 10 \cdot \frac{2}{8} = 2,5 \text{ В}$$

3. Визначимо  $R_{\text{ex}}$  усієї схеми стосовно затисків  $ab$  при к.з. джерела ЕРС.



$$R_{\text{ex}} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4} = \frac{12}{8} + \frac{16}{8} = 3,5 \text{ Ом}$$

4. Визначаємо струм у вітці  $I_5$

$$I_5 = U_{abxx} / (R_5 + R_{\text{ex}}) = 2,5 / (1,5 + 3,5) = 0,5 \text{ А.}$$

### 2.1.10. Перетворення трикутника опорів в еквівалентну зірку опорів або навпаки

При розрахунку складних кіл спрощення схеми виконується вже відомим методом еквівалентних опорів, але попередньо проводиться перетворення трикутника опорів в еквівалентну зірку або навпаки.

Заміна трикутника опорів еквівалентною зіркою або навпаки здійснюється при умові, що така заміна не змінює потенціалів вузлових точок 1, 2 та 3, які є вершинами трикутника та еквівалентної зірки.

Одночасно припускається, що в іншій частині кола, яку не торкають перетворення, режим роботи не змінюється (не змінюються струми, напруги



та потужності). З'єднання трьох опорів, що мають вигляд трипроменевої зірки, називається з'єднанням у зірку (рис.2.23).

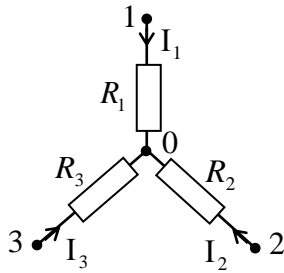


Рис.2.23

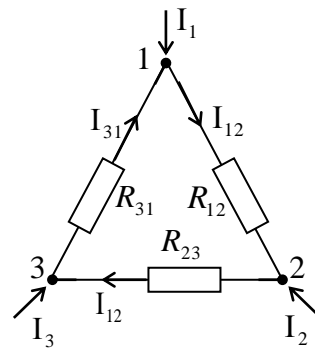


Рис.2.24

З'єднання трьох опорів так, що вони утворюють сторони трикутника називається з'єднанням в трикутник (рис.2.24).

Формули перетворення зірки в еквівалентний трикутник мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 R_{12} &= R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3}; \\
 R_{23} &= R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}; \\
 R_{31} &= R_3 + R_1 + \frac{R_3 \cdot R_1}{R_2}.
 \end{aligned}
 \tag{2.22}$$

Для розрахунку деяких схем застосовується перетворення трикутника у зірку. Формули цього перетворення мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{R_{12} R_{31}}{R_{12} + R_{31} + R_{23}} \\
 R_2 &= \frac{R_{12} R_{23}}{R_{12} + R_{31} + R_{23}} \\
 R_3 &= \frac{R_{31} R_{23}}{R_{12} + R_{31} + R_{23}}
 \end{aligned}
 \tag{2.23}$$

### 2.1.11. Заміна декількох паралельних віток однією еквівалентною

Якщо в складному електричному колі є одна або кілька груп паралельно з'єднаних віток з ЕРС, то розрахунок і дослідження такого кола можна значно спростити шляхом заміни кожної групи паралельних віток з ЕРС однією віткою з еквівалентною ЕРС і еквівалентним опором.

Виділимо з електричної схеми одну групу з трьох паралельно з'єднаних віток.

Замінімо три паралельні вітки (рис.2.25, а) однією еквівалентною (рис.2.25, б) так, щоб струм  $I$  і напруга  $U_{ab}$  в еквівалентній схемі були такими

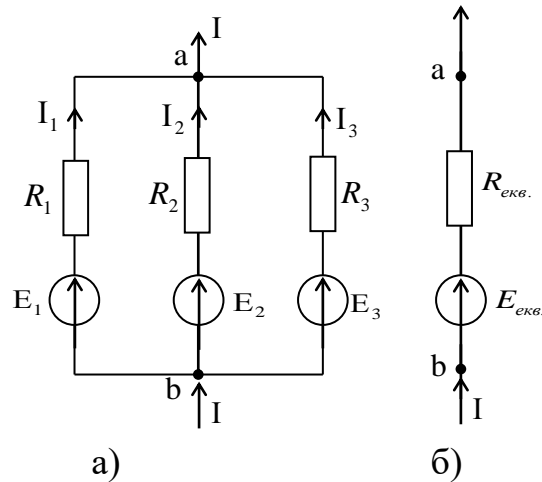


Рис.2.25

ж, як у заданій. Дві схеми рис. 2.26 будуть еквівалентні тільки в тому випадку, якщо при будь-яких значеннях струму  $I$ , що підтікає з усього кола, напруги на затисках  $a$  і  $b$  у цих схемах будуть однаковими.

Визначимо, чому будуть дорівнювати  $R_{екв}$  і  $E_{екв}$ . Користаючись методом вузлових потенціалів, запишемо вираз для струму у вигляді:

$$\begin{aligned}
 I &= I_1 + I_2 + I_3 = (E_1 - U_{ab}) \cdot G_1 + (E_2 - U_{ab}) \cdot G_2 + (E_3 - U_{ab}) \cdot G_3; \\
 I_1 &= (U_{ва} + E_1)/R_1; \\
 I_2 &= (U_{ва} + E_2)/R_2; \\
 I_3 &= (U_{ва} + E_3)/R_3; \\
 I &= E_1G_1 + E_2G_2 + E_3G_3 - U_{ab}(G_1 + G_2 + G_3).
 \end{aligned} \tag{2.24}$$

У загальному випадку, коли є « $n$ » віток:

$$I = \sum_{k=1}^n I_k = \sum_{k=1}^n E_k G_k - U_{ab} \sum_{k=1}^n G_k, \text{ де } k = 1 \dots n.$$

Для еквівалентної схеми:

$$I = (E_{екв} - U_{ab})/R_{екв} = E_{екв}G_{екв} - U_{ab}G_{екв}. \tag{2.25}$$

Так як умови еквівалентності повинні бути виконані при будь-якому струмі  $I$  і будь-якій напрузі  $U_{ab}$ , то, порівнюючи праві частини рівнянь (2.24) і (2.25), одержимо:

$$E_{екв} G_{екв} = E_1 G_1 + E_2 G_2 + E_3 G_3$$

$$U_{ab} G_{екв} = U_{ab}(G_1 + G_2 + G_3)$$

Звідки:

$$G = G_1 + G_2 + G_3$$

$$E_{екв} = \frac{E_1 G_1 + E_2 G_2 + E_3 G_3}{G_1 + G_2 + G_3}$$

У загальному виді:

$$G_{екв} = \sum_{k=1}^n G_k; E_{екв} G_{екв} = \sum_{k=1}^n E_k G_k, \text{ } k = 1 \dots n., \text{ звідки}$$

$$E_{екв} = \frac{\sum_{k=1}^n E_k G_k}{\sum_{k=1}^n G_k}$$

При визначенні еквівалентної ЕРС з позитивним знаком беруться ті ЕРС, що діють у напрямку того ж вузла (а), що й еквівалентна ЕРС  $E_{екв}$ , а з негативним знаком – діючі в напрямку іншого вузла (b).

У вітках з декількома ЕРС струми можуть протікати і при  $I = 0$ , у той час як при  $I=0$  в еквівалентній схемі споживання енергії відсутнє. Після визначення струму  $I$  в еквівалентній схемі можна повернутися до початкової, знайти реальні струми і потужності у всіх вітках.

### 2.1.12. Теорема компенсації

В електричному колі без зміни струморозподілення в ньому опір може бути замінено ЕРС, яка чисельно дорівнює падінню напруги на опорі, що змінюється, і направлена назустріч струму в опорі.

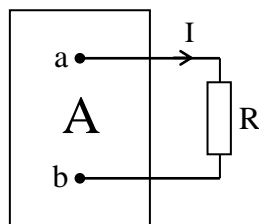


Рис. 2.26

Для доказу теореми виділимо з схеми вітку з опором  $R$  (рис. 2.26), всю іншу частину схеми подамо як активний двополіусник.

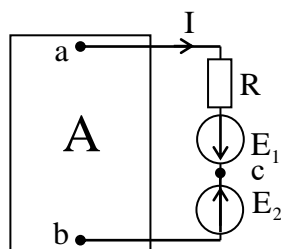


Рис.2.27

Включимо у виділену вітку дві однакові і протилежно направлені ЕРС (рис. 2.27), чисельно рівні падінню напруги на опорі  $R$ :

$$E_1 = - E_2 = IR.$$

При цьому струм в схемі не зміниться. Визначимо потенціал в точці «с»:  $\varphi_c = \varphi_a + E_1 - IR$ , але  $E_1 = IR$ , тобто  $\varphi_c = \varphi_a$ , а це означає, що схему можна уявити у вигляді (рис.2.28):

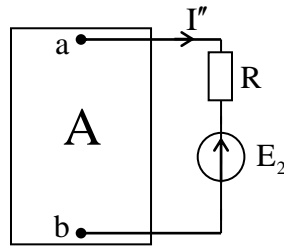


Рис.2.28

Відповідно опір  $R$  можна замінити ЕРС, яка чисельно дорівнює  $IR$  і направлена зустрічно струму.

## 2.2. ЛІНІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ОДНОФАЗНОГО СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

### 2.2.1. Періодичні синусоїдні ЕРС, напруги та струми

*Змінним струмом у широкому розумінні називають будь-який змінний за часом електричний струм.*

Так як такий струм змінюється за часом, то у будь-який момент часу ми маємо діло з миттєвими значеннями струму, напруги, ЕРС.

Під *миттєвим значенням* струму, напруги і ЕРС розуміють їх значення в даний момент часу.

В техніці найбільш часто використовують періодичні струми, ЕРС, напруги, миттєві значення яких повторюються через рівні проміжки часу.

Найменший проміжок часу, через який ці повторення спостерігаються, називаються періодом " $T$ ".

Період – це час, за який здійснюється одне повне коливання.

Для періодичної функції справедливе співвідношення:

$$F(t) = F(t + T) \quad (2.26)$$

Величину, зворотну періоду, називають частотою  $f = \frac{1}{T}$ , вона дорівнює числу коливань за одну секунду. Вимірюється частота у  $\frac{1}{c}$  або у герцах (Гц).

Величина  $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$  зветься кутовою частотою і вимірюється в  $\frac{рад}{c}$ . Миттєві значення синусоїдних ЕРС, струмів і напруг виражаються функціями:

$$\begin{aligned} i &= I_m \sin(\omega t + \psi_i) \\ u &= U_m \sin(\omega t + \psi_u) \\ e &= E_m \sin(\omega t + \psi_e) \end{aligned} \quad (2.27)$$

Найбільші значення ЕРС  $E_m$ , струму  $I_m$  та напруги  $U_m$  називаються амплітудами; аргументи  $\omega t + \psi_e$ ;  $\omega t + \psi_i$ ;  $\omega t + \psi_u$  - фазами, величини  $\psi_i, \psi_u, \psi_e$  – початковими фазами відповідно струму, напруги і ЕРС.

Фаза характеризує стан коливання, тобто числове значення величини у даний момент часу  $t$ .

Із збільшенням часу  $t$  фаза збільшується. Після збільшення фази на  $2\pi$  цикл зміни синусоїдної величин повторюється.

На рис. 2.29 за функціями (2.27) побудовані криві залежності напруги  $u$  та струму  $i$  від змінної частини аргументу  $\omega t$  (що те саме, від часу  $t$ ). Такі криві називаються хвильовими або часовими діаграмами (залежностями). Початкова фаза  $\psi$  відраховується від початку синусоїди до моменту початку підрахунку часу.

Початок синусоїди – це нульове її значення при переходу величини від негативного значення до позитивного.

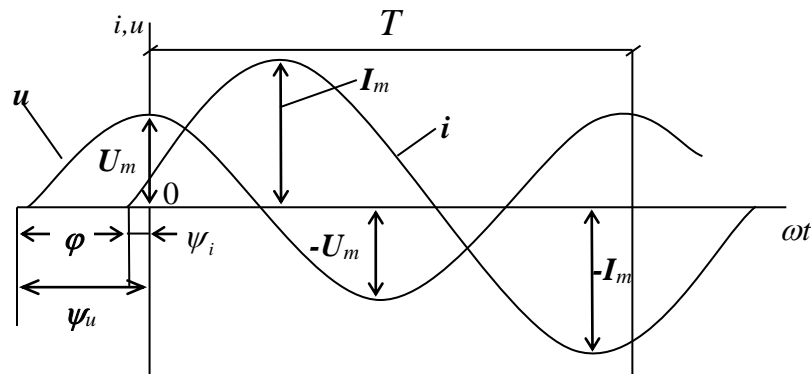


Рис.2.29

Таким чином, позитивні початкові фази мають синусоїди, зсунуті вліво від початку координат, тобто позитивні  $\psi$  відкладають від початку координат вліво, а негативні – вправо.

По осі абсцис можна відкласти час  $t$  або пропорційну йому величину  $\omega t$ . Період буде відповідно  $T$  або  $2\pi$ .

Різницю фаз напруги і струму  $\varphi = \psi_u - \psi_i$  називають **кутом зсуву фаз** між напругою та струмом. При  $\varphi = 0$  напруга і струм збігаються за фазою.

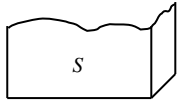
У більшості випадків прагнуть до того, щоб у електричних колах струми та напруги змінювались за синусоїдним законом.

В електротехніці більш всього мають діло зі змінним струмом, величина якого змінюється за періодичним несинусоїдним законом. У лінійних електричних колах змінний синусоїдний струм виникає під дією ЕРС тієї ж самої форми.

## 2.2.2. Одержання синусоїдної ЕРС

Синусоїдну ЕРС можна одержати, обертаючи виток в однорідному магнітному полі з кутовою швидкістю  $\omega$  навколо осі, перпендикулярної до напрямку ліній магнітної індукції (рис.2.30).

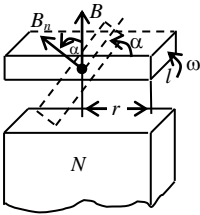
При  $\alpha = 0$ , тобто коли нормаль до площини витка співпадає з напрямком ліній магнітної індукції, магнітний потік через площу, обмежену витком, має найбільше значення:



$$\Phi_m = BS = B2rl, \text{ [Вб]} \quad (2.28)$$

де  $l$  – довжина активної сторони витка;

$B$  – числове значення магнітної індукції однорідного магнітного поля, у якому обертається виток.



При повороті витка на кут  $\alpha = \omega t$  величина магнітного потоку через площу, обмежену витком, має значення:

$$\Phi = 2rlB \cos \alpha, \quad (2.29)$$

Рис.2.30  
так як  $B_n = B \cos \alpha$ .

$$\Phi = \Phi_m \cos \alpha = \Phi_m \cos \omega t = \Phi_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (2.30)$$

При обертанні витка у магнітному полі у ньому наводиться ЕРС, величина якої може бути визначена як:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(\Phi_m \cos \omega t) = \omega \Phi_m \sin \omega t = E_m \sin \omega t \quad (2.31)$$

де  $E_m = \omega \Phi_m$ .

У початковий момент часу при  $t = 0$ , тобто при  $\alpha = 0$  наводиться ЕРС  $e = 0$ , а потік  $\Phi = \Phi_m$  при  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ ,  $\Phi = 0$ , а  $e = E_m$ .

Таким чином, миттєві значення потоку  $\Phi$  та електрорушійної сили змінюються за синусоїдним законом і дорівнюють:

$$\Phi = \Phi_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (2.32)$$

$$e = E_m \sin \omega t$$

Ми бачимо, що магнітний потік при своїй зміні у часу випереджає наведену ним ЕРС на кут  $\frac{\pi}{2}$ .

У даному випадку синусоїдне змінювання ЕРС одержуано за рахунок безперервної зміни кута, під яким витки перетинають лінії магнітної індукції. Однак такий спосіб отримання ЕРС не знайшов практичного використання, так як важко створити рівномірне поле в достатньо великому об'ємі.

В генераторі, який має  $p$  пар полюсів, за час одного оберту якоря виток проходить під  $p$  парами полюсів, тобто одному оберту відповідає  $p$  циклів зміни ЕРС.

Отже, при  $p \neq 1$

$$e = E_m \sin p\alpha = E_m \sin \omega t \quad (2.33)$$

Добуток  $p\alpha$  зветься електричним кутом:

$$p\alpha = \omega t. \quad (2.34)$$

Відношення електричного кута до часу зветься електричною кутовою швидкістю або кутовою частотою:

$$\omega = \frac{p\alpha}{t}. \quad (2.35)$$

При  $\alpha = 2\pi$  в генераторі з  $p = 1$  повний оберт витка буде за час  $t = T$ .

В генераторі  $p \neq 1$  повний оберт витка відповідає електричному куту  $p2\pi$  за той же час  $t = pT$ , де  $T$  – період ЕРС в багатополіусному генераторі.

$$\text{Тоді } \omega = \frac{p\alpha}{t} = \frac{p2\pi}{pT} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f, \text{ тобто } \omega = 2\pi f.$$

### 2.2.3. Середнє і діюче значення синусоїдних величин

Під середнім значенням змінного струму (ЕРС, напруги) розуміється середнє арифметичне значення всіх миттєвих значень за півперіод.

Середнє значення дорівнює висоті прямокутника, площа якого дорівнює площі  $S$ , яка обмежена позитивною півхвилею струму і віссю абсцис.

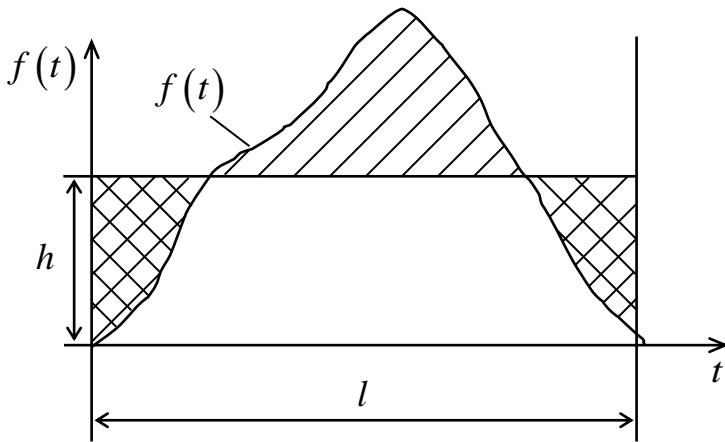


Рис.2.31

Так як для синусоїди середнє значення за період  $T$  дорівнює нулю, тобто  $\frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = 0$ , то величину середнього значення для синусоїдних функцій обчислюють за половину періоду.

Середнє значення струму:

$$I_{cp} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \frac{2I_m}{T} \int_0^{T/2} \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} I_m,$$

$$\text{тобто } I_{cp} = \frac{2}{\pi} I_m \cong 0,638 I_m. \quad (2.36)$$

$$\text{Аналогічно: } U_{cp} = \frac{2}{\pi} U_m; E_{cp} = \frac{2}{\pi} E_m. \quad (2.37)$$

На практиці частіше використовують поняття, яке відображає ефективність дії періодичного змінного струму, наприклад, при нагріванні проводу. Такі величини звуться **діючими або ефективними**.

Якщо порівняти теплову дію змінного і постійного струмів, то можна зробити висновок, що постійний струм, рівний амплітуді змінного, виділить більше тепла в одному й тому ж елементі кола за один і той же час, так як змінний струм за півперіод менше постійного, і лише одну мить ці струму рівні один одному.

Визначимо кількість тепла, яка виділяється за час  $t$ , який дорівнює  $T$ , при протіканні постійного струму  $I$  і змінного струму  $i = I_m \sin \omega t$  у елементі кола - опорі  $R$ :

$$Q_{пост} = I^2 RT. \quad (2.38)$$

Кількість тепла, яка виділяється змінним струмом в такому ж опорі за той же період  $T$  визначається з формули:

$$Q_{змін} = \int_0^T i^2 R dt. \quad (2.39)$$

Прирівнюючи вирази (2.38) та (2.39), та проводячи математичні викладки, одержимо вираз для діючого значення змінного струму:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}. \quad (2.40)$$

Аналогічно діюче значення напруги і ЕРС:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}; E = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2 dt}. \quad (2.41)$$

Згідно стандарту **діючі значення позначаються буквами без індексів  $I, U, E$** .

Зв'язок між діючим та максимальним значенням струму має вигляд:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (2.42)$$

Таким чином, діюче значення синусоїдного струму менше його амплітуди в  $\sqrt{2}$  разів.

$$\text{Аналогічно: } U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}. \quad (2.43)$$

Для характеристики форми симетричних кривих користуються двома коефіцієнтами: коефіцієнтом форми і коефіцієнтом амплітуди.

Під **коефіцієнтом форми** кривої розуміють відношення діючого значення до середнього:

$$K_{\phi} = \frac{E}{E_{cp}}. \quad (2.19)$$

Під **коефіцієнтом амплітуди** кривої розуміють відношення максимального значення до діючого значення, тобто:



$$K_a = \frac{E_m}{E}. \quad (2.44)$$

Для синусоїди ці коефіцієнти дорівнюють:

$$K_a = \frac{E_m}{E} \sqrt{2} = \sqrt{2} = 1,41; K_\phi = 1,11 \quad (2.45)$$

Криві, які мають більш загострену форму, чим синусоїда, характеризуються:  $K_a > 1,41$  і  $K_\phi > 1,11$ , а криві, які мають плоску форму, -  $K_a < 1,41$  і  $K_\phi < 1,11$ .

Більшість вимірювальних приладів показують діючі значення вимірюваної величини. Діючі значення вимірюють прилади електромагнітної, електродинамічної та теплової системи.

### 2.2.4. Відображення синусоїдних функцій векторами

При розрахунках кіл виникають задачі складання або віднімання синусоїдних функцій часу. Наприклад, для вузла електричного кола (рис.2.32) згідно першого закону Кірхгофа складаємо рівняння:

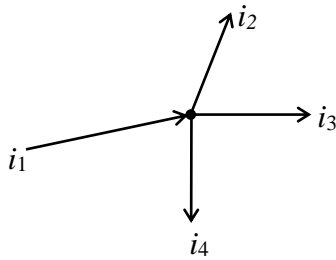


Рис. 2.32

$$i_1 = i_2 + i_3 + i_4 \quad (2.46)$$

**Якщо відомі струми:**

$$i_2 = I_{m2} \sin(\omega t + \psi_2); \quad i_3 = I_{m3} \sin(\omega t + \psi_3);$$

$i_4 = I_{m4} \sin(\omega t + \psi_4)$ , то для визначення закону зміни струму  $i_1$  за часом треба відобразити криві  $i_2$ ,  $i_3$  і  $i_4$  і графічно їх скласти.

Нехай ми маємо функцію  $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ . У прямокутній системі координат розташуємо під кутом  $\psi$  відносно горизонтальної осі ОМ вектор  $\bar{I}_m$  (рис.2.33), довжина якого у масштабі дорівнює амплітуді  $I_m$ . Позитивні кути  $\psi$  відкладаємо від осі ОМ проти годинникової стрілки.

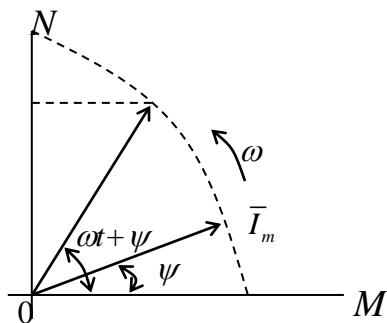


Рис.2.33

Уявимо собі, що вектор  $\bar{I}_m$ , починаючи з моменту часу  $t = 0$ , обертається навколо початку координат 0 проти годинникової стрілки з постійною кутовою швидкістю  $\omega$ .

Через деякий час  $t$  вектор  $\bar{I}_m$  складатиме з віссю ОМ кут  $\omega t + \psi$ . Проекція вектора  $\bar{I}_m$ , що обертається, на вісь ОН дорівнює миттєвому значенню функції часу, що розглядається:

$$i = I_m \cos(90 - (\omega t + \psi)) = I_m \sin(\omega t + \psi). \quad (2.47)$$

Вектор  $\bar{I}_m$  відображає синусоїдну функцію часу, якщо довжина вектора в певному масштабі дорівнює амплітудному значенню функції, і

вектор складає з позитивним напрямком горизонтальної вісі кут, який дорівнює початковій фазі функції, а при обертанні вектора у позитивному напрямку (тобто проти годинної стрілки) з постійною кутовою швидкістю  $\omega$  проєкції на вертикальну ось дають миттєві значення синусоїдної функції часу.

Вектори, які відображають синусоїдні функції часу, позначаються такими ж буквами що і максимальні значення  $\bar{U}_m, \bar{I}_m, \bar{E}_m$  цих функцій, але з рисою над буквою.

**Сукупність векторів, зображених синусоїдними функціями часу однієї і тієї ж частоти, побудованих у певній орієнтації відносно один одного, називають векторною діаграмою.**

Розглянемо приклад складання двох синусоїдних функцій часу за допомогою векторів.

Треба скласти два струми, які задані рівняннями:

$$\begin{aligned} i_1 &= I_{m1} \sin(\omega t + \alpha) \\ i_2 &= I_{m2} \sin(\omega t + \beta) \end{aligned} \quad (2.48)$$

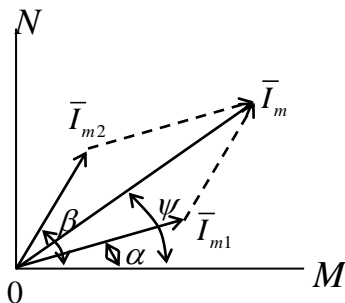


Рис. 2.34

і визначити їх суму :  $i = i_1 + i_2$  (рис.2.34).

Для цього відобразимо струми у вигляді векторів з початком у точці 0. Струм  $i_1$  відобразимо на площині вектором  $\bar{I}_{1m}$ , який складає кут  $\alpha$  з прямою OM, а струм  $i_2$ , - вектором  $\bar{I}_{2m}$ , що складає кут  $\beta$  відносно прямої OM. Геометрична сума векторів  $\bar{I}_{1m}$  та  $\bar{I}_{2m}$  дасть амплітуду сумарного струму:  $\bar{I}_{1m} + \bar{I}_{2m} = \bar{I}_m$ .

Нехай з моменту часу  $t = 0$  ці вектори обертаються у позитивному напрямку з постійною кутовою швидкістю  $\omega$  навколо початку координат 0. Проекція вектора сумарного струму  $\bar{I}_m$ , що обертається, на вертикальну вісь в будь-який момент часу дорівнює сумі проєкцій на ту ж вісь векторів  $\bar{I}_{m1}$  і  $\bar{I}_{m2}$ , що обертаються, тобто сумі їх миттєвих значень  $i_1$  і  $i_2$ . Отже, вектор  $\bar{I}_m$  відображає струм, що шукається  $i = i_1 + i_2$ .

Визначивши з діаграми довжину вектора  $\bar{I}_m$  і кут  $\psi$ , можемо записати вираз для струму, який шукаємо:  $i = I_m \sin(\omega t + \psi)$ .

## 2.5. Зображення синусоїдних функцій часу векторами і комплексними числами на комплексній площині

Застосування векторних діаграм до розрахунку кіл змінного струму спрощує розрахунки. Однак, як і всі графічні побудови, векторні діаграми не завжди дають достатню точність і, що більш істотне, не завжди дають розв'язок загального характеру.

Тому застосовують метод комплексних амплітуд, заснований на зображенні векторів комплексними числами, а так як синусоїдні функції часу

можливо зобразити векторами, то синусоїдні змінні величини можуть бути зображені комплексними числами.

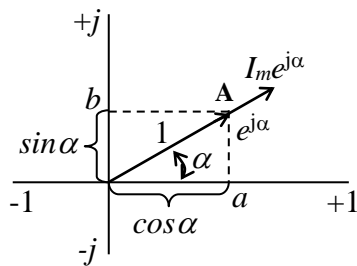
Даний метод дозволяє звести геометричні операції над векторами до алгебраїчних операцій над комплексними числами.

Розглянемо головні положення методу комплексних амплітуд.

На рис. 2.35 показана комплексна площина, на якій можуть бути зображені комплексні числа. Комплексне число має дійсну і уявну частини. По осі абсцис комплексної площини відкладають дійсну частину комплексного числа, по осі ординат – уявну частину.

Вісь дійсних значень позначають  $+1, -1$ , а вісь уявних значень  $- +j, -j$  ( $j = \sqrt{-1}$ ).

Зобразимо комплексне число:  $e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \sin \alpha$  на комплексній



площині. Дане комплексне число відображають на комплексній площині вектором, який чисельно дорівнює одиниці і складає кут  $\alpha$  з віссю дійсних значень (віссю  $+1$ ). Кут  $\alpha$  відраховуємо проти годинникової стрілки від вісі  $+1$ . Модуль функції  $e^{j\alpha}$  дорівнює:

$$|e^{j\alpha}| = \sqrt{\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} = 1. \quad (2.49)$$

Рис. 2.35

Проекція функції  $e^{j\alpha}$  на вісь  $+1$  дорівнює  $\cos \alpha$ , а на вісь  $+j$  дорівнює  $\sin \alpha$ . З початку координат проведемо у точку “А” вектор. Модуль цього вектора дорівнює одиниці.

Таким чином, комплексне число  $e^{j\alpha}$  можна зобразити на комплексній площині вектором, який складає з дійсною віссю кут  $\alpha$  і за модулем дорівнює одиниці.

Якщо замість функції  $e^{j\alpha}$  взяти функцію  $I_m e^{j\alpha}$ , то

$$I_m e^{j\alpha} = I_m \cos \alpha + j I_m \sin \alpha. \quad (2.50)$$

На комплексній площині ця функція, так як і функція  $e^{j\alpha}$ , зобразиться вектором, що складає кут  $\alpha$  з віссю  $+1$ , але величина його буде в  $I_m$  разів більше.

Кут  $\alpha$  може бути будь-яким. Покажемо, що  $\alpha = \omega t + \psi$ , тобто кут  $\alpha$  є змінним за часом. Тоді  $I_m e^{j\alpha(\omega t + \psi)} = I_m \cos(\omega t + \psi) + j I_m \sin(\omega t + \psi)$ .

Додаток  $I_m \cos(\omega t + \psi)$  являє собою дійсну частину (Re) виразу  $I_m e^{j(\omega t + \psi)}$ :

$$I_m \cos(\omega t + \psi) = \text{Re}(I_m e^{j(\omega t + \psi)}), \quad (2.51)$$

а функція  $I_m \sin(\omega t + \psi)$  є коефіцієнт при уявній частині (Im) виразу  $I_m e^{j(\omega t + \psi)}$ :

$$I_m \sin(\omega t + \psi) = \text{Im}(I_m e^{j(\omega t + \psi)}). \quad (2.52)$$

Математичний запис (2.27) означає, що вираз  $I_m \cos(\omega t + \psi)$  дорівнює дійсній частині комплексного числа  $I_m e^{j(\omega t + \psi)}$ , а запис (2.52) означає, що вираз  $I_m \sin(\omega t + \psi)$  дорівнює його уявній частині.

Таким чином, можна сказати, що миттєве значення синусоїдної функції часу може бути подане як уявна частина якогось комплексного числа, модуль якого дорівнює амплітудному значенню функції, а аргумент дорівнює її фазі:

$$I_m \sin(\omega t + \psi) = \text{Im}\left(I_m e^{j(\omega t + \psi)}\right) \quad (2.53)$$

Запис синусоїдної функції у вигляді уявної частини комплексного числа (2.53) називають комплексним записом даної синусоїдної функції часу, а саме комплексне число  $I_m e^{j(\omega t + \psi)}$  - комплексним зображенням даної синусоїдної функції:

$$I_m e^{j(\omega t + \psi)} = I_m e^{j\psi} e^{j\omega t}. \quad (2.54)$$

$I_m e^{j\psi}$  не залежить від часу, це постійна величина даної синусоїдної функції, її позначають  $I_m e^{j\psi} = \underline{I}_m$ . Другий множник  $e^{j\omega t}$  залежить від часу.  $\underline{I}_m$  називають комплексною амплітудою струму  $i$ . Комплексна амплітуда відображає струм  $i$  на комплексній площині для моменту часу  $t = 0$ .

Множник  $e^{j\omega t}$  зветься оператором обертання. Множення комплексної амплітуди  $\underline{I}_m$  на  $e^{j\omega t}$  означає обертання вектора  $I_m$  на кут  $\omega t$  у позитивному напрямку.

Під комплексом діючого значення струму  $\underline{I}$  розуміють частку від ділення комплексної амплітуди на  $\sqrt{2}$ :  $\underline{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi} = I e^{j\psi}$ . Аналогічно:

$$\underline{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; \underline{E} = \frac{E_m}{\sqrt{2}}.$$

**Приклад 1.** Струм  $i = 14 \sin(\omega t + 30^\circ)$ . Записати вираз комплексної амплітуди цього струму.

Розв'язання:  $I_m = 14$  А,  $\varphi = 30^\circ$ .

**Приклад 2.** Комплексна амплітуда струму  $\underline{I}_m = 35 e^{-j10}$ . Записати вираз миттєвого значення струму  $i = 35 \sin(\omega t - 10^\circ)$ .

Розв'язання: Для переходу від комплексної амплітуди до миттєвого значення треба помножити  $\underline{I}_m$  на оператор обертання  $e^{j\omega t}$  і взяти вираз для уявної частини від одержаного виразу:

$$i = \text{Im}\left(35 e^{-j10} e^{j\omega t}\right) = \text{Im}\left(35 e^{j(\omega t - 10)}\right) = 35 \sin(\omega t - 10^\circ).$$

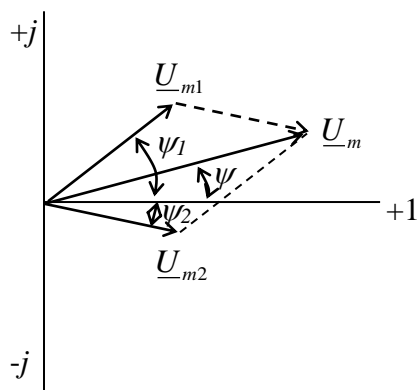
**Приклад 3.** Струм  $i = 8 \sin(\omega t + 20)$ . Записати комплекс діючого значення струму.

Розв'язання:  $\underline{I} = \frac{8}{\sqrt{2}} e^{j20}$ .

**Приклад 4.** Знайти суму гармонійних функцій часу  $u = u_1 + u_2$ , де  $u_1 = U_{m1} \sin(\omega t + \psi_1)$ , а  $u_2 = U_{m2} \sin(\omega t - \psi_2)$ . Розглянемо два метода розв'язання.

1. Розв'язання за допомогою векторної діаграми.

Відкладемо на комплексній площині вектори:  $\underline{U}_{m1} = U_{m1} e^{j\psi_1}$  і  $\underline{U}_{m2} = U_{m2} e^{j\psi_2}$   $\psi_1 > 0$  а  $\psi_2 < 0$ . Графічно визначаємо вектор  $\underline{U}_m = U_m e^{j\psi}$ , який дорівнює сумі векторів  $\underline{U}_{m1}$  і  $\underline{U}_{m2}$ . Проекція сумарного вектора  $U_m e^{j(\omega t + \psi)}$  на вертикальну вісь у будь-який момент часу дорівнює сумі проекцій на ту ж



вісь векторів  $U_{m1} e^{j(\omega t + \psi_1)}$  і  $U_{m2} e^{j(\omega t - \psi_2)}$ , тобто дорівнює сумі їх миттєвих значень  $u_1$  і  $u_2$ . Отже, проекція вектора  $U_m e^{j(\omega t + \psi)}$  дорівнює сумі, яку ми шукаємо, а вектор  $\underline{U}_m = U_m e^{j\psi}$  зображає функцію часу  $u = u_1 + u_2$ , яку треба знайти. Визначивши із діаграми довжину вектора  $U_m$  і кут  $\psi$ , можна записати вираз для шуканої величини:  $u = U_m \sin(\omega t + \psi)$ .

2. Аналітичне розв'язання.

На підставі побудови за векторною діаграмою можна записати:

$$\underline{U}_m = \underline{U}_{m1} + \underline{U}_{m2}.$$

Щоб провести сумування комплексних чисел, їх треба записати у алгебраїчній формі:

$$\underline{U}_{m1} = U_{m1}' + jU_{m1}'', \quad \underline{U}_{m2} = U_{m2}' - jU_{m2}''.$$

Підсумувавши ці два комплексних числа, одержимо:  $\underline{U}_m = U_m' + jU_m''$ , де  $U_m' = U_{m1}' + U_{m2}'$ , а  $U_m'' = U_{m1}'' + U_{m2}''$ . Знайдемо  $U_m = \sqrt{(U_m')^2 + (U_m'')^2}$ ,  $\text{tg}\psi = \frac{U_m''}{U_m'}$ .

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi).$$

З наведеного раніше можна зробити висновок, що комплексне число може бути символічно зображене вектором на комплексній площині. Вектор, у свою чергу, відображає синусоїдну зміну за часом функції. Отже, синусоїдна функція часу може бути зображена комплексним числом.

При зображенні комплексними числами синусоїдних функцій часу домовились зображати ці комплексні числа тими ж буквами, що і відповідні амплітуди чи діючі значення, але з ризикою знизу.

## 2.6. Множення вектора на $+j$ і $-j$

Нехай ми маємо деякий вектор  $\underline{A} = A e^{j\alpha}$  (рис.2.8). Помножимо цей вектор на  $+j$  та на  $-j$ . Запишемо  $+j$  і  $-j$  у такому вигляді:

$$e^{j90^\circ} = \cos 90^\circ + j \sin 90^\circ = j \quad (2.55)$$

$$e^{-j90^\circ} = \cos 90^\circ - j \sin 90^\circ = -j \quad (2.56)$$

Помножимо вектор  $\underline{A}$  на  $+j$ , отримаємо:

$$j\underline{A} = e^{j90^\circ} A e^{j\alpha} = A e^{j(\alpha+90^\circ)} \quad (2.57)$$

Тобто помноження вектора  $\underline{A}$  на  $+j$  дає вектор за модулем рівний  $A$ , але повернутий у бік випередження (проти годинникової стрілки) по відношенню до початкового вектора  $\underline{A}$  на  $90^\circ$ . Множення вектора  $\underline{A}$  на  $-j$  обертає вектор  $\underline{A}$  на  $90^\circ$  у бік відставання (за годинниковою стрілкою) також без зміни його модуля (рис.2.36):

$$-j\underline{A} = e^{-j90^\circ} A e^{j\alpha} = A e^{j(\alpha-90^\circ)}$$

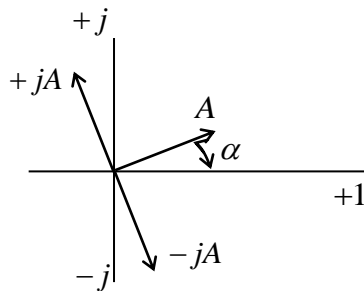


Рис.2.36

## 2.7. Параметри і елементи електричних кіл однофазного синусоїдного струму

Для спрощення дослідження процесів у реальних електричних колах змінного струму їх заміняють ідеалізованими колами, які складені із елементів.

Пасивними елементами кола при змінних струмах є: опір  $R$ , індуктивність  $L$ , і ємність  $C$ . Назва елементів кола співпадає з назвою параметрів кола, які ці елементи характеризують.

Таким чином, параметрами відокремленого кола змінного струму є опір  $R$ , ємність  $C$ , індуктивність  $L$ . Під відокремленим колом розуміють коло, яке не підлягає електромагнітному впливу з боку других кіл.

Якщо такий вплив має місто, або є у відокремленому колі з боку однієї його ділянки вплив на другу, то до параметрів кола ввійде ще і взаємна індуктивність „ $M$ ”.

**Опір** – це (як раніше було визначено) ідеалізований елемент кола, у якому відбуваються не обернені процеси перетворення електричної енергії у теплову. Термін „опір” і відповідне йому умовне позначення “ $R$ ” використовують як для позначення самого елемента, в якому відбуваються не обернені процеси перетворення електромагнітної енергії, так і для кількісної оцінки величини, яка дорівнює відношенню напруги на даному елементі кола до струму, який протікає через нього:

$$R = \frac{u}{i} \text{ [Ом]}. \quad (2.58)$$

У цьому випадку “ $R$ ” є параметром кола.

**Індуктивність** – це ідеалізований елемент кола, що наближається за своїми якостям до індуктивної котушки, у якій накопичується енергія магнітного поля. Термін „індуктивність” і відповідне йому умовне позначення “ $L$ ” використовують як для позначення самого елемента кола, так і для кількісної оцінки відношення потокозчеплення самоіндукції до струму у даному елементі:

$$L = \frac{\Psi}{i} \text{ [Гн]}. \quad (2.59)$$

У цьому випадку “ $L$ ” є параметром кола.

*Потокозчепленням самоіндукції* зветься добуток магнітного потоку, обумовленого тільки струмом у цьому колі, на кількість витків, якщо вони всі пронизуються цим магнітним потоком (або сума додатків магнітних потоків, обумовлених тільки струмом у даному колі, на кількість витків, з якими ці потоки зчеплені):  $\psi = \Phi w$ .

**Ємністю** зветься ідеалізований елемент кола, у якому накопичується енергія електричного поля. Термін „ємність” і відповідне йому позначення “ $C$ ” використовують як для позначення елемента кола, так і для кількісної оцінки відношення заряду до напруги на цьому елементі:

$$C = \frac{q}{u} \text{ [Ф]}. \quad (2.60)$$

У цьому випадку “ $C$ ” є параметром кола.

Взаємна індуктивність не є елементом електричного кола, а лише вказує на магнітний зв’язок між індуктивними елементами:

$$M = \frac{\Phi_{12} w_1}{i_2} = \frac{\Phi_{21} w_2}{i_1} \quad (2.37)$$

*Взаємна індуктивність  $M$  є параметром електричного кола*, так як дає кількісну оцінку відношенню потокозчеплення взаємоіндукції даного елемента до струму у індуктивно зв’язаному елементі.

Кола, в яких ми можемо розглядати перетворення електромагнітної енергії у інші види, або її накопичення у певних місцях електричного кола (у пасивних елементах) називаються *колами з зосередженими параметрами*.

Якщо залежність параметрів кола від струму та напруги є слабкою, то нею можна знехатати, і процеси у таких колах можливо описувати лінійними диференційними рівняннями, а такі кола зветься *лінійними електричними колами*.

## 2.8. Миттєва потужність

Протікання синусоїдних струмів по ділянках електричного кола супроводжується споживанням енергії від джерела. Швидкість надходження енергії характеризується потужністю.

Під миттєвим значенням потужності розуміють добуток миттєвого значення напруги  $u$  на ділянці кола на миттєве значення струму  $i$ , який тече по цій ділянці:

$$p = ui, \quad (2.38)$$

де  $p$  - функція часу.

Перед тим, як приступити до вивчення основ розрахунку складних кіл синусоїдного струму, розглянемо співвідношення між струмами і напругами у простих колах, векторні діаграми для них та криві миттєвих значень різноманітних величин.

Термін „опір” на відміну від кіл постійного струму, є недостатньо повним, так як опір змінному струму чинять не тільки елементи, в яких виділяється енергія у вигляді тепла (їх зовуть активними опорами), але і ті елементи кола, у яких періодично запасасться енергія у електричних та магнітних полях. Такі елементи кола зовуться реактивними, а їх опори змінному струму - реактивними опорами. Реактивними опорами володіють індуктивні котушки та конденсатори.

## 2.9. Резистор у колі синусоїдного струму

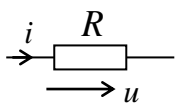


Рис.2.37

Електричні лампи розжарювання, побутові прилади, реостати та інші приймачі, де електрична енергія перетворюється в теплову, на схемах заміщення електричних кіл як правило представлені тільки резистором  $R$ . На рис.2.37 зображений резистор, через який тече струм:

$$i = I_m \sin \omega t. \quad (2.61)$$

Згідно закону Ома напруга на резисторі дорівнює:

$$u = iR = I_m R \sin \omega t = U_m \sin \omega t, \quad (2.62)$$

де  $U_m = RI_m$ .

При змінних значеннях напруги і струму швидкість перетворення електричної енергії в опорі, тобто її потужність, теж змінюється. Миттєве значення потужності дорівнює добутку миттєвих значень струму та напруги:  
 $p = ui$ .

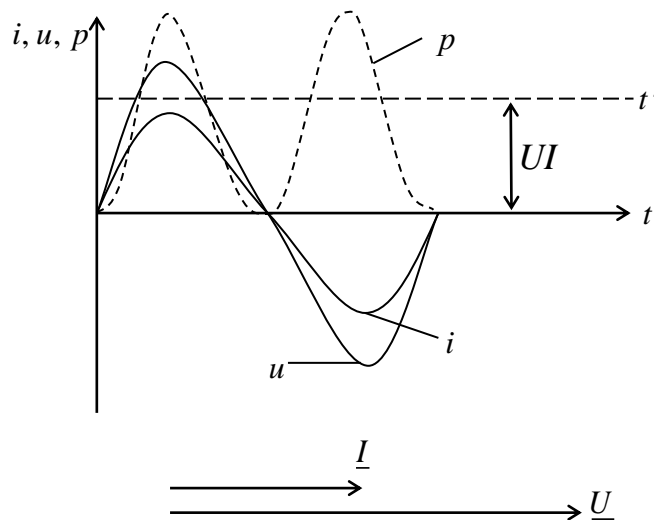
Підставляючи миттєве значення струму та напруги, отримаємо рівняння миттєвої потужності у вигляді:

$$p = ui = U_m \sin \omega t I_m \sin \omega t = U_m I_m \sin^2 \omega t = \frac{U_m I_m}{2} (1 - \cos 2\omega t) = UI (1 - \cos 2\omega t). \quad (2.63)$$



Миттєва потужність має постійну складову  $UI$  та складову  $UI \cos 2\omega t$ , яка змінюється з частотою  $2\omega$ . Енергія, споживана від джерела енергії за час  $dt$ , дорівнює  $pdt$ .

Більш наглядне уявлення про характер зміни потужності у колах дає графік (рис.2.38), на якому зображені криві миттєвих значень струму  $i$ , напруги  $u$  та потужності  $p$  у залежності від часу  $t$ .



Векторна діаграма кола з активним опором

Рис.2.38

Якщо вісь часу  $t$  на графіку щодо кривої  $p$  підняти на величину  $UI$ , то відносно нової вісі  $t'$  графік потужності буде синусоїдою з подвійною частотою та початковою фазою  $90^\circ$ .

Аналізуючи графік миттєвої потужності, легко побачити, що потужність за період залишається позитивною, незалежно від того, що струм та напруга змінюють свій знак. Це виникає тому, що напруга та струм співпадають за фазою (див. векторну діаграму рис.2.38).

Постійність знаку потужності говорить про те, що напрям потоку електричної енергії залишається на протязі періоду незмінним, в даному випадку від джерела енергії до споживача з опором  $R$ , де електрична енергія необернено перетворюється в інший вид енергії. Електрична енергія в цьому випадку називається активною.

Активну потужність оцінюють середнім значенням потужності за період:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt. \quad (2.64)$$

З математичної точки зору активна потужність є постійною складовою у рівнянні миттєвої потужності, так як:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{U_m I_m}{2T} \int_0^T dt - \frac{U_m I_m}{2T} \int_0^T \cos 2\omega t dt, \text{ але } \int_0^T \cos 2\omega t dt = 0.$$

Тому:

$$P = \frac{U_m I_m}{2} = UI. \quad (2.65)$$

## 2.10. Індуктивність у колі синусоїдного струму

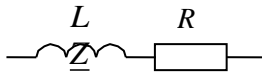


Рис.2.39

Кожна обмотка (катушка) має деяку індуктивність  $L$  та активний опір  $R$ . На схемі катушки можна показати у вигляді послідовного з'єднання індуктивності  $L$  та актив-

ного опору  $R$  (рис.2.39).

Виділимо із схеми тільки індуктивність  $L$  (без активного опору) (рис.2.40). Припустимо, що для кола рис.2.40 відомі

індуктивність  $L$  і струм, який змінюється по закону:  $i = I_m \sin \omega t$ . Треба визначити напругу і потужність у колі.

Рис.2.40

Змінний струм у колі викликає ЕРС самоіндукції. При відсутності активного опору прикладена до катушки напруга урівноважується тільки ЕРС самоіндукції, тому згідно другому закону Кірхгофа у будь-який момент часу:

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt} = \omega L I_m \cos \omega t = \omega L I_m \sin(\omega t + 90^\circ), \quad (2.66)$$

$$\text{тобто } u_L = u = U_m \sin(\omega t + 90^\circ), \quad (2.67)$$

де  $U_m = \omega L I_m$ .

Діюче значення напруги визначається з рівняння:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \omega L \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad U = I \omega L = IX_L, \quad (2.68)$$

де  $X_L = \omega L$  - індуктивний опір.

Одиниця вимірювання індуктивного опору:.

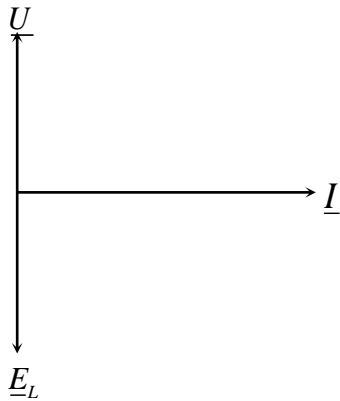
$$[X_L] = [\omega][L] = [c^{-1} \text{ Ом} \cdot c] = \text{Ом}$$

Таким чином, індуктивна катушка чинить змінному струму опір, модуль якого  $X_L = \omega L$  прямо пропорційний частоті. Крім того, напруга на індуктивності випереджає струм за фазою на  $90^\circ$  (рис.2.41).

*Індуктивний опір з фізичної точки зору нічого спільного зі звичним опором не має. Поняття про індуктивний опір введено формально щоб облегшити розрахунки. Він замінює у розрахунках вплив ЕРС самоіндукції на струм у колі, тобто відображає інерційні якості електричного кола.*

З рівнянь для струму та напруги індуктивного кола видно, що у колі з індуктивністю струм відстає від напруги за фазою на чверть періоду або у кутовій мірі на  $\frac{\pi}{2}$ .

На векторній діаграмі (рис.2.41) це знаходить відображення у тому, що вектор струму відстає від вектора напруги на  $\frac{\pi}{2}$ .



Вектор ЕРС самоіндукції  $\underline{E}_L$  знаходиться у протифазі з вектором прикладеної напруги  $\underline{U}$ .

*Миттєва та реактивна потужності.*

Миттєве значення потужності дорівнює:

$$p = ui = U_m \sin(\omega t + 90^\circ) I_m \sin \omega t = U_m I_m \cos \omega t \sin \omega t = \frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t \quad (2.69)$$

Рис.2.41

Графік зміни потужності (рис.2.42) являє собою синусоїду подвоєної частоти з амплітудою:

$$\frac{U_m I_m}{2} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \frac{I_m}{\sqrt{2}} = UI \quad (2.70)$$

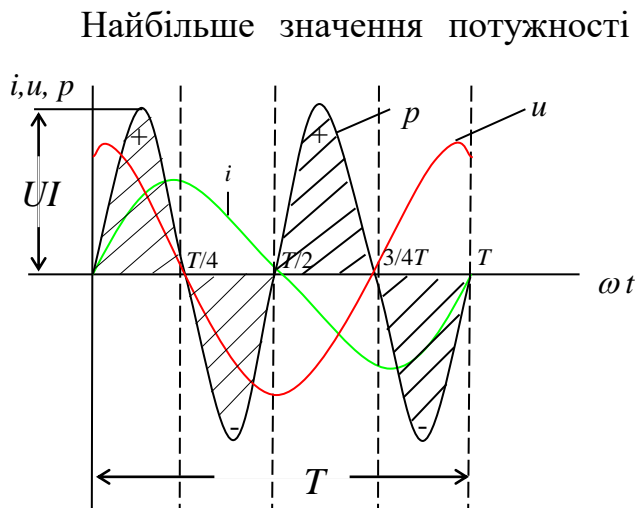


Рис. 2.42

Найбільше значення потужності у колі з індуктивністю дорівнює добутку діючих значень напруги та струму. Відобразимо графічно  $i$ ,  $u$ ,  $p$ . Щоб зрозуміти фізичні поняття енергетичних процесів у колі з індуктивністю, звернемо увагу на графік потужності, з якого видно, що миттєва

потужність за період чотири

рази змінює знак (у моменти часу  $T/4$ ,  $T/2$ ,  $3/4T$ ,  $T$ ), так як вона

має нульові значення у ті моменти часу, коли струм  $i$  або напруга  $u$  дорівнює нулю. Зміна знаку потужності означає, що напрямок потоку енергії змінюється.

У першу чверть періоду, коли струм та напруга мають однаковий знак, тобто "+", потужність теж позитивна. Струм збільшується, енергія накопичується у магнітному полі котушки за рахунок енергії джерела. Котушка у цей час є приймачем енергії, струм має напрям протилежний ЕРС самоіндукції.

У другу чверть періоду, коли струм зменшується, енергія магнітного поля, яка запасалася у індуктивності  $L$ , віддається назад джерелу живлення. При цьому миттєва потужність негативна. Напрямки ЕРС самоіндукції та струму у котушці співпадають – котушка у цей час є джерелом енергії.

У наступну половину періоду процес повторюється. Легко замітити, що кількість енергії, яка накопичується у котушці за одну чверть періоду (заштрихована площа “+”) дорівнює кількості енергії, яка повертається назад у наступну чверть періоду (заштрихована площа “-“).

Середня (активна) потужність за період дорівнює нулю ( $P = 0$ ), так як у колі з індуктивністю перетворення електричної енергії у інші види енергії (теплову чи механічну) відсутнє.

Швидкість накопичення або зменшення енергії магнітного поля змінюється згідно гармонійного закону. Амплітуда кривої миттєвої потужності  $Q$ , яка носить назву реактивної потужності, є характеристикою цього процесу. Одиниця потужності у цьому випадку має назву „ВАр” – вольт-ампери реактивні.

## 2.11. Ємність у колі синусоїдного струму

Якщо прикладена до конденсатора напруга не змінюється за часом, то заряд  $q = CU$  на одній його обкладці та заряд  $-q = -CU$  на другій ( $C$  – ємність конденсатору) незмінні і струму через конденсатор немає:  $i = \frac{dq}{dt} = 0$ .

Якщо напруга на конденсаторі змінюється за часом, наприклад, за синусоїдним законом:

$$u = U_m \sin \omega t, \quad (2.71)$$

то за синусоїдним законом буде змінюватись і заряд  $q$  конденсатора:  $q = Cu = CU_m \sin \omega t$  і конденсатор буде періодично перезаряджатися. Періодична перезарядка конденсатора супроводжується течією через нього зарядного струму:

$$\begin{aligned} i &= \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(CU_m \sin \omega t) = \omega CU_m \cos \omega t = \\ &= \omega CU_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \end{aligned} \quad (2.72)$$

де  $I_m = \omega CU_m$  – амплітуда струму. (2.73)

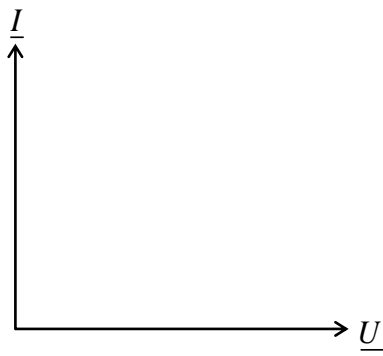


Рис.2.43

З рівнянь (2.49) і (2.50) бачимо, що струм через конденсатор випереджує за фазою напругу на конденсаторі на  $\frac{\pi}{2}$ . На векторній діаграмі (рис.2.43) вектор струму  $\underline{I}$  випереджає вектор напруги  $\underline{U}$  на  $\frac{\pi}{2}$ . З рівняння (2.51) маємо, що

$$U_m = I_m \frac{1}{\omega C} = I_m X_c, \text{ де } X_c = \frac{1}{\omega C}.$$

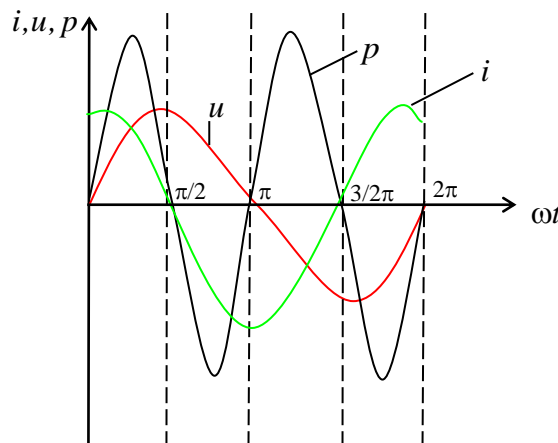


Рис.2.44

Величину  $X_c = \frac{1}{\omega C}$  називають реактивним опором ємності або ємнісним опором. Ємнісний опір пропорційний частоті і вимірюється в Омах.

На рис.2.44 показаний графік залежності миттєвих значень  $u, i, p$  від  $\omega t$ . Побудова графіка миттєвої потужності виконується так, як і для кола з індуктивністю, якщо мати на увазі, що миттєва потужність є такий же

добуток:  $p = ui = U_m I_m \sin \omega t \cos \omega t = \frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t$ . З графіка

бачимо, що миттєва потужність, як і у колі з індуктивністю, чотири рази за період змінює знак. У першу чверть періоду конденсатор споживає енергію від джерела живлення. Ця енергія іде на створення електричного поля у конденсаторі, конденсатор заряджається, напруга на конденсаторі збільшується. За другу чверть періоду енергія, яка запасується у електричному колі, віддається джерелу (миттєва потужність негативна), напруга зменшується. Потім усе повторюється.

Активна потужність у колі з ємністю дорівнює нулю ( $P=0$ ), а реактивна потужність дорівнює добутку діючих значень напруги та струму:

$$Q = UI = U^2 \omega C. \quad (2.74)$$

Таким чином, у колі з ємністю, як і у колі з індуктивністю, перетворення електричної енергії у інші види енергії немає.

## 2.12. Символічний методу розрахунку електричних кіл з послідовним з'єднанням елементів

Дуже широке розповсюдження на практиці отримав символічний, або комплексний, метод розрахунку кіл синусоїдного струму.

Суть символічного методу розрахунку у тому, що для режиму синусоїдного струму можливо перейти від рівнянь, складених щодо миттєвих значень, які по суті є диференційними рівняннями, до алгебраїчних рівнянь, складених щодо комплексів струмів та ЕРС. Цей перехід засновано на тому, що у будь-якому рівнянні, складеному згідно законів Кірхгофа, миттєве значення струму  $i$  замінюють комплексною амплітудою струму  $\underline{I}_m$ , миттєве значення напруги на активному опорі, яке дорівнює  $iR$ , замінюють комплексом  $R\underline{I}_m$ , який за фазою співпадає зі струмом  $\underline{I}_m$ ; миттєве значення напруги на індуктивності  $u_L = L \frac{di}{dt}$  - комплексом  $\underline{I}_m j\omega L$ , який випереджає струм на  $90^\circ$ ; миттєве значення напруги на ємність  $u_C = \frac{1}{C} \int idt$  - комплексом  $\underline{I}_m \left( \frac{-j}{\omega C} \right)$ , який відстає від струму на  $90^\circ$ ; миттєве значення ЕРС  $e$  замінюють комплексом  $\underline{E}_m$ .

Зіставляючи вирази  $u_R = iR$ ;  $u_L = L \frac{di}{dt}$ ;  $u_C = \frac{1}{C} \int idt$  з комплексними напругами, можна встановити правило переходу від похідної та інтегралу синусоїдної функції часу до зображення їх комплексними величинами:

- а) синусоїдна функція зображається її комплексною величиною;
- б) диференціювання замінюють помноженням на  $j\omega$ ;
- в) інтегрування синусоїдної функції замінюють діленням на  $j\omega$ .

Рівняння для напруги на вході у комплексній формі записують:

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C \quad (2.75)$$

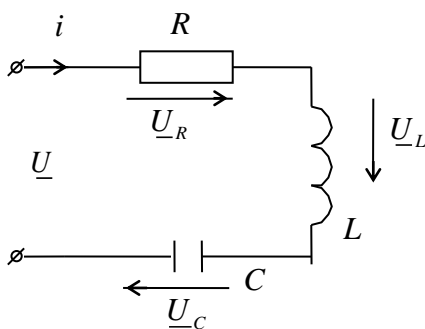


Рис.2.45

Нехай у схемі (рис.2.45), яка являє собою послідовно з'єднані опір  $R$ , індуктивність  $L$ , та ємність  $C$ , відомі струм  $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$  та параметри кола  $R, L, C$ . Треба визначити напругу на окремих елементах та на вхідних затискачах кола.

Згідно другому закону Кірхгофа для кола, яке розглядається, запишемо рівняння:

$$u = u_R + u_L + u_C, \quad (2.76)$$

де  $u_R = Ri = RI_m \sin(\omega t + \psi_i)$ ;

$$u_L = L \frac{di}{dt} = \omega L I_m \cos(\omega t + \psi_i) = \omega L I_m \sin\left(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2}\right);$$

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{1}{C} \int I_m \sin(\omega t + \psi_i) dt = \frac{I_m}{\omega C} \sin\left(\omega t + \psi_i - \frac{\pi}{2}\right).$$

У комплексній, або векторній формі, рівняння (2.54) має вигляд:

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C \quad (2.77)$$

Побудуємо векторну діаграму (рис.2.46). Вектори напруг  $\underline{U}_R, \underline{U}_L, \underline{U}_C$  будемо відкладати у масштабі напруг.

1. Напруга на опорі  $u_R$  сходиться за фазою зі струмом  $i$ , тому вектор  $\underline{U}_R$  співпадає за напрямком з вектором  $\underline{I}$ .

2. Напруга  $u_L$  випереджає за фазою вектор струму  $i$  на  $\frac{\pi}{2}$ , тому вектор  $\underline{U}_L$  повернуто відносно вектору струму  $\underline{I}$  на кут  $\frac{\pi}{2}$  у позитивному напрямку, тобто проти напрямку руху годинникової стрілки.

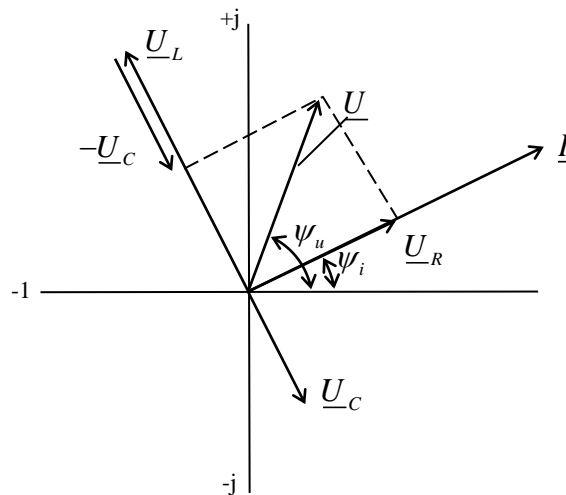


Рис. 2.46

3. Напруга  $u_C$  відстає за фазою від струму  $i$  на кут  $\frac{\pi}{2}$ , тому вектор  $\underline{U}_C$  повернуто відносно вектору струму  $\underline{I}$  на кут  $\frac{\pi}{2}$  у бік відставання, тобто за рухом годинникової стрілки.

Дійсно вектор  $\underline{U}_R$  одержано множенням струму  $\underline{I}$  на дійсну величину  $R$ . Аргумент комплексу  $\underline{I}R$ , такий же, як і комплексної величини  $\underline{I}$ , тому напрямок вектора  $\underline{U}_R$  співпадає з напрямком вектору  $\underline{I}$ .

Вектор  $\underline{U}_L$  одержано множенням  $\underline{I}$  на  $j\omega L$ . Множення комплексної величини  $\underline{I}$  на дійсну частину  $\omega L$  змінює модуль, але не змінює аргументу, а

множення на  $j$  збільшує аргумент на  $\frac{\pi}{2}$ . Отже, вектор  $\underline{U}_L$  повернуто відносно вектору  $\underline{I}$  на кут  $\frac{\pi}{2}$  у позитивному напрямку, тобто в бік випередження.

Вектор  $\underline{U}_C$  здобуто діленням  $\underline{I}$  на  $j\omega C$ . Ділення комплексної величини на дійсну величину  $\omega C$  змінює її модуль, а ділення на  $j$  теж саме, що множення на  $-j = e^{-j\frac{\pi}{2}}$  і зменшує аргумент на  $\frac{\pi}{2}$ . Тому вектор  $\underline{U}_C$  повернуто відносно вектора  $\underline{I}$  на кут  $\frac{\pi}{2}$  у негативному напрямку, тобто у бік відставання.

Склавши вектори  $\underline{U}_R$ ,  $\underline{U}_L$ ,  $\underline{U}_C$  одержимо вектор  $\underline{U}$  (рис.2.46). Його довжина у масштабі напруг визначає діюче значення напруги  $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ , а положення відносно координатних осей – початкову фазу  $\psi_u$ :  $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ .

Рівняння (2.54) можна розглядати як співвідношення між комплексними числами. Якщо підставити у нього значення комплексних напруг, то отримаємо:

$$\underline{U} = R\underline{I} + j\omega L\underline{I} + \underline{I} \frac{1}{j\omega C} \text{ або } \underline{U} = \underline{I} \left( R + j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \right). \quad (2.78)$$

Вираз (2.56) являє собою **закон Ома у комплексній формі** і дозволяє знайти комплекс діючого значення напруги за комплексом діючого значення струму та опору кола.

Запишемо  $\underline{U}$  у показниковій формі:

$$\underline{U} = U e^{j\psi_u} = \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} e^{j\varphi} \cdot \underline{I} e^{j\psi_i}, \quad (2.79)$$

$$\text{де } U = I \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}; \psi_u = \varphi + \psi_i. \quad (2.80)$$

Врахуємо, що  $U_m = \sqrt{2}U$ , тоді можемо записати вираз для миттєвого значення цієї напруги:  $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ .

### 2.13. Комплексний опір

Відношення комплексної напруги до комплексного струму називають комплексним опором:

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U e^{j\psi_u}}{I e^{j\psi_i}} = \frac{U}{I} e^{j(\psi_u - \psi_i)} = \frac{U_m}{I_m} e^{j\varphi} = \frac{U}{I} e^{j\varphi} = Z e^{j\varphi}. \quad (2.81)$$



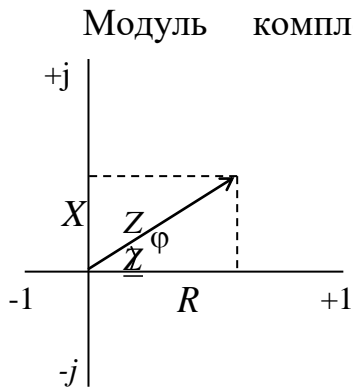


Рис.2.47

$X = Z \sin \varphi$  - уявна частина комплексного опору (реактивний опір).

Комплексний опір  $\underline{Z}$  може бути зображений вектором на комплексній площині (рис.2.47): звідки:

$X = Z \sin \varphi$  - уявна частина комплексного опору (реактивний опір).

Комплексний опір  $\underline{Z}$  може бути зображений вектором на комплексній площині (рис.2.47): звідки:  $\varphi = \arctg \frac{X}{R}$ , (2.83)

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}.$$

При розгляданні кола з послідовним з'єднанням елементів  $R, L, C$ , було одержано вираз закону Ома у символічній формі (2.56), з якого отримуємо вираз для комплексного опору:

$$\underline{Z} = R + j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = R + j(X_L - X_C) = R + jX, \quad (2.84)$$

де  $X$  - реактивний опір:  $X = X_L - X_C$ .

Реактивний опір  $X$  є алгебраїчна величина, тобто може бути як позитивним, так і негативним.

## 2.14. Комплексна провідність

Під комплексною провідністю  $\underline{Y}$  розуміють величину, яка зворотно пропорційна комплексному опору  $\underline{Z}$ :

$$\underline{Y} = \frac{I}{U} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{Ze^{j\varphi}} = ye^{-j\varphi} = y \cos \varphi - jy \sin \varphi = g - jb, \quad (2.85)$$

де  $\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}}$  - повна провідність, величина, зворотна повному опору;

$g = y \cos \varphi$  - активна провідність (дійсна частина комплексної провідності);

$b = y \sin \varphi$  - реактивна провідність (уявна частина комплексної провідності).

Комплексну провідність  $\underline{Y}$  можна показати вектором на комплексній площині (рис.2.48).

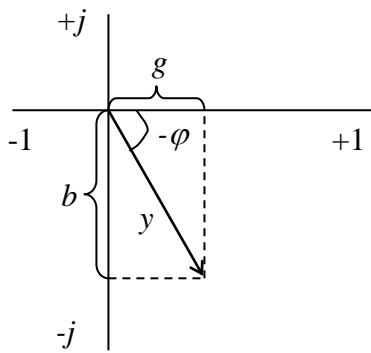


Рис.2.48

З рис.2.48 видно, що  $y = \sqrt{g^2 + b^2}$ ,  $\varphi = \arctg \frac{b}{g}$ ,

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{R + jX} \cdot \frac{R - jX}{R - jX} = \frac{R}{R^2 + X^2} - j \frac{X}{R^2 + X^2} = g - jb$$

тобто  $g = \frac{R}{R^2 + X^2}$ ,  $b = \frac{X}{R^2 + X^2}$ .

Якщо  $X$  позитивне, то і  $b$  позитивне; при  $X$  негативному -  $b$  також негативне.

Запишемо опір через провідності:

$$R = gZ^2 = \frac{g}{y^2} = \frac{g}{g^2 + b^2},$$

$$X = bZ^2 = \frac{b}{y^2} = \frac{b}{g^2 + b^2}. \quad (2.86)$$

## 2.15. Символічний метод розрахунку електричних кіл з паралельним з'єднанням елементів

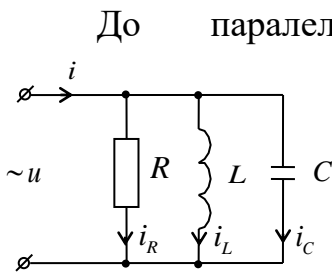


Рис.2.49

До паралельного кола (рис.2.49) прикладена напруга:  $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ . Задані параметри  $R, L, C$ . Треба визначити струми у вітках кола та у нерозгалуженій частині кола.

Згідно першого закону Кірхгофа запишемо рівняння для струму у нерозгалуженій частині кола:

$$i = i_R + i_L + i_C \quad (2.87)$$

або у символічній формі:

$$\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_L + \underline{I}_C. \quad (2.88)$$

Використовуючи для кожної вітки закон Ома у комплексній формі, одержимо значення комплексів струмів:

$$\underline{I}_R = \frac{\underline{U}}{R} = \frac{U}{R} e^{j\psi_u};$$

$$\underline{I}_L = \frac{\underline{U}}{j\omega L} = \frac{U}{\omega L} e^{j(\psi_u - \frac{\pi}{2})}; \quad (2.89)$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}}{1/j\omega C} = j\omega C U e^{j\psi_u} = \omega C U e^{j(\psi_u + \frac{\pi}{2})}.$$

З наведених рівнянь видно, що:

1. Струм у активному опорі співпадає за фазою з напругою.

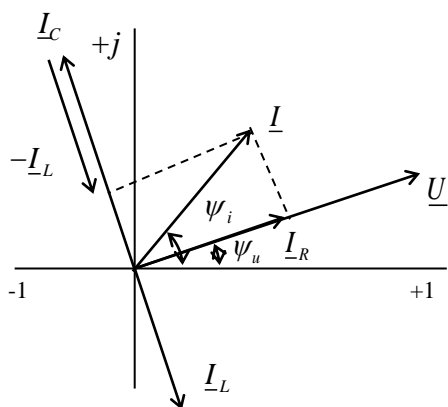


Рис.2.50

Спочатку відкладаємо на комплексній площині вектор  $\underline{U}$ , який відображає напругу. Струм у активному опорі співпадає за фазою з напругою, тому вектор  $\underline{I}_R$  співпадає за напрямком з вектором  $\underline{U}$ . Струм у індуктивності відстає за фазою від напруги на  $\frac{\pi}{2}$ , тому і вектор струму  $\underline{I}_L$  відстає від вектору напруги на кут  $\frac{\pi}{2}$ , тобто його повернуто на  $\frac{\pi}{2}$  у негативному напрямку. Струм у ємності випереджає напругу за фазою на  $\frac{\pi}{2}$ , тому вектор струму  $\underline{I}_C$  повернуто відносно вектора напруги на  $\frac{\pi}{2}$  у позитивному напрямку. Підсумовуючи вектори  $\underline{I}_R, \underline{I}_L, \underline{I}_C$ , одержимо вектор  $\underline{I}$  (рис.2.22). Його довжина у масштабі струмів визначає діюче значення струму  $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$  у нерозгалуженій частині кола, а розташування вектора  $\underline{I}$  відносно вісей координат визначає початкову фазу  $\psi_i$ :  $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ .

Дану задачу можна розв'язати іншим способом.

Здобувши значення комплексів, запишемо миттєві значення цих струмів у вигляді функцій часу:

$$i_R = \sqrt{2}I_R \sin(\omega t + \psi_u), \text{ де } I_R = \frac{U}{R}; \quad (2.90)$$

$$i_L = \sqrt{2}I_L \sin\left(\omega t + \psi_u - \frac{\pi}{2}\right), \text{ де } I_L = \frac{U}{\omega L}; \quad (2.91)$$

$$i_C = \sqrt{2}I_C \sin\left(\omega t + \psi_u + \frac{\pi}{2}\right), \text{ де } I_C = U\omega C. \quad (2.92)$$

Знайдемо вираз для сумарного струму. Для цього підставимо значення комплексів струмів у рівняння, яке складено для них згідно першого закону Кірхгофа:

$$\underline{I} = \frac{U}{R} + \frac{U}{j\omega L} + j\omega C U = U \left( \frac{1}{R} - j \left( \frac{1}{\omega L} - \omega C \right) \right). \quad (2.93)$$

Із цього виразу визначаємо комплексну провідність:

2. Струм у індуктивності відстає від напруги по фазі на кут  $\frac{\pi}{2}$ .

3. Струм у ємності випереджає за фазою напругу на кут  $\frac{\pi}{2}$ .

Струм на вході кола  $\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_L + \underline{I}_C$  можна визначити за допомогою векторної діаграми. Вектори струмів відкладаємо у масштабі струмів "m<sub>i</sub>" (рис.2.50).

$$\underline{Y} = \frac{\underline{I}}{\underline{U}} = \frac{1}{R} - j\left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right) = g - j(b_L - b_c), \quad (2.94)$$

де  $g = \frac{1}{R}$ ;  $b_L = \frac{1}{\omega L}$ ;  $b_c = \omega C$  - відповідно активна, індуктивна, та ємнісна провідності;

$b = b_L - b_c$  - реактивна провідність.

$$\underline{I} = \underline{U}\underline{Y} = Ue^{j\psi_u} \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)^2} e^{-j\varphi}. \quad (2.95)$$

Із останнього виразу виходить, що:

$$I = U \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)^2}; \quad (2.96)$$

де  $\psi_i = \psi_u - \varphi$ , тобто  $i = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \psi_i)$ .

## 2.16. Трикутники напруг та опорів

Струм та напруга на вході будь-якого пасивного двополюсника (рис.2.51) зв'язані законом Ома  $\underline{U} = \underline{I}\underline{Z}$ , де  $\underline{Z}$  - вхідний комплексний опір двополюсника. Вхідному комплексному опорі двополюсника  $\underline{Z} = R + jX$  відповідає еквівалентна схема двополюсника, яка складається з послідовно

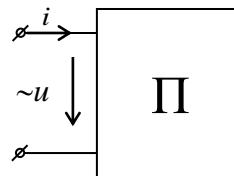


Рис.2.51

з'єднаних активного опору  $R$  та реактивного опору  $X$ . Реактивний опір в залежності від знаку слід розглядати як індуктивний або ємнісний. Тому на схемі реактивний опір  $X$  умовно позначено прямокутником (рис.2.52):

$$\underline{U} = \underline{I}\underline{Z} = \underline{I}(R + jX) = \underline{I}R + j\underline{I}X = \underline{U}_a + \underline{U}_p, \quad (2.97)$$

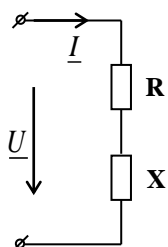


Рис.2.52

де  $\underline{U}_a = \underline{I}R$  - складова напруги, яка співпадає за фазою зі струмом, зветься активною складовою напруги;

$\underline{U}_p = j\underline{I}X$  - складова напруги, яка зсунута за фазою відносно струму на кут  $\frac{\pi}{2}$  (якщо  $X$  є індуктивним опором) і зветься реактивною складовою напруги.

Векторна діаграма (рис.2.53) зображена у вигляді геометричної суми активної та реактивної складових і має назву трикутника напруг.

Із цього трикутника можна визначити такі залежності:

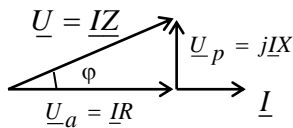


Рис.2.53

$$U_a = U \cos \varphi; U_p = U |\sin \varphi|; U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}, \quad (2.98)$$

Якщо кожен із сторін трикутника напруг поділити на струм  $I$ , отримаємо новий трикутник, сторони якого дорівнюють відповідно  $Z, R, X$ .

Модуль комплексного опору дорівнює:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}. \quad (2.99)$$

Тому  $Z$  можна представити як гіпотенузу прямокутного трикутника, один катет якого дорівнює  $R$ , а другий -  $X$ .

При цьому:

$$R = Z \cos \varphi; \quad \cos \varphi = \frac{R}{Z}; \quad \sin \varphi = \frac{X}{Z}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R};$$

$$X = Z \sin \varphi. \quad (2.100)$$

Трикутник опорів дає геометричну інтерпретацію зв'язку між модулем повного опору  $Z$  і активним та реактивним опором кола.

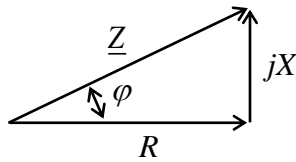


Рис.2.54

## 2.17. Трикутник струмів та провідностей

Вхідна комплексна провідність  $Y = g - jb$  відповідно еквівалентна схемі двополюсника, яка складається з паралельно з'єднаних провідностей  $b$  та  $g$  (рис.2.55).

Реактивну провідність в залежності від знаку слід розглядати як індуктивну або ємнісну. Тому на схемі реактивна провідність  $b$  умовно позначена прямокутником (рис.2.55).

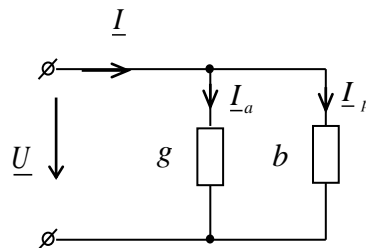


Рис.2.55

Струм  $I$  на вході двополюсника дорівнює:

$$I = YU = (g - jb)U = Ug - jUb = I_a + I_p, \quad (2.101)$$

де  $I_a = gU$  - складова струму, яка співпадає за фазою з напругою, зветься активною складовою струму;

$I_p = -jUb$  - складова струму, яка зсунута за фазою відносно напруги на кут  $\frac{\pi}{2}$  у бік відставання (якщо реактивна провідність індуктивна), зветься реактивною складовою струму.

Складові  $I_a$  та  $I_p$  можна розглядати як струми в елементах  $g$  та  $b$  еквівалентної схеми.

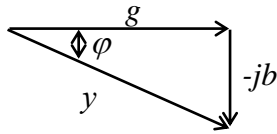


Рис.2.56

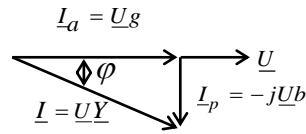


Рис.2.57

Векторна діаграма побудована для струмів  $\underline{I}_a, \underline{I}_p, \underline{I}$ , має вигляд трикутника (рис.2.56) і зветься *трикутником струмів*. З трикутника струмів одержимо такі значення:

$$I_a = I \cos \varphi; I_p = I |\sin \varphi|; I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}.$$

Якщо поділити кожен із сторін трикутника струмів на напругу  $\underline{U}$ , здобудемо новий трикутник, сторони якого дорівнюють  $y, b$  та  $g$ . Тому він зветься *трикутником провідностей* (рис.2.57).

Модуль комплексної провідності дорівнює:

$$y = \sqrt{g^2 + b^2}. \quad (2.102)$$

$y$  є гіпотенуза прямокутного трикутника (рис.2.57), катетами якого є активна  $g$  і реактивна  $b$  провідності.

З трикутника провідностей витікають наступні залежності:

$$g = y \cos \varphi; \cos \varphi = \frac{g}{y}; b = y \sin \varphi; \sin \varphi = \frac{b}{y}; \operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{g}. \quad (2.103)$$

Трикутник провідностей дає геометричну інтерпретацію зв'язку між модулем повної провідності  $y$  та її активною та реактивною складовими.

## 2.18. Закони Кірхгофа у символічній формі

Згідно першого закону Кірхгофа, алгебраїчна сума миттєвих значень струмів, які сходяться у вузлі електричного кола, дорівнює нулю:

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0. \quad (2.104)$$

Підставивши замість  $i_k$   $\underline{I}_k e^{j\omega t}$ , і маючи на увазі, що  $e^{j\omega t}$  не дорівнює нулю при будь-якому  $t$ , отримаємо:

$$\sum_{k=1}^n \underline{I}_k = 0. \quad (2.105)$$

Для замкненого контуру складного електричного кола синусоїдного струму можна скласти рівняння за другим законом Кірхгофа для миттєвих значень струму, напруги або ЕРС.

Нехай замкнений контур має  $n$  віток і кожна  $k$  вітка в загальному випадку включає в себе джерело ЕРС  $e_k$ , резистор  $R_k$ , індуктивний  $L_k$  і ємнісний  $C_k$  елементи, по яким тече струм  $i_k$ . Тоді за другим законом

Кірхгофа алгебраїчна сума миттєвих значень ЕРС джерел енергії, діючих у цьому контурі, дорівнює алгебраїчній сумі падінь напруг у цьому контурі:

$$\sum_{k=1}^n (i_k R_k + L_k \frac{di_k}{dt} + \frac{1}{C_k} \int i_k dt) = \sum_{k=1}^n e_k \quad (2.106)$$

Але кожен складову лівої частини рівняння (2.106) можна замінити на  $\underline{I}_k \underline{Z}_k$ , а кожен складову правої частини – на  $\underline{E}_k$ . Тоді рівняння (2.84) переходить в:

$$\sum_{k=1}^n \underline{I}_k \underline{Z}_k = \sum_{k=1}^n \underline{E}_k, \quad (2.107)$$

яке являє собою другий закон Кірхгофа у символічній формі.

## 2.19. Активна, реактивна та повна потужність у колах змінного струму

Під **активною** потужністю розуміють середнє значення миттєвої потужності  $p$  за період  $T$ :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt. \quad (2.108)$$

Якщо струм  $i = I_m \sin \omega t$ , а напруга на ділянці кола  $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ , то:

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T I_m U_m \sin \omega t \sin(\omega t + \varphi) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{U_m I_m}{2} [\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] dt = \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T \frac{U_m I_m}{2} \cos \varphi dt - \frac{1}{T} U I \int_0^T \cos(2\omega t + \varphi) dt = UI \cos \varphi \end{aligned} \quad (2.109)$$

Активна потужність фізично являє собою енергію, яка виділяється у одиницю часу у вигляді тепла на ділянці кола з опором  $R$ , тобто активна потужність є мірою енергії, яка необернено надходить у коло. Дійсно, добуток  $U \cos \varphi = IR$ . Тому:

$$P = UI \cos \varphi = I^2 R. \quad (2.110)$$

Одиниця виміру активної потужності – Вт.

При розрахунках електричних кіл змінного струму застосовується поняття **реактивна** потужність, під якою розуміють добуток напруги  $U$  на ділянці кола на струм  $I$  на цій же ділянці та на синус кута  $\varphi$  між напругою  $U$  та струмом  $I$ :

$$Q = UI \sin \varphi. \quad (2.111)$$

Одиниця реактивної потужності – вольт-ампер реактивний (ВАр).

Якщо у колі є тільки активний опір  $R$ ;  $\varphi = 0$ ;  $\cos \varphi = 1$ ;  $\sin \varphi = 0$ , тобто:  $P = UI$ ;  $Q = 0$ . У такому колі відбуваються процеси споживання енергії приймачем і відсутні періодичні процеси накопичення та наступного повернення енергії, яка зв'язана з магнітними та електричними полями.

Якщо  $\varphi > 0$ , то  $Q > 0$ , що відповідає індуктивному характеру реактивного опору, при  $\varphi = +\frac{\pi}{2}$ ,  $\cos \varphi = 0$ ,  $\sin \varphi = 1$  і  $P = 0$ ;  $Q = IU$ . Реактивна

потужність індуктивного кола позитивна. При  $\varphi < 0$ ;  $Q < 0$ , що відповідає ємнісному характеру реактивного опору, при  $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ ;  $\cos \varphi = 0$ ;  $\sin \varphi = -1$ ,  $P = 0$ ,  $Q = -UI$ , реактивна потужність ємнісного кола негативна.

**Повна** потужність:

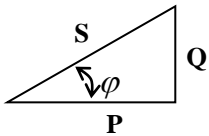
$$S = UI. \quad (2.112)$$

Одиниця повної потужності - вольт-ампер (ВА).

Потужності  $P$ ,  $Q$  та  $S$  пов'язані залежністю:

$$P^2 + Q^2 = S^2. \quad (2.113)$$

Графічно цей зв'язок можна показати у вигляді прямокутного трикутника – трикутника потужностей, один катет якого  $P$ , другий  $Q$ , а гіпотенуза  $S$  (рис.2.58).



На щитах генераторів та трансформаторів змінного струму позначається величина повної потужності  $S$ . Вона характеризує ту потужність, котру видає

Рис.2.58  
генератор при  $\cos \varphi = 1$ .

## 2.20. Вираз потужності у символічній формі

Нехай задано деякий комплекс:

$$\underline{A} = Ae^{j\alpha} = A \cos \alpha + jA \sin \alpha. \quad (2.114)$$

Під комплексом  $\underline{A}^*$ , спряженим з комплексом  $\underline{A}$ , будемо розуміти:

$$\underline{A}^* = Ae^{-j\alpha} = A \cos \alpha - jA \sin \alpha. \quad (2.115)$$

Розглянемо спосіб визначення активної, реактивної та повної потужностей через комплекс напруги та спряжений комплекс струму. Напруга на деякій ділянці кола  $\underline{U} = Ue^{j\psi_u}$ , струм через цю ділянку -  $\underline{I} = Ie^{j\psi_i}$ , кут зсуву фаз між напругою та струмом:  $\varphi = \psi_u - \psi_i$ . Помножимо комплекс напруги  $\underline{U}$  на спряжений комплекс струму  $\underline{I}^* = Ie^{-j\psi_i}$  та позначимо отриманий комплекс через  $\tilde{S}$ :

$$\tilde{S} = \underline{U} \underline{I}^* = UI^{j(\psi_u - \psi_i)} = UIe^{j\varphi} = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi = P + jQ \quad (2.116)$$

Знак  $\sim$  над  $S$  визначає комплекс (а не спряжений комплекс) повної потужності, складений при участі спряженого комплексу струму  $\underline{I}^*$ .

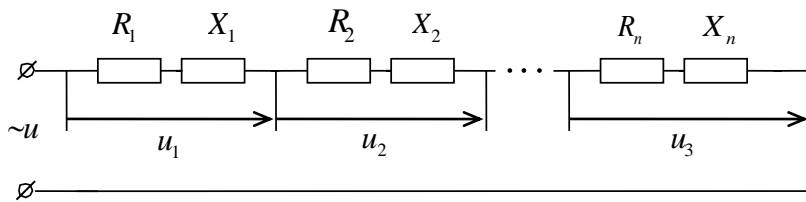
Таким чином, активна потужність  $P$  є дійсна частина (Re), а реактивна потужність  $Q$  - уявна частина (Im) добутку  $\underline{U} \underline{I}^*$ :

$$P = \operatorname{Re}(\underline{U} \underline{I}^*); \quad Q = \operatorname{Im}(\underline{U} \underline{I}^*). \quad (2.117)$$



## 2.21. Розрахунок електричних кіл при послідовному з'єднанні активних і реактивних опорів

Розглянемо коло, що складається із послідовного з'єднання резисторів (рис.2.59), через які тече струм  $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ .



Активні і реактивні опори окремих резисторів позначені відповідно через  $R_1, R_2, \dots, R_n$ , та  $X_1, X_2, \dots, X_n$ .

Рис.2.59

Згідно другого закону Кірхгофа маємо:  $u = u_1 + u_2 + \dots + u_n$ .

Відображаючи напругу у колі комплексними числами  $\underline{U} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \dots + \underline{U}_n$  і використовуючи закон Ома у символічній формі для кожного із резисторів та враховуючи, що при послідовному з'єднанні через коло проходить один і той же струм, маємо:

$$\underline{U} = I \underline{Z}_1 + I \underline{Z}_2 + \dots + I \underline{Z}_n = I \underline{Z}, \quad (2.118)$$

де  $\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \dots + \underline{Z}_n$  - комплексний опір усього кола.

Таким чином, при послідовному з'єднанні комплексний опір кола дорівнює сумі комплексних опорів окремих резисторів. При цьому треба пам'ятати, що цей висновок не відноситься до повних опорів, тобто повні опори сумувати неможливо:  $Z \neq Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n$ . Так як  $\underline{Z}_k = R_k + jX_k$ , то

$$\underline{Z} = \sum_{k=1}^n R_k + j \sum_{k=1}^n X_k = R + jX, \text{ тобто } R = \sum_{k=1}^n R_k, \text{ а } X = \sum_{k=1}^n X_k \text{ і } Z = \sqrt{R^2 + X^2}.$$

Таким чином, при послідовному з'єднанні резисторів еквівалентний активний опір усього кола дорівнює арифметичній сумі активних опорів, а еквівалентний реактивний опір усього кола дорівнює алгебраїчній сумі реактивних опорів. Знак реактивного опору залежить від того, який опір має перевагу у колі - індуктивний чи ємнісний.

Методика розрахунку.

Спосіб 1.

Задано струм та параметри кола, визначити напруги  $U, U_1, U_2, \dots, U_n$ .

1. Знаходимо комплексний опір кола  $\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \dots + \underline{Z}_n$ .

2. Визначаємо напругу на вході  $\underline{U} = I \underline{Z}$ .

3. Напруга на ділянках кола дорівнює:  $\underline{U}_1 = I \underline{Z}_1; \underline{U}_2 = I \underline{Z}_2; \dots; \underline{U}_n = I \underline{Z}_n$ .

Спосіб 2. Якщо використовувати повні опори та діючі значення струмів, отримаємо:

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}; U_1 = I Z_1; Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2}; U_2 = I Z_2.$$

$$Z = \sqrt{(R_1 + R_2 + \dots + R_n)^2 + (X_1 + X_2 + \dots + X_n)^2}, U = I Z.$$

Із виразів для активного та реактивного опорів кола маємо:

$$I^2 R = I^2 R_1 + I^2 R_2 + \dots + I^2 R_n \text{ або } P = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

$$I^2 X = I^2 X_1 + I^2 X_2 + \dots + I^2 X_n \text{ або } Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n.$$

Тобто, активна потужність усього кола дорівнює арифметичній сумі активних потужностей усіх ділянок, а реактивна потужність - алгебраїчній сумі реактивних потужностей ділянок.

## 2.22. Розрахунок електричних кіл при паралельному з'єднанні активних та реактивних опорів

Нехай електричне коло складається з паралельно з'єднаних резисторів. Напруга на вході дорівнює:  $u = U_m \sin \omega t$  (рис.2.60).

Згідно першого закону Кірхгофа струм у нерозгалуженій частині кола:  $i = i_1 + i_2 + \dots + i_n$ , у символічній формі -  $\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \dots + \underline{I}_n$ . Використовуючи закон Ома у символічній формі для кожної вітки та враховуючи, що

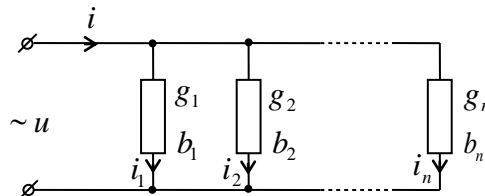


Рис.2.60

при паралельному з'єднанні резисторів всі вони знаходяться під однією напругою  $\underline{U}$ , одержимо:

$$\underline{I} = \underline{U}\underline{Y}_1 + \underline{U}\underline{Y}_2 + \dots + \underline{U}\underline{Y}_n = \underline{U}\underline{Y}, \quad \text{де } \underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \dots + \underline{Y}_n, \quad (2.119)$$

тобто  $\underline{Y} = \sum_{k=1}^n \underline{Y}_k$ .

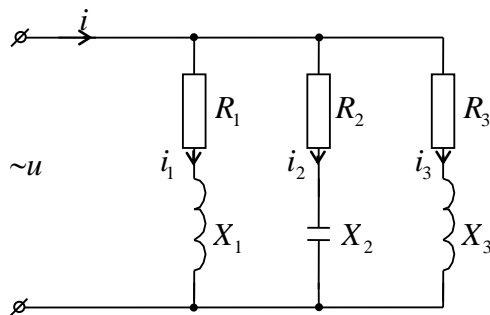


Рис.2.61

Розглянемо коло з трьох паралельно з'єднаних елементів (рис.2.61). Параметри кола та напруга на вході кола задані. Визначити струми.

Розв'язання:

$$1) \underline{I}_1 = \underline{U}\underline{Y}_1,$$

$$\text{де } \underline{Y}_1 = g_1 - jb_1, \quad g_1 = \frac{R_1}{R_1^2 + X_1^2}, \quad b_1 = \frac{X_1}{R_1^2 + X_1^2};$$

$$\underline{I}_2 = \underline{U}\underline{Y}_2,$$

$$\text{де } \underline{Y}_2 = g_2 + jb_2, \quad g_2 = \frac{R_2}{R_2^2 + X_2^2}, \quad b_2 = \frac{X_2}{R_2^2 + X_2^2};$$

$$\underline{I}_3 = \underline{U}\underline{Y}_3, \quad \underline{Y}_3 = g_3 - jb_3, \quad g_3 = \frac{R_3}{R_3^2 + X_3^2}, \quad b_3 = \frac{X_3}{R_3^2 + X_3^2}.$$

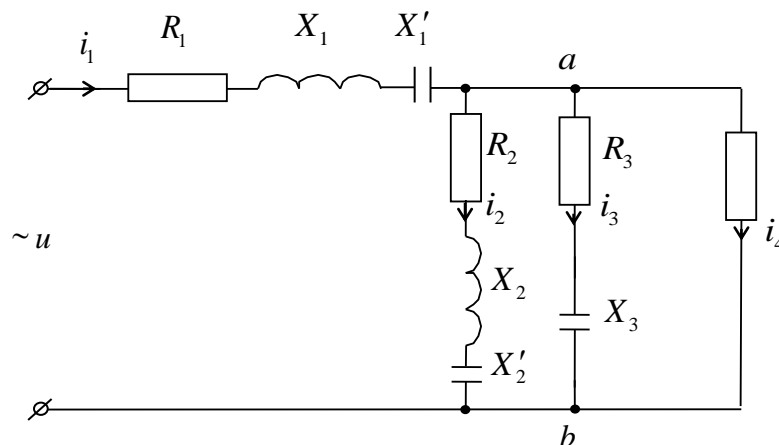
$$2) \underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3.$$

### 2.23. Розрахунок електричних кіл при змішаному з'єднанні активних та реактивних опорів

При змішаному з'єднанні елементів розрахунок схеми проводять наступним чином:

1. Знаходимо провідність паралельно з'єднаних елементів:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{ab} &= \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 + \underline{Y}_4 = \frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_3} + \frac{1}{\underline{Z}_4} = \\ &= \frac{\underline{Z}_2\underline{Z}_4 + \underline{Z}_2\underline{Z}_3 + \underline{Z}_3\underline{Z}_4}{\underline{Z}_2\underline{Z}_3\underline{Z}_4}. \end{aligned} \quad (2.120)$$



2. Знаходимо повний опір паралельно з'єднаних елементів:

$$\underline{Z}_{ab} = \frac{1}{\underline{Y}_{ab}} = \frac{\underline{Z}_2\underline{Z}_3\underline{Z}_4}{\underline{Z}_3\underline{Z}_4 + \underline{Z}_2\underline{Z}_4 + \underline{Z}_2\underline{Z}_3}. \quad (2.121)$$

3. Загальний опір кола дорівнює:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{ab}. \quad (2.122)$$

4. Визначаємо струм у нерозгалуженій частині схеми:

$$\underline{I}_1 = \frac{U}{\underline{Z}}. \quad (2.123)$$

5. Знаходимо напругу на паралельній ділянці кола:  $\underline{U}_{ab} = \underline{I}_1 \underline{Z}_{ab}$ .

6. Визначаємо струм у вітках схеми:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_2}; \quad \underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_3}; \quad \underline{I}_4 = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_4}. \quad (2.124)$$

## 2.24. Резонанс в електричних колах

У двополюснику, що містить одну або кілька індуктивностей і одну або декілька ємностей, може установитися такий режим роботи, при якому струм на вході кола збігається за фазою з напругою, тобто коло поводить себе як активний опір. Такий режим роботи називається *резонансом*.

Дослідження резонансних режимів в електричних колах полягає в знаходженні резонансних частот, залежностей різних величин від частоти (частотних характеристик) або параметрів  $L$  і  $C$ , при яких виникає резонанс.

Розрізняють два основних резонансних режими – резонанс напруг і резонанс струмів.

### 2.24.1. Резонанс напруг

Коло, наведене на рис.2.62, називають послідовним контуром.

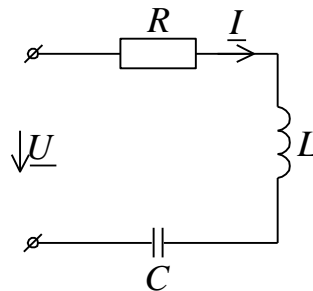


Рис. 2.62

Розглянемо умову резонансу у послідовному контурі. При резонансі напруг струм і напруга на вході кола збігаються за фазою, тобто:

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R} = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} = 0. \quad (2.125)$$

Отже, умовою резонансу у послідовному контурі є рівність нулю вхідного реактивного опору:

$$X = X_L - X_C = 0, \quad (2.126)$$

$$X_L = X_C, \quad (2.127)$$

$$\text{або } \omega L = \frac{1}{\omega C}. \quad (2.128)$$

З умови (2.106) виходить, що резонансу можна досягти, якщо змінювати частоту напруги джерела або параметри кола - індуктивність або ємність.

$$L_0 = \frac{1}{\omega^2 C}, \quad (2.129)$$

$$C_0 = \frac{1}{\omega^2 L}. \quad (2.130)$$

*Кутова частота*, при якій настає резонанс, називається резонансною кутовою частотою:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2.131)$$

При резонансі індуктивний і ємнісний опір рівні:

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{\sqrt{LC}}{C} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho. \quad (2.132)$$

Величина  $\rho$  не залежить від частоти і називається *характеристичним або хвильовим опором кола*.

Повний опір кола при резонансі мінімальний і дорівнює активному опору кола, а струм досягає найбільшого значення:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = R \quad (2.133)$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{R}. \quad (2.134)$$

При резонансі:

$$U_{L_0} = \omega_0 L I = \rho I;$$

$$U_{C_0} = \frac{1}{\omega_0 C} I = \rho I;$$

тобто  $U_{L_0} = U_{C_0}$

Відношення:

$$\frac{U_{L_0}}{U} = \frac{U_{C_0}}{U} = \frac{\rho I}{RI} = \frac{\rho}{R} = Q \quad (2.135)$$

визначає кратність перевищення напруги на затисках індуктивного і ємнісного опорів над напругою на вхідних затисках. Величину  $Q$ , що визначає резонансні властивості контуру, називають *добротністю контуру*.

Прийнято також резонансні властивості характеризувати величиною, зворотною до добротності:

$$d = \frac{1}{Q}, \quad (2.136)$$

яка носить назву *згасання контуру*.

Як впливає із умови (2.112), при  $R \ll \rho$  напруги на індуктивності і ємності при резонансі значно перевищують напругу на затисках кола. Тому резонанс у послідовному контурі називають резонансом напруг.

При резонансі сума комплексів напруг на індуктивності і ємності дорівнює:

$$\underline{U}_L + \underline{U}_C = j\omega L \underline{I} + \frac{1}{j\omega C} \underline{I} = j\underline{I} \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = 0 \quad (2.137)$$

тобто  $\underline{U}_L = -\underline{U}_C$ .

Векторна діаграма при резонансі має вигляд (рис.2.63):

Для з'ясування енергетичних процесів при резонансі визначимо суму енергій магнітних і електричних полів кола:

$$W = W_M + W_E. \quad (2.138)$$

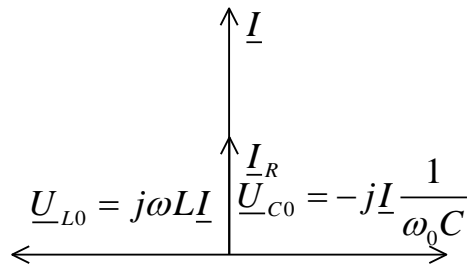


Рис. 2.63

Нехай струм у контурі  $i = I_m \sin \omega_0 t$ . Тоді напруга на ємності:

$$U_c = U_{c_m} \sin(\omega_0 t - \frac{\pi}{2}) = -U_{c_m} \cos \omega_0 t. \quad (2.139)$$

Сумарна енергія:

$$W = W_M + W_E = \frac{Li^2}{2} + \frac{Cu_c^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2} \sin^2 \omega_0 t + \frac{CU_{c_m}^2}{2} \cos^2 \omega_0 t. \quad (2.140)$$

Але

$$U_{c_m} = \frac{1}{\omega_0 C} I_m = \sqrt{\frac{L}{C}} I_m, \quad (2.141)$$

звідки  $\frac{CU_{c_m}^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2}$ .

Тоді  $W = \frac{CU_{c_m}^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2} = const$ , тобто сума енергій магнітних і електричних полів з часом не змінюється.

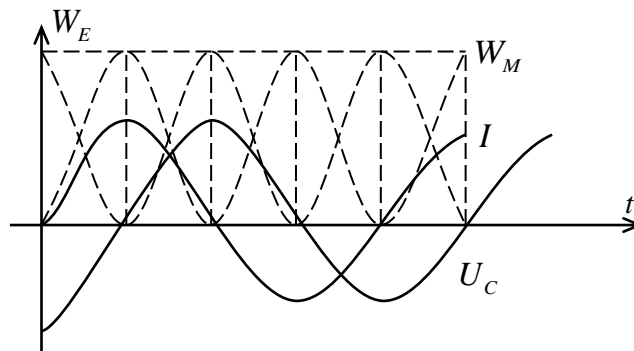


Рис. 2.64.

На підставі викладеного робимо висновок, що при резонансі в розглянутому колі (послідовний контур) магнітне і електричне поля увесь час обмінюються енергією (рис.2.64). При максимальному струмі енергія цілком зосереджується в магнітному полі. При зменшенні струму енергія поступово

переходить з магнітного поля в електричне і при струмі  $i = 0$ , коли напруга на обкладках конденсатора досягає максимум, вся енергія зосереджується в електричному полі. Потім починається зворотний процес переходу енергії з електричного поля у магнітне і т.д.

При цьому повернення енергії з полів кола до джерела напруги немає, тому що все коло у цілому поводить себе як активний опір. Таким чином, спостерігається безперервний перехід енергії з електричного поля в магнітне і назад.

За період  $T$  коло споживає від джерела енергію:

$$W = PT = RI^2T = RI_m^2\left(\frac{T}{2}\right), \quad (2.142)$$

яка при малому загасанні кола значно менше енергії, зосередженої у магнітному і електричному полях кола, і інтенсивні коливання енергії між цими полями виявляються в значному підвищенні напруги на затисках індуктивного і ємнісного опорів.

Якщо умови резонансу не виконані, то  $W_{M_{\max}} \neq W_{E_{\max}}$ , і енергія, яка дорівнює  $W_{M_{\max}} - W_{E_{\max}}$ , повинна періодично доставлятися від джерела напруги.

### 2.24.2. Частотні характеристики кола з послідовним з'єднанням елементів $R, L, C$

Під частотними характеристиками розуміють залежність від частоти параметрів кола, а також величин, обумовлених параметрами  $Z, X, R$ .

$$X_L = \omega L;$$

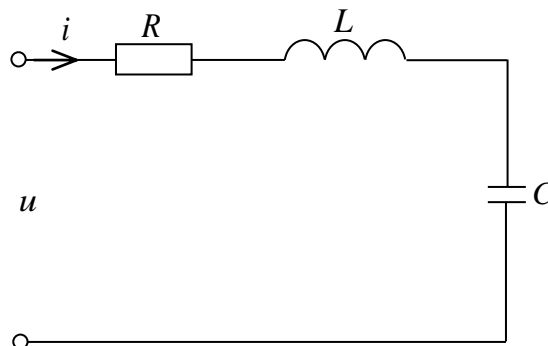
$$X_C = \frac{1}{\omega C};$$

$$X = X_L - X_C;$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2};$$

$$R(\omega) = \text{const};$$

$$\varphi = \text{arctg} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$



Розглянемо частотні характеристики кола з послідовно з'єднаними:  $R, L, C$  (рис.2.65).

При частотах  $\omega < \omega_0$ ,  $X_C > X_L$  і реактивний опір має ємнісний характер ( $X < 0$  і  $\varphi < 0$ ).

При частотах  $\omega > \omega_0$ ,  $X_L > X_C$  і реактивний опір має індуктивний характер ( $X > 0$  і  $\varphi > 0$ ).

Таким чином, у момент резонансу відбувається зміна характеру реактивного опору.

В окремому випадку, якщо  $R=0$  при частоті  $\omega = \omega_0$  відбувається стрибкоподібна зміна кута  $\varphi$  від  $-\frac{\pi}{2}$  до  $+\frac{\pi}{2}$ , тобто відбувається «перекидання фази».

Залежності струмів і напруг від частоти також називають *частотними характеристиками*.

$$U_L = \omega LI, \quad U_C = \frac{1}{\omega C} I, \quad (2.143)$$

де  $I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$  - теж залежить від частоти.

Розглянемо залежності  $U_L(\omega)$  і  $U_C(\omega)$  при незмінному значенні прикладеної напруги  $U = const$ .

Досліджуючи вираз (2.140), можна показати, що при  $Q \leq \frac{1}{\sqrt{2}}$  ні  $U_L$ , ні  $U_C$  не мають максимумів і при підвищенні частоти  $\omega$ ,  $U_L$  монотонно зростає, а  $U_C$  монотонно убиває. При цьому ні  $U_L$ , ні  $U_C$  не перевищують значення прикладеної напруги  $U$ .

При  $\omega=0$  струм  $I=0$  тому, що конденсатор не пропускає постійного струму і вся напруга прикладена до затисків конденсатора ( $U_C=U$ , а  $U_L=0$ ).

При  $\omega = \infty$  струм  $I=0$  тому, що опір котушки нескінченно великий і вся напруга припадає на затискачі котушки ( $U_L=U$ , а  $U_C=0$ ).

При  $Q > \frac{1}{\sqrt{2}}$  значення напруг  $U_L$  і  $U_C$  перевищують  $U$  на всьому інтервалі зміни  $\omega$ .

Щоб визначити частоти, при яких  $U_L$  і  $U_C$  досягають максимуму (рис.2.42), візьмемо похідні  $\frac{dU_L}{d\omega} = 0$  і  $\frac{dU_C}{d\omega} = 0$ , одержимо:

$$\omega_{L,max} = \omega_0 \sqrt{\frac{2Q^2}{2Q^2 - 1}} \quad (2.144)$$



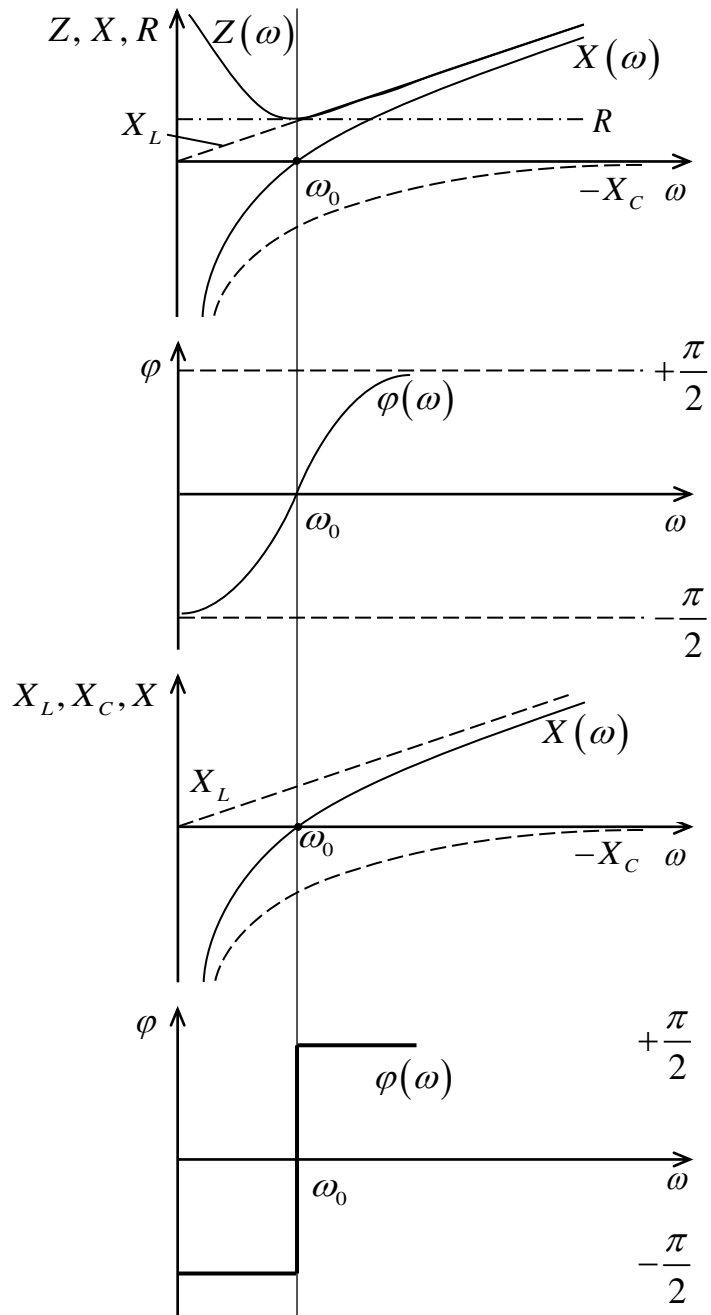


Рис. 2.65

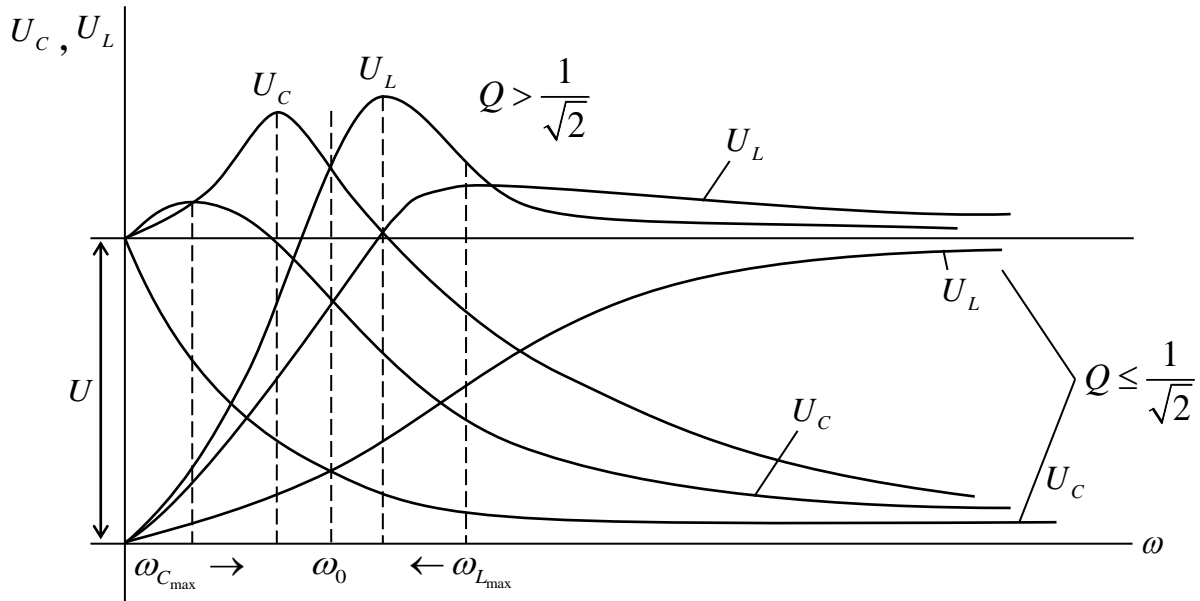


Рис. 2.66

$$\omega_{Cmax} = \omega_0 \sqrt{\frac{2Q^2 - 1}{2Q^2}}. \quad (2.145)$$

Зі збільшенням  $Q$   $\omega_{Lmax} \rightarrow \omega_0$ ,  $\omega_{Cmax} \rightarrow \omega_0$ . При відомих  $\omega_{Lmax}$  і  $\omega_{Cmax}$ , визначаємо  $U_{Lmax}$  і  $U_{Cmax}$  за формулою:

$$U_{Lmax} = U_{Cmax} = \frac{2U}{d\sqrt{4-d^2}}. \quad (2.146)$$

При  $Q \rightarrow \infty$  ( $d \rightarrow 0$ )  $U_{Lmax} = U_{Cmax} \rightarrow \infty$ .

Таким чином, вид частотних характеристик визначається добротністю контуру.

Частотні характеристики, приведені на рис.2.66, отримані за умови, що добротність контуру збільшується шляхом зменшення опору  $R$ . У цьому випадку, резонанс настає при одній і тій же частоті  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  (тобто величини  $L$  і  $C$  залишаються незмінними).

Розглянемо залежність  $I(\omega)$ . Для зручності порівняння резонансних кривих будемо їх розглядати у вигляді залежностей

$\frac{I}{I_0} = f\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)$ , де  $I_0 = \frac{U}{R}$  - струм при резонансі.

Перетворимо вираз повного опору кола:

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L \frac{\omega_0}{\omega_0} - \frac{1}{\omega C} \frac{\omega_0}{\omega_0}\right)^2} \\ &= \sqrt{R^2 + \omega_0^2 L^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{1}{LC \omega \omega_0}\right)^2} = R \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}. \end{aligned} \quad (2.147)$$

У вище наведених формулах використані наступні перетворення:

$$\frac{\omega_0^2 L^2}{R^2} = \frac{1}{LC} \frac{L^2}{R^2} = \frac{L}{C} \frac{1}{R^2} = \frac{\rho^2}{R^2} = Q^2; \quad \frac{1}{LC} = \omega_0^2. \quad (2.148)$$

$$\frac{1}{LC} \frac{1}{\omega \omega_0} = \frac{\omega_0^2}{\omega \omega_0} = \frac{\omega_0}{\omega}. \quad (2.149)$$

Струм у колі дорівнює:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{R \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}} = \frac{I_0}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}. \quad (2.150)$$

Позначимо відношення  $\omega/\omega_0 = \eta$ , одержимо:

$$I = \frac{I_0}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\eta - \frac{1}{\eta}\right)^2}} \quad (2.151)$$

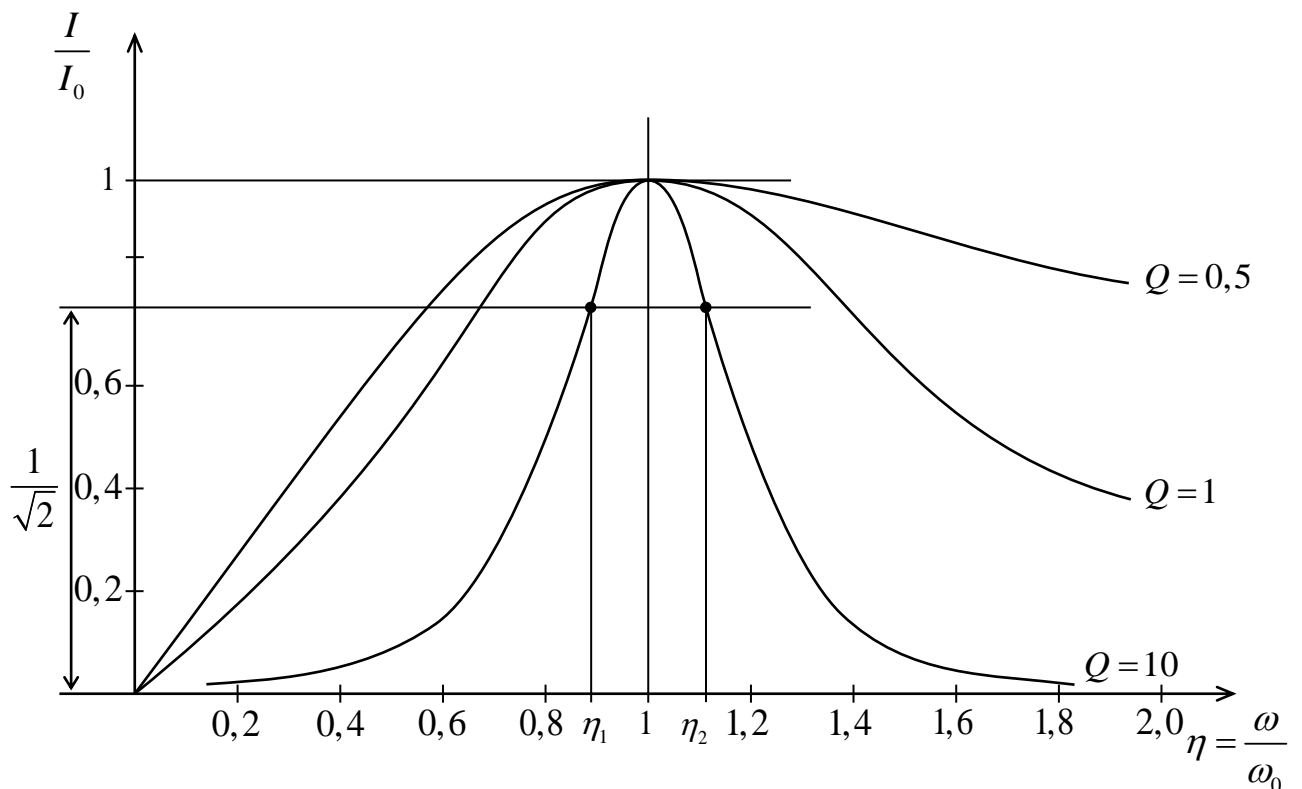


Рис. 2.67

і побудуємо залежність  $\frac{I}{I_0} = f(\eta)$  (рис.2.67).

Графік залежності струму від частоти показує, що коло має «виборчі властивості». Чим більше  $Q$  тим гостріше резонансна крива, тим краще виборчі властивості кола, що і послужило однієї з причин назвати  $Q$  добротністю контуру. Як бачимо, чим вище добротність, тим вужче смуга пропускання контуру.

На рис.2.67 при частоті  $\eta_1$  і  $\eta_2$  маємо значення струму  $I = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$ . При струмі  $I = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$  потужність дорівнює:

$$R \left( \frac{I_0}{\sqrt{2}} \right)^2 = \frac{1}{2} R I_0^2, \quad (2.152)$$

тобто складає половину потужності при резонансі. Тому смугу пропускання характеризують як смугу, границі якої відповідають половині максимальної потужності.

### 2.24.3. Резонанс струмів

Розглянемо коло з двома паралельними вітками. Таке коло називають паралельним контуром (рис.2.68).

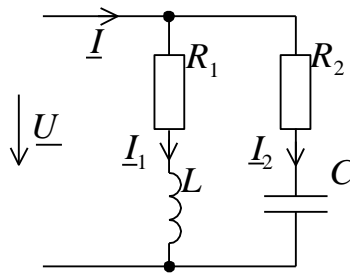


Рис. 2.68

Розглянемо умови резонансу для такого кола. Резонанс у такому колі також настає при відсутності зсуву фаз між струмом і напругою на затисках кола:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{b}{g} = 0, \quad (2.153)$$

тобто  $b = 0$ . (2.154)

Таким чином, умовою резонансу в паралельному контурі є рівність нулю вхідної реактивної провідності:

$$b = b_1 - b_2 = 0, \quad (2.155)$$

тобто  $b_1 = b_2$ , або

$$\frac{\omega L}{R_1^2 + (\omega L)^2} = \frac{1}{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (2.156)$$

З рівняння (2.153) визначаємо резонансну частоту:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\rho^2 - R_1^2}{\rho^2 - R_2^2}}, \quad (2.157)$$

де  $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ .

З виразу (2.154) випливає, що не завжди у колі з визначеними параметрами можливе досягнення резонансу струмів.

Визначимо умови, при яких можливий або не можливий резонанс струмів.

1.  $R_1 < \rho$  і  $R_2 < \rho$ , або  $R_1 > \rho$  і  $R_2 > \rho$ .

Частота  $\omega_0$  при цих умовах є позитивна величина. Отже, можливе досягнення резонансу.

2.  $R_1 < \rho$ , а  $R_2 > \rho$ , або  $R_1 > \rho$ , а  $R_2 < \rho$ .

При цих умовах резонансна частота є уявною величиною.

Це означає, що в такому колі резонанс струмів неможливий.

3.  $R_1 = R_2 = \rho$ ,  $\omega_0$  дорівнює невизначеності  $\frac{0}{0}$ .

Це означає, що резонанс струмів настає при будь-якій частоті, тобто таке коло працює в режимі резонансу при будь-якій частоті.

4.  $R_1 = R_2$  - резонанс можливий при частоті  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ .

При резонансі реактивна провідність кола дорівнює 0 і повна провідність кола досягає свого мінімального значення:

$$y = \sqrt{g^2 + b^2} = g. \quad (2.158)$$

Тому струм у загальній вітці (на вході кола) при незмінній напрузі виявляється найменшим на відміну від резонансу при послідовному з'єднанні, коли струм, навпаки, мав максимальне значення.

$$I_0 = Uy = Ug \quad (2.159)$$

Векторна діаграма для розглянутого кола приведена на рис.2.69.

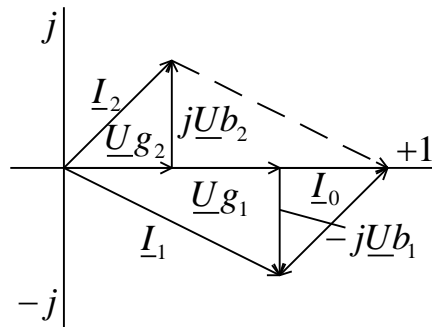


Рис. 2.69

$\underline{U}b_2 = \underline{U}b_1$ , тому  $\underline{I}_0$  буде збігатися за фазою з  $\underline{U}$ .

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{1a} + \underline{I}_{1p} = \underline{U}g_1 - j\underline{U}b_1;$$

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_{2a} + \underline{I}_{2p} = \underline{U}g_2 + j\underline{U}b_2;$$

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = \underline{U}(g_1 + g_2) - j\underline{U}(b_1 - b_2).$$

При резонансі  $b_1 - b_2 = b = 0$ .

$$\underline{I}_0 = \underline{U}(g_1 + g_2),$$

тобто струм на вході кола збігається по фазі з напругою.

$$\underline{I}_{1p} = -j\underline{U}b_1;$$

$$\underline{I}_{2p} = j\underline{U}b_2;$$

$$\underline{I}_{1p} + \underline{I}_{2p} = -j\underline{U}(b_1 - b_2) = 0,$$

тобто  $\underline{I}_{1p} = -\underline{I}_{2p}$ .

При резонансі струмів протилежні за фазою реактивні складові струмів у паралельних вітках рівні між собою і струми в цих вітках при умові  $g_1 + g_2 \ll b_1 + b_2$  значно перевищують струм на вході кола і можуть досягати великих значень.

Тому резонанс у паралельному контурі називають резонансом струмів.

Струм на вході кола при резонансі має мінімальне значення і дорівнює сумі активних складових струмів віток.

Явище резонансу найбільш чітке при  $R_1 = R_2 = 0$ .

Схема при цьому буде мати вигляд (рис.2.70):

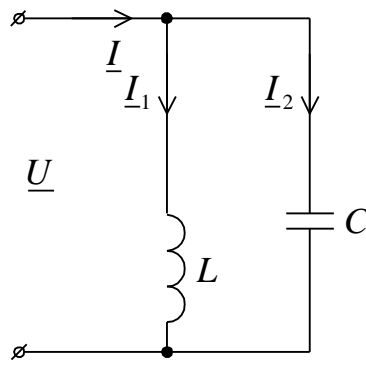


Рис. 2.70

Резонансна частота для такого кола

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2.160)$$

Векторна діаграма для випадку, коли  $R_1 = R_2 = 0$  (рис.2.71):

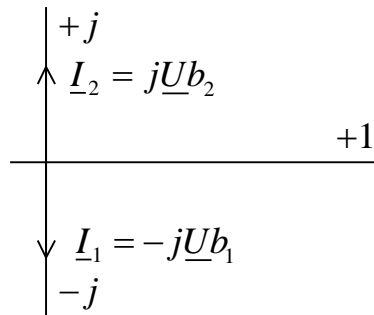


Рис. 2.71

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = -j\underline{U}(b_1 - b_2) = 0, \quad (2.161)$$

тобто у паралельних вітках протікають рівні за модулем, але протилежні за напрямом струми, а струм на вході кола дорівнює нулю.

Це ідеальний випадок, коли у контурі немає втрат, але в контурі є індуктивність і зв'язане з нею магнітне поле, що має запас енергії, і є ємність і зв'язане з нею електричне поле, що також має запас енергії.

Спочатку, при включенні джерела, тобто у перехідному режимі, струм у колі протікає, а в сталому режимі відбувається тільки обмін енергіями між магнітними і електричними полями. Обміну енергією між приймачем і джерелом немає. Струм на вході дорівнює нулю. Енергія від джерела у сталому режимі у коло не надходить.

#### 2.24.4. Частотні характеристики паралельного контуру

Побудуємо частотні характеристики для ідеального паралельного контуру (рис.2.72).

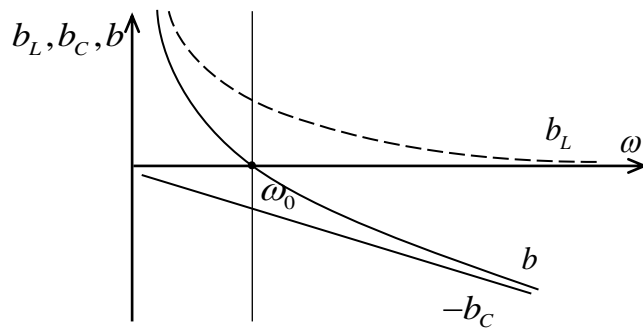


Рис. 2.72

$$b_L = \frac{1}{\omega L}; \quad b_C = \omega C; \quad b = b_L - b_C. \quad (2.162)$$

Але  $I_L = Ub_L$ ,  $I_C = Ub_C$ , а  $I = I_L - I_C$ .

$$(2.163)$$

Залежності струмів від частоти мають аналогічний вид і наведені на рис.2.73.

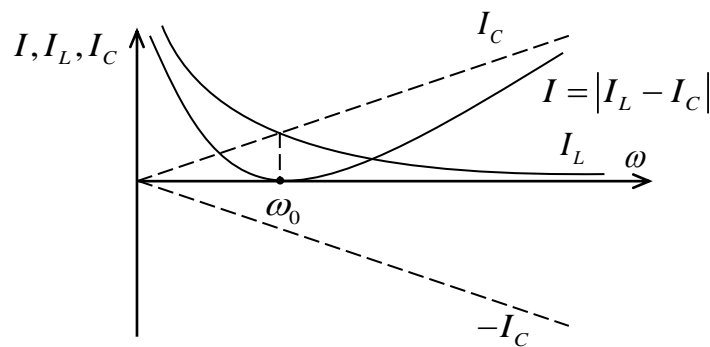


Рис. 2.73

При кутових частотах від 0 до  $\omega_0$   $b_L > b_C$  і  $b = b_L - b_C > 0$ .

У цій області частот струм у колі має індуктивний характер і відстає від напруги на її затискачах. В міру збільшення частоти  $b_L$  зменшується, а  $b_C$  збільшується і  $b$  за абсолютним значенням зменшується, а також зменшується і струм  $I$ . При частоті  $\omega_0$  реактивна провідність кола  $b=0$ , а струм  $I=0$ . При подальшому підвищенні частоти  $b_C$  буде більше  $b_L$ , повна реактивна провідність  $b$  буде негативною і буде зростати. Струм  $I$  при цьому теж зростає і за фазою випереджає напругу на затисках кола (тобто має ємнісної характер).

З виразу  $I_L = U/\omega L$ ,  $I_C = U\omega C$  випливає, що зі збільшенням частоти струм  $I_L$  убуває, а струм  $I_C$  зростає, причому перша залежність зображується рівнобікою гіперболою, а друга - прямою, що проходить через початок координат і яка пересікає гіперболу при  $\omega = \omega_0$ .



У випадку резонансного кола користуються, як було наведено раніше, поняттям добротності кола, припускаючи під цим у загальному випадку величину  $Q = \omega_0 \frac{\sum W_{max}}{P}$ , де  $\omega_0$  – резонансна частота;  $\sum W_{max}$  – сума максимальних значень енергії, яка запасється періодично при резонансі в індуктивних (або ємнісних) елементах;  $P$  – активна потужність на затискачах кола при резонансі.

Для послідовного контуру одержуємо:

$$Q = \omega_0 \frac{LI_m^2}{2} \frac{1}{I^2 R} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R} = \frac{\rho}{R}. \quad (2.164)$$

Цей вираз було отримано раніше в розділі 2.24.2.

Для паралельного контуру (2.24.3):

$$Q = \omega_0 \frac{W_{Lmax}}{P} = \omega_0 \frac{LI_m^2}{2} \frac{1}{U^2 g_0} = \omega_0 \frac{LU_m^2}{2Z_1^2} \frac{1}{U^2 g_0} = \omega_0 \frac{LU^2 R}{2Z_1^2} \frac{1}{U^2 g_0} = \frac{\omega_0 L}{Z_1^2 g_0};$$

$$g_0 = \frac{R_1}{Z_1^2} + \frac{R_2}{Z_2^2} = \frac{R_1 Z_2^2 + R_2 Z_1^2}{Z_1^2 Z_2^2};$$

$$Q = \frac{\omega_0 L}{Z_1^2 \frac{R_1 Z_2^2 + R_2 Z_1^2}{Z_1^2 Z_2^2}} = \frac{\omega_0 L}{R_1 + R_2 \frac{Z_1^2}{Z_2^2}}.$$

Можна доказати, що  $\frac{Z_1^2}{Z_2^2} = \frac{\frac{L}{C} - R_1^2}{\frac{L}{C} - R_2^2}$ , але  $\omega_0^2 LC = \frac{\frac{L}{C} - R_1^2}{\frac{L}{C} - R_2^2}$  (з формули

(2.135), тому:

$$\omega_0 LC = \frac{Z_1^2}{Z_2^2}, \quad (2.165)$$

відкіля  $Q = \frac{\omega_0 L}{R_1 + R_2 \omega_0^2 LC}, \quad (2.166)$

якщо  $R_2 \approx 0$ , то  $Q = \frac{\omega_0 L}{R_1}$  (вважаючи, що втрат енергії в конденсаторі немає).

### 2.24.5. Резонанс у складних колах

У загальному випадку складного кола, що містить реактивні опори, має місце резонанс для всього кола, якщо струм і напруга на затискачах кола сходяться за фазою, тобто  $\varphi=0$ .

Умови резонансу  $b=0$  або  $X=0$  для розгалуженого кола з декількома  $L$  і  $C$  дають рівняння для частоти  $\omega$ , яке може мати ще кілька дійсних коренів.

Отже, таке складне коло може мати кілька резонансних частот. Причому у залежності від конфігурації кола умови резонансу можуть бути різними.

Розглянемо приклад дослідження умов резонансу для конкретного кола (рис.2.74).

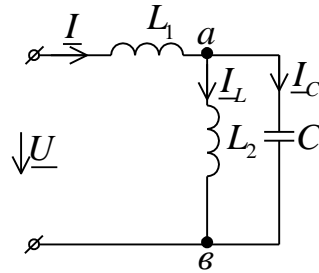


Рис.2.74

Визначимо комплекс вхідного опору:

$$\begin{aligned} \underline{Z} &= j\omega L_1 + \frac{j\omega L_2 \frac{1}{j\omega C}}{j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C}} = j \left( \omega L_1 + \frac{\omega L_2}{j\omega C (j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C})} \right) = \\ &= j \left( \omega L_1 - \frac{\omega L_2}{1 - \omega^2 L_2 C} \right) = j \left( \omega L_1 - \frac{\omega L_2}{-1 + \omega^2 L_2 C} \right). \end{aligned} \quad (2.167)$$

Перетворимо вираз:

$$\frac{\omega L_2}{\omega^2 L_2 C - 1} = \frac{1}{\omega} \left( \frac{\omega L_2}{\omega L_2 C - \frac{1}{\omega}} \right) = \frac{1}{\omega} \left( \frac{1}{C - \frac{1}{\omega} \frac{1}{\omega L_2}} \right).$$

Тобто другий вираз в дужках (2.145) є еквівалентом ємності і тому комплекс вхідного опору можна представити в такому вигляді:

$$\underline{Z} = j \left( \omega L_1 - \frac{\omega L_2}{\omega^2 L_2 C - 1} \right) = jX_{L_1} - jX_{L_2 C} = jX, \quad (2.168)$$

$$\text{де } X = \omega L_1 - \frac{\omega L_2}{\omega^2 L_2 C - 1}.$$

1. Розглянемо умову виникнення резонансу напруг в цьому колі.

При резонансі напруг  $X = 0$ , тобто

$$\omega L_1 = \frac{\omega L_2}{\omega^2 L_2 C - 1}; \quad \omega^2 L_1 L_2 C - L_1 = L_2 \quad (2.169)$$

Резонансна частота буде дорівнювати:  $\omega_{0_H} = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}}$ ,

де  $\omega_{0_H}$  - частота при резонансі напруг.

Резонанс напруг розглядається в послідовному контурі, що складається з індуктивності  $L_1$  і еквівалентної ємності  $C_e = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 \omega^2}}$  (рис.2.75).

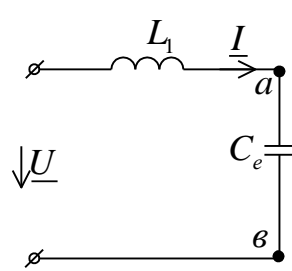


Рис. 2.75

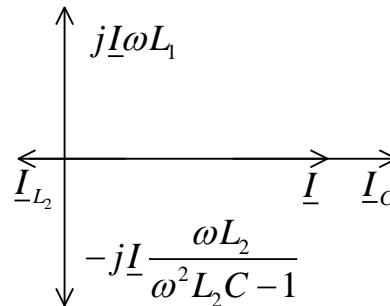


Рис. 2.76

При резонансі напруг паралельний контур  $L_2 C$  еквівалентний ємності, тому струм у котушці  $L_2$  буде мати мінімальне значення, струм у ємності  $I_C$  буде мати максимальне значення і збігатися зі струмом  $I$  (як у послідовному контурі).

Напруга на індуктивності  $L_1$  випереджає струм  $I$ , а на еквівалентній ємності відстає від струму на  $90^\circ$  (рис.2.76).

## 2. Розглянемо умову виникнення резонансу струмів.

При резонансі струмів  $b=0$  або  $X = \infty$  при  $\omega^2 L_2 C - 1 = 0$ ,

$$(2.170)$$

тобто  $\omega_{0c} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C}}$ , де  $\omega_{0c}$  - частота при резонансі струмів.

При цій частоті має місце резонанс струмів у паралельних вітках  $L_2$  і  $C$ . Побудуємо векторну діаграму для режиму резонансу струмів (рис.2.77).

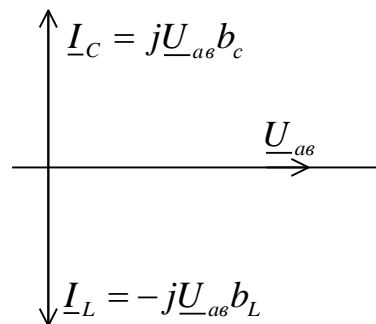


Рис. 2.77

Відкладаємо вектор  $\underline{U}_{ab}$ , потім  $\underline{I}_C$ , який випереджає  $\underline{U}_{ab}$ , і  $\underline{I}_L$  відстає від  $\underline{U}_{ab}$  на  $90^\circ$ ,  $\underline{I}_L$  і  $\underline{I}_C$  рівні і знаходяться в протифазі, тобто  $\underline{I} = 0$ , а  $\underline{U}_{ab} = \underline{U}$  (рис.2.78).

Порівняємо частоти  $\omega_{0c}$  і  $\omega_{0H}$ .

$$\omega_{0_H} = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} = \sqrt{1 + \frac{L_2}{L_1}} \frac{1}{\sqrt{L_2 C}} > \omega_{0_C} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C}} \quad (2.171)$$

Розглянемо частотні характеристики (рис.2.54).

I. Резонанс струмів:

$$b=0, \text{ але } b = b_L - b_C,$$

$$\text{де } b_L = \frac{1}{\omega L_2}, \text{ при } \omega \rightarrow 0 \quad b_L \rightarrow \infty; \text{ при } \omega \rightarrow \infty \quad b_L \rightarrow 0;$$

$$-b_C = -\omega C, \text{ при } \omega \rightarrow 0 \quad -b_C \rightarrow 0; \text{ при } \omega \rightarrow \infty \quad -b_C \rightarrow \infty.$$

II. Резонанс напруг:  $X=0$

Розглянемо еквівалентний опір паралельного контуру:

$$X' = \frac{1}{b}; \quad b = b_L - b_C = \frac{1}{\omega L_2} - \omega C.$$

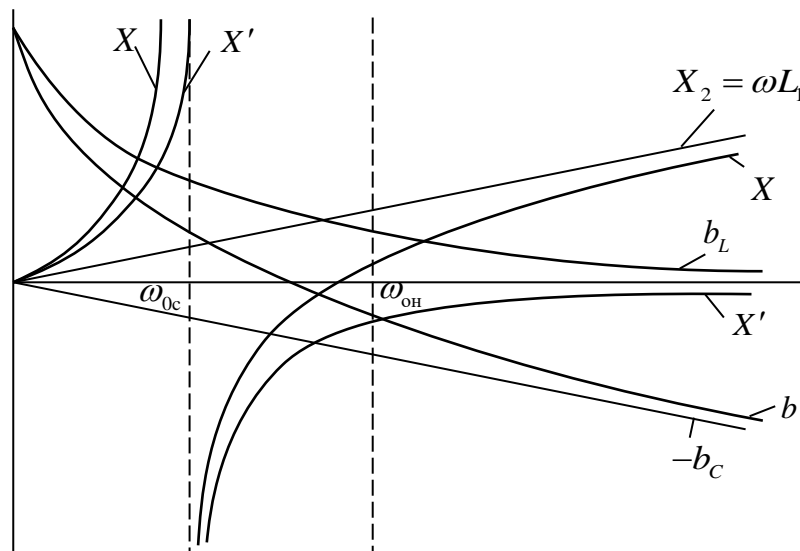


Рис. 2.78

$$\text{при } \omega = 0 \quad b \rightarrow \infty, \quad a; \quad X' \rightarrow 0$$

$$\text{при } \omega = \omega_{0_C} \quad b_L = b_C \text{ і } b=0; \quad X' \rightarrow \infty$$

В області негативних значень  $b$

$$b = 0, \quad X' \rightarrow -\infty; \quad \omega \rightarrow \infty; \quad b \rightarrow -\infty, \quad X' \rightarrow 0.$$

Резонансна частота  $\omega_{0_H}$  розташована в області частот, де  $X' < 0$ , тобто резонанс має ємнісної характер.

Таким чином, не може бути при одній і тій же частоті і резонансу струмів і резонансу напруг. Резонансні частоти  $\omega_{0_H}$  і  $\omega_{0_C}$  не збігаються.

Енергетичні процеси при резонансі у складних колах протікають значно складніше, ніж у колах з послідовним або паралельним з'єднанням реактивності.

## 2.25. Електричні кола з індуктивно зв'язаними елементами

Розглянемо електричні кола, в яких є явище взаємоіндукції, тобто наведення ЕРС в одному елементі при зміні струму у другому елементі електричного кола, яке виникає тільки при магнітному зв'язку двох котушок зі струмами, розташованими одна від одної так, що магнітний потік, викликаний струмом однієї котушки  $i_1$  зчеплений з витками обох котушок. Кола, в яких наводиться ЕРС взаємоіндукції, зветься **індуктивно зв'язаними колами**.

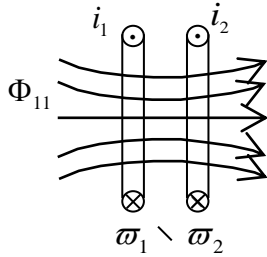


Рис. 2.79

Розглянемо дві індуктивно зв'язані котушки, які мають відповідно  $\varpi_1$  і  $\varpi_2$  витків (рис.2.79).

Потокозчеплення самоіндукції першої котушки -  $\Psi_{11} = \Phi_{11}\varpi_1 = L_1i_1$ , другої котушки -  $\Psi_{22} = \Phi_{22}\varpi_2 = L_2i_2$ .

Потокозчеплення взаємоіндукції для першої та другої котушок відповідно дорівнюють:

$$\Psi_{12} = \Phi_{12}\varpi_1 = \Phi_{12}i_2; \Psi_{21} = \Phi_{21}\varpi_2 = \Phi_{21}i_1.$$

Коефіцієнт пропорційності  $M_{12}$  ( $M_{21}$ ) зветься взаємоіндуктивністю і є мірою магнітного впливу одного елемента на другий:  $M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{i_2} = \frac{\varpi_1\Phi_{12}}{i_2}$ ;  $M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{i_1} = \frac{\varpi_2\Phi_{21}}{i_1}$ . (2.172)

Для лінійних електричних кіл завжди виконується рівняння:  $M_{12} = M_{21}$ , тому індекси біля коефіцієнтів взаємоіндуктивності не ставлять, а позначають буквою  $M$ .

Це можна доказати, якщо виразити потоки взаємоіндуктивності  $\Phi_{12}$  та  $\Phi_{21}$  через відповідні намагнічуючі сили  $i_1\varpi_1$  та  $i_2\varpi_2$  та магнітну провідність кіл, по яких замикаються ці потоки:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{21} &= \frac{i_1\varpi_1}{R_M} \\ \Phi_{12} &= \frac{i_2\varpi_2}{R_M} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} M_{21} &= \frac{\varpi_2\varpi_1 \cdot i_1}{i_1 \cdot R_M} = \frac{\varpi_1\varpi_2}{R_M} \\ M_{12} &= \frac{\varpi_1\varpi_2 \cdot i_2}{i_2 \cdot R_M} = \frac{\varpi_1\varpi_2}{R_M} \end{aligned} \quad M_{12} = M_{21} = M \quad (2.173)$$

$\Phi = \frac{i\varpi}{R_M}$ , де  $R_M = \frac{l}{\mu_a S}$  - магнітний опір магнітопроводу;  $S$  - переріз магнітопроводу;  $\mu$  - магнітна проникливість магнітопроводу;  $l$  - середня довжина магнітопроводу.

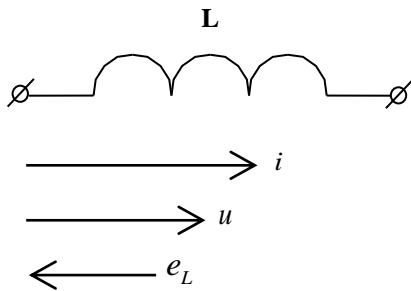
Згідно закону електромагнітної індукції Фарадея-Максвелла, зміна потокозчеплення самоіндукції викликає ЕРС самоіндукції:

$$e_L = -\frac{d\Psi}{dt}. \quad (2.174)$$

Позитивний напрям  $u$ ,  $e_L$  (рис. 2.80) приймається співпадаючим з позитивним напрямом струму. Але завжди треба пам'ятати, що при цьому:

$$u_L = -e_L \text{ та } e_L = -L \frac{di}{dt}; u_L = L \frac{di}{dt}.$$

У свою чергу ЕРС взаємоіндукції першої котушки дорівнює:  $e_{M1} = -M \frac{di_2}{dt}$ . Але який напрям струму взаємоіндукції відносно потоку самоіндукції: узгоджений або зустрічний? З яким знаком треба урахувувати напругу, що компенсує ЕРС взаємоіндукції? Будемо вважати, що як  $L > 0$ , так і  $M > 0$  завжди, але при цьому треба пам'ятати, що потоки само- і взаємоіндукції  $\Phi_{11}$  та  $\Phi_{12}$  співпадають за напрямком коли:



$$\begin{aligned} u_{1M} = -e_{1M} &= M \frac{di_2}{dt}; \\ e_{1M} &= -M \frac{di_2}{dt} \\ u_{1M} &= M \frac{di_2}{dt} \end{aligned} \quad (2.175)$$

Рис.2.80

Якщо потоки само- і взаємоіндукції спрямовані назустріч, то:

$$u_{1M} = -e_{1M} = -M \frac{di_2}{dt};$$

тобто:

$$\begin{aligned} e_{1M} &= M \frac{di_2}{dt} \\ u_{1M} &= -M \frac{di_2}{dt} \end{aligned} \quad (2.176)$$

Розглянемо співвідношення:

$$\frac{M_{12}M_{21}}{L_1L_2} = \frac{\frac{\varpi_1\Phi_{12}}{i_2} \frac{\varpi_2\Phi_{21}}{i_1}}{\frac{\varpi_1\Phi_{11}}{i_1} \frac{\varpi_2\Phi_{22}}{i_2}} = \frac{\Phi_{12}\Phi_{21}}{\Phi_{11}\Phi_{22}} = K^2 < 1; K = \frac{M}{\sqrt{L_1L_2}} < 1. \quad (2.177)$$

де  $K$  – коефіцієнт зв'язку індуктивно зв'язаних елементів.

Щоб знати, з яким знаком записувати у рівняннях напруги, які компенсують ЕРС взаємоіндукції, треба знати, який напрям мають потоки само- та взаємоіндукції у індуктивно зв'язаних елементах.

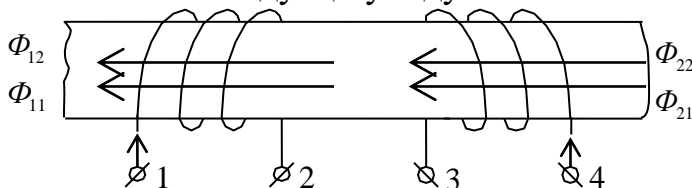


Рис. 2.81

Для цього роблять розмітку затискачів індуктивно зв'язаних елементів.

Затискачі двох індуктивно зв'язаних елементів зветься однойменними, якщо при

однакових напрямках струмів відносно цих затискачів потоки  $\Phi_{11}$  та  $\Phi_{22}$  самоіндукції та потоки  $\Phi_{12}$  та  $\Phi_{21}$  взаємоіндукції узгоджені, тобто мають узгоджений напрям.

Одноийменні затискачі позначаються “\*” або “•”, на рис.2.82 затискачі 1 та 4, 2 та 3 є одноийменні. Одноийменні затискачі визначаються напрямом намотки котушок.

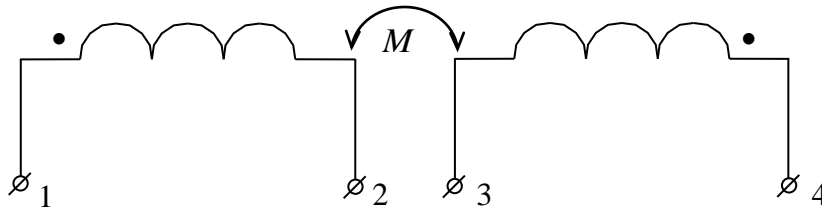


Рис 2.82

Завдяки поняттю про одноийменні затискачі немає необхідності при кресленні електричних схем показувати напрям намотки витків індуктивно зв'язаних елементів. Достатньо розмітити на схемі одноийменні затискачі (рис 2.83).

### 2.25.1. Послідовне з'єднання двох індуктивно зв'язаних елементів

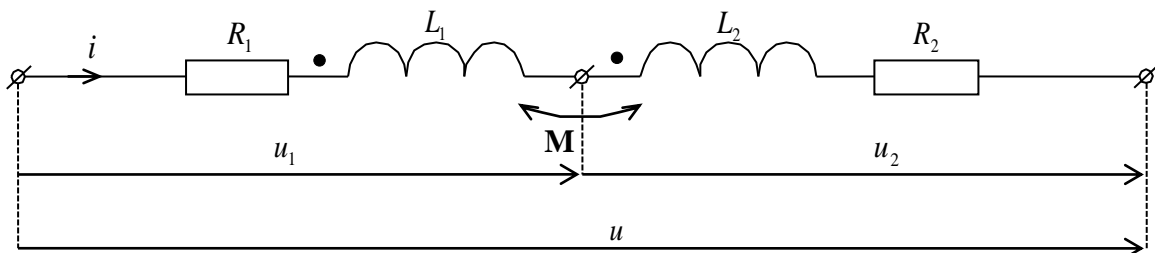


Рис.2.83

а) Розглянемо узгоджене з'єднання (рис. 2.84).

Складемо рівняння згідно другого закону Кірхгофа:

$$u = u_1 + u_2 = \underbrace{iR_1 + L_1 \frac{di}{dt}}_{u_1} + \underbrace{M \frac{di}{dt} + iR_2 + L_2 \frac{di}{dt}}_{u_2} + M \frac{di}{dt} \quad (2.178)$$

Запишемо це рівняння у комплексній формі:

$$\underline{U} = \underline{I}(R_1 + R_2 + j\omega(L_1 + L_2 + 2M)) = \underline{I}(R_1 + R_2 + j\omega L_{\text{узг.}}) = \underline{I}(R_1 + R_2 + jX_{\text{узг.}}) = \underline{I}Z_{\text{узг.}}, \quad (2.179)$$

де  $L_{\text{узг.}} = L_1 + L_2 + 2M$  – еквівалентна індуктивність кола при узгодженому з'єднанні елементів;  $X_{\text{узг.}} = \omega L_{\text{узг.}}$  – реактивний опір кола при узгодженому з'єднанні елементів.

Векторна діаграма кола зі взаємоіндуктивністю при узгодженому з'єднанні.

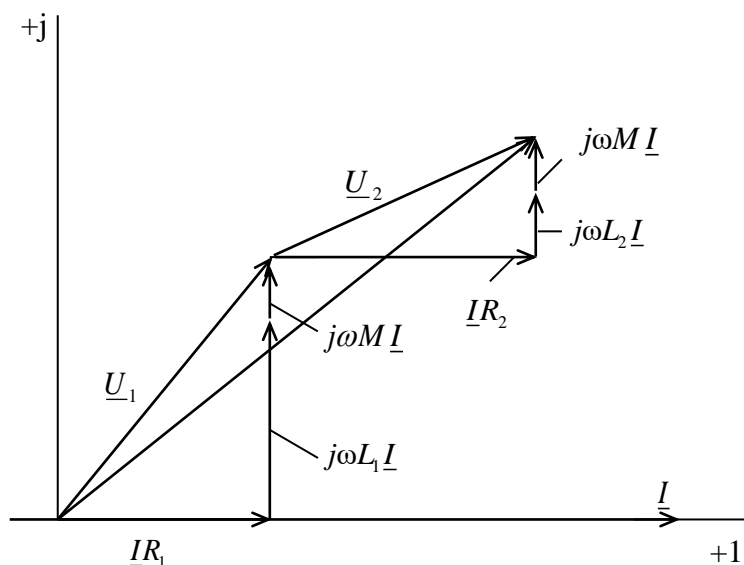


Рис. 2.84

б) З'єднання назустріч.

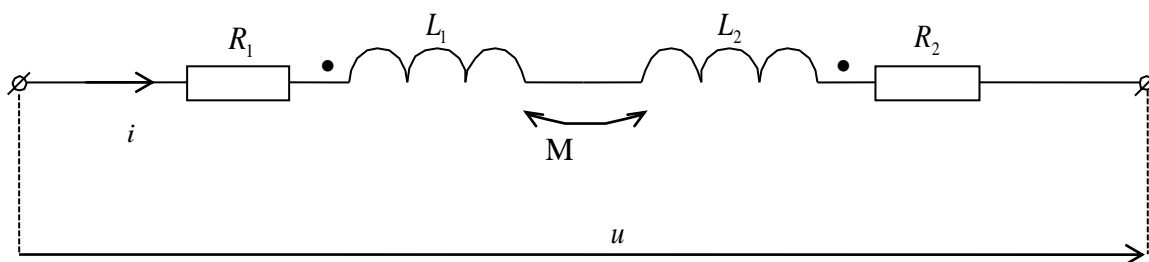


Рис. 2.85

Складемо рівняння за другим законом Кірхгофа у комплексній формі для схеми (рис. 2.85):

$$\begin{aligned} \underline{U} &= \underbrace{\underline{I}R_1 + j\omega L_1 \underline{I} - j\omega M \underline{I}}_{\underline{U}_1} + \underbrace{\underline{I}R_2 + j\omega L_2 \underline{I} - j\omega M \underline{I}}_{\underline{U}_2} = \underline{I}(R_1 + R_2 + j\omega(L_1 + L_2 - 2M)) = \\ &= \underline{I}(R_1 + R_2 + j\omega L_{\text{звс.}}) = \underline{I}(R_1 + R_2 + jX_{\text{звс.}}) = \underline{I}\underline{Z}_{\text{звс.}}, \end{aligned} \quad (2.180)$$

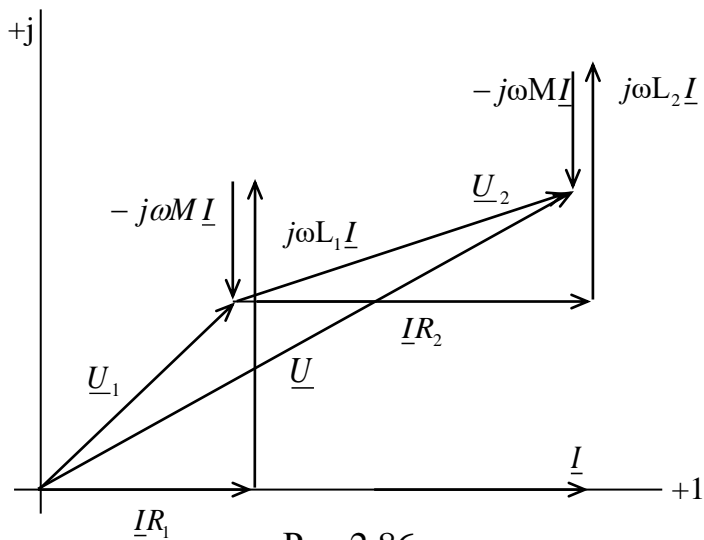


Рис.2.86

де  $L_{\text{звс.}} = L_1 + L_2 - 2M$  – еквівалентна індуктивність кола при з'єднанні назустріч;  
 $X_{\text{звс.}} = \omega L_{\text{звс.}}$  – реактивний опір кола при з'єднанні назустріч.

Векторна діаграма кола зі взаємоіндуктивністю



при зустрічному включенні (рис. 2.86).

Із викладеного вище можна зробити висновок, що наявність взаємної індукції збільшує індуктивність при узгодженому включенні і зменшує її при зустрічному включенні.

При побудові векторної діаграми приймали, що  $L_1 > M$  та  $L_2 > M$ .

Умови  $L_1 < M$  і  $L_2 < M$ , одночасно виконуватись не можуть.

Якщо  $L_1 > M$ , а  $L_2 < M$ , то напруга  $\underline{U}_2$  може відставати від струму  $\underline{I}$ , як і у випадку ємнісного опору, але реактивний опір усього кола – індуктивний і струм відстає від напруги. Це ємнісний ефект.

### 2.25.2. Визначення коефіцієнта взаємоіндукції двох індуктивно зв'язаних елементів експериментально

1-й метод. З'єднаємо котушки послідовно і зробимо виміри потужності, напруги, струму.

$$\text{Визначаємо: } Z = \frac{U}{I}; R = \frac{P}{I^2}; X = \sqrt{Z^2 - R^2}.$$

З'єднаємо котушки послідовно, але поміняємо місцями кінці другої котушки, і зробимо такі ж виміри.

$$\text{Визначаємо: } Z' = \frac{U'}{I'}, R' = \frac{P'}{(I')^2}, X' = \sqrt{(Z')^2 - (R')^2}.$$

Припустимо, що одержали  $X > X'$ , пам'ятаючи, що

$$X_{\text{узг.}} = \omega L_{\text{узг.}} = \omega L_1 + \omega L_2 + 2\omega M;$$

$$X_{\text{зус.}} = \omega L_{\text{зус.}} = \omega L_1 + \omega L_2 - 2\omega M;$$

$$X_{\text{узг.}} - X_{\text{зус.}} = 4\omega M; M = \frac{X_{\text{узг.}} - X_{\text{зус.}}}{4\omega}.$$

$$\text{У нашому випадку: } M = \frac{X - X'}{4\omega}.$$

2-й метод визначення коефіцієнту взаємоіндукції.

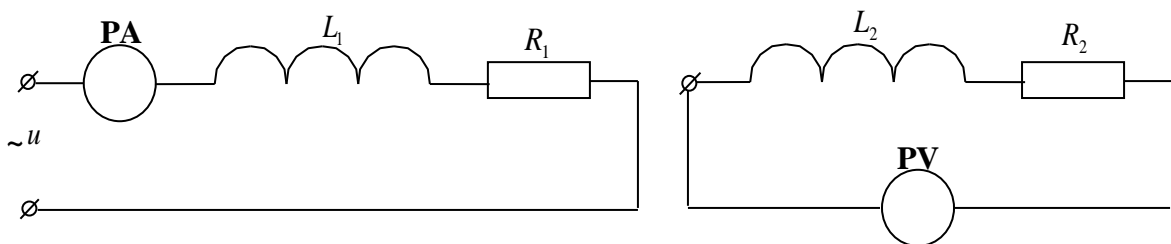


Рис. 2.87

До першої котушки підключаємо джерело напруги і вимірюємо ЕРС взаємодукції  $E_2$  (рис.2.87). Так як друга котушка знаходиться у режимі холостого ходу, то  $\pm\omega M I_1 = E_2$  і  $\omega M I_1 = E_2$ , звідки  $M = \frac{E_2}{\omega I_1}$ .

### 2.25.3. Паралельне з'єднання двох індуктивно зв'язаних елементів

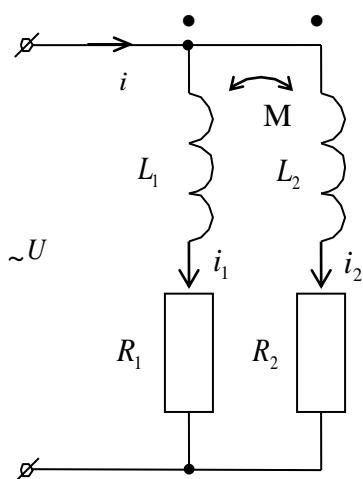


Рис.2.88

а) Узгоджене з'єднання. (рис. 2.88)

$$\begin{cases} \underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 \\ \underline{U} = \underline{I}_1 R_1 + j\omega L_1 \underline{I}_1 + j\omega M \underline{I}_2 \\ \underline{U} = \underline{I}_2 R_2 + j\omega L_2 \underline{I}_2 + j\omega M \underline{I}_1 \end{cases} \quad (2.181)$$

Якщо відоме значення струму  $\underline{I}$  у нерозгалуженій частині схеми, то напруга на затискачах кола дорівнює:

$$\underline{U} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}{\underline{Z}_\Sigma} \underline{I}, \quad (2.182)$$

де  $\underline{Z}_\Sigma = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 - 2\underline{Z}_M$ ;  $\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1$ ;

$\underline{Z}_2 = R_2 + j\omega L_2$ ;  $\underline{Z}_M = j\omega M$ .

Струми у вітках:  $\underline{I}_1 = \frac{\underline{Z}_2 - \underline{Z}_M}{\underline{Z}_\Sigma} \underline{I}$ ,  $\underline{I}_2 = \frac{\underline{Z}_1 - \underline{Z}_M}{\underline{Z}_\Sigma} \underline{I}$ . (2.183)

Вхідний опір кола:  $\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}{\underline{Z}_\Sigma}$ . (2.184)

Ці вирази одержані після заміни змінних у першому рівнянні системи (2.178) та визначення  $\underline{I}_2$ , тобто одержуємо рівняння відносно  $\underline{U}$  та  $\underline{I}$ .

б). З'єднання назустріч.

При з'єднанні назустріч комплексний опір взаємної індукції залишається зі знаком  $-\underline{Z}_M$  і тоді, зробив аналогічні перетворення, одержимо:

$$\underline{U} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}{\underline{Z}_\Sigma} \underline{I} \quad (2.185)$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_M}{\underline{Z}_M} \underline{I}; \quad \underline{I}_2 = \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_M}{\underline{Z}_M} \underline{I}; \quad (2.186)$$

$$\underline{Z} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}{\underline{Z}_\Sigma}, \quad (2.187)$$

де  $\underline{Z}_\Sigma = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + 2\underline{Z}_M$ .

## 2.25.4. Розрахунок розгалужених кіл при взаємній індукції

При розрахунках розгалужених кіл застосовуються такі методи:

1. Метод безпосереднього застосування рівнянь Кірхгофа.
2. Метод контурних струмів.
3. Метод еквівалентного генератора (застосовується тільки тоді, коли струм чи напруга визначаються для вітки, яка індуктивно не зв'язана з останньою частиною схеми).
4. Метод накладання.

Метод вузлових потенціалів не застосовується, так як він не дозволяє враховувати ЕРС взаємної індукції.

Не можливе користування формулами перетворення  $\Delta \rightarrow Y$  і навпаки.

В основному кола зі взаємною індукцією розраховуються методом рівнянь Кірхгофа і методом контурних струмів.

При складанні рівнянь згідно законам Кірхгофа для врахування напруги, яка урівноважує ЕРС взаємоіндукції, користуються таким правилом: якщо напрям обходу контуру та напрям струму у індуктивно зв'язаних елементах кола однакові відносно однойменних затискачів, то напругу  $j\omega M I$  беруть зі знаком "+"; якщо їх напрями відносно однойменних затискачів не однакові, то напругу  $j\omega M I$  беруть зі знаком "-".

При складанні рівнянь методом контурних струмів напруга  $j\omega M I$  береться зі знаком "+", якщо напрям контурних струмів відносно однойменних затискачів однаковий.

Складемо рівняння за законом Кірхгофа для схеми рис. 2.89.

Довільно вибираємо позитивні напрями струмів і ЕРС і складаємо рівняння за першим та другим законами Кірхгофа.

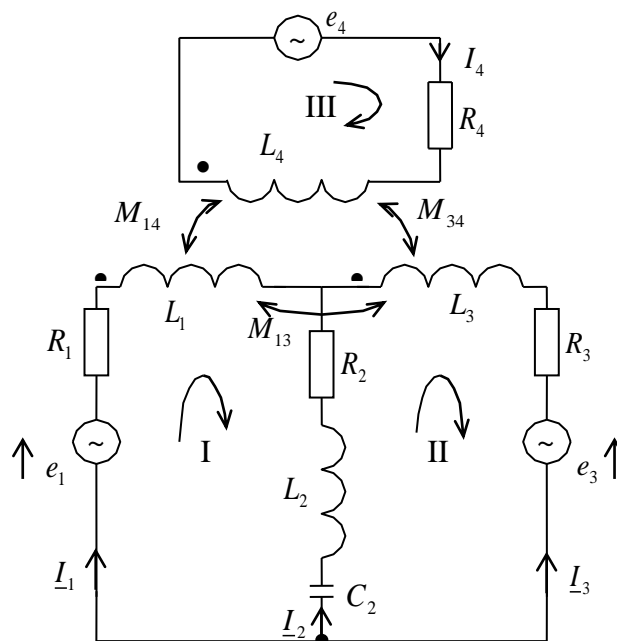


Рис. 2.89

$$1) \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0;$$

$$2) \underline{I}_1 R_1 + j\omega L_1 \underline{I}_1 - j\omega M_{13} \underline{I}_3 - j\omega M_{14} \underline{I}_4 - \underline{I}_2 R_2 - j\omega L_2 \underline{I}_2 - \frac{1}{j\omega C_2} \underline{I}_2 = \underline{E}_1;$$

$$3) \underline{I}_2 \left( R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \right) - \underline{I}_3 (R_3 + j\omega L_3) + j\omega M_{13} \underline{I}_1 - j\omega M_{34} \underline{I}_4 = -\underline{E}_3;$$

$$4) \underline{I}_4 (R_4 + j\omega L_4) - j\omega M_{14} \underline{I}_1 + j\omega M_{34} \underline{I}_3 = \underline{E}_4.$$

Складемо рівняння за методом контурних струмів (рис. 2.90).

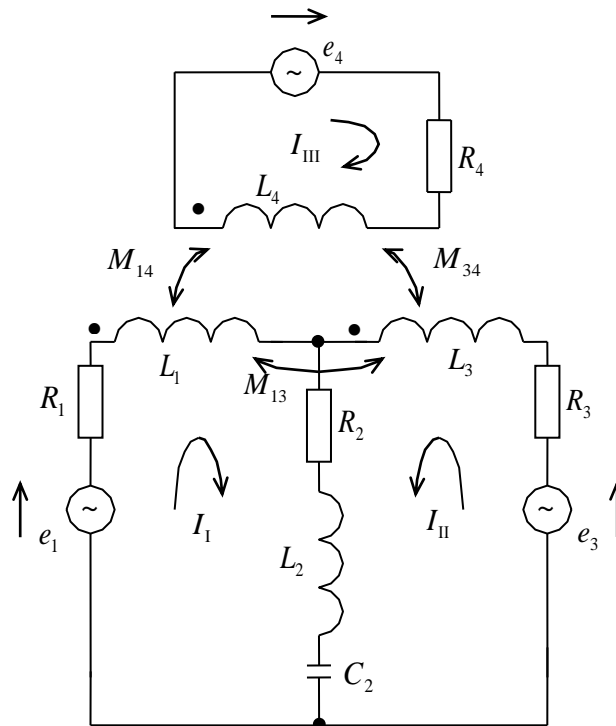


Рис. 2.90

1) Для першого контуру:

$$\underline{I}_I \left( R_1 + j\omega L_1 + R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \right) - \underline{I}_{II} \left( R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \right) + j\omega M_{13} \underline{I}_{II} - j\omega M_{14} \underline{I}_{III} = \underline{E}_1.$$

2) Для другого контуру:

$$\underline{I}_{II} \left( R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + R_3 + j\omega L_3 \right) - \underline{I}_I \left( R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \right) + j\omega M_{13} \underline{I}_I - j\omega M_{34} \underline{I}_{III} = -\underline{E}_3.$$

3) Для третього контуру:

$$\underline{I}_{III} (R_4 + j\omega L_4) - j\omega M_{14} \underline{I}_I - j\omega M_{34} \underline{I}_{II} = \underline{E}_4.$$

### 2.25.5. Еквівалентна заміна індуктивних зв'язків

У ряді випадків доцільно перетворити коло зі взаємною індукцією у еквівалентне коло, яке не має індуктивних зв'язків.

При послідовному з'єднанні 2-х котушок (рис. 2.91) ми маємо:

$$L_{\text{вз.}} = L_1 + L_2 + 2M \quad \text{і} \quad L_{\text{зв.}} = L_1 + L_2 - 2M. \quad (2.188)$$

Перетворимо ці вирази:

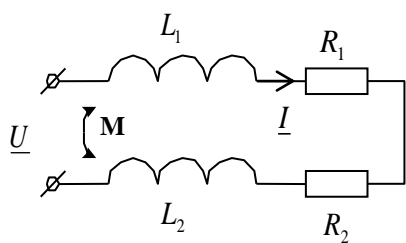


Рис.2.91

$$L_{\text{уз.}} = (L_1 + M) + (L_2 + M),$$

$$L_{\text{зус.}} = (L_1 - M) + (L_2 - M) \quad (2.189)$$

і запишемо рівняння:

$$\underline{U}_{\text{уз.}} = \underline{I}(R_1 + R_2 + j\omega(L_1 + M) + j\omega(L_2 + M)); \quad (2.190)$$

$$\underline{U}_{\text{зус.}} = \underline{I}(R_1 + R_2 + j\omega(L_1 - M) + j\omega(L_2 - M)). \quad (2.191)$$

Введемо позначення:

$$L_1 + M = L_1', \quad L_2 + M = L_2'; \quad L_1 - M = L_1'', \quad \text{а}$$

$$L_2 - M = L_2''. \quad (2.192)$$

$$\underline{U} = \underline{I}(R_1 + R_2 + j\omega L_1' + j\omega L_2'); \quad (2.193)$$

$$\underline{U} = \underline{I}(R_1 + R_2 + j\omega L_1'' + j\omega L_2''). \quad (2.194)$$

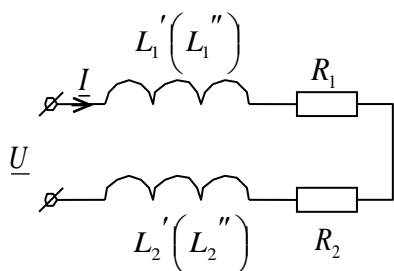


Рис.2.92

При порівнянні заданої та еквівалентної схеми виходить, що незважаючи на те, що струм та напруга обох схем однакові, напруга на затискачах віток еквівалентної схеми не дорівнює відповідним напругам на вітках заданої схеми. Однак це не заважає застосуванню такої заміни при розрахунках кіл зі взаємною індукцією, так як після визначення струмів у вітках еквівалентної

схеми можна знайти напругу на затискачах заданого кола.

Еквівалентна заміна при паралельному з'єднанні індуктивних елементів (рис.2.92).

а) Узгоджене з'єднання.

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1; \quad Z_2 = R_2 + j\omega L_2; \quad Z_M = j\omega M \quad (2.195)$$

Запишемо рівняння Кірхгофа:

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 \quad (2.196)$$

$$\underline{U} = \underline{I}_1 Z_1 + \underline{Z}_M \underline{I}_2 \quad (2.197)$$

$$\underline{U} = \underline{Z}_M \underline{I}_1 + \underline{Z}_2 \underline{I}_2 \quad (2.198)$$

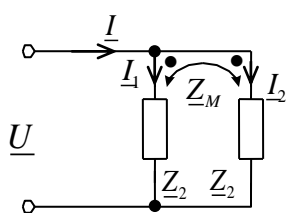


Рис. 2.93

У рівняннях (2.194) і (2.195) струми, які не протікають в даній вітці схеми, заміняємо через сумарний струм, тобто струми, які протікають в цих

вітках, дорівнюють:

для рівняння (2.175):  $\underline{I}_2 = \underline{I} - \underline{I}_1, \quad (2.199)$

для рівняння (2.176):  $\underline{I}_1 = \underline{I} - \underline{I}_2, \quad (2.200)$

Звідки:

тримаємо:  $\underline{U} = \underline{I}_1 Z_1 + \underline{Z}_M (\underline{I} - \underline{I}_1) = (\underline{Z}_1 - \underline{Z}_M) \underline{I}_1 + \underline{Z}_M \underline{I} \quad (2.201)$

$$\underline{U} = \underline{Z}_M (\underline{I} - \underline{I}_2) + \underline{Z}_2 \underline{I}_2 = (\underline{Z}_2 - \underline{Z}_M) \underline{I}_2 + \underline{Z}_M \underline{I}$$

Для отриманих рівнянь будемо еквівалентні схеми (рис.2.94 та 2.95):

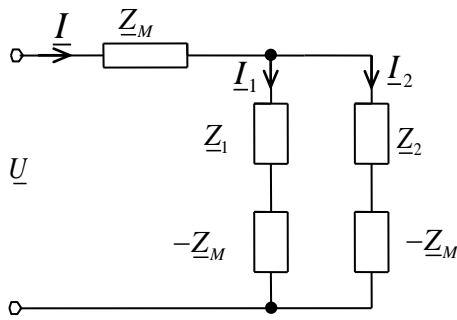


Рис. 2.94

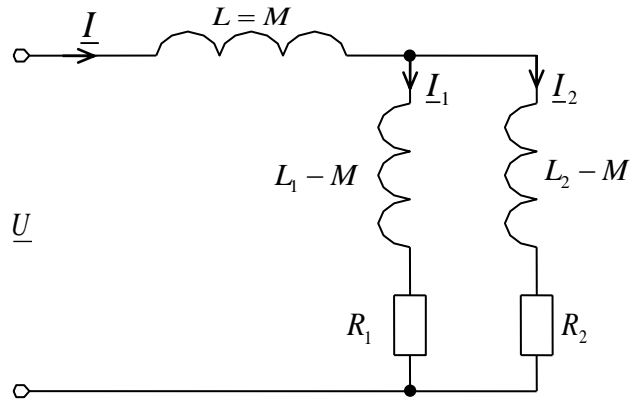


Рис. 2.95

При зміні полярності однієї з обмоток вихідної схеми в еквівалентній схемі знак опору  $\underline{Z}_M$  змінюємо на протилежний.

### 2.25.6. Повітряний трансформатор

Трансформатор являє собою пристрій, який перетворює електричну енергію змінного струму з одними параметрами на електричну енергію з іншими параметрами.

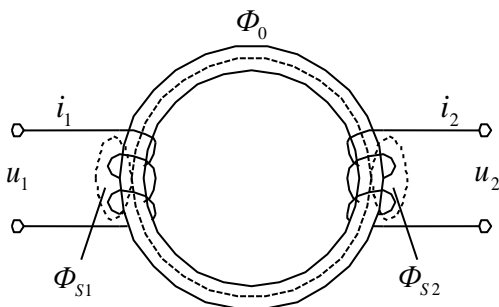


Рис.2.96

Трансформатор має дві або декілька індуктивно зв'язаних обмоток.

Для посилення магнітного зв'язку між котушками їх розміщують на одному феромагнітному осерді, в цьому випадку ми маємо нелінійну залежність між потоком та повним намагнічуючим струмом обмотки.

Розглянемо процеси, що утворюються у трансформаторі у лінійному режимі. Трансформатори без феромагнітних осердь зветься лінійними або повітряними, назва „повітряні” підкреслює те, що магнітний потік замикається через повітря.

Обмотка трансформатора (рис.2.96), до якої підключається джерело живлення, зветься первинною; обмотка трансформатора, до якої підключається навантаження, - вторинною. Згідно цьому напруги та струми цих обмоток зветься первинними та вторинними.

Однак ця назва є умовною, все залежить, до якої обмотки подається напруга. Якщо до однієї із обмоток – наприклад, первинної, буде підведена напруга і по обмотці тече синусоїдний струм, то магнітне поле теж буде змінюватися за синусоїдним законом.

Частина потоку, яка утворюється цим струмом, буде перетинати вітки першої та другої обмоток, інша частина буде охоплювати тільки вітки першої обмотки.

Співвідношення між цими потоками залежить від конструкції трансформатора (взаємного розташування котушок, їх розмірів, кількості

витків). Та частина потоку, яка є загальною щодо обох обмоток, зветься основним або головним „ $\Phi_0$ ”, а друга – потоком розсіювання  $\Phi_s$ .

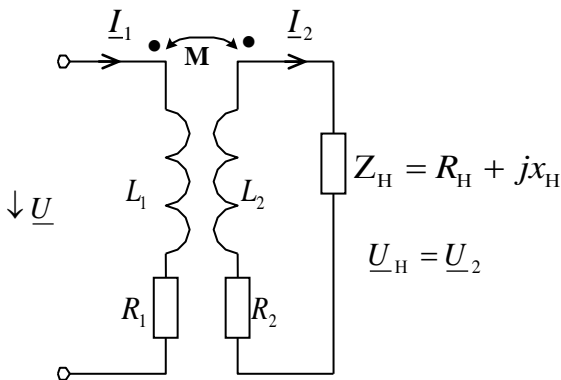
При зміні потоку „ $\Phi_0$ ” за часом у другій обмотці індукується ЕРС взаємоіндукції. Якщо до затискачів другої котушки підключене навантаження, то під дією цієї ЕРС у другій котушці виникає струм. Якщо не брати до уваги ємність між витками обмоток трансформатора, то коло, яке складається з двох обмоток трансформатора та навантаження, можна замінити еквівалентною схемою.

Складені згідно 2-го закону Кірхгофа рівняння мають такий вигляд:

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1 R_1 + j\omega L_1 \underline{I}_1 - j\omega M \underline{I}_2; \quad (2.202)$$

$$0 = \underline{I}_2 R_2 + j\omega L_2 \underline{I}_2 - j\omega M \underline{I}_1 + \underline{U}_H. \quad (2.203)$$

Згідно рівнянь (2.202) та (2.203) побудуємо векторну діаграму (рис.2.98).



2.97

Відкладемо вектори (рис.2.98)

$\underline{I}_2$ ,  $\underline{I}_2 R_2$ ,  $jX_H \underline{I}_2$  (приймаємо, що  $X_H > 0$ ). Далі будуємо вектори  $\underline{I}_2 R_2$ ,  $j\omega L_2 \underline{I}_2$ . Згідно рівняння (2.203), склавши всі ці вектори та додавши ще вектор  $-j\omega M \underline{I}_1$ , отримаємо 0. Тобто ми знайшли вектор  $-j\omega M \underline{I}_1$ . Вектор

$\underline{I}_1$  випереджає вектор  $-j\omega M \underline{I}_1$  на кут  $\frac{\pi}{2}$ . Відкладемо  $\underline{I}_1$ , потім  $\underline{I}_1 R_1$ ,  $j\omega L_1 \underline{I}_1$  та  $-j\omega M \underline{I}_2$ . Склавши всі ці вектори, одержимо вектор напруги  $\underline{U}_1$ .

Введемо позначення:

$$\begin{cases} X_2 + X_H = X_{22} \\ R_2 + R_H = R_{22} \end{cases}$$

та запишемо рівняння (2.199) та (2.200) у вигляді:

$$\underline{I}_2 R_{22} + jX_{22} \underline{I}_2 - j\omega M \underline{I}_1 = 0, \quad (2.204)$$

$$\text{звідки } \underline{I}_2 = \frac{j\omega M \underline{I}_1}{R_{22} + jX_{22}}.$$

(2.205)

Підставимо формулу (2.183) у рівняння (2.180) і одержимо:

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1 R_1 + j\underline{I}_1 X_1 - j\omega M \frac{j\omega M}{R_{22} + jX_{22}} \underline{I}_1 = \underline{I}_1 \left( R_1 + jX_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_{22} + jX_{22}} \right);$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{R_1 + jX_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_{22} + jX_{22}} \cdot \frac{R_{22} - jX_{22}}{R_{22} - jX_{22}}} = \frac{\underline{U}_1}{R_1 + jX_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} R_{22} - j \frac{\omega^2 M^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} X_{22}} =$$

$$= \frac{\underline{U}_1}{R_1 + jX_1 + R_{\text{вн}} + jx_{\text{вн}}}, \quad (2.206)$$

$$\text{де } R_{\text{вн}} = \frac{\omega^2 M^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} R_{22}; \quad X_{\text{вн}} = -\frac{\omega^2 M^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} X_{22}.$$

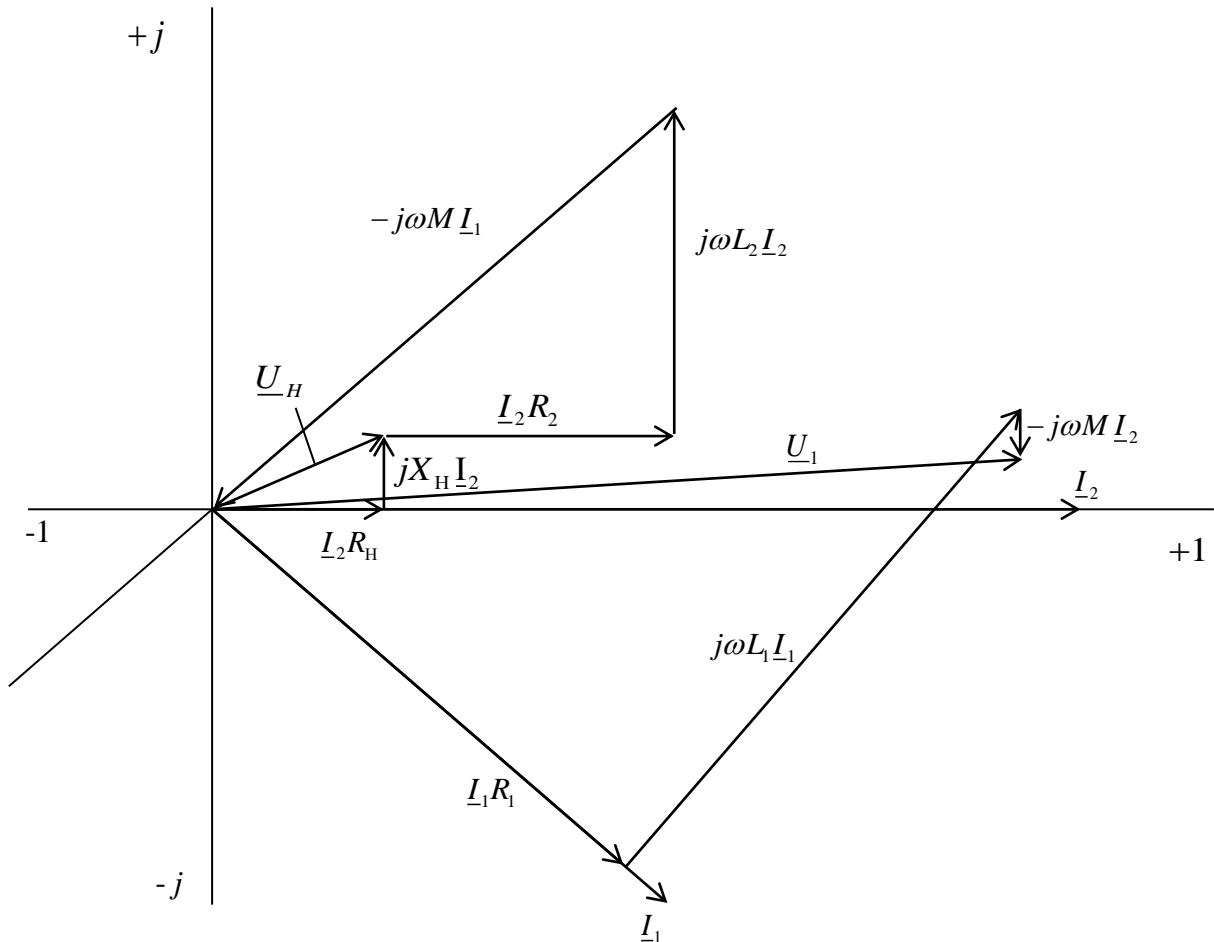


Рис. 2.98

Опори  $R_{\text{вн}}$ ,  $X_{\text{вн}}$ , зветься внесеними (з другого контуру в перший) відповідно активним та реактивним опорами.

Всю схему (відповідно першої обмотки) можна розглядати як двополюсник з опорами  $R_1 + R_{\text{вн}}$  та  $X_1 + X_{\text{вн}}$  (рис.2.99).

Величина  $R_{\text{вн}}$  завжди позитивна  $R_{\text{вн}} > 0$ , а  $X_{\text{вн}}$  може бути як позитивна, так і негативна:  $X_{22} = X_2 + X_{\text{вн}}$ ;  $X_2 > 0$  завжди,  $X_{\text{вн}}$  може бути як більше 0, так і менше нуля, якщо  $X_{22} = X_2 + X_{\text{вн}} < 0$  то  $X_{\text{вн}} > 0$ .

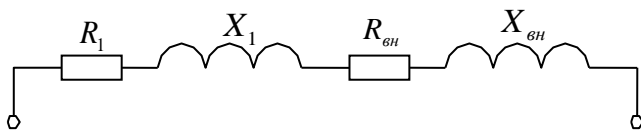


Рис. 2.99

Іноді, якщо зробити заміну трансформатора еквівалентним двополюсником, простіше виконувати розрахунки.



### Схема заміщення трансформатора.

Індуктивно зв'язані котушки трансформатора можна замінити схемами заміщення, які мають тільки електричні зв'язки, величини струмів та напруг на вході та виході схеми заміщення залишаються такими ж, як і у реальному трансформаторі.

Для одержання схеми заміщення головні рівняння трансформатора перетворюють і приходять до нових співвідношень, які дозволяють відобразити електричну схему, у якій  $\underline{U}_1$ ,  $\underline{I}_1$ ,  $\underline{U}_2$ ,  $\underline{I}_2$  будуть такими ж, як і у реальному трансформаторі.

$$\begin{cases} 0 = \underline{I}_2 R_2 + j\omega L_2 \underline{I}_2 - j\omega M \underline{I}_1 + \underline{I}_2 Z_H + j\omega M \underline{I}_2 - j\omega M \underline{I}_2 \\ 0 = \underline{I}_2 R_2 + j\omega(L_2 - M) \underline{I}_2 + \underline{I}_2 Z_H - j\omega M (\underline{I}_1 - \underline{I}_2) \end{cases} \quad (2.207)$$

Рівняння перетворюють, додаючи і віднімаючи  $j\omega M \underline{I}_1$  та  $j\omega M \underline{I}_2$ , і отримують наступну систему:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{I}_1 R_1 + j\omega L_1 \underline{I}_1 - j\omega M \underline{I}_2 + j\omega M \underline{I}_1 - j\omega M \underline{I}_1 \\ \underline{U}_1 = \underline{I}_1 R_1 + j\omega(L_1 - M) \underline{I}_1 + j\omega M (\underline{I}_1 - \underline{I}_2) \end{cases} \quad (2.208)$$

За рівняннями будемо електричну схему (рис. 2.100).

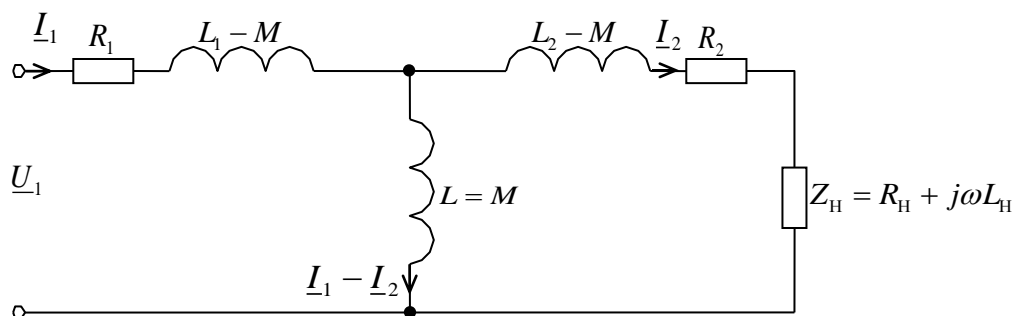


Рис.2.100

Якщо  $L_1 = L_2$ , то  $L_1 - M > 0$  та  $L_2 - M > 0$  і так як  $\frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} < 1$ , то  $M < L$ .

При  $L_1 \neq L_2$  одна з величин  $L_1 - M$  або  $L_2 - M$  може бути негативною. У цьому випадку схема заміщення може бути практично здійснена тільки при фіксованій частоті, коли негативна індуктивність може бути зображена ємносним елементом.

У загальному випадку схема з лінійними елементами, яка має негативну індуктивність, практично не може бути реалізована.

### 2.25.7. Ідеальний трансформатор

У реальному трансформаторі  $K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} < 1$ , крім того,  $R_1 \neq R_2 \neq 0$ .

Розглянемо трансформатор, у якого потік розсіювання дуже малий, тобто  $K \approx 1$  і можна знехтувати активними опорами, тобто  $R_1 = R_2 = 0$ .

Це ідеальні умови. У цьому випадку рівняння трансформатора мають вигляд:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = j\omega L_1 \underline{I}_1 - j\omega M \underline{I}_2 \\ 0 = j\omega L_2 \underline{I}_2 - j\omega M \underline{I}_1 + \underline{U}_2 \end{cases} \quad (2.209)$$

Відобразимо первинний струм та напругу через вторинний струм та напругу.

З другого рівняння системи (2.187) знайдемо струм  $\underline{I}_1$ :

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{j\omega M} + \frac{L_2}{M} \underline{I}_2, \quad (2.210)$$

та підставимо вираз (2.188) у перше рівняння (2.187):

$$\underline{U}_1 = j\omega L_1 \left( \frac{\underline{U}_2}{j\omega M} + \frac{L_2}{M} \underline{I}_2 \right) - j\omega M \underline{I}_2 = \frac{L_1}{M} \underline{U}_2 + j\omega \left( \frac{L_1 L_2}{M} - M \right) \underline{I}_2 \quad (2.211)$$

Розглянемо вираз у дужках  $\frac{L_1 L_2}{M} - M = \frac{L_1 L_2 - M^2}{M} = 0$ . Так як  $K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = 1$ , то  $L_1 L_2 = M^2$ , тому  $\underline{U}_1 = \frac{L_1}{M} \underline{U}_2$ .

Позначимо  $\frac{L_1}{M} = K_T$  - це постійна величина для заданого трансформатора:  $\underline{U}_1 = K_T \underline{U}_2$  за модулем  $U_1 = K_T U_2$ .

$$\frac{L_2}{M} = \frac{L_2 L_1}{M L_1} = \frac{M^2}{M L_1} = \frac{M}{L_1} = \frac{1}{K_T};$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{j\omega M} + \frac{1}{K_T} \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_1}{K_T j\omega M} + \frac{\underline{I}_2}{K_T}.$$

Якщо  $\omega L_1$  достатньо велике, то  $\underline{I}_1 \approx \frac{\underline{I}_2}{K_T}$  (це може бути при великих значеннях  $\omega$  або  $L_1$ ). Трансформатор, який задовольняє умовам:  $\underline{U}_1 = K_T \underline{U}_2$  та  $\underline{I}_1 = \frac{\underline{I}_2}{K_T}$ , зветься ідеальним.

Припущення: 1)  $R_1 = R_2 = 0$  - означає відсутність втрат енергії у трансформаторі; 2) при  $K_T = 1$  - потік розсіювання дорівнює 0, тому витки обох котушок перетинаються одним з тим же магнітним потоком.

Тому відношення ЕРС, які наводяться у обмотках, пропорційні відношенню кількості витків  $\varpi_1$  та  $\varpi_2$ .  $\left( e_1 = -\frac{d\psi_1}{dt} = -\varpi_1 \frac{d\Phi}{dt}; e_2 = -\frac{d\psi_2}{dt} = -\varpi_2 \frac{d\Phi}{dt}; \frac{e_1}{e_2} = \frac{\varpi_1}{\varpi_2} \right)$ . Якщо  $R_1 = R_2 = 0$ , то напруги на затискачах дорівнюють ЕРС, які в них наводяться.

Отже  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{\varpi_1}{\varpi_2} = K_T$ , який має назву коефіцієнта трансформації.

Ідеальному трансформатору притаманні такі властивості:

- 1) Завжди  $\frac{U_1}{U_2} = K_T$  та  $\frac{I_2}{I_1} = K_T$ , тобто  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = K_T = \frac{\varpi_1}{\varpi_2}$ . Таким чином, при будь-яких умовах відношення первинної напруги до вторинної на затискачах ідеального трансформатора дорівнює відношенню вторинного струму до первинного і дорівнює коефіцієнту трансформації.
- 2) Ідеальний трансформатор не має втрат енергії.
- 3) При розімкнутій вторинній обмотці через його первинну обмотку струму немає.

Реально такі трансформатори не існують, але до них наближається трансформатор, у якого  $K \approx 1$  та така кількість витків, що опір  $\omega L_1 \rightarrow \infty$ ;

$$\left( L_1 = \frac{\omega_1 \Phi}{i_1} \right).$$

Вхідний опір ідеального трансформатору:

$$\underline{Z}_{1ex} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{\frac{\varpi_1}{\varpi_2} U_2}{\frac{I_2}{\varpi_2}} = \left( \frac{\varpi_1}{\varpi_2} \right)^2 \frac{U_2}{I_2} = \left( \frac{\varpi_1}{\varpi_2} \right)^2 \underline{Z}_H = K_T^2 \underline{Z}_H \quad (2.212)$$

$$\underline{Z}_{1ex} = K_T^2 \underline{Z}_H; \quad Z_1 = K_T^2 Z_H,$$

трансформатор може використовуватися для узгодження опорів джерела та приймача енергії з тим, щоб підвищить потужність, що передається.

## 2.3. ЛІНІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА З ПЕРІОДИЧНИМИ НЕСИНУСОЇДНИМИ НАПРУГАМИ ТА СТРУМАМИ

### 2.3.1. Тригонометрична форма ряду Фур'є

Періодичними несинусоїдними струмами і напругами називаються струми і напруги, що змінюються в часі за періодичним несинусоїдним законом.

Вони виникають при чотирьох різних режимах роботи електричних кіл (і при сполученнях цих режимів).

- 1) Коли джерело ЕРС (джерело струму), має несинусоїдний характер зміни ЕРС (струму), а всі елементи кола – активні опори, індуктивності і ємності – лінійні, тобто від величини струму не залежать;
- 2) якщо джерело ЕРС (джерело струму) дає синусоїдну ЕРС (струм), але один або декілька елементів нелінійні;

- 3) коли джерело ЕРС (джерело струму) має несинусоїдну ЕРС (несинусоїдний струм), а до складу електричного кола входить одне чи кілька нелінійних опорів;
- 4) якщо джерело ЕРС (струму) має постійну чи синусоїдну ЕРС (струм), а один чи кілька елементів кола періодично змінюються в часі.

Розглянемо методику розрахунку і особливості роботи лінійних електричних кіл при впливі на них несинусоїдних ЕРС і струмів (1 режим).

Будь-яку періодичну функцію  $f(x)$  з періодом  $2\pi$ , що задовольняє умовам Діріхле (усі періодичні функції, що розглядаються в електротехніці, умовам Діріхле задовольняють), можна розкласти в ряд Фур'є.

Змінна величина  $x$  зв'язана з часом  $t$  співвідношенням:

$$x = \omega t = \frac{2\pi}{T} t, \quad (2.213)$$

де  $T$  - період функції в часі.

Тоді період функції по  $x$  дорівнює  $2\pi$ , а період тієї ж функції за часом дорівнює  $T$ .

Ряд Фур'є записують так:

$$f(x) = A_0 + A_1' \sin x + A_2' \sin 2x + A_3' \sin 3x + \dots + A_1'' \cos x + A_2'' \cos 2x + A_3'' \cos 3x \dots, \quad (2.214)$$

де  $A_0$  - постійна складова;

$A_1'$  - амплітуда синусної (що змінюється за законом синуса) складової першої гармоніки;

$A_1''$  - амплітуда косинусної складової першої гармоніки і т.д.

$$\text{Тут} \quad A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx; \quad (2.215)$$

$$A_1' = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin x dx; \quad A_1'' = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos x dx; \quad (2.216)$$

$$A_k' = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin kx dx; \quad A_k'' = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos kx dx. \quad (2.217)$$

Так як  $A_k' \sin kx + A_k'' \cos kx = A_k \sin(kx + \Psi_k)$ , де  $A_k = \sqrt{(A_k')^2 + (A_k'')^2}$  і  $\tan \Psi_k = \frac{A_k''}{A_k'}$ , то ряд Фур'є можна записати в іншій формі:

$$f(x) = A_0 + A_1 \sin(x + \Psi_1) + A_2 \sin(2x + \Psi_2) + \dots = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(kx + \Psi_k), \quad (2.218)$$

де  $A_k$  - амплітуда  $k$ -ої гармоніки ряду Фур'є.

Гармоніки, для яких  $k$  - непарне число, називаються непарними; для який  $k$  - парне число, - парними.

### 2.3.2. Деякі властивості періодичних кривих, що володіють симетрією

Розглянемо три криві (рис.2.101), що задовольняють умовам:

1.  $-f(x + \pi) = f(x)$
2.  $f(-x) = f(x)$
3.  $-f(-x) = f(x)$

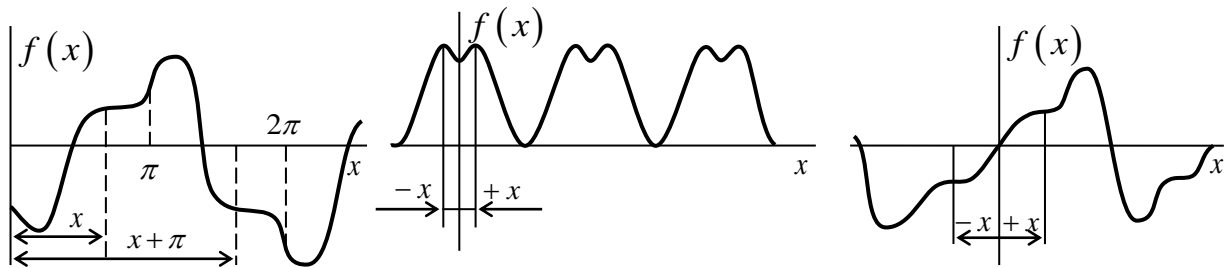


Рис. 2.101.

Якщо першу криву рис.2.101 змістити по осі  $x$  на півперіод і дзеркально відбити щодо осі  $x$ , то вийде крива, що збігається з кривою  $f(x)$ .

При розкладанні таких кривих у ряди Фур'є відсутня постійна складова і парні гармоніки, тобто дорівнюють нулю коефіцієнти:

$$A_0 = A_2' = A_2'' = \dots = 0;$$

$$f(x) = A_1' \sin x + A_1'' \cos x + A_3' \sin 3x + A_3'' \cos 3x + \dots$$

Кожен доданок цього ряду задовольняє умові:  $-f(x + \pi) = f(x)$ , наприклад,  $-\sin(x + \pi) = \sin x$ .

Крива, подібна до другої кривої рис. 2.101, має симетрію щодо осі ординат, і задовольняє умові:  $f(-x) = f(x)$ .

Якщо криву, яка лежить лівіше осі ординат, дзеркально відбити щодо осі ординат, то отримана крива співпаде з кривою, що лежить правіше осі ординат. При розкладанні таких кривих у ряд Фур'є відсутні синусні ( $A_1' = A_2' = A_3' = \dots = 0$ ) і присутні лише косинусні і постійна складові:

$$f(x) = A_0 + A_1'' \cos x + A_2'' \cos 2x + A_3'' \cos 3x + \dots$$

Криві типу кривих 3 рис. 2.101, задовольняють умові  $-f(-x) = f(x)$  і є кривими, симетричними відносно початку координат. Ряд Фур'є має вид:

$$f(x) = A_1' \sin x + A_2' \sin 2x + A_3' \sin 3x + \dots$$

Періодичні криві, що зустрічаються в електротехніці, можна розділити на дві групи:

- 1) криві геометрично правильної форми, наприклад трапецеїдальної, трикутної, прямокутної і так далі. Розкладання їх в ряд Фур'є дано в таблиці

№№ п.п.	Графік $f(\omega t)$	Розкладання в ряд $f(\omega t)$
1.		$f(\omega t) = \frac{4a_m}{\alpha\pi} \left( \sin \alpha \sin \omega t + \frac{1}{9} \sin 3\alpha \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\alpha \sin 5\omega t + \dots \right)$
2.		$f(\omega t) = \frac{8a_m}{\pi^2} \left( \sin \omega t - \frac{1}{9} \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\omega t + \dots \right)$
3.		$f(\omega t) = \frac{4a_m}{\pi} \left( \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right)$

- 2) криві довільної (геометрично неправильної) форми, найчастіше вони задані у виді графіків, розкладання їх у ряд Фур'є роблять графо-аналітично.

### 2.3.3. Графо-аналітичний метод визначення гармонік ряду Фур'є

Цей метод заснований на заміні визначеного інтеграла сумою кінцевого числа додатків. З цією метою період функції  $f(x)$ , що дорівнює  $2\pi$ , розбивають на  $n$  рівних частин:  $\Delta x = \frac{2\pi}{n}$  і інтеграли замінюють сумами.

По визначенню (3.3), постійна складова:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx \approx \frac{1}{2\pi} \sum_{\rho=1}^n f_{\rho}(x) \Delta x = \frac{1}{2\pi} \sum_{\rho=1}^n f_{\rho}(x) \frac{2\pi}{n},$$

чи  $A_0 = \frac{1}{n} \sum_{\rho=1}^n f_{\rho}(x),$

де  $\rho$  - поточний індекс, що приймає значення від 1 до  $n$ ;

$f_{\rho}(x)$  - значення функцій  $f(x)$  при  $x = (\rho - 0,5)\Delta x$ , тобто в середині  $\rho$ -го інтервалу.

Амплітуда синусної складової  $k$  - гармоніки ряду згідно формули:

$$A'_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin kx dx \approx \frac{2}{2\pi} \sum_{\rho=1}^n f_{\rho}(x) \frac{2\pi}{n} \sin_{\rho} kx,$$

чи

$$A'_k = \frac{2}{\pi} \sum_{p=1}^n f_p(x) \sin_{\rho} kx;$$

амплітуда косинусної складової  $k$  – гармоніки згідно формули (3.5):

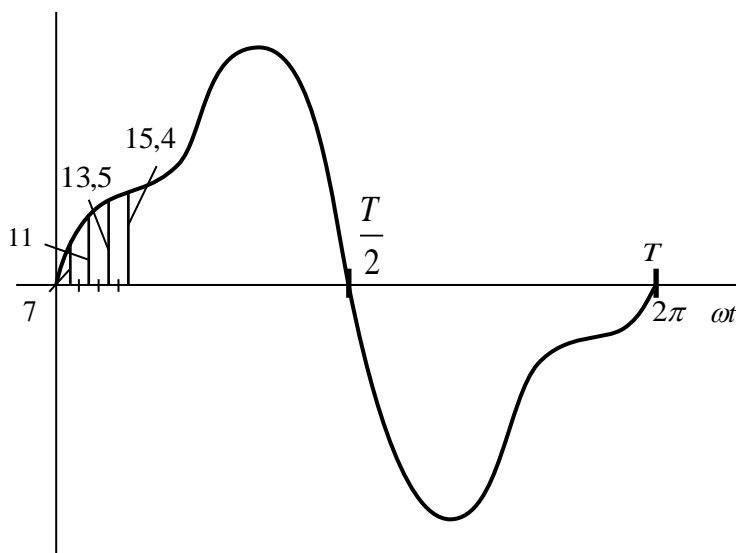
$$A''_k = \frac{2}{\pi} \sum_{p=1}^n f_p(x) \cos_{\rho} kx.$$

Тут  $\sin_{\rho} kx$  і  $\cos_{\rho} kx$  - відповідно значення функцій  $\sin kx$  і  $\cos kx$  при  $x = (\rho - 0,5)\Delta x$ , тобто в середині  $\rho$  - го інтервалу.

При розрахунках по цих формулах звичайно досить розділити період на  $n = 24$  чи 18 частин, а в деяких випадках і на менше число частин.

Перед тим, як робити графічне розкладання в ряд Фур'є, необхідно з'ясувати, чи володіє функція, що розкладається, симетрією щодо осей координат. Наявність того чи іншого виду симетрії дозволяє до проведення розкладання пророчити, які гармоніки варто очікувати.

Так, якщо крива  $f(x)$  симетрична щодо осі абсцис, то постійна



складова  $A_0$  і всі парні гармоніки відсутні, а, обчисливши  $A'_k$  і  $A''_k$  при непарних  $k$  впливає, що  $\sum f_p(x) \sin_{\rho} kx$  за перший півперіод дорівнює сумі  $\sum f_p(x) \sin_{\rho} kx$  за другий півперіод.

При побудові гармонік на графіку (рис. 2.102) необхідно враховувати, що

Рис. 2.102

масштаб по осі абсцис для  $k$  – гармоніки повинний бути узятий у  $k$  раз більшим,  $\pi$  ніж для першої гармоніки.

Так, наприклад, якщо деякий відрізок по осі абсцис для першої гармоніки відповідає куту  $\frac{\pi}{3}$ , то той же відрізок для третьої гармоніки

відповідає куту, у 3. рази більшому, тобто  $3\left(\frac{\pi}{3}\right) = \pi$ .

### Приклад.

Знайти першу і третю гармоніки функції  $f(x)$ , заданої на рис.2.102.

Значення ординати функції  $f_p(x)$  за перший півперіод при поділу періоду на частини ( $n = 24$ ) наведені в таблиці.

Таблиця

$p$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$f_p(x)$	7	11	13,5	15,4	17,4	20,5	25,4	32,5	27,7	19,2	10	5

Розв'язання.

Так як крива симетрична щодо осі абсцис, то  $A_0 = 0$  і ряд буде складатися тільки з непарних гармонік.

Амплітуда синусної складової першої гармоніки:

$$A_1' = \frac{2}{\pi} \sum_{p=1}^n f_p(x) \sin_p x = \frac{4}{n} \sum_{p=1}^{n/2} f_p(x) \sin_p x.$$

$$A_1' = \frac{4}{24} (7 \sin 7^\circ 30' + 11 \sin 22^\circ 30' + 13,5 \sin 37^\circ 30' + 15,4 \sin 52^\circ 30' + 17,4 \sin 67^\circ 30' + 20,5 \sin 82^\circ 30' + 25,4 \sin 97^\circ 30' + 32,5 \sin 112^\circ 30' + 27,7 \sin 127^\circ 30' + 19,2 \sin 142^\circ 30' + 10 \sin 157^\circ 30' + 5 \sin 172^\circ 30') \approx 25,3.$$

Амплітуда косинусної складової першої гармоніки:

$$A_1'' = \frac{4}{n} \sum_{p=1}^{n/2} f_p(x) \cos_p x \approx -5,23.$$

Амплітуда синусної складової третьої гармоніки:

$$A_3' = \frac{4}{24} \sum_{p=1}^{12} f_p(x) \sin_p 3x \approx 3,47.$$

Амплітуда косинусної складової третьої гармоніки:

$$A_3'' = \frac{1}{6} \sum_{p=1}^{12} f_p(x) \cos_p 3x \approx 5,1.$$

Амплітуда першої гармоніки:

$$A_1 = \sqrt{(A_1')^2 + (A_1'')^2} = 25,9.$$

Тангенс кута  $\psi_1$ , на який початок першої гармоніки зміщено стосовно початку кривої  $f(x)$ :

$$\operatorname{tg} \psi_1 = \frac{A_1''}{A_1'} = \frac{-5,23}{25,3} = -0,206; \quad \psi_1 = -11^\circ 40'.$$

Амплітуда третьої гармоніки:

$$A_3 = \sqrt{(A_3')^2 + (A_3'')^2} = 6;$$

$$\operatorname{tg} \psi_3 = \frac{A_3''}{A_3'} = 1,47; \quad \psi_3 = 55^\circ 50'$$

Отже, якщо обмежитися третьою гармонікою, то  $f(\omega t) = 25,9 \sin(\omega t - 11^\circ 40') + 6 \sin(3\omega t + 55^\circ 50')$ .

Зобразимо функцію графічно (рис. 2.103):



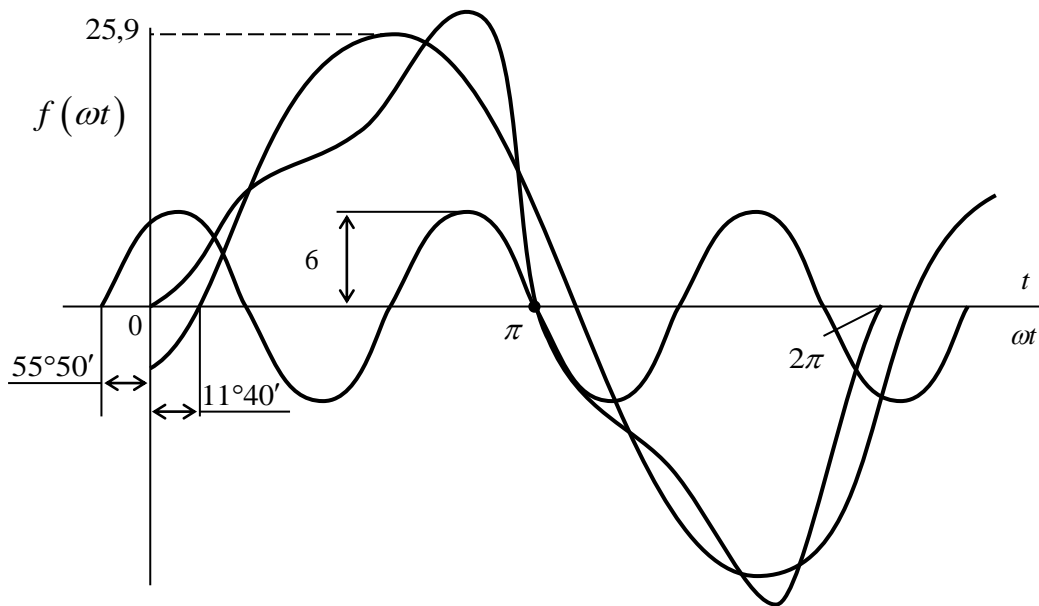


Рис. 2.103

### 2.3.4. Розрахунок струмів і напруг при несинусоїдних джерелах живлення

До проведення розрахунку струм джерела струму чи ЕРС джерела ЕРС повинні бути представлені рядами Фур'є.

Розрахунок роблять для кожної з гармонік окремо. Спочатку розраховують струми і напруги, що виникають від дії постійної складової ЕРС чи джерела струму, після цього – струми і напруги від дії першої гармоніки, потім від другої, третьої і т.д.

Відповідно до принципу накладання, миттєве значення струму будь якої вітки схеми дорівнює сумі миттєвих значень струмів окремих гармонік. Аналогічно, миттєве значення напруги на будь-якій ділянці схеми дорівнює сумі миттєвих значень напруг окремих гармонік на цій ділянці.

При розрахунку струмів і напруг, що виникають від дій постійної складової ЕРС, необхідно мати на увазі, що спадання напруги на індуктивності при постійному струмі дорівнює нулю, так само, що постійний струм через ємність не проходить.

Індуктивний опір  $X_L$  зростає прямо пропорційно частоті  $X_{Lk} = k\omega L = kX_{L1}$ . Ємнісний опір зменшується з розрахунком частоти, тому для  $k$  – гармоніки  $X_{Ck}$  в  $k$  раз менше ніж для першої гармоніки  $X_{C1}$ :

$$X_{Ck} = \frac{1}{k\omega C} = \frac{X_{C1}}{k}.$$

Для кожної з гармонік можна побудувати векторну діаграму (на різних осях).

Активні опори від частоти не залежать. При розрахунку кожен гармоніку виражають комплексним числом. Підсумовування однойменних

гармонік роблять шляхом додавання комплексних чисел чи векторів на комплексній площині.

Якщо діюча ЕРС несинусоїдна, то в електричному колі можуть виникнути резонансні режими (резонанси струмів чи напруг) не тільки на першій гармоніці, але і на вищих гармоніках (при наявності індуктивності і ємності). При цьому реактивна складова вхідного опору для цієї гармоніки повинна дорівнювати нулю (резонанс напруг) і нескінченності (резонанс струмів).

При виникненні резонансного і близького до нього режиму на якій-небудь вищій гармоніці струму чи напруги цієї гармоніки можуть виявитися більшими, ніж струми і напруги першої гармоніки на цих ділянках кола, що може привести до небажаних наслідків.

### 2.3.5. Діюче значення несинусоїдального струму і несинусоїдальної напруги

Як відомо, квадрат діючого значення струму  $I$  виражається через миттєве значення струму  $i$  таким чином:

$$I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt. \quad (2.219)$$

Якщо струм  $i = I_0 + I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + I_{2m} \sin 2(\omega t + \psi_2) + \dots$ ,

то

$$i^2 = I_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{km}^2 \sin^2(k\omega t + \psi_k) + \sum_{\substack{p=0; q=0 \\ p \neq q}}^{\infty} I_{pm} I_{qm} \sin^2(p\omega t + \psi_p) \cdot \sin(q\omega t + \psi_q),$$

але

$$\int_0^T \sin^2(k\omega t + \psi_k) dt = \frac{T}{2};$$

$$\int_0^T \sin(p\omega t + \psi_p) \sin(q\omega t + \psi_q) dt = 0.$$

Тому:

$$I^2 = I_0^2 + \frac{I_{1m}^2}{2} + \frac{I_{2m}^2}{2} + \frac{I_{3m}^2}{2} + \dots,$$

або 
$$I = \sqrt{I_0^2 + \frac{I_{1m}^2}{2} + \frac{I_{2m}^2}{2} + \dots}.$$

(2.220)

Так як  $\frac{I_{km}^2}{2} = \frac{I_{km}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{km}}{\sqrt{2}} = I_k^2$ , то 
$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots}.$$

(2.221)

Від кутів зсуву фаз  $\psi_k$  діючі значення струму не залежать.

Аналогічно:

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots}. \quad (2.222)$$

### 2.3.6. Активна і повна потужність несинусоїдного струму

Під активною потужністю  $P$  несинусоїдного струму розуміють середнє значення миттєвої потужності за період першої гармоніки:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt . \quad (2.223)$$

Представимо напругу і струм рядами Фур'є:

$$u = U_0 + U_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + U_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots ;$$
$$i = I_0 + I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1 - \varphi_1) + I_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2 - \varphi_2) + \dots .$$

Якщо підставити ці ряди під знак інтегралу формули (2.223) і проінтегрувати, тоді одержимо:

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots . \quad (2.224)$$

При такому способі активна потужність несинусоїдного струму дорівнює сумі активних потужностей окремих гармонік плюс потужність постійної складової.

Повна потужність  $S$  дорівнює добутку діючого значення несинусоїдного струму на діюче значення несинусоїдної напруги:

$$S = UI ; \quad (2.225)$$

де  $U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots}$ ;  $I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots}$  .

## 3. ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ

### 3.1. Загальні відомості про трифазні системи

Трифазна симетрична система ЕРС може бути одержана за допомогою трифазного генератора, який має три самостійні обмотки, які зсунуті одна відносно одної у просторі на кут  $120^\circ$ . На рис. 3.1 схематично показаний трифазний генератор з однією парою полюсів на статорі та обмотками на роторі.

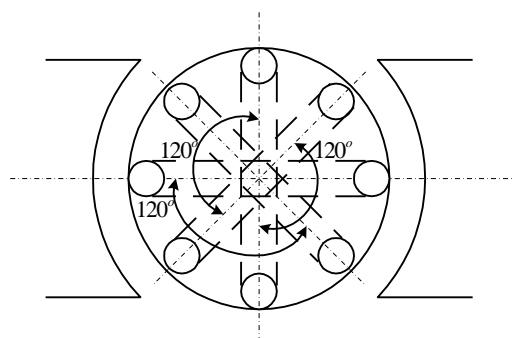


Рис 3.1

У реальних генераторах обмотка змінного струму нерухома (знаходиться на статорі), а магнітні полюси обертаються (знаходяться на роторі). Якщо кількість витків у обмотках однакова, то при обертанні ротора у всіх обмотках наводяться ЕРС однакової величини. Початкові фази цих

ЕРС зсунуті відносно одна одної на кут  $120^\circ$  у відповідності з розташуванням обмоток.

Трифазна симетрична система ЕРС – це сукупність трьох ЕРС, які мають однакову частоту та амплітуду, та зсунуті за фазою одна відносно одної на кути  $120^\circ$ .

Якщо приєднати до кожної котушки споживача електричної енергії, то отримаємо три електричних кола, які не зв'язані одне з одним.

### Симетричні трифазні системи

*Умови симетричності трифазного електричного кола.*

1. Система ЕРС повинна бути симетричною. Для цього величини ЕРС та зсув за фазою їх відносно одна одної повинні бути однакові.

2. Навантаження повинно бути рівномірним. Для цього комплексні опори у кожній фазі повинні бути однакові.

Симетрична система ЕРС може бути представлена рівняннями:

$$\begin{aligned} e_1 &= E_m \sin(\omega t + \psi) \\ e_2 &= E_m \sin(\omega t + \psi - 120^\circ) \\ e_3 &= E_m \sin(\omega t + \psi - 240^\circ), \end{aligned} \quad (3.1)$$

де  $\psi$  - початкова фаза ЕРС  $e_1$ .

ЕРС у комплексній формі запису мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} \underline{E}_1 &= E e^{j\psi} \\ \underline{E}_2 &= E e^{j(\psi-120^\circ)} \\ \underline{E}_3 &= E e^{j(\psi-240^\circ)}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Цим рівнянням відповідають графіки ЕРС та векторна діаграма, які зображені на рис. 3.2. і 3.3.

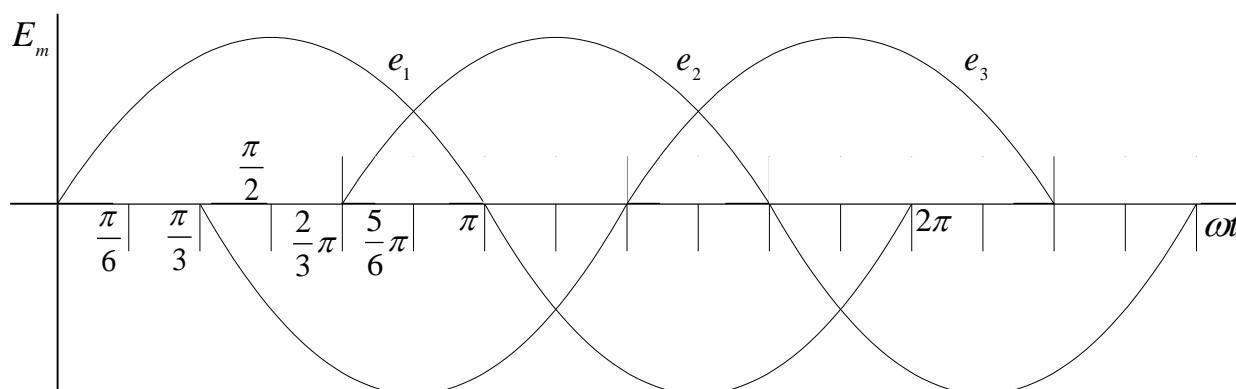


Рис. 3.2

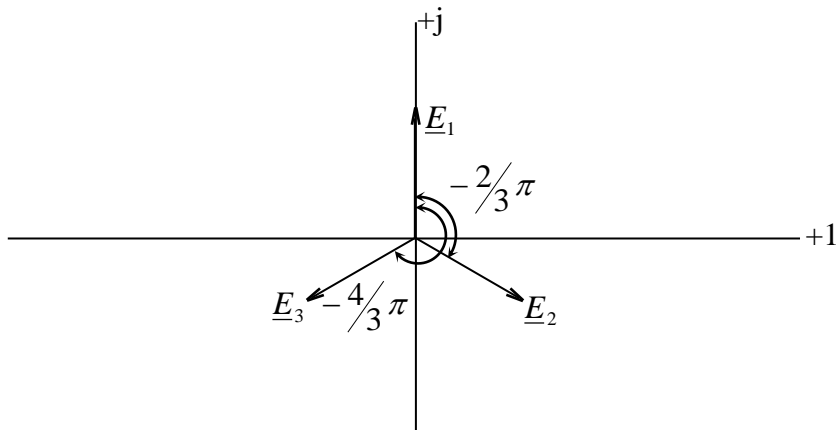


Рис 3.3

Вектор  $\underline{E}_1$  направлено вздовж осі  $+j$ . Інші вектори відповідно зі зсувом фаз на  $-120^\circ$  та  $-240^\circ$  відносно вектора ЕРС  $\underline{E}_1$ , який прийнято за вихідний.

Ці ж положення векторів ЕРС  $\underline{E}_2$  та  $\underline{E}_3$  можна одержати, якщо обертати їх проти ходу годинникової стрілки відповідно:  $\underline{E}_2$  на кут  $240^\circ$  та  $\underline{E}_3$  та кут  $120^\circ$ . Тоді у комплексній формі ці вектори запишуться такими рівняннями

$$\begin{aligned}\underline{E}_1 &= E \\ \underline{E}_2 &= E e^{j240^\circ} \\ \underline{E}_3 &= E e^{j120^\circ}\end{aligned}\quad (3.3)$$

Рівняння (3.3) аналогічні рівнянням (3.2).

Таким чином, можна говорити, що вектор  $\underline{E}_3$  відстає від вектора  $\underline{E}_1$  на кут  $240^\circ$  (тому кут пишеться зі знаком “мінус”), або випереджає вектор  $\underline{E}_1$  на кут  $120^\circ$  (тому цей кут беруть зі знаком “плюс”).

Множник  $e^{j120^\circ}$  у трифазних системах аналогічний множнику  $e^{j90^\circ}$  для однофазних систем.

У теорії трифазного змінного струму оператор  $e^{j120^\circ}$  зветься оператором повороту у позитивному напрямку на кут  $120^\circ$  і позначається “ $a$ ”, тобто  $e^{j120^\circ} = a$ .

Величина оператора  $a$ :

$$\begin{aligned}a &= e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}; \\ a^2 &= e^{j240^\circ} = \cos 240^\circ + j \sin 240^\circ = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}; \\ a^3 &= e^{j360^\circ} = \cos 360^\circ + j \sin 360^\circ = 1; \\ a^4 &= a^3 a = a.\end{aligned}$$

Можна бачити, що сума трьох векторів, які зміщені на кут  $120^\circ$ , дорівнює нулю:

$$\alpha + \alpha^2 + \alpha^3 = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} + 1 = 0.$$

$$\begin{aligned} a &= e^{j120^\circ}; \\ a^2 &= e^{j240^\circ}; \\ a^3 &= e^{j360^\circ}. \end{aligned}$$

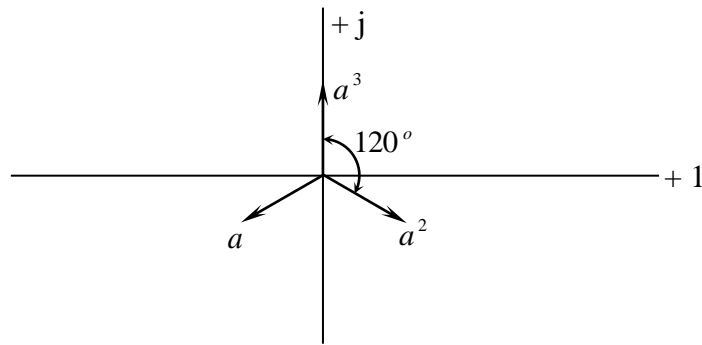


Рис. 3.4

Тобто геометрична сума векторів ЕРС  $\underline{E}_1, \underline{E}_2, \underline{E}_3$ , теж дорівнює нулю:

$$\underline{E}_1 + \underline{E}_2 + \underline{E}_3 = \underline{E}(1 + e^{j240^\circ} + e^{j120^\circ}) = 0.$$

Це ж положення стосується і миттєвих значень ЕРС:  $e_1 + e_2 + e_3 = 0$ .

Тобто сума миттєвих значень ЕРС у будь-який момент часу дорівнює нулю. Для фазних обмоток трифазної системи прийнято таке позначення:

A – x або 1–1'

B – y або 2–2'

C – z або 3–3'

де A,B,C або 1,2,3 - початок обмоток;

x,y,z або 1',2',3' – кінець обмоток.

Умовно приймають, що у фазах генератора ЕРС мають напрям від кінця до початку обмотки.

Розглянемо схему рис. 3.5. Кожна обмотка трифазного генератора двома провідниками з'єднана з окремими приймачами електричної енергії, тобто маємо три окремих замкнених кола змінного струму, які не зв'язані один з одним у загальну систему. У схемі шість з'єднуючих проводів.

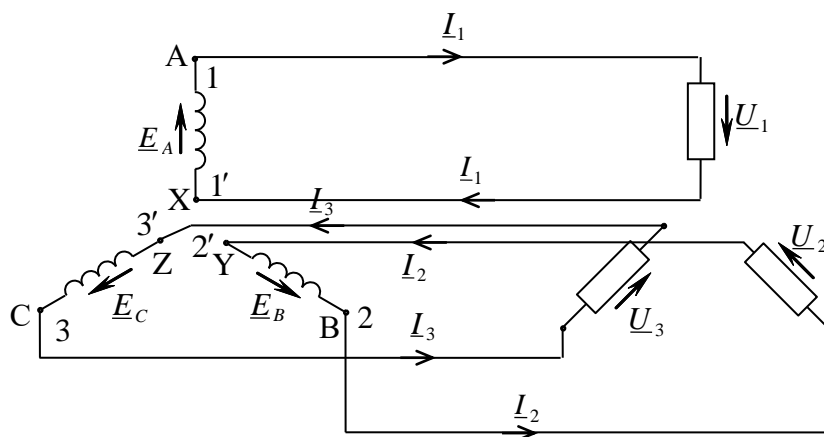


Рис. 3.5.

Кола ізольовані одне від одного. Особливих переваг ця сукупність кіл перед трьома однофазними колами не має. Можна було б для живлення цього навантаження взяти однофазний генератор, але з проводами більшого перерізу.

Переваги з'являються тоді, коли ці незв'язані системи електрично зв'язати між собою. Існує два основних способи з'єднання обмоток генераторів, трансформаторів і приймачів в трифазних колах: з'єднання зіркою і з'єднання трикутником.

Існують такі з'єднання генератора з навантаженням:

однотипні: “зірка”–“зірка”  $Y - Y$ ,

“трикутник”–“трикутник”  $\Delta - \Delta$ ,

різнотипні: “зірка”–“трикутник”  $Y - \Delta$ ,

“трикутник”–“зірка”  $\Delta - Y$ .

У трифазних генераторах та трансформаторах доцільно іменувати початком симетрично розташовані кінцеві точки обмоток, причому і кінці обмоток тоді теж будуть розташовані симетрично. При такому виборі початків та кінців обмоток система ЕРС в обмотках симетричних генераторів та трансформаторів буде симетрична, якщо домовитись за напрям ЕРС вибирати напрям від початку обмоток до їх кінців, або навпаки.

З'єднання обмоток генератора або трансформатора зіркою виконують, об'єднуючи початки усіх його обмоток у одну загальну точку, яка має назву нейтральної точки. Зв'язок між генератором та приймачами виконують за допомогою чотирьох проводів. При цьому проводи, які ідуть від початків обмоток, називають лінійними, а провід, який іде від нейтральної точки – нейтральним.

З'єднання обмоток генератора або трансформатора трикутником виконують, з'єднуючи початок обмотки кожної фази з кінцем обмотки наступної фази. Зв'язок між генератором та приймачами у цьому випадку виконують за допомогою трьох проводів, які називають лінійними проводами, а нейтральний провід відсутній.

З'єднання приймачів зіркою або трикутником виконують таким же чином, причому визначення фазних або лінійних напруг і струмів для приймачів залишається таким, як для генераторів і трансформаторів.

У подальшому, розглядаючи як симетричні, так і несиметричні системи, будемо всі струми спрямовувати одноманітно, а саме так, щоб всі лінійні струми мали напрям до приймача, або всі мали напрям, зворотний від нього, а фазні струми у сторонах трикутника мали напрям за рухом годинникової стрілки, або всі мали зворотний напрям. При цьому фазні струми у променях зірки будуть сходиться у нейтральній точці, або будуть розходитись від неї.

Напрямок ЕРС та напруг будемо вибирати також одноманітно. Так, при з'єднанні зіркою домовимось усі лінійні напруги направляти від попередньої фази до наступної.

У нейтральному проводі напрям струму можна вибирати довільно: або від нейтральної точки приймача, або навпаки. Напряма між нейтральними точками генератора та приймача вибирається у відповідності з вибраним напрямом струму у нейтральному проводі.

### 3.2. З'єднання трифазного генератора та трифазного навантаження за схемою “зірка – зірка”

Для одержання електричного кола зі з'єднанням “зірка - зірка” кінці обмоток генератора  $1', 2', 3'$  (або  $X, Y, Z$ ) з'єднуємо в один вузол, який зветься нульовим ( $0$ ).

Кінці приймачів енергії з'єднуємо у другий вузол, теж нульовий ( $0'$ ). Точки  $0$  та  $0'$  та початки обмоток генератора та приймачів з'єднуємо проводами (рис. 3.6).

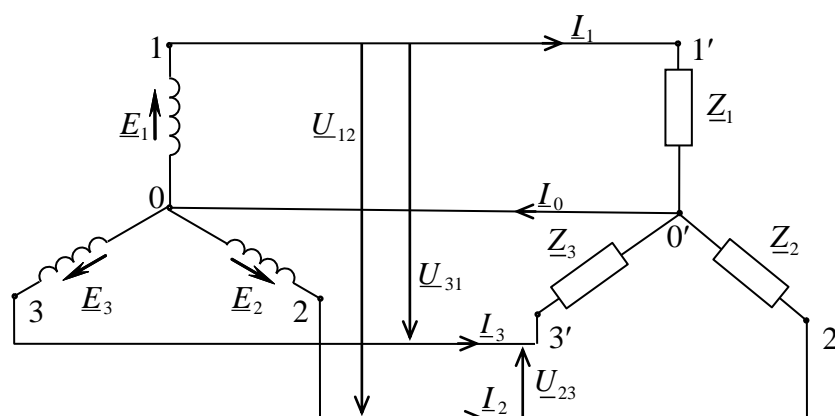


Рис 3.6

Позитивний напрям струмів приймаємо від початку обмоток генератора до приймачів. У нульовому проводі, навпаки, від приймачів до генератора.



Проводи, які з'єднують початки обмоток генератора з приймачами, називаються лінійними, струми в них та напруги між ними мають назву **лінійних**: ( $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_3, \underline{U}_{12}, \underline{U}_{23}, \underline{U}_{31}$ ) або ( $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C, \underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}$ ).

Струми у фазах генератора та приймачів, а також напруги на них називаються **фазними**.

Провід, який з'єднує нульові вузли генератора та приймачів  $00^I$ , називається нульовим (нейтральним, урівнюючим).

Струм у нульовому проводі дорівнює:

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3.$$

Розглянемо співвідношення між фазними та лінійними струмами та напругами. Зі схеми рис.4.6 можна зробити висновок, що фазні та лінійні струми однакові:

$$\underline{I}_\phi = \underline{I}_l, \text{ або } I_\phi = I_l.$$

Фазні напруги:

$$\underline{U}_{10} = \varphi_1 - \varphi_0; \underline{U}_{20} = \varphi_2 - \varphi_0; \underline{U}_{30} = \varphi_3 - \varphi_0.$$

Лінійні напруги:

$$\underline{U}_{12} = \underline{U}_1 - \underline{U}_2 = \varphi_1 - \varphi_0 - \varphi_2 + \varphi_0 = \varphi_1 - \varphi_2$$

Тобто співвідношення між лінійними та фазними напругами таке:

$$\underline{U}_{12} = \underline{U}_{10} - \underline{U}_{20}$$

$$\underline{U}_{23} = \underline{U}_{20} - \underline{U}_{30}$$

$$\underline{U}_{31} = \underline{U}_{30} - \underline{U}_{10}$$

Отже сума лінійних напруг, а так само і сума їх миттєвих значень завжди дорівнює нулю.

Ці співвідношення між лінійними та фазними струмами та напругами справедливі як для симетричних, так і для несиметричних електричних кіл.

Для симетричних кіл співвідношення між  $U_l$  та  $U_\phi$  мають більш простіший вигляд. Так як  $\underline{I}_0$  є векторною сумою лінійних струмів, то він значно менший за величиною. Тому переріз нульового проводу менший, ніж перерізи лінійних проводів.

Чим більше несиметрія, тим більше струм у нульовому проводі:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{12} = \underline{U}_{10} - \underline{U}_{20} &= \underline{U}_{10} - \alpha^2 \underline{U}_{10} = \underline{U}_{10}(1 - \alpha^2) = \underline{U}_{10} \left(1 + \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}\right) = \underline{U}_{10} \sqrt{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2}\right) = \\ &= \underline{U}_{10} \sqrt{3} e^{j30^\circ} \end{aligned}$$

$$\left(\frac{\sqrt{3}}{2} = \cos 30^\circ, \frac{1}{2} = \sin 30^\circ\right).$$

Таким чином:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{12} &= \underline{U}_{10} \sqrt{3} e^{j30^\circ}, & U_{12} &= \sqrt{3} U_1; \\ \underline{U}_{23} &= \underline{U}_{20} \sqrt{3} e^{j30^\circ}, & U_{23} &= \sqrt{3} U_2; \\ \underline{U}_{31} &= \underline{U}_{30} \sqrt{3} e^{j30^\circ}, & U_{31} &= \sqrt{3} U_3. \end{aligned}$$

Тобто для симетричних кіл:  $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\phi}$  (рис. 3.7).

Для симетричних електричних трифазних кіл лінійна напруга випереджає фазну на кут  $30^\circ$  та за модулем більша фазної у  $\sqrt{3}$  рази.

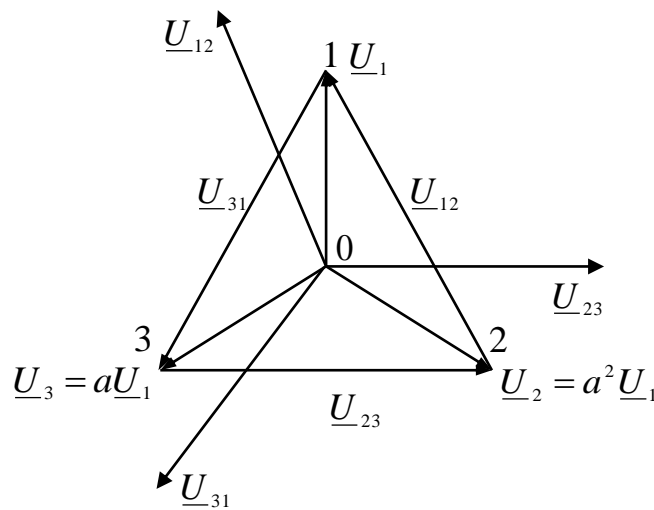


Рис. 3.7

Струм у нульовому проводі симетричного кола дорівнює нулю, так як система лінійних та фазних струмів симетрична:

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0.$$

Тому при симетричних режимах роботи трифазних кіл нульовий провід можна не використовувати.

Таким чином, у трифазному колі споживачам передається таж сама потужність, як і у випадку незв'язаної системи, а проводів використовується не шість, а три, що дає економію матеріалу проводів, втрати потужності у проводах зменшуються.

### 3.3. Розрахунок симетричних трифазних електричних кіл при з'єднанні приймачів енергії зіркою

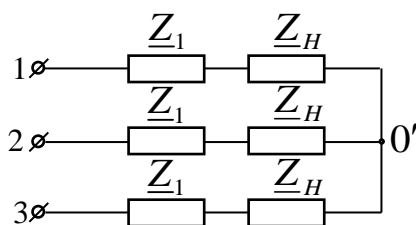


Рис. 3.8

На рис. 3.8 задані лінійні напруги:

$$U_{12} = U_{23} = U_{31} = U_{\text{л}} \text{ та всі опори } \underline{Z}.$$

Визначити струми, фазні та лінійні напруги на приймачах.

Послідовність розрахунку.

1. Визначаємо модуль фазної напруги:

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}.$$

2. Визначаємо повний опір кожної фази:

$$Z_n = \sqrt{(R_n + R_n)^2 + (X_n + X_n)^2}.$$

3. Визначаємо лінійні струми (вони є і фазними):

$$I_n = I_\phi = \frac{U_\phi}{Z_\phi}.$$

4. Фазна напруга на навантаженні дорівнює:

$$U_{\phi n} = I_\phi Z_n.$$

5. Лінійна напруга на навантаженні визначається як:

$$U_{\text{лн}} = \sqrt{3}U_{\phi n}.$$

Цю задачу можна розв'язати і використовуючи метод комплексних амплітуд.

$$\text{Так як } \underline{U}_{12} = \underline{U}_{10} \sqrt{3} e^{j30^\circ}, \text{ то } \underline{U}_{10} = \frac{\underline{U}_{12}}{\sqrt{3}} e^{-j30^\circ}.$$

$$\text{Відповідно: } \underline{U}_{20} = \frac{\underline{U}_{23}}{\sqrt{3}} e^{-j30^\circ}, \quad \underline{U}_{30} = \frac{\underline{U}_{31}}{\sqrt{3}} e^{-j30^\circ}.$$

Так як система симетрична, то розрахунок проводять тільки для однієї фази:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_{10}}{\underline{Z}_l + \underline{Z}_n}, \quad \underline{U}_{n10} = \underline{I}_1 \underline{Z}_n, \quad \underline{U}_{n10} = \underline{U}_{n10} \sqrt{3} e^{j30^\circ}.$$

### 3.4. З'єднання приймачів енергії трифазного кола трикутником

Як було наведено раніше, при з'єднанні трикутником кінець першої фази з'єднується з початком другої, кінець другої фази з початком третьої, кінець третьої з початком першої. Таким чином, одержують замкнений трикутник.

Розглянемо з'єднання трикутником приймачів (рис. 3.10).

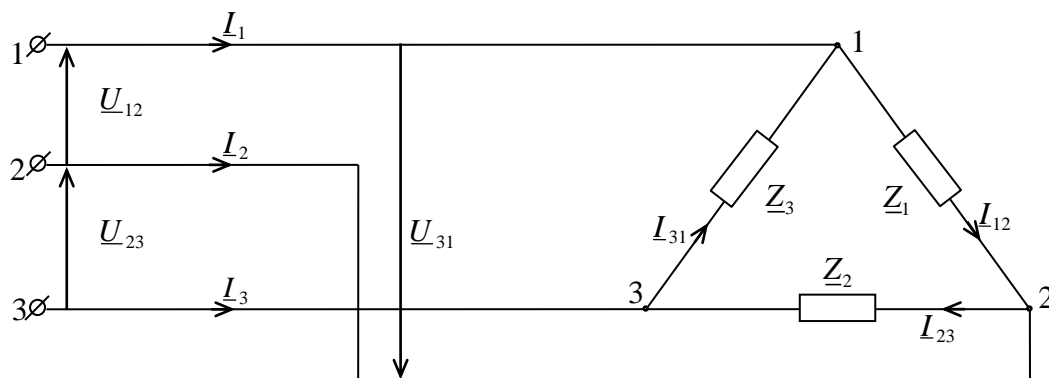


Рис. 3.10

*Співвідношення між лінійними та фазними струмами.*

Для вузла 1 запишемо рівняння згідно першого закону Кірхгофа:

Звідкіля:

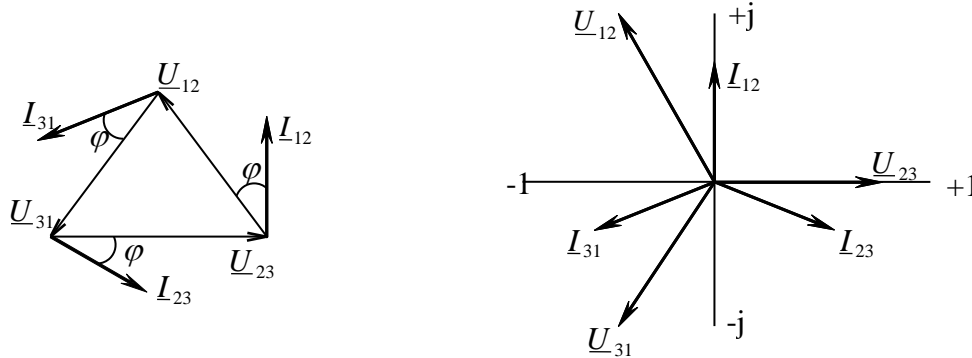
$$\underline{I}_1 - \underline{I}_{12} + \underline{I}_{31} = 0, \text{ звідкіля } \underline{I}_1 = \underline{I}_{12} - \underline{I}_{31}$$

Аналогічно одержимо вирази для струмів  $\underline{I}_2$  та  $\underline{I}_3$ :

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_{23} - \underline{I}_{12},$$

$$\underline{I}_3 = \underline{I}_{31} - \underline{I}_{23}.$$

Між фазними та лінійними струмами при симетричному навантаженні (рис. 3.11) існує більш просте співвідношення, що використовується при розрахунках. Для його визначення побудуємо трикутник напруг.



або  
Рис. 3.11

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{12} - \underline{I}_{31} = \underline{I}_{12}(1 + a) = \underline{I}_{12} \left( 1 + \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \underline{I}_{12} \sqrt{3} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} \right) = \underline{I}_{12} \sqrt{3} e^{+j30^\circ},$$

$$\underline{I}_2 = \sqrt{3} \underline{I}_{23} e^{j30^\circ},$$

$$\underline{I}_3 = \sqrt{3} \underline{I}_{31} e^{j30^\circ}.$$

За модулем  $I_l = \sqrt{3} I_\phi$ .

### 3.5. Розрахунок симетричних трифазних електричних кіл при з'єднанні приймачів енергії трикутником

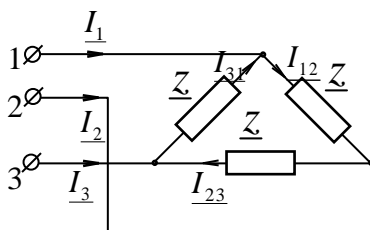


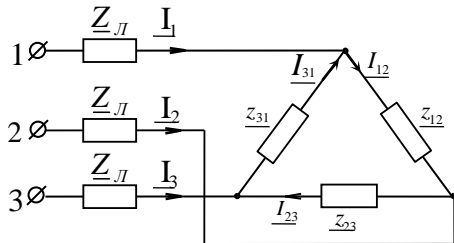
Рис. 3.12

Приймачі енергії з'єднані трикутником, задані напруги на навантаженні та їх опори (рис. 3.12). Визначити лінійні та фазні струми.

Розв'язання:

1. Визначаємо значення фазних струмів:  $I_\phi = \frac{U_\phi}{Z}$  та значення лінійних струмів:  $I_\lambda = \sqrt{3}I_\phi$ .

Розв'язання дещо ускладнюється, якщо необхідно врахувати опори проводів  $Z$  (рис. 3.13).



Навантаження з'єднані трикутником, але задані значення напруг не на навантаженні, а на початку лінії. Між навантаженням та генератором є ще опори з'єднуючих проводів  $Z_L$ .

Цю задачу розв'язують, використовуючи метод перетворення схем. Трикутник навантаження треба замінити еквівалентною зіркою.

Так як навантаження рівномірне, то  $Z_Y = \frac{Z_\Delta}{3}$  і схема приймає такий вигляд (рис. 3.14).

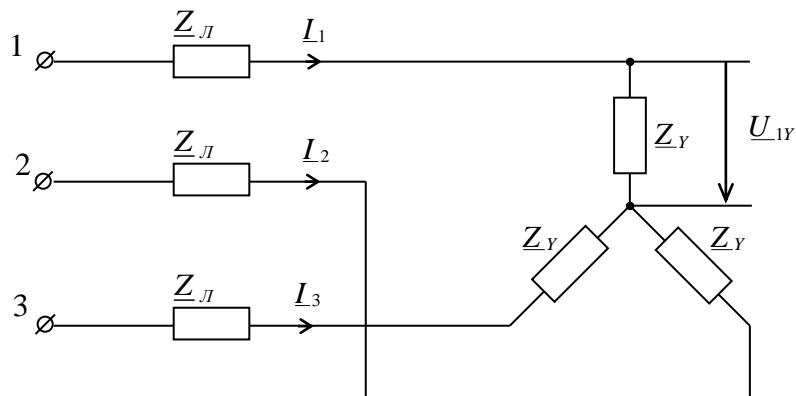


Рис. 3.14

Визначаємо:

1. Повний опір кожної фази:  $Z_\phi = \sqrt{(R_\lambda + R_Y)^2 + (X_\lambda + X_Y)^2}$ .
2. Значення фазної напруги:  $U_\phi = \frac{U_\lambda}{\sqrt{3}}$ .
3. Значення фазного струму еквівалентної схеми:  $I_{\phi Y} = \frac{U_\phi}{Z_\phi}$ .
4. Значення напруги на навантаженні еквівалентної схеми:  $U_{nY} = I_{\phi Y} \cdot Z_Y$ .
5. Напругу на навантаженні, тобто у фазах трикутника:  $U_{n\Delta} = \sqrt{3}U_{nY}$ .

6. Струм у приймачах енергії:  $I_{12} = I_{23} = I_{31} = I_{\phi} = \frac{U_{н\Delta}}{Z_{\Delta}}$ .

7. Лінійні струми:  $I_{л} = \sqrt{3}I_{\phi}$ , де  $I_1 = I_2 = I_3 = I_{л}$ .

Таким чином, при розв'язанні цієї задачі метод комплексних амплітуд використовується тільки при розрахунках комплексного опору еквівалентної схеми:

$$\underline{Z}_Y = \frac{\underline{Z}_{\Delta}}{3}.$$

### 3.6. Розрахунок складних трифазних електричних кіл при симетричному навантаженні

Задані значення симетричних напруг на затискачах джерела живлення (рис. 3.15). Відомі значення усіх опорів схеми. Приймачі енергії симетричні.

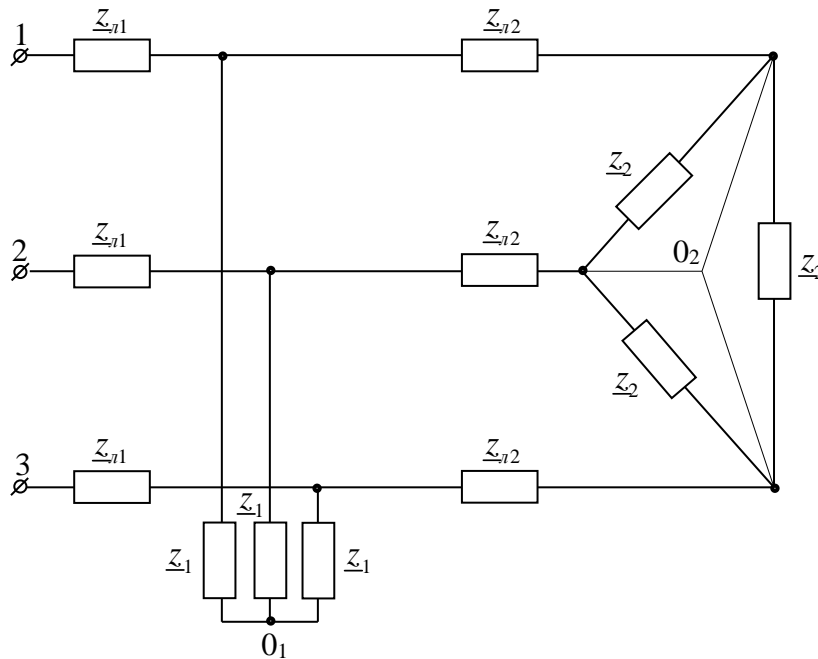


Рис 3.15

При розрахунку такої складної схеми з'єднання трикутниками замінюють з'єднанням зіркою. Одержимо таку схему (рис. 3.16).

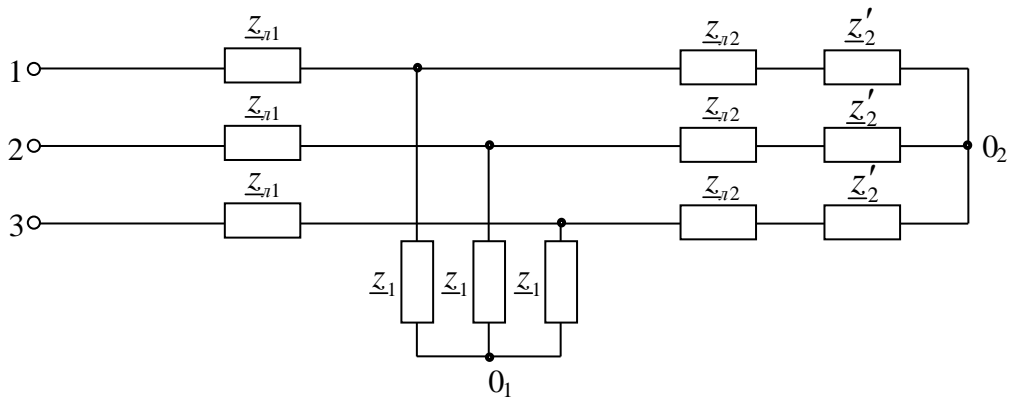


Рис. 3.16

Фазні напруги еквівалентного джерела живлення, з'єднаного зіркою, у  $\sqrt{3}$  разів менше заданих напруг трикутника. При заміні з'єднання трикутником приймачів  $\underline{Z}_2$  еквівалентною зіркою  $\underline{Z}'_2$  еквівалентні опори визначаються за формулою:  $\underline{Z}'_2 = \frac{\underline{Z}_2}{3}$  (рис. 3.17).

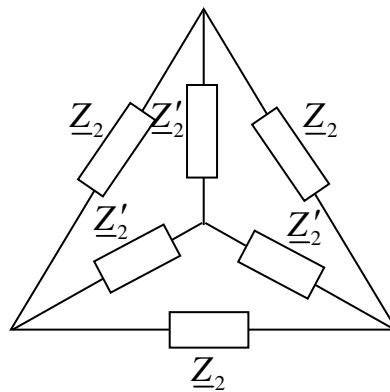


Рис. 3.17

Усі нульові точки мають однаковий потенціал, тому і з'єднуємо їх проводом без опору.

Одержуємо схему рис. 3.18, розрахунок якої було вже наведено у розділі “Однофазні кола при синусоїдних напругах”.

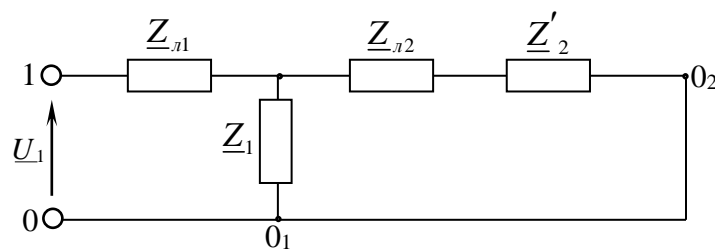


Рис. 3.18

### 3.7. Розрахунок несиметричних режимів трифазних електричних кіл при з'єднанні приймачів енергії зіркою

Несиметричний режим у трифазних електричних колах виникає у випадках:

1. Несиметричного навантаження;
2. Несиметричної системи ЕРС;
3. При розмиканні будь-якої фази;
4. При короткому замиканні (наприклад, між двома фазами чи фазою та нейтраллю).

Ми розглянемо розрахунок несиметричних режимів при таких умовах:

1. Маємо тільки статичне навантаження (у електричному колі немає двигунів).

2. Падіння напруги у фазах генератора не враховується, тобто система фазних та лінійних напруг генератора симетрична.

При цих умовах розрахунок несиметричних трифазних кіл не має принципово нічого нового і виконується методами, які уже були розглянуті.

При розрахунку несиметричних режимів трифазних кіл, які мають електродвигуни, використовують метод симетричних складових, який буде розглянуто у наступному розділі.

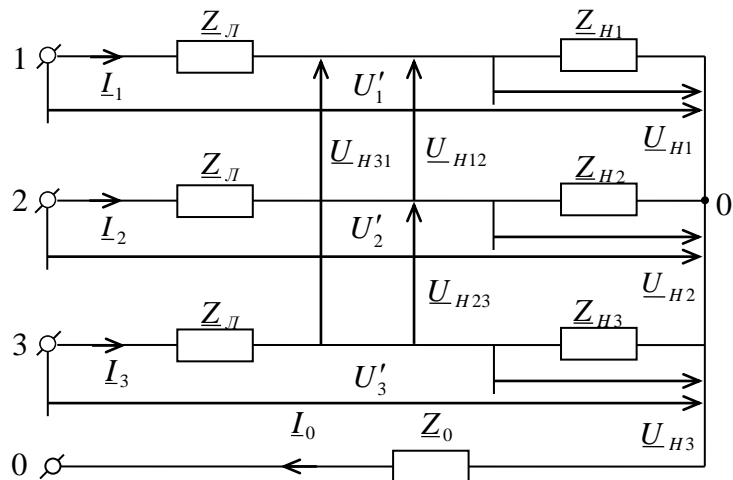


Рис. 3.19

На схемі (рис. 3.19) приймачі енергії з'єднані зіркою з нульовим проводом. Задана симетрична система ЕРС на початку лінії та значення усіх опорів. Несиметрія виникає за рахунок несиметричного навантаження:

$$\underline{Z}_{H1} \neq \underline{Z}_{H2} \neq \underline{Z}_{H3}.$$

Треба визначити значення струмів та напруг на навантаженні.

Розв'язання:

1. Складаємо еквівалентну схему електричного кола (рис. 3.20), у якому напруги на вході замінені джерелами живлення, ЕРС яких дорівнюють:

$$\underline{E}_1 = \underline{U}_1, \underline{E}_2 = \underline{U}_2, \underline{E}_3 = \underline{U}_3.$$



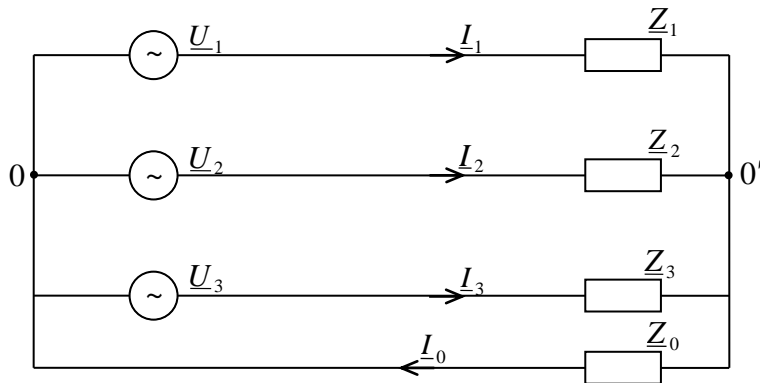


Рис. 3.20

2. Схема має два вузли, тому використовуємо метод двох вузлів і визначаємо значення вузлової напруги:

$$\underline{U}_{00'} = \frac{\underline{U}_1 \underline{Y}_1 + \underline{U}_2 \underline{Y}_2 + \underline{U}_3 \underline{Y}_3}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 + \underline{Y}_0}.$$

3. Згідно з законом Ома для ділянки кола визначаємо значення струмів у вітках:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \frac{\underline{U}_{00'} + \underline{U}_1}{\underline{Z}_1} = \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_{00'}}{\underline{Z}_1} = (\underline{U}_1 - \underline{U}_{00'}) \underline{Y}_1, \\ \underline{I}_2 &= (\underline{U}_2 - \underline{U}_{00'}) \underline{Y}_2, \\ \underline{I}_3 &= (\underline{U}_3 - \underline{U}_{00'}) \underline{Y}_3, \\ \underline{I}_0 &= \underline{U}_{00'} \underline{Y}_0 = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3, \end{aligned}$$

де прийняті такі заміни:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= \underline{Z}_l + \underline{Z}_{n1}, \\ \underline{Z}_2 &= \underline{Z}_l + \underline{Z}_{n2}, \quad \underline{Y}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1}, \quad \underline{Y}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_2}, \quad \underline{Y}_3 = \frac{1}{\underline{Z}_3}, \\ \underline{Z}_3 &= \underline{Z}_l + \underline{Z}_{n3}. \end{aligned}$$

4. Напруги на відповідних фазах  $\underline{Z}_l + \underline{Z}_{n1}$ ,  $\underline{Z}_l + \underline{Z}_{n2}$ ,  $\underline{Z}_l + \underline{Z}_{n3}$  дорівнюють:

$$\underline{U}'_1 = \underline{U}_1 - \underline{U}_{00'}, \quad \underline{U}'_2 = \underline{U}_2 - \underline{U}_{00'}, \quad \underline{U}'_3 = \underline{U}_3 - \underline{U}_{00'}.$$

5. Визначаємо фазні напруги на навантаженні:

$$\underline{U}_{n1} = \underline{I}_1 \underline{Z}_{n1}, \quad \underline{U}_{n2} = \underline{I}_2 \underline{Z}_{n2}, \quad \underline{U}_{n3} = \underline{I}_3 \underline{Z}_{n3}.$$

6. Визначаємо значення лінійних напруг на навантаженні:

$$\underline{U}_{n12} = \underline{U}_{n1} - \underline{U}_{n2}, \quad \underline{U}_{n23} = \underline{U}_{n2} - \underline{U}_{n3}, \quad \underline{U}_{n31} = \underline{U}_{n3} - \underline{U}_{n1}.$$

Розглянемо з'єднання приймачів енергії зіркою без нульового проводу (рис. 3.21). Задані значення лінійних напруг на початку лінії та опорів. Треба визначити значення струмів та напруг на фазах приймачів енергії.

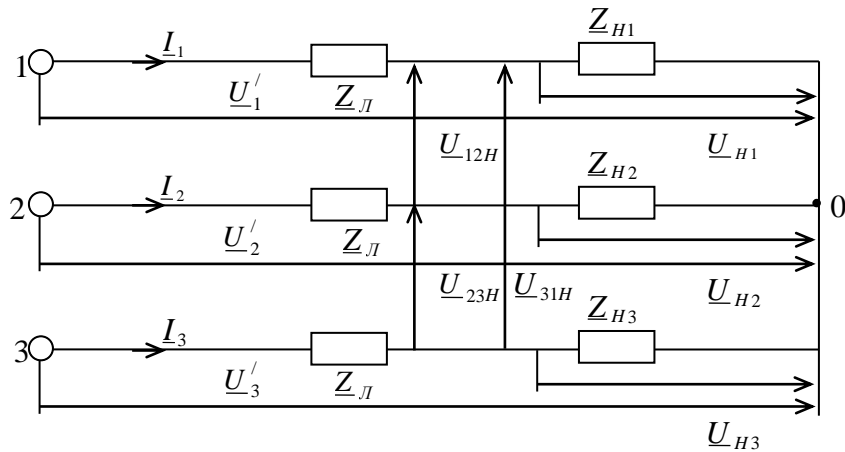


Рис. 3.21

Методика розрахунку.

Якщо були б відомі значення фазних напруг на навантаженні  $\underline{U}'_1$ ,  $\underline{U}'_2$ ,  $\underline{U}'_3$ , то задача була б розв'язана досить просто.

Щоб їх визначити складаємо еквівалентну схему (рис. 3.22).

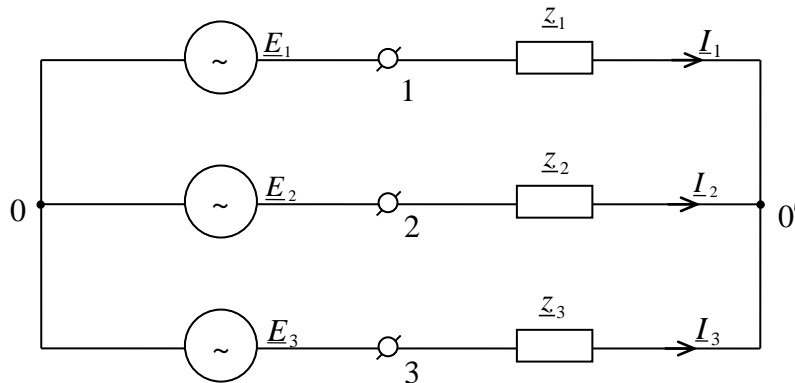


Рис. 3.22

1. У наведеній схемі  $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_L + \underline{Z}_{H1}$ ,  $\underline{Z}_2 = \underline{Z}_L + \underline{Z}_{H2}$ ,  $\underline{Z}_3 = \underline{Z}_L + \underline{Z}_{H3}$ , а ЕРС можуть мати будь-які величини, але обов'язково повинні виконуватись такі умови:

$$\underline{U}_{12} = \underline{E}_1 - \underline{E}_2, \underline{U}_{23} = \underline{E}_2 - \underline{E}_3, \underline{U}_{31} = \underline{E}_3 - \underline{E}_1.$$

2. Так як ЕРС можуть бути будь-якої величини, то приймемо, що  $\underline{E}_2 = 0$ , тоді  $\underline{U}_{12} = \underline{E}_1$ ,  $\underline{U}_{23} = -\underline{E}_3$  і у цьому випадку:

$$\underline{U}'_{20'} = \underline{U}'_2 = -\underline{U}_{o'o} = -\frac{\underline{E}_1 \underline{Y}_1 + \underline{E}_2 \underline{Y}_2 + \underline{E}_3 \underline{Y}_3}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3} = -\frac{\underline{U}_{12} \underline{Y}_1 - \underline{U}_{23} \underline{Y}_3}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3} = \frac{\underline{U}_{21} \underline{Y}_1 + \underline{U}_{23} \underline{Y}_3}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3};$$

$$\underline{U}'_2 = \frac{\underline{U}_{21} \underline{Y}_1 + \underline{U}_{23} \underline{Y}_3}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3}.$$

Аналогічно:

$$\underline{U}'_1 = \frac{\underline{U}_{12}\underline{Y}_2 + \underline{U}_{13}\underline{Y}_3}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3}; \quad \underline{U}'_3 = \frac{\underline{U}_{31}\underline{Y}_1 + \underline{U}_{32}\underline{Y}_2}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3}.$$

3. Згідно закону Ома для ділянки кола:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}'_1}{\underline{Z}_1}, \quad \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}'_2}{\underline{Z}_2}, \quad \underline{I}_3 = \frac{\underline{U}'_3}{\underline{Z}_3}.$$

4. Значення фазних напруг на навантаженні:

$$\underline{U}_{n1} = \underline{I}_1 \underline{Z}_{n1}, \quad \underline{U}_{n2} = \underline{I}_2 \underline{Z}_{n2}, \quad \underline{U}_{n3} = \underline{I}_3 \underline{Z}_{n3}.$$

5. Значення лінійних напруг на навантаженні:

$$\underline{U}_{n12} = \underline{U}_{n1} - \underline{U}_{n2}, \quad \underline{U}_{n23} = \underline{U}_{n2} - \underline{U}_{n3}, \quad \underline{U}_{n31} = \underline{U}_{n3} - \underline{U}_{n1}.$$

*З'єднання фаз приймача трикутником.*

Задача 1.

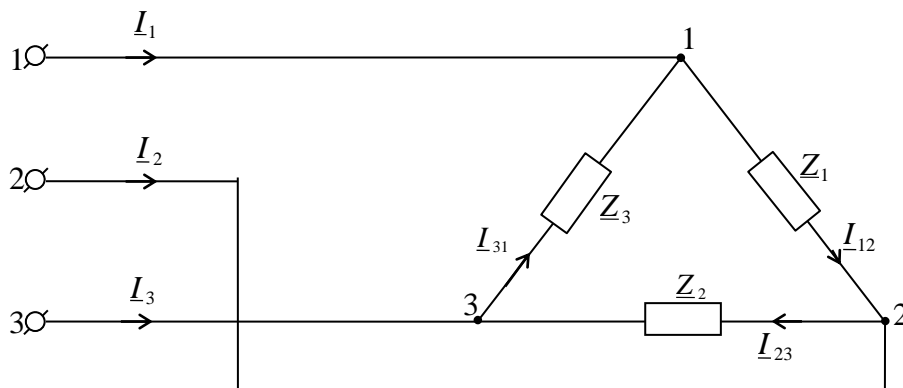


Рис. 3.23

Відомі значення напруг на навантаженні та значення усіх опорів (рис. 3.23). Треба визначити значення фазних струмів та напруг.

Розв'язання:

Визначаємо фазні струми:

$$\underline{I}_{12} = \frac{\underline{U}_{12}}{\underline{Z}_1}, \quad \underline{I}_{23} = \frac{\underline{U}_{23}}{\underline{Z}_2}, \quad \underline{I}_{31} = \frac{\underline{U}_{31}}{\underline{Z}_3},$$

а потім лінійні струми:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{12} - \underline{I}_{31}, \quad \underline{I}_2 = \underline{I}_{23} - \underline{I}_{12}, \quad \underline{I}_3 = \underline{I}_{31} - \underline{I}_{23}.$$

Задача 2 (рис. 3.24).

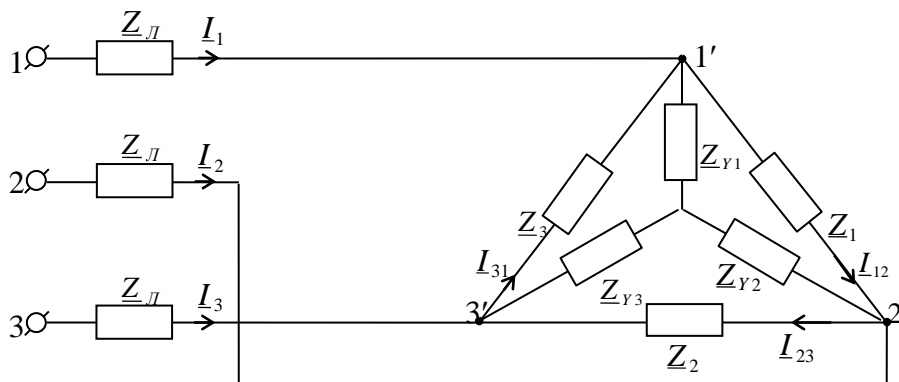


Рис. 3.24

Розв'язання цієї задачі значно ускладнюється, так як треба врахувати опори  $\underline{Z}_l$ . Задані напруги на початку лінії (симетрична система лінійних напруг на початку лінії  $\underline{U}_{12}$ ,  $\underline{U}_{23}$ ,  $\underline{U}_{31}$ ), а також відомі значення опорів навантаження ( $\underline{Z}_1 \neq \underline{Z}_2 \neq \underline{Z}_3$ ). Треба розрахувати значення фазних та лінійних струмів.

Послідовність розрахунку.

1.Перетворюємо з'єднання опорів навантаження трикутником у еквівалентну зірку:

$$\underline{Z}_{Y1} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}, \quad \underline{Z}_{Y2} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3},$$

$$\underline{Z}_{Y3} = \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}.$$

2.Розрахунок еквівалентної схеми (рис. 3.27) зводиться до розрахунку електричного кола при з'єднанні фаз приймача зіркою, який було розглянуто раніше (визначаємо значення  $\underline{U}'_1$ ,  $\underline{U}'_2$ ,  $\underline{U}'_3$ ).

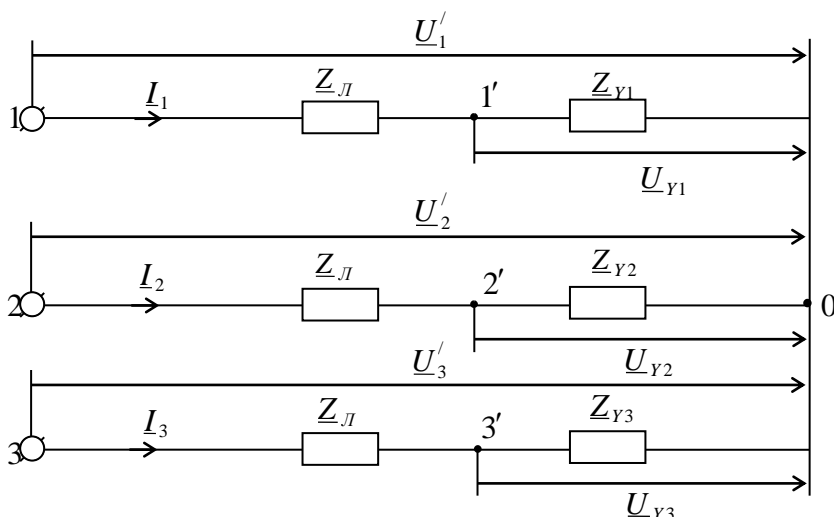


Рис. 3.27

3. Визначаємо струми:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}'_1}{\underline{Z}_l + \underline{Z}_{Y1}}, \quad \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}'_2}{\underline{Z}_l + \underline{Z}_{Y2}}, \quad \underline{I}_3 = \frac{\underline{U}'_3}{\underline{Z}_l + \underline{Z}_{Y3}}.$$

4.Розраховуємо значення падінь фазних напруг на приймачах еквівалентної схеми:

$$\underline{U}_{Y1} = \underline{I}_1 \underline{Z}_{Y1}, \quad \underline{U}_{Y2} = \underline{I}_2 \underline{Z}_{Y2}, \quad \underline{U}_{Y3} = \underline{I}_3 \underline{Z}_{Y3}.$$

5.Повертаючись до заданої схеми, визначаємо значення напруг на трикутнику навантаження  $\underline{U}_{1'2'}$ ,  $\underline{U}_{2'3'}$ ,  $\underline{U}_{3'1'}$ .

6.Далі визначаємо струми у фазах приймачів:

$$\underline{I}_{12} = \frac{\underline{U}_{1'2'}}{\underline{Z}_1}, \quad \underline{I}_{23} = \frac{\underline{U}_{2'3'}}{\underline{Z}_2}, \quad \underline{I}_{31} = \frac{\underline{U}_{3'1'}}{\underline{Z}_3}.$$

### 3.8. Розрахунок складних трифазних кіл при несиметричному режимі

Задані напруги на початку лінії  $\underline{U}_{12}$ ,  $\underline{U}_{23}$ ,  $\underline{U}_{31}$  та значення усіх опорів. Треба визначити значення струмів та напруг на усіх ділянках кола (рис. 3.26).

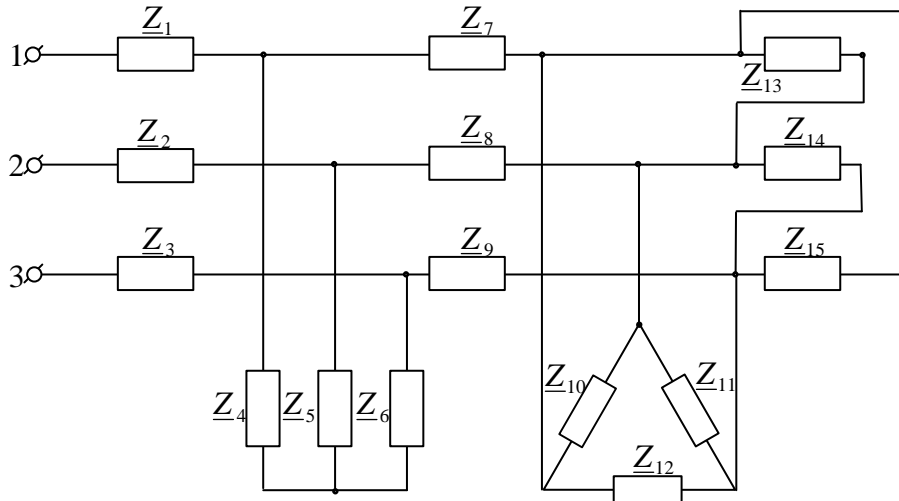


Рис 4.26

Для розрахунку такого складного електричного кола застосовують метод згортання схеми, починаючи від кінця до початку, приводячи її до більш простішої.

Замінити дві  $Y$  однією неможливо при згортанні схеми, а два  $\Delta$ -ки одним можна.

**Приклад** (рис 3.27).

$$\underline{Z}_7 = \frac{\underline{Z}_3 \underline{Z}_4}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4}, \quad \underline{Z}_8 = \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_6}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_6}, \quad \underline{Z}_9 = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_5}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_5}.$$

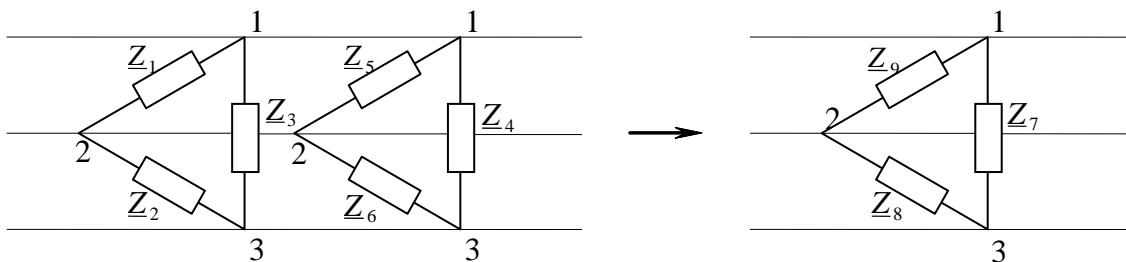


Рис 3.27

Послідовність розрахунку.

1. Замінюємо з'єднання приймачів трикутниками  $\underline{Z}_{10}$ ,  $\underline{Z}_{11}$ ,  $\underline{Z}_{12}$ , та  $\underline{Z}_{13}$ ,  $\underline{Z}_{14}$ ,  $\underline{Z}_{15}$  одним еквівалентним:

$$\underline{Z}'_1 = \frac{\underline{Z}_{12} \underline{Z}_{15}}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{15}}, \quad \underline{Z}'_2 = \frac{\underline{Z}_{11} \underline{Z}_{14}}{\underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{14}}, \quad \underline{Z}'_3 = \frac{\underline{Z}_{10} \underline{Z}_{13}}{\underline{Z}_{10} + \underline{Z}_{13}}.$$

Після цих перетворювань схема прийме вигляд (рис. 3.28).

2. Замінюємо одержаний трикутник зіркою:

$$\underline{Z}'_4 = \frac{\underline{Z}'_3 \underline{Z}'_1}{\underline{Z}'_1 + \underline{Z}'_2 + \underline{Z}'_3}, \quad \underline{Z}'_5 = \frac{\underline{Z}'_3 \underline{Z}'_2}{\underline{Z}'_1 + \underline{Z}'_2 + \underline{Z}'_3}, \quad \underline{Z}'_6 = \frac{\underline{Z}'_1 \underline{Z}'_2}{\underline{Z}'_1 + \underline{Z}'_2 + \underline{Z}'_3}.$$

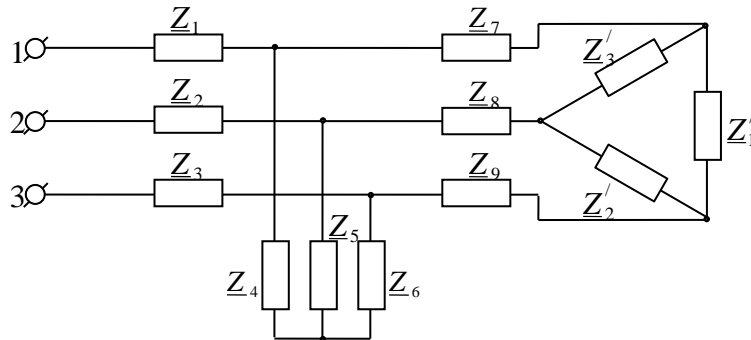


Рис 3.28

Після цього перетворення схема прийме вигляд (рис 3.29).

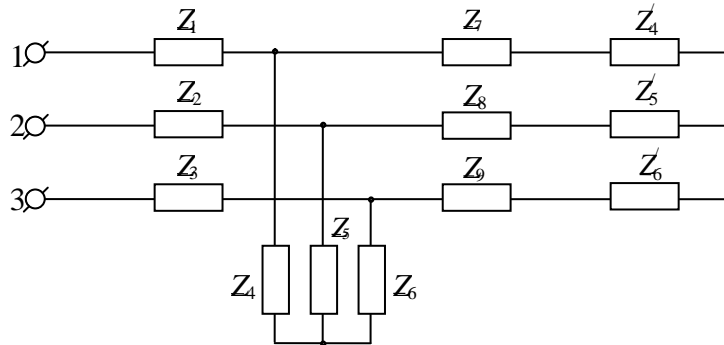


Рис 3.29

3. Згортаємо далі схему враховуючи, що:  $\underline{Z}'_7 = \underline{Z}_7 + \underline{Z}'_4$ ,  $\underline{Z}'_8 = \underline{Z}_8 + \underline{Z}'_5$ ,  $\underline{Z}'_9 = \underline{Z}_9 + \underline{Z}'_6$ , одержимо схему (рис. 3.30).

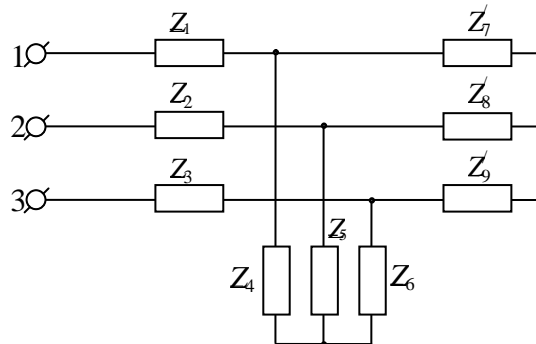


Рис 3.30

4. Замінюємо з'єднання зірками  $\underline{Z}_4$ ,  $\underline{Z}_5$ ,  $\underline{Z}_6$ , та  $\underline{Z}'_7$ ,  $\underline{Z}'_8$ ,  $\underline{Z}'_9$  трикутниками, а потім два трикутника одним еквівалентним, одержуємо схему (рис. 3.31):

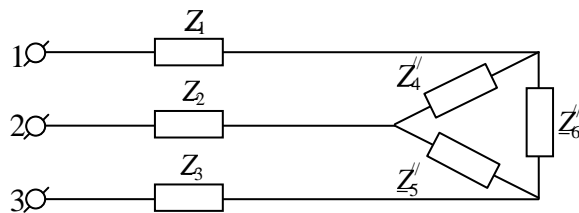


Рис. 3.31

Розрахунок такої схеми нами було розглянуто раніше. Після цього починаємо розрахунок, поступово розгортаючи схему до її початкового виду.

### 3.9. Активна, реактивна та повна потужності у трифазній системі

Під *активною потужністю* трифазної системи розуміють суму активних потужностей фаз навантаження та активної потужності у опорі нульового проводу:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_o.$$

**Реактивна потужність** трифазної системи - це сума реактивних потужностей навантаження та реактивної потужності у нульовому проводі:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_o.$$

**Повна потужність:**

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Якщо навантаження симетричне, то  $P_o = Q_o = 0$ .

$$P_1 = P_2 = P_3 = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi$$

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi$$

де  $\varphi_\phi$  - кут між фазною напругою навантаження  $U_\phi$  та струмом  $I_\phi$  фази навантаження.

При розрахунках потужностей по цих формулах виникає практична незручність, так як одні прилади показують фазну величину, а другі – лінійну.

Розглянемо це на прикладі. При з'єднанні зіркою амперметр показує  $I_l = I_\phi$ , а вольтметр показує  $U_l$  (рис. 3.32).

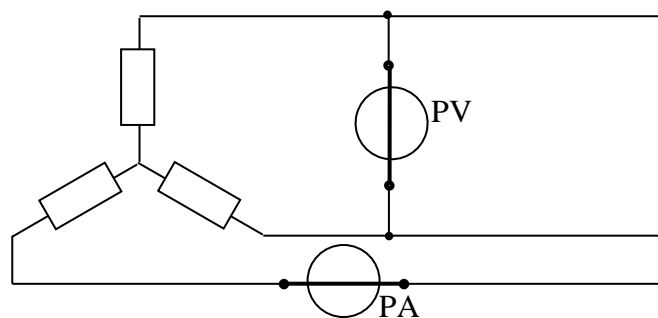


Рис. 3.32

При з'єднанні трикутником вольтметр показує  $U_{\phi} = U_{\phi}$ , а амперметр показує  $I_{\phi}$ . Тому доцільно перетворити формули так, щоб у них були б тільки лінійні величини. При з'єднанні зіркою:  $I_{\phi} = I_{\phi}$ ,  $U_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{3}}$ ,

$$P = 3 \frac{U_{\phi}}{\sqrt{3}} I_{\phi} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi .$$

При з'єднанні трикутником:  $I_{\phi} = \frac{I_{\phi}}{\sqrt{3}}$ ,  $U_{\phi} = U_{\phi}$  (рис. 3.33):

$$P = 3 U_{\phi} \frac{I_{\phi}}{\sqrt{3}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi ,$$

$$P = 3 U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi ,$$

$$P = \sqrt{3} U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi .$$

Іноді у цих формулах не пишуть  $U_{\phi}$  або  $I_{\phi}$ , але якщо у формулі стоїть цифра 3, то мова йде про фазні величини, а якщо  $\sqrt{3}$ , то про лінійні.

Аналогічно запишемо формули для реактивної та повної потужностей:

$$Q = 3 U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi , Q = \sqrt{3} U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi ;$$

$$S = 3 U_{\phi} I_{\phi} , S = \sqrt{3} U_{\phi} I_{\phi} .$$

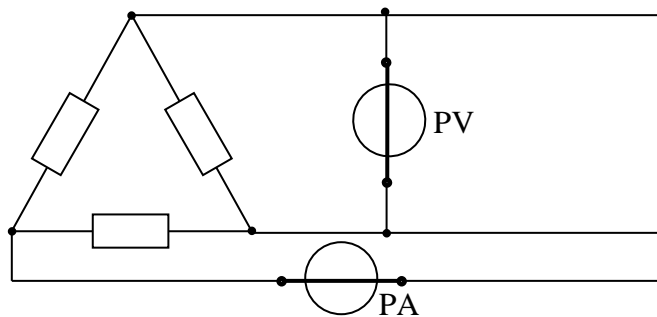


Рис. 3.33

Треба пам'ятати, що наведені формули справедливі тільки при симетричному навантаженні.

Проаналізуємо вираз для миттєвої потужності трифазної системи:

$$p = u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3 .$$

Якщо підставити у цю формулу миттєві значення напруги та струму, то для симетричної системи сума миттєвих потужностей трифазної системи буде постійною величиною і дорівнюватиме активній потужності усієї системи. *Такі системи, у яких миттєва потужність постійна, зветься урівноваженими.*

Можна доказати, що при  $m > 2$  ( $m$  - кількість фаз) і при симетрії систем напруг та струмів багатofазна система урівноважена.



$$p = \sum_{k=1}^m p_k = \sum_{k=1}^m UI \cos \varphi = mUI \cos \varphi = \text{const},$$

тобто миттєва потужність багатозазної системи не залежить від часу і дорівнює сумі активних потужностей окремих фаз, тобто активній потужності усієї системи.

Очевидно, несиметрія системи не є ознакою її неурівноваженості, так як можуть бути випадки, коли  $p = \sum_{k=1}^m p_k = \text{const}$  і для несиметричної системи.

Якщо  $p = \text{const}$ , то це означає, що гальмуючий момент теж постійним і не виникає шкідливих коливань та биття на валу генератора. Це важливо для роботи первинних двигунів, для котрих такі трифазні генератори є навантаженням.

## 4. ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ З ЗОСЕРЕДЖЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

### 4.1. Загальні принципи аналізу перехідних процесів

*Перехідним називається процес, який виникає при переході від одного усталеного режиму до другого.* При усталених режимах струми і напруги у колі теоретично можуть існувати необмежено довго, не змінюючи своїх параметрів, і при заданій конфігурації кола та його параметрах визначаються тільки видом діючих у колі ЕРС або відповідним видом заданих струмів джерел струмів.

*Якщо у колі діють сталі* за часом ЕРС, то в усталеному режимі струми і напруги на всіх ділянках кола повинні також бути сталими за часом. *Коли ЕРС джерела змінюються синусоїдно за часом* з однією і тією ж частотою, то струми і напруги у колі в усталеному режимі повинні бути синусоїдними функціями часу тієї ж частоти.

*Якщо діючі у колі ЕРС несинусоїдні*, але змінюються за часом з одним і тим же періодом, то струми і напруги повинні бути періодичними функціями часу з таким же періодом.

Цими трьома видами ЕРС і струмів вичерпується перелік випадків усталених режимів у колі. Причому сталі і синусоїдні ЕРС та струми можна розглядати як часткові випадки періодичних струмів і ЕРС.

*Визначення струмів і напруг в усталених режимах зводиться до знаходження часткових розв'язань диференційних рівнянь кола.* Наприклад, для кола, яке містить послідовно з'єднані  $R$ ,  $L$  і  $C$ , рівняння (4.1) у відповідності за другим законом Кірхгофа має вигляд:

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = \frac{du}{dt}. \quad (4.1)$$

Для визначення струмів  $i(t)$  напруг  $u(t)$  у перехідному процесі необхідно знайти повне розв'язання диференційного рівняння кола. Як відомо, повне розв'язання  $i(t)$  лінійного диференційного рівняння являє собою суму часткового розв'язання  $i'(t)$  неоднорідного рівняння, тобто рівняння, що містить задані ЕРС або напруги, і розв'язання  $i''(t)$  однорідного рівняння, яке одержуємо з того ж рівняння кола, якщо вважати напруги або ЕРС, що містяться в ньому, рівними нулю.

Тобто:

$$i(t) = i'(t) + i''(t). \quad (4.2)$$

При  $t \rightarrow \infty$  струм  $i''(t)$  прагне до нуля, так як процес у колі, яке має кінцевий опір, повинен згасати при відсутності у колі джерел ЕРС. Цей струм називають *вільним струмом*, складову  $i''(t)$  далі будемо позначати  $i_{віль.}$ . Вільний струм виникає в наслідок того, що при включенні або відключенні кола чи при інших раптових змінах у ньому запаси енергії у полях елементів кола при попередньому сталому режимі не відповідають запасам енергії у полях, які повинні були б бути у новому сталому режимі після змін, що відбулися в колі.

Якщо вільний струм прагне до нуля, то струм  $i(t)$  прагне до  $i'(t)$ . Тобто, часткове розв'язання  $i'(t)$  являє собою струм усталеного режиму кола, який встановлюється після змін, що відбулися в ньому. Цей струм має назву *примушеного*. Далі складову  $i'(t)$  будемо позначати  $i_{пр.}$

Будемо називати *комутацією* будь-яку зміну у колі, яка приводить до виникнення перехідного процесу або до зміни режиму його роботи. Причому будемо припускати, що ця зміна відбувається миттєво, тобто за інтервал часу  $\Delta t = 0$ .

Це може бути включення кола під дію джерела ЕРС або його відключення, замикання кола накоротко, стрибкоподібна зміна параметра кола, зміна стрибком амплітуди, частоти або фази прикладеної до кола напруги і т.п. Реальний процес комутації завжди триває кінцевий, хоч і досить малий відрізок часу  $\Delta t$ , на протязі якого відбувається, наприклад, зміна опору на затискачах кола від нескінченності до малої величини при підключенні кола до джерела ЕРС або від малої величини до нескінченності - при відключенні його. Тобто, якщо абстрагуватися від дійсної картини явища можна вважати, що  $\Delta t = 0$ .

Умовимось також початок відліку часу  $t = 0$  сполучати з моментом комутації. Через  $t = 0_-$  позначати момент часу, який безпосередньо передує моменту комутації і через  $t = 0_+$  - момент часу безпосередньо після комутації.

У електричному колі, не можуть виникати нескінченно великі струми, тому миттєва потужність " $p$ " являє собою кінцеву величину, і у таких колах не може бути миттєвої зміни накопиченої в електричних і магнітних полях енергії. Якщо зміну енергії за час комутації ( $\Delta t > 0$ ) позначимо

$\Delta W = W(0_+) - W(0_-)$  то одержимо  $\Delta W = p\Delta t \rightarrow 0$ , і таким чином,  $W(0_+) = W(0_-)$ .

Так як енергія електричного поля конденсатора і енергія магнітного поля індуктивної котушки дорівнюють:  $W_e = \frac{Cu_c^2}{2}$ ,  $W_m = \frac{Li_L^2}{2}$ , то рівність  $W = 0$  означає, що у момент комутації мають місце умови:

$$u_c(0_+) = u_c(0_-), \quad i_L(0_+) = i_L(0_-), \quad (4.3)$$

тобто у момент комутації залишаються незмінними напруга на обкладках конденсатора і струми у індуктивних котушках. Наведені співвідношення є виразом **законів комутації**, які формулюються таким чином:

1. У будь-якій вітці з індуктивністю струм і магнітний потік у момент комутації зберігають ті значення, які вони мали до комутації і у подальшому починають змінюватися з цих значень.

2. У будь-якій вітці напруга і заряд на ємності збережуть у момент комутації ті значення, які вони мали до комутації, і у подальшому будуть змінюватися з цих значень.

Так як у реальних фізичних колах кожний елемент має індуктивність і ємність, то в них не можуть стрибком змінюватися ні струми, ні напруги.

Однак, якщо, абстрагуючись від дійсності, нехтувати у котушці її розповсюдженою ємністю, то можна рахувати, що напруга на котушці може змінюватися стрибком. Так само, якщо повністю нехтувати індуктивністю конденсатора, то в ньому струм може змінюватися стрибком.

Якщо до комутації у момент  $t = 0_-$  існували струми у котушках і напруги на конденсаторах, які визначалися процесом, що відбувався до комутації, то кажуть, що мають місце **ненульові початкові умови**.

У випадку, коли струми у котушках і напруги на конденсаторах до комутації дорівнювали нулю, то кажуть, що мають місце **нульові початкові умови**.

Розглянуті початкові умови:

$$u_c(0_+) = u_c(0_-), \quad i_L(0_+) = i_L(0_-)$$

служать для визначення довільних сталих інтегрування.

Перехідні процеси у простіших колах будемо досліджувати так званим класичним методом, який полягає в інтегруванні диференційних рівнянь, що зв'язують струми і напруги кола у перехідному процесі. У результаті інтегрування з'являються сталі, які і визначаються з початкових умов.

## 4.2. Перехідні процеси в активно-індуктивних електричних колах

*Підключення активно-індуктивного кола до джерела постійної напруги.*

Розглянемо перехідні процеси в електричному колі, яке має опір  $R$  та індуктивність  $L$  (рис. 4.1). Згідно схеми це є вмикання активно-індуктивного

кола на постійну напругу. Диференційне рівняння для цієї схеми має вигляд

$$Ri + L \frac{di}{dt} = E, \text{ розв'язання якого шукаємо у вигляді:}$$

$$i = i_{np} + i_{вільн}$$

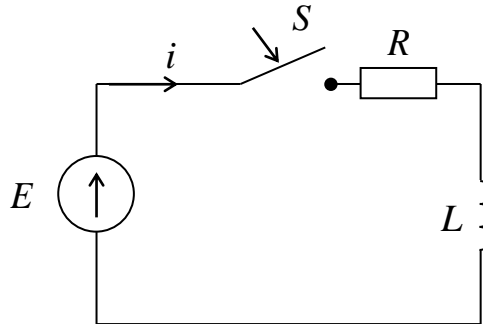


Рис. 4.1

Примушена складова  $i_{np}$  повного струму  $i$  є частковим розв'язанням неоднорідного рівняння і визначається виглядом діючої функції (напруги), яка в даному випадку постійна.

Для примушеного режиму:

$$Ri_{np} + L \frac{di_{np}}{dt} = E, \text{ а } \frac{di_{np}}{dt} = 0.$$

$$\text{Тому } i_{np} = \frac{E}{R}.$$

Загальне розв'язання лінійного однорідного рівняння  $L \frac{di_{вільн}}{dt} + Ri_{вільн} = 0$  має вигляд  $i_{вільн} = Ae^{pt}$ , а його характеристичне рівняння  $Lp + R = 0$  має один корінь  $p = -\frac{R}{L}$ , тобто вільна складова струму буде:  $i_{вільн} = Ae^{-\frac{R}{L}t}$ .

Постійну інтегрування визначають за допомогою початкових умов (у нашому випадку до вмикання струм  $i$  у колі дорівнює нулю). Згідно першого закону комутації:

$$i(0_-) = i(0_+) = 0$$

$$i(0) = i_{np}(0) + i_{вільн}(0) = \frac{E}{R} + A = 0,$$

$$\text{звідкіля постійна інтегрування } A = -\frac{E}{R}.$$

Отже повний струм буде змінюватись по закону:

$$i = \frac{E}{R} \left( 1 - e^{-t/\tau} \right), \quad (4.4)$$

де  $\tau = \frac{L}{R}$  має розмірність часу і **зветься постійною часу**.

Із виразу (4.4) бачимо, що струм в колі поступово зростає від нуля, асимптотично наближуючись до свого кінцевого значення  $\frac{E}{R}$ , причому зростання струму буде тим швидше, чим меншою буде постійна часу.

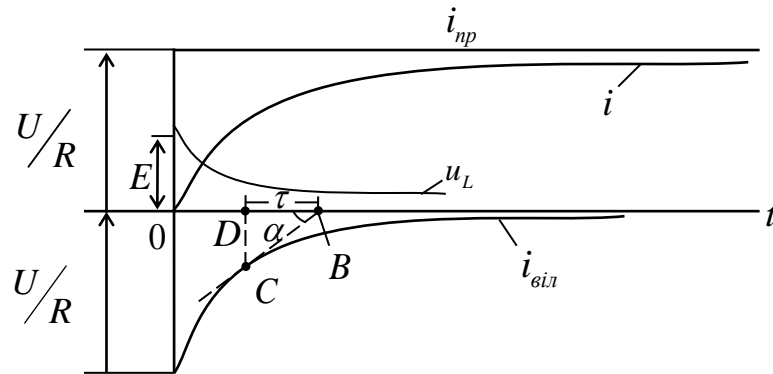


Рис 4.2

Розглянемо побудову залежностей  $i, i_{\text{вiл}}, i_{\text{np}}, u_L$  від часу (рис. 4.2).

Спочатку будемо залежності  $i_{\text{np}}$  та  $i_{\text{вiл}}$ , а потім повний струм. Постійна часу кола  $\tau = \frac{L}{R}$  може бути визначена як час, за який вільний струм зменшується в  $e$  разів порівняно зі своїм початковим значенням  $i_{\text{вiл}}(0)$ :

$$i_{\text{вiл}}(\tau) = i_{\text{вiл}}(0)e^{-1} = \frac{i_{\text{вiл}}(0)}{e} = \frac{A}{e}.$$

Графічний спосіб визначення  $\tau$  такий. Проведемо дотичну до кривої  $i_{\text{вiл}}$  у будь-якій точці, наприклад, в точці "С", значення піддотичної  $BD$  може бути знайдено з трикутника  $CBD$ :

$$BD = CD \operatorname{ctg} \alpha = \frac{i_{\text{вiл}}}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{i_{\text{вiл}}}{\frac{di_{\text{вiл}}}{dt}} = \frac{i_{\text{вiл}}}{\frac{i_{\text{вiл}}}{\tau}} = \tau.$$

Тобто постійна часу  $\tau$  чисельно дорівнює довжині піддотичної:

Перехідний процес практично закінчується через  $t = (3 \div 5)\tau$ , а теоретично при  $t = \infty$ .

Дійсно, якщо підрахувати значення струму в колі, у % від його початкового рівня для проміжків часу кратних  $\tau$ , то ми будемо мати:

$t$	$\tau$	$2\tau$	$3\tau$	$4\tau$	$5\tau$	$6\tau$
$\frac{i}{I}, \%$	36,8	13,5	5	1,8	0,67	0,25

Напруга на індуктивності:

$$u_L = u_{L_{\text{вiл}}} = L \frac{di}{dt} = E e^{-t/\tau}.$$

Оскільки до вмикання напруги на індуктивності дорівнювала нулю, а в момент комутації  $u_L = E$ , то перехідна, примушена та вільна напруги на індуктивності змінюється стрибком.

Відключення активно-індуктивного кола від джерела постійної напруги.

Розглянемо перехідні процеси, які виникають у активно-індуктивному електричному колі (рис. 4.3).

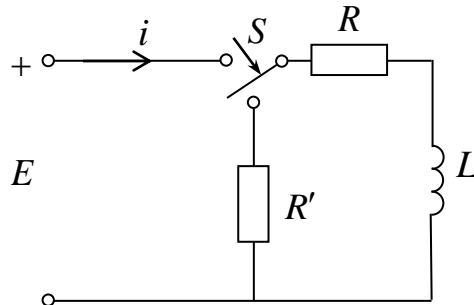


Рис. 4.3

Вітка з опором  $R$  та індуктивністю  $L$  раптово замикається на опір  $R'$  або накоротко ( $R' = 0$ ), тобто відключається від джерела живлення.

Струм у котушці до комутації визначається як:

$$i(0_-) = \frac{E}{R}.$$

Примушений струм у котушці після комутації дорівнює нулю, тобто повний струм буде:

$$i = i_{\text{свл}}.$$

Для післякомутаційної схеми складаємо рівняння згідно другого закону Кірхгофа:

$$L \frac{di_{\text{свл}}}{dt} + (R + R')i_{\text{свл}} = 0.$$

Загальне розв'язання цього рівняння буде:

$$i = i_{\text{свл}} = Ae^{-\frac{R+R'}{L}t} = Ae^{-t/\tau},$$

де  $\tau = \frac{L}{R + R'}$ .

Значення струму після комутації:  $i(0_+) = A$ .

Згідно першого закону комутації:  $i(0_-) = i(0_+) = E/R$ .

Звідси постійна інтегрування  $A = \frac{E}{R}$

і вираз для повного струму буде мати вигляд:

$$i = \frac{E}{R} e^{-t/\tau}.$$

Графічна залежність повного струму від часу приведена на рис.5.4.

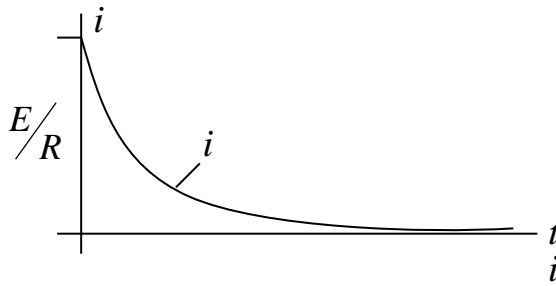


Рис. 4.4

ЕРС самоіндукції буде  $e_L = -L \frac{di}{dt} = E \frac{R+R'}{R} e^{-t/\tau} = E \left(1 + \frac{R'}{R}\right) e^{-t/\tau}$  і у

момент комутації буде утримувати значення струму на початковому рівні.

З енергетичної точки зору процес короткого замикання котушки індуктивності (відключення від джерела живлення) характеризується тим, що енергія магнітного поля котушки до комутації за час комутаційного процесу перетворюється у тепло.

При розмиканні такого кола в момент відключення котушки від джерела між контактами розмикача напруга різко збільшується від нуля до значення  $E + u_L$ . Швидкість зміни струму у момент розриву кола  $\frac{di}{dt} \rightarrow \infty$ , тому величина  $u_L = L \frac{di}{dt}$  може досягти великих значень.

Повітряний проміжок між контактами пробивається і виникає іскра. При великій потужності джерела іскровий розряд може перейти у дуговий.

*Включення активно-індуктивного кола на синусоїдну напругу.*

Активно-індуктивне коло (рис. 4.5) вмикається на синусоїдну напругу  $u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi)$ .

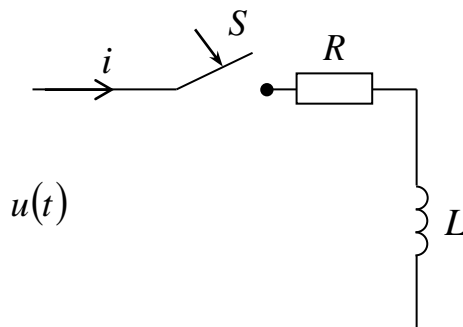


Рис. 4.5

Запишемо диференціальне рівняння:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U_m \sin(\omega t + \psi).$$

Повний струм будемо шукати як суму двох складових, примушеної та вільної:

$$i = i_{np} + i_{віль}.$$

Примушений струм визначається згідно закону Ома:

$$i_{np} = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi),$$

$$\text{де } z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega L}{R}, \quad I_m = \frac{U_m}{Z}.$$

Вільна складова струму:

$$i_{віль} = Ae^{-t/\tau}.$$

Для повного струму отримаємо:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) + Ae^{-t/\tau}.$$

У колі, що розглядається, до вмикання струму не було. Тому при  $t = 0$   $i(0) = 0$ . Звідкіля  $i_{віль}(0) = A = -I_m \sin(\psi - \varphi)$ . Повний струм буде змінюватись згідно виразу:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) - I_m \sin(\psi - \varphi) e^{-t/\tau}.$$

Напруга на індуктивності змінюється згідно виразу:

$$U_L = L \frac{di}{dt} = U_m \left[ \sin \varphi \sin \left( \omega t + \psi - \varphi + \frac{\pi}{2} \right) + \cos \varphi \sin(\psi - \varphi) e^{-t/\tau} \right].$$

Відмітимо, що

$$\begin{aligned} i_{np}(0) &= I_m \sin(\psi - \varphi) \\ i_{віль}(0) &= -I_m \sin(\psi - \varphi) \end{aligned}$$

Перехідний процес визначається вільним значенням струму.

Графічні залежності  $i_{np}$ ,  $i_{віль}$ ,  $i$  приведені на рис. 4.6.



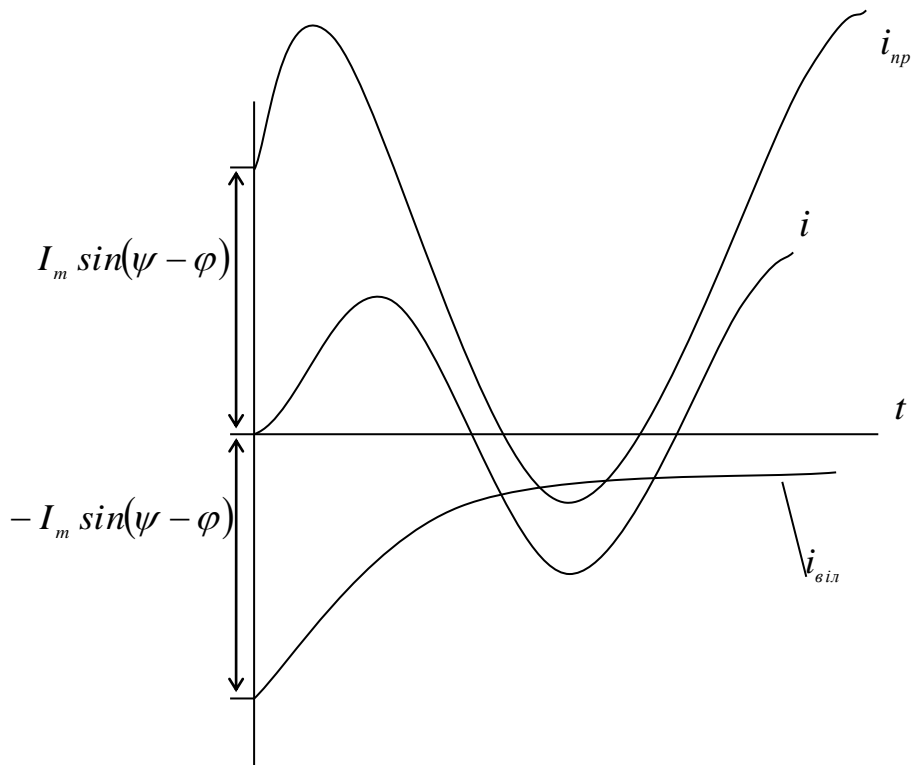


Рис. 4.6

По мірі згасання вільної складової перехідний струм наближається до значення примушеного струму. Однак через інтервал часу від  $\frac{1}{4}T$  до  $\frac{3}{4}T$  після вмикання, що залежить від кута  $\psi$ , струм може досягти значень, які будуть перевищувати амплітуду примушеного струму.

Для конкретного електричного кола значення  $I_m$  та  $\varphi$  задані, а значення початкової фази  $\psi$ , залежить від моменту вмикання.

### 4.3. Перехідні процеси в активно-ємнісних електричних колах

*Коротке замикання активно-ємнісного кола.*

Розглянемо електричне коло рис. 4.7.

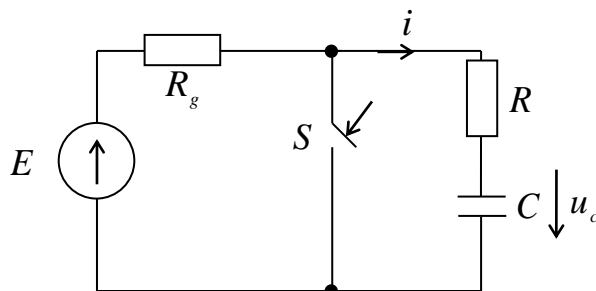


Рис. 4.7

До комутації конденсатор ємністю  $C$  заряджений до напруги джерела живлення  $U = E$ . Потім замикається ключ  $S$  і конденсатор буде розряджуватися через опір  $R$ .

Знайдемо закони зміни струму в такому колі  $i(t)$  та напруги на конденсаторі  $u_c(t)$  під час комутаційного процесу.

Примушені значення напруги на ємності та струм у колі дорівнюють нулю.

Виберемо позитивні напрямки напруги на ємності та струму співпадаючими.

Тоді рівняння згідно другого закону Кірхгофа для вільних складових буде таким:

$$Ri_{\text{віль}} + u_{\text{свіль}} = 0,$$

де

$$i_{\text{віль}} = \frac{dq_{\text{віль}}}{dt} = C \frac{du_{\text{свіль}}}{dt}.$$

Після чого рівняння прийме вигляд:

$$RC \frac{du_{\text{свіль}}}{dt} + u_{\text{свіль}} = 0.$$

Характеристичне рівняння його буде  $RCp + 1 = 0$ , звідки  $p = -\frac{1}{RC}$ ,  $\tau = RC$ .

Загальне розв'язання диференційного рівняння будемо шукати у вигляді:

$$u_c = u_{\text{свіль}} = Ae^{-t/\tau}.$$

Величину  $A = u_{\text{свіль}}(0)$  – початкове значення вільної напруги на ємності, визначають із початкових умов. Для будь-якої вітки з ємністю вони зводяться до того, що напруга на ємності в момент комутації (тобто при  $t = 0$ ) не може змінитися стрибком (згідно другого закону комутації). Тому при  $t = 0$ :

$$u_c(0) = A = E = U_0.$$

Для напруги на конденсаторі тепер маємо:  $u_c = U_0 e^{-t/\tau}$ .

а струм:  $i = -\frac{U_0}{R} e^{-t/\tau}$ .

Графічні залежності наведені на рис. 4.8.

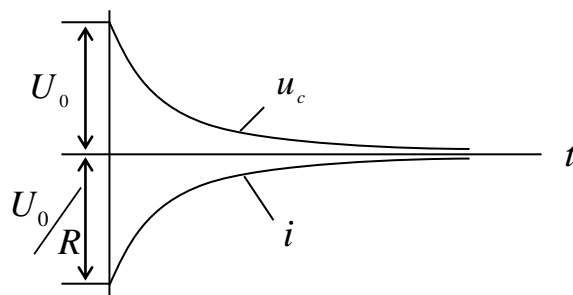


Рис. 4.8

З енергетичної точки зору процес короткого замикання електричного кола з ємністю характеризується переходом енергії, яка була в конденсаторі до комутації у тепло.

Треба відмітити, що практично будь яке коло з ємністю завжди має деяку індуктивність, хоча і малу. Тому струм не змінюється стрибком, а починається з нуля, дуже швидко досягає значення близького до  $U_0/R$ , а потім зменшується.

*Вмикання активно-ємнісного кола на постійну напругу*

Розглянемо перехідний процес при вмиканні активно-ємнісного кола на постійну напругу (рис. 4.9).

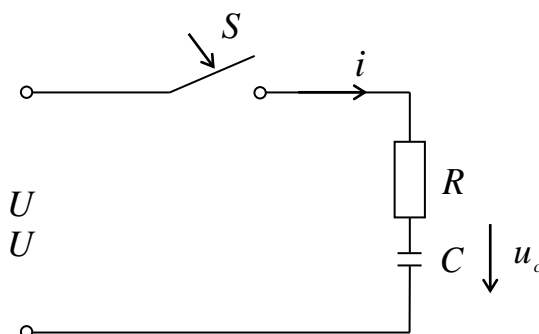


Рис. 4.9

Рівняння, складене згідно другого закону Кірхгофа для вільної складової напруги, буде таке, як розглянуте раніше:

$$u_{cвил} = Ae^{-t/\tau}.$$

Повна напруга на ємності буде:

$$u_c = u_{cпр} + u_{cвил} = U + Ae^{-t/\tau}.$$

Початкові умови для даного кола зводяться до відсутності стрибка перехідної напруги на ємності у момент комутації, тобто при  $t = 0$ ,  $u_c = 0$ , звідкіля  $A = -U$  і напруга на ємності буде:

$$u_c = U(1 - e^{-t/\tau}).$$

Для струму отримаємо:

$$i = C \frac{du_c}{dt} = \frac{U}{R} e^{-t/\tau}.$$

Графічні залежності представлені на рис. 4.10.

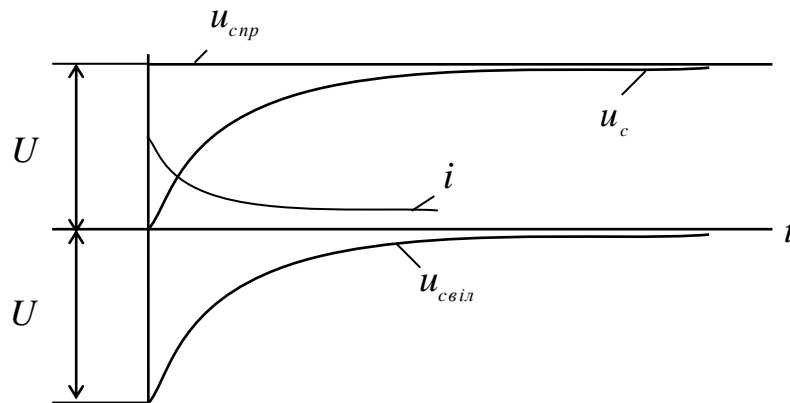


Рис. 4.10

Із графічних залежностей можна бачити, що напруга на ємності змінюється поступово, досягаючи напруги джерела живлення. Вона буде зростати тим повільніше, чим буде більша постійна часу.

З енергетичної точки зору процес вмикання електричного кола з ємністю на постійну напругу характеризується тим, що при будь яких значеннях опору та ємності половина енергії, яка надходить від джерела живлення за час перехідного процесу, перейде у тепло, а друга половина запасається у електричному полі конденсатора.

Необхідно відмітити повну аналогію у характері зміни струму в активно-індуктивному колі та напруги на ємності в активно-ємнісному колі при вмиканні їх на постійну напругу.

*Включення активно-ємнісного кола на синусоїдну напругу*

Розглянемо перехідні процеси, які виникають в активно-ємнісному колі при включенні на синусоїдну напругу (рис. 4.11)  $u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi)$ .

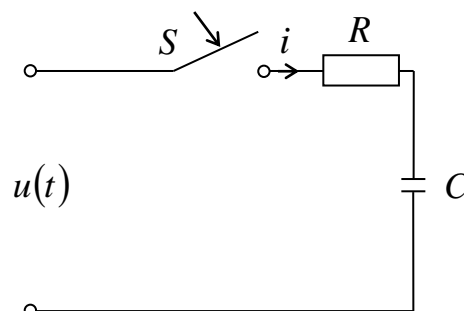


Рис. 4.11

Приймаємо, що до включення конденсатор не був зарядженим, тобто  $u_c(0) = 0$ .

Примушена напруга на ємності буде:

$$u_{cnp} = \frac{U_m}{Z\omega C} \sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right),$$

$$\text{де } Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}, \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{1}{\omega CR}.$$

Вільна складова напруги на ємності визначається як:

$$u_{c\text{вн}} = Ae^{-t/\tau}.$$

Перехідна напруга на ємності:

$$u_c = u_{cnp} + u_{c\text{вн}} = \frac{U_m}{Z\omega C} \sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) + Ae^{-t/\tau}.$$

Враховуючи початкові умови  $u_c(0) = 0$ , визначаємо постійну інтегрування  $A$ :

$$A = -\frac{U_m}{Z\omega C} \sin\left(\psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right).$$

Тоді для повної напруги на ємності маємо:

$$u_c = \frac{U_m}{Z\omega C} \sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) - \frac{U_m}{Z\omega C} \sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) e^{-t/\tau}.$$

Струм буде змінюватись так:

$$i = C \frac{du_c}{dt} = \frac{U_m}{R} \left[ \cos \varphi \sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin \varphi \sin\left(\psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) e^{-t/\tau} \right].$$

Графічні залежності аналогічні як і для активно-індуктивного кола (див. рис.7.10).

Через час від  $\frac{1}{4}T$  до  $\frac{3}{4}T$  після включення напруга на ємності може досягати значень, які перевищують амплітуду напруги у сталому режимі. Найбільшого значення напруга на ємності досягає, якщо в момент включення кола під напругу примушена напруга буде мати амплітудне значення (тобто  $\psi - \varphi = \pi$ ), а постійна часу кола  $\tau \rightarrow \infty$ . Приблизно через половину періоду після включення напруга на ємності може досягти подвійного значення амплітуди сталого режиму. Це самий несприятливий режим включення.

#### 4.4. Перехідні процеси в нерозгалуженому активно-індуктивно-ємнісному колі

Розглянемо перехідні процеси які виникають в електричному колі (рис. 4.12) при включенні на постійну напругу.

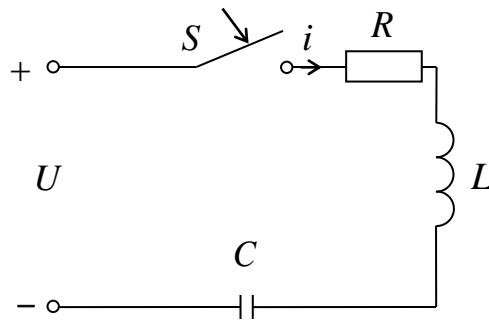


Рис. 4.12

Приймаємо, що початкові умови нульові, тобто  $i(0) = 0$  і  $u_c(0) = 0$ . Для такого кола згідно другого закону Кірхгофа маємо таке диференціальне рівняння:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + u_c = U.$$

Візьмемо похідну за часом від функції:

$$L \frac{d^2i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = 0,$$

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i = 0.$$

Так як у сталому режимі струм у колі дорівнює нулю (в колі є ємність) то повний струм буде дорівнювати вільній складовій:

$$i = i_{\text{вл}}.$$

Перейдемо від диференціального до характеристичного рівняння:

$$p^2 + \frac{R}{L} p + \frac{1}{LC} = 0,$$

розв'язання якого дає два корені:

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}.$$

Позначимо  $\frac{R}{2L} = \delta$  – декремент згасання;

$\frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0$  – частота незгасаючих коливань;

$$p_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}.$$

Характер переходних процесів, які будуть виникати в такому колі у момент його вмикання до джерела напруги, буде залежати від співвідношення між елементами кола  $R-L-C$ , тобто від того, які будуть корені характеристичного рівняння.

Розглянемо можливі випадки.

Перший випадок:  $\delta > \omega_0$ , тобто  $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ .

Тоді характеристичне рівняння має дійсні нерівні негативні корені і значення струму в цьому випадку шукають у вигляді:

$$i = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}.$$

Це рівняння має дві постійні інтегрування, для знаходження яких використовують початкові умови:

$i_0 = 0$  звідкіля  $A_1 = -A_2$  і рівняння для струму запишеться у вигляді:

$$i = A_1 (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}).$$

$u_c(0) = 0$ , але  $u_c = U - u_c - iR$ ,

$$u_L = L \frac{di}{dt} = LA_1 (p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t}),$$

$$u_c(0) = U - LA_1 (p_1 - p_2) \quad (i(0) = 0), \text{ то } iR = 0.$$

Звідкіля знаходимо значення  $A_1$ :

$$A_1 = \frac{U}{L(p_1 - p_2)}.$$

і відповідно знайдемо закони зміни  $i$ ,  $u_L$ ,  $u_c$ :

$$i = \frac{U}{L(p_1 - p_2)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}),$$

$$u_L = \frac{U}{p_1 - p_2} (p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t}),$$

$$u_c = U - \frac{U}{p_1 - p_2} (p_1 e^{p_2 t} - p_2 e^{p_1 t}).$$

Графічні залежності приведені на рис. 4.13.

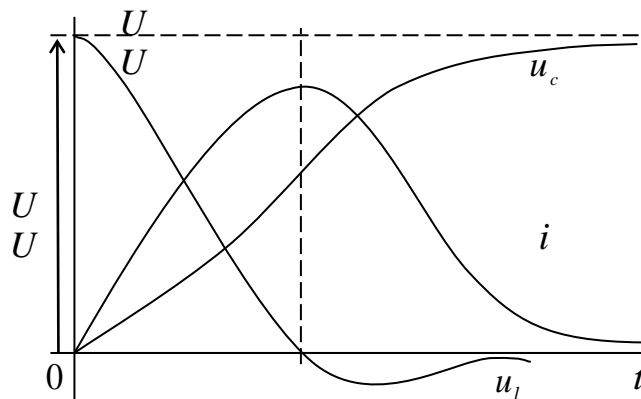


Рис. 4.13

Як видно з рис. 4.13, напруга на ємності зростає від нуля до напруги джерела живлення  $U$ , причому точка перегіну кривої  $u_c$  має місце у момент, коли струм досягає свого максимального значення (так як  $i_c = C \frac{du_c}{dt}$ ).

Дотична до кривої  $u_c$  у початковий момент горизонтальна, так як струм в початковий момент дорівнює нулю.

Напруга на індуктивності за величиною спочатку зменшується, потім коли пройде через нуль у момент коли струм має максимальне значення (так як  $u_L = L \frac{di}{dt}$ ) буде зростати потім зменшується до нуля.

Як видно з рис. 4.13 кожна з складових струму змінюється за експоненційним законом, але струм не змінює знака. Такий заряд конденсатора має назву аперіодичного заряду (тобто перезарядка конденсатора не виникає).

$$\text{Другий випадок: } \delta = \omega_0 \text{ тобто } R = R_{кр} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}.$$

У цьому випадку корені характеристичного рівняння дійсні, кратні, негативні.

Аперіодичний характер вільного процесу має місце коли корені характеристичного рівняння, дійсні.

При співвідношенні  $\delta = \omega_0$  має місце граничний випадок аперіодичного процесу.

Будемо називати критичним такий опір контуру при котрому вільний процес ще має аперіодичний характер.

Загальне розв'язання однорідного диференційного рівняння у випадку кратних дійсних коренів характеристичного рівняння будемо шукати у вигляді:

$$i = (A_3 + A_4 t)e^{pt},$$

де  $p_1 = p_2 = p = -\delta$ .

З початкових умов  $i(0) = 0$  слідує, що  $A_3 = 0$ .

Тому

$$i = A_4 t e^{pt},$$

$$u_c(0) = U - u_L - i(0)R = U - LA_4(1 + pt)e^{pt} = 0,$$

звідкіля  $A_4 = \frac{U}{L}$  і струм буде:  $i = \frac{U}{L} t e^{pt}$ ,

$$u_L = U(1 + pt)e^{pt}, \quad u_c = U - U(1 - pt)e^{pt}.$$

Третій випадок:  $\delta < \omega_0$  тобто  $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ .

У цьому випадку корені характеристичного рівняння комплексні спряженні:

$$p_1 = -\delta + j\omega_3, \quad p_2 = -\delta - j\omega_3, \quad \text{де } \omega_0^2 - \delta^2 = \omega_3^2$$

$\omega_3$  – частота згасаючих коливань у колі.

Процес заряду конденсатора буде мати коливальний характер.

Розв'язання диференційного рівняння при комплексних коренях його характеристичного рівняння будемо шукати у вигляді:

$$i = i_{\text{вн}} = A_5 e^{-\delta t} \sin(\omega_3 t + \alpha),$$

$$i(0) = 0 = A_5 \sin \alpha,$$

звідки:

$$\alpha = 0,$$



$$i = A_5 e^{-\delta t} \sin \omega_3 t,$$

$$u_L = L \frac{di}{dt} = LA_5 (\omega_3 \cos \omega_3 t - \delta \sin \omega_3 t) e^{-\delta t},$$

$$u_c = U - u_L - iR, \quad u_c(0) = U - A_5 L \omega_3,$$

звідкіля

$$A_5 = \frac{U}{\omega_3 L},$$

$$i = \frac{U}{\omega_3 L} e^{-\delta t} \sin \omega_3 t, \quad u_L = U \left( \cos \omega_3 t - \frac{\delta}{\omega_3} \sin \omega_3 t \right) e^{-\delta t},$$

$$u_c = U - U \left( \cos \omega_3 t + \frac{\delta}{\omega_3} \sin \omega_3 t \right) e^{-\delta t}.$$

Будуємо криву струму:

1.  $\omega_3 t = 0 \quad i = 0$ ;
2.  $\omega_3 t = \pi/2 \quad i = \frac{U}{\omega_3 L} e^{-\delta t}$ ;
3.  $\omega_3 t = \pi \quad i = 0$ ;
4.  $\omega_3 t = \frac{3}{2}\pi \quad i = -\frac{U}{\omega_3 L} e^{-\delta t}$ ;
5.  $\omega_3 t = 2\pi \quad i = 0$ .

Графічні залежності приведені на рис. 4.14.

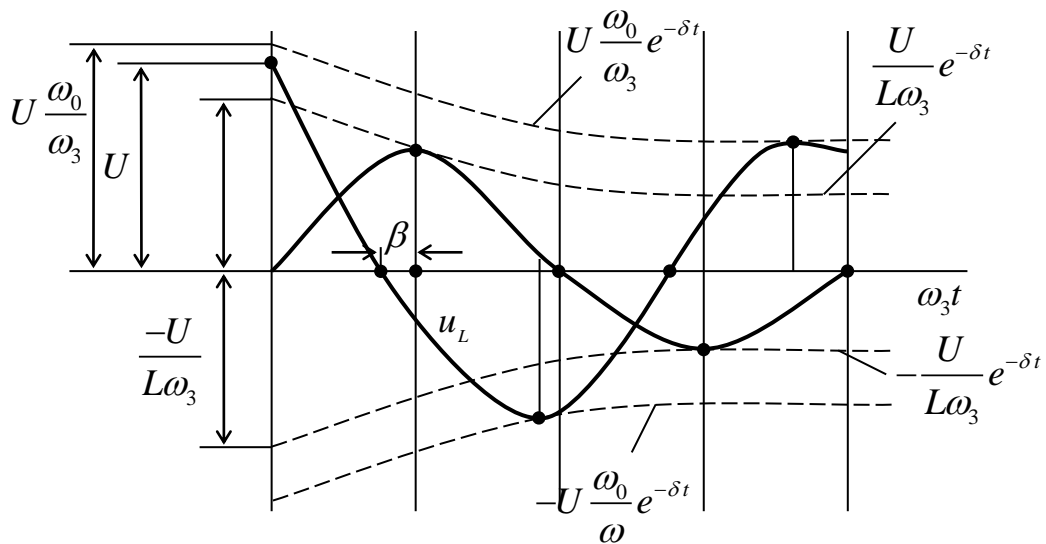
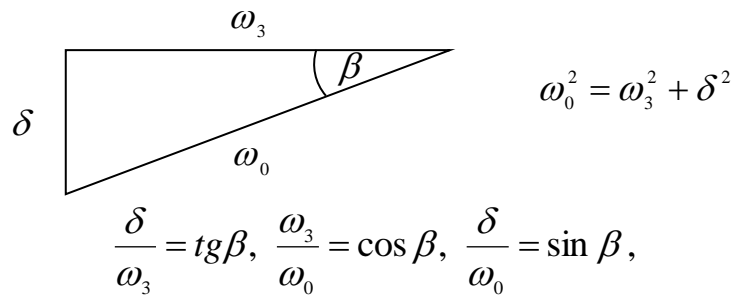


Рис. 4.14

Для побудови графічної залежності  $u_L$  від часу перетворимо вираз для  $u_L$ :

$$u_L = U \left( \cos \omega_3 t - \frac{\delta}{\omega_3} \sin \omega_3 t \right) e^{-\delta t}.$$



$$\frac{\delta}{\omega_3} = \operatorname{tg} \beta, \quad \frac{\omega_3}{\omega_0} = \cos \beta, \quad \frac{\delta}{\omega_0} = \sin \beta,$$

$$u_L = U \frac{1}{\cos \beta} (\cos \omega_3 t \cdot \cos \beta - \sin \omega_3 t \sin \beta) e^{-\delta t} = \frac{\omega_0}{\omega_3} U \cos(\omega_3 t + \beta) e^{-\delta t} \quad 0 < \beta < \pi/2.$$

Побудуємо цю залежність.

1.  $\omega_3 t = 0 \quad u_L = U$ ;
2.  $\omega_3 t = \pi/2 - \beta \quad u_L = 0$ ;
3.  $\omega_3 t = \pi - \beta \quad u_L = -U \frac{\omega_0}{\omega_3} e^{-\delta t}$ ;
4.  $\omega_3 t = \frac{3}{2} \pi - \beta \quad u_L = 0$ ;
5.  $\omega_3 t = 2\pi - \beta \quad u_L = \frac{\omega_0}{\omega_3} U e^{-\delta t}$ .

Аналогічно можна побудувати залежність  $u_c$  від часу. Вона буде аналогічною  $u_L$ , тільки зсунута на  $180^\circ$ .

Як видно з рис. 4.14, ці залежності мають характер згасаючих періодичних коливань, причому переходи  $u_L$  через нуль випереджають переходи струму через нуль на кут  $\pi/2 + \beta$ , а переходи  $u_c$  через нуль відстають на той же кут.

Енергетична сторона процесів виявляється у коливанні енергії між електричним полем конденсатора та магнітним полем котушки.

## 5. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ПРОГРАМИ ELECTRONICS WORKBENCH

Розробка будь-якого електричного пристрою супроводжується фізичним або математичним моделюванням. Фізичне моделювання пов'язане з значними матеріальними витратами, оскільки потрібне виготовлення макетів і їхнє трудомістке дослідження. Часто фізичне моделювання просто неможливе через надзвичайну складність пристрою. У цьому випадку прибігають до математичного моделювання з використанням засобів і методів обчислювальної техніки. Легко освоюваною і досить зручною в роботі є програма Electronics Workbench (**EWB**) – розробка фірми Interactive Image Technologies ([www.interactiv.com](http://www.interactiv.com)). Історія створення програми Electronics Workbench (**EWB**) починається з 1989 р. Ранні версії програми склалися з двох незалежних частин. За допомогою однієї половини програми можна було моделювати аналогові пристрої, за допомогою іншої – цифрові. В 1996 р. у версії 4.1 ці частини були об'єднані і через півроку з'явилася п'ята версія програми. У даному посібнику розглядається версія 5.12.

### 5.1 Структура вікна і система меню

Робоче вікно програм версії 5.12 показано на рис. 5.1. Вікно програми містить поле, меню, лінійку контрольно-вимірювальних приладів і лінійку бібліотек компонентів, одна з яких у розгорнутому виді показана в лівій верхній частині робочого поля. У робочому полі програми розташовується схема, що моделюється, з підключеними до неї іконками контрольно-вимірювальних приладів. При необхідності кожний із приладів може бути розгорнутий для установки режимів його роботи і спостереження результатів. Лінійки прокручування використовуються тільки для переміщення схеми.

Розглянемо команди меню програми **EWB** у порядку їхнього проходження на рис. 5.1.

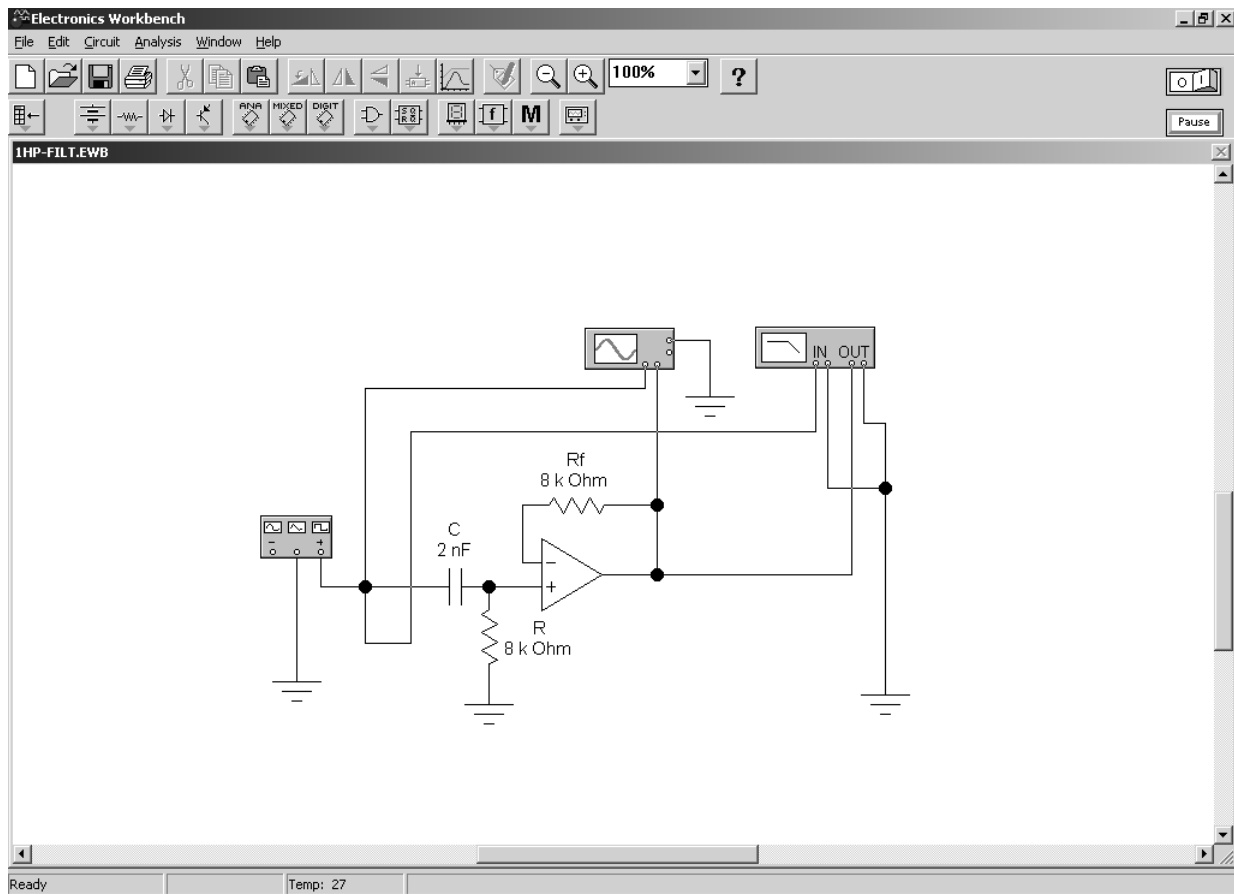


Рис. 5.1. Вікно програми EWB

### 5.1.1 Меню File

Меню **File** призначено для завантаження і запису файлів, одержання твердої копії обраних для друку складових частин схеми, а також для імпорту/експорту файлів у форматах інших систем моделювання і програм розробки друкованих плат.

1. Перші чотири команди цього меню: **New (Ctrl+ N)**, **Open... (Ctrl+ O)**, **Save (Ctrl+ S)**, **Save As...** - типові для Windows команди роботи з файлами. Для цих команд є кнопки (іконки) зі стандартним зображенням.

2. **Import/Export** – обмін даними з програмою розробки друкованих плат **EWB Layout**

3. **Print... (CTRL+ P)** – вибір даних для виводу на принтер:  
**Schematic** – схеми (опція включена за замовчуванням);  
**Description** – опису до схеми;  
**Part list** – переліку виведених на принтер документів;  
**Label list** – списку позначень елементів схеми;  
**Model list** – списку наявних у схемі компонентів;  
**Subcircuits** – підсхем (частин схеми, що є закінченими функціональними вузлами і позначаються прямокутниками з назвою усередині);

**Analysis options** – переліку режимів моделювання;

**Instruments** – список приладів. У цьому ж підменю можна вибрати опції друку (кнопка Setup) і відправити матеріал на принтер (кнопка Print). У програмі передбачена також можливість зміни масштабу виведених на принтер даних у межах від 20 до 500%.

**4. Print Setup...** - настроювання принтера.

**5. Exit (ALT+ F4)** – вихід із програми.

**6. Install...** - установка додаткових програм з гнучких дисків.

**7. Export to PCB** – складання списків з'єднань схеми у форматі OrCAD і інших програм розробки друкованих плат.

**8. Import from SPICE** – імпорт текстових файлів опису схеми й завдання на моделювання у форматі SPICE (з розширенням. cir) і автоматична побудова схеми по її текстовому опису.

**9. Export to SPICE** – складання текстового опису схеми і завдання на моделювання у форматі SPICE.

### 5.1.2 Меню Edit

Меню **Edit** дозволяє виконувати команди редагування схем і копіювання екрана.



**1. Select All (CTRL+ A)** – виділення всієї схеми.




**2. Copy as Bitmap** – команда перетворює курсор миші в хрестик, яким за правилом прямокутника можна виділити потрібну частину екрана, після відпускання лівої кнопки миші виділена частина копіюється в буфер обміну, після чого його вміст може бути імпортований в будь-який додаток **Windows**. Копіювання всього екрана виробляється натисканням клавіші **Print Screen**: копіювання активної в цей момент частини екрана, наприклад, діалогового вікна – комбінацією **Alt+ Print Screen**. Команда дуже зручна при підготовці звітів по моделюванню, наприклад, при оформленні лабораторних робіт.

**3. Show Clipboard** – показати вміст буфера обміну.

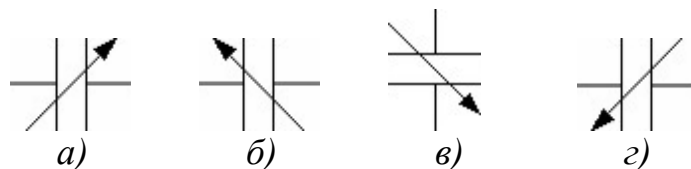
### 5.1.3 Меню Circuit

Меню **Circuit** використовується при підготовці схем, а також для завдання параметрів моделювання.

**1. Zoom In i Zoom Out** команди масштабування схеми з вказівкою масштабу в діапазоні 50 – 200%, відповідно збільшення й зменшення масштабу. Ці команди можуть бути виконані також за допомогою мнемонічних засобів зі стандартним позначенням  

Команди **Rotate, Flip Vertical i Flip Horizontal** виконуються натисканням кнопок   . **Rotate (CTRL+ R)** – обертання виділеного компонента проти вартовий стрілки на 90°. При кожному виконанні команди, для вимірювальних приладів (амперметр, вольтметр і ін.) міняються місцями клеми підключення. Команда найчастіше використовується при підготовці

схем. Команда **Flip Horizontal** – дзеркальне відображення по горизонталі. Команда **Flip Horizontal** – дзеркальне відображення по горизонталі. У готовій схемі користуватися командами недоцільно, оскільки це найчастіше приводить до плутанини - у такому випадку компонентів потрібно спочатку відключити від приєднаних кіл, а потім обертати.



Результати застосування команд **Rotate** і **Flip**

Як приклад на малюнку наведені результати застосування зазначених команд для перетворення графічного зображення конденсатора змінної ємності: на рис.(а) – зображення конденсатора у вихідному стані, на рис.(б) – після застосування команди **Rotate** (поворот на  $90^\circ$  проти вартовий стрілки), на рис.(в) – після застосування команди **Flip Horizontal** (дзеркальне відображення по горизонталі) і на рис.(г) – після застосування команди **Flip Vertical** (дзеркальне відображення по вертикалі).

**2. Schematic Options. (CTRL+ E)** – вибір елементів оформлення схеми, діалогові вікна якої показані на рис. 5.2 і 5.3. Зазначені в меню опції мають наступне призначення:

**Show grid** – показувати сітку для зручності малювання схеми (за замовчуванням ця опція виключена, інші включені); опція активна тільки при включеній опції;

**Use grid** – використати сітку;

**Show labels** – показувати позиційні позначення компонентів, наприклад, C1, C2 для конденсаторів;

**Show models** – показувати найменування моделей компонентів, наприклад, типів транзисторів;

**Show values** – показувати номінали компонентів, наприклад, опору резисторів;

**Show Nodes** – показувати нумерацію вузлів;

**Autohide part bins** – за замовчуванням не показувати склад бібліотеки компонентів, що використовується в даній схемі;

**Keep parts bin positions** – зберігати положення використовуваної бібліотеки компонентів на екрані при оформленні схеми; звичайно вибір нової бібліотеки компонентів приводить до вимикання попередньої; для збереження на екрані відразу декількох бібліотек, їх необхідно рознести по екрану, при цьому їхнє положення при виборі нової бібліотеки залишиться незмінним.

При виборі закладки **Fonts** (рис. 5.3,а) можна встановити тип (**Font name**) і розмір (**Font size**) шрифту роздільно для позначення компонента (кнопка **Set label font**) і номінального значення його параметра (кнопка **Set value font**). Як приклад на рис. 5.3, м показане вікно установки типу й

розміру шрифту позначення компонента. Вікна команди **Schematic Options** при виборі закладок **Wiring** і **Printing** показані на рис. 5.4. Перша команда (рис. 5.4, а) пов'язана із прокладкою провідників на схемі й організацією їхніх взаємних з'єднань (**Routing options**), видаленням провідників (**Rewiring options**) і з'єднань **Auto-delete connectors** – автоматичне видалення невикористовуваних з'єднань, наприклад, що дублюють один одного). Друга команда (рис. 5.4, б) пов'язана з масштабуванням виведеної на принтер інформації.

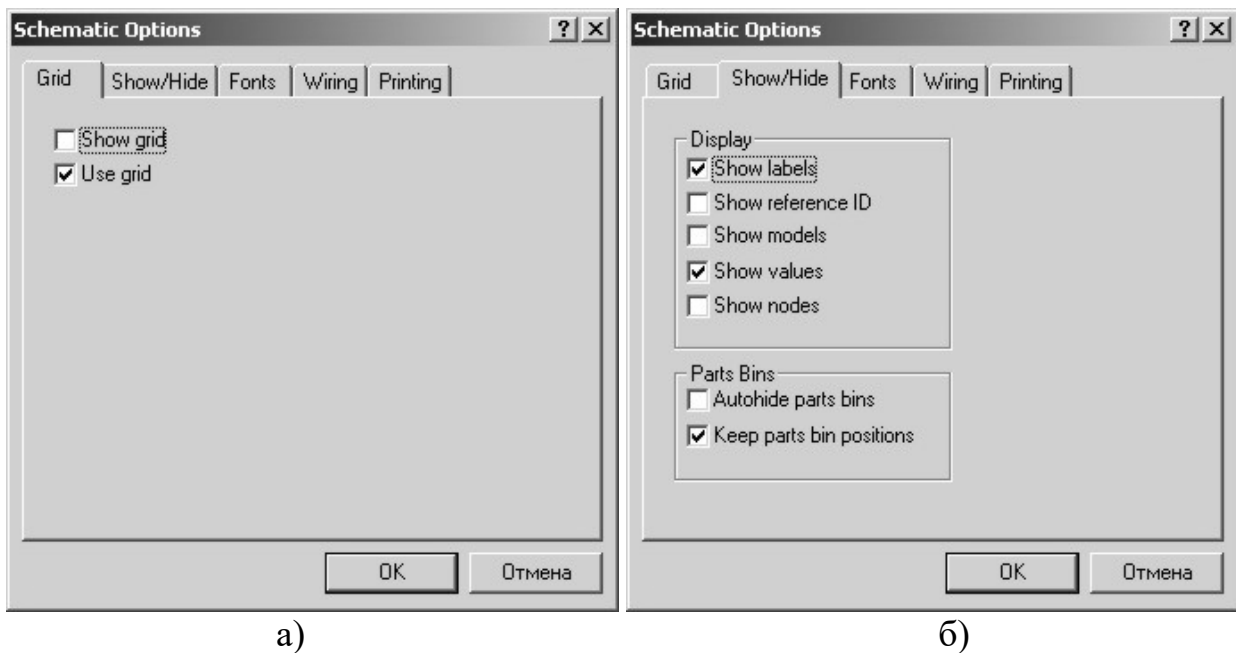
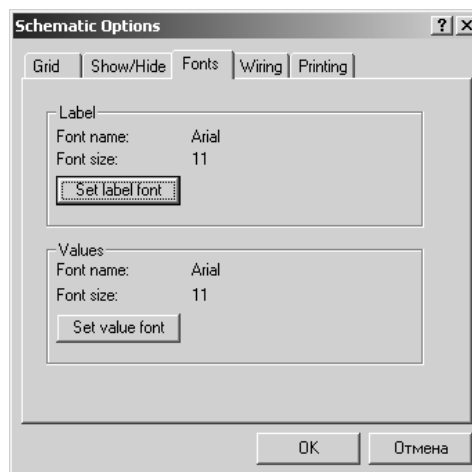
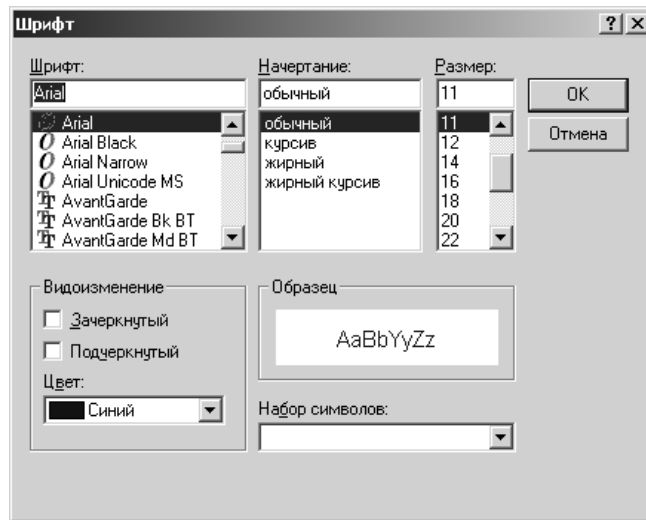


Рис. 5.2. Вікно команди **Schematic Options**, закладки **Grid** (а), **Show/Hide** (б)

При виборі закладки **Fonts** (рис. 5.3,а) можна встановити тип (**Font name**) і розмір (**Font size**) шрифту роздільно для позначення компонента (кнопка **Set label font**) і номінального значення його параметра (кнопка **Set value font**). Як приклад на рис. 5.3,б показане вікно установки типу й розміру шрифту позначення компонента.



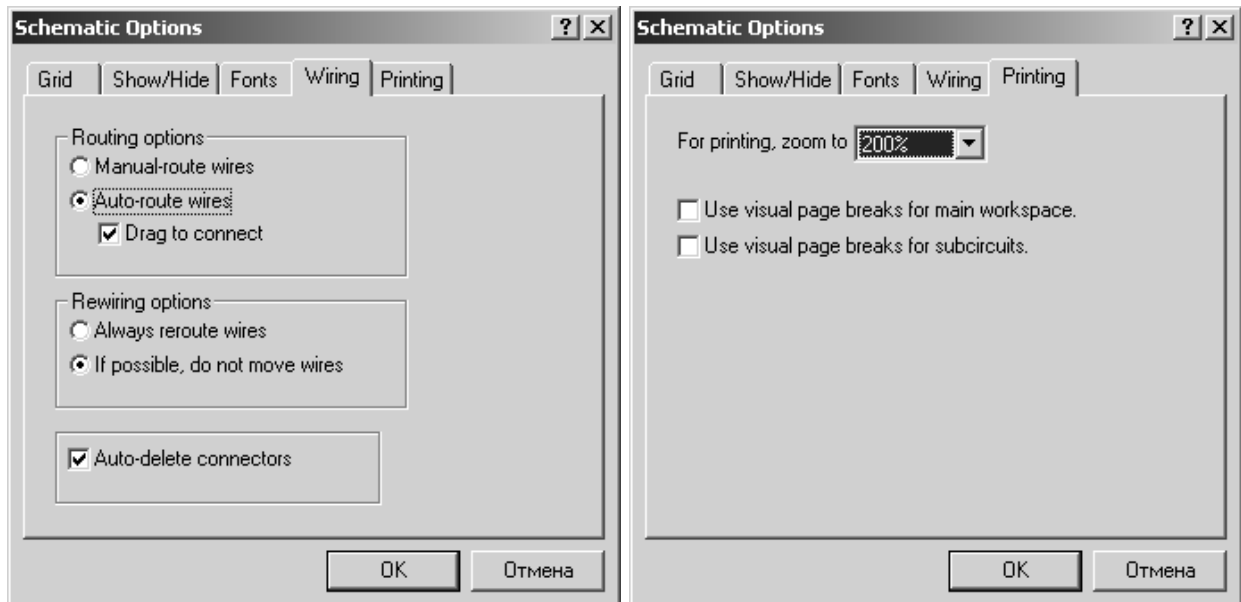


б)

Рис. 5.3. Вікно команди **Schematic Options**, закладки **Fonts** (а) з установкою типу шрифту і його атрибутів (б)

Вікна команди **Schematic Options** при виборі закладок **Wiring** і **Printing** показані на рис. 5.4.

Перша команда (рис. 2.1.4,а) пов'язана із прокладкою провідників на схемі і організацією їхніх взаємних з'єднань (**Routing options**), видаленням провідників (**Rewiring options**) і з'єднань **Auto-delete connectors** – автоматичне видалення не використовуваних з'єднань, наприклад, що дублюють один одного). Друга команда (рис. 5.4,б) пов'язана з масштабуванням виведеної на принтер інформації.



а)

б)

Рис. 5.4 Вікно команди **Schematic Options Wiring** (а) і **Printing** (б)



## 5.1.4 Меню Analysis

**Activate (CTRL + G)** – запуск моделювання.

**Pause (F9)** – тимчасова зупинка моделювання.

**Stop (Ctrl + t)** – зупинка моделювання.

**Analysis Options...** (CTRL + Y) – набір команд для установки параметрів моделювання.

**1. Global** – настроювання загального характеру, задаються за допомогою діалогового вікна (рис. 5.5), у якому параметри мають наступне призначення:

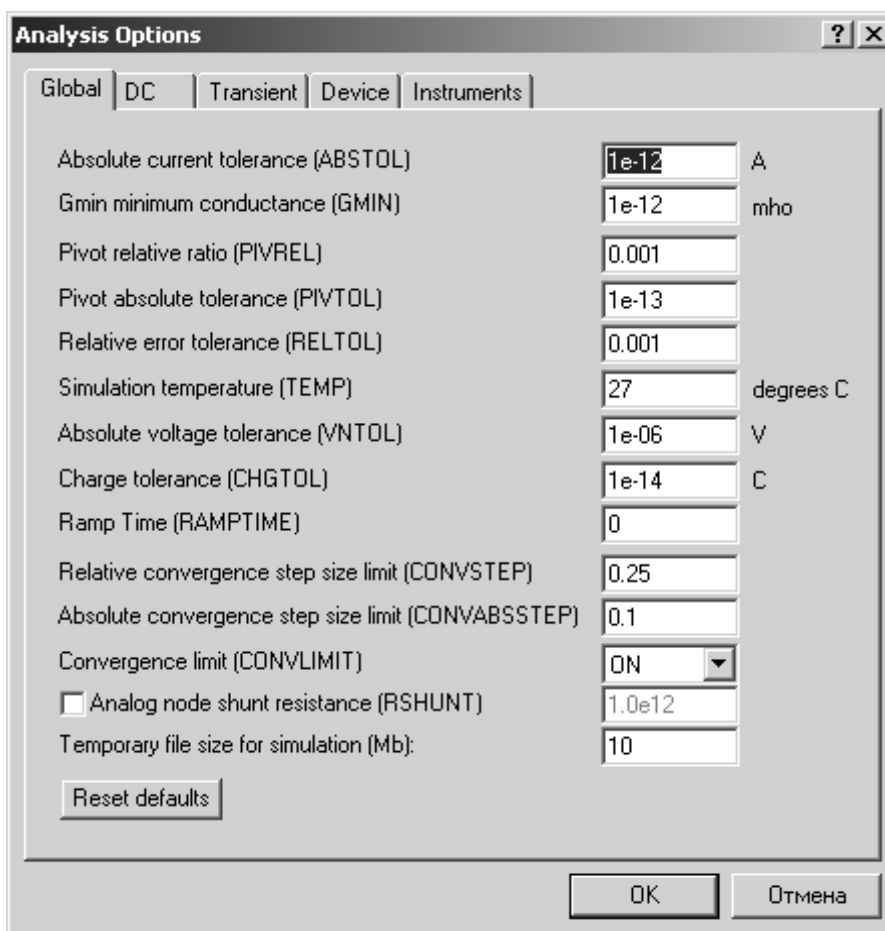


Рис. 5.5. Діалогове вікно настроювання параметрів моделювання загального характеру

**Abstol** – абсолютна помилка розрахунку струмів;

**Gmin** – мінімальна провідність ділянки кола (провідність ділянки, менша Gmin, вважається рівною нулю);

**Pivrel, Pivtol** – відносна і абсолютна величини елемента рядка матриці вузлових провідностей (наприклад, при розрахунку за методом вузлових потенціалів), необхідні для його виділення як провідного елемента;

**Pivtol** – припустима відносна помилка розрахунку напруг і струмів;

**Temp** – температура, при якій проводиться моделювання;

**Vntol** – припустима помилка розрахунку напруги у режимі Transient (аналіз перехідних процесів);

**Chgtol** – припустима помилка розрахунку зарядів;

**Ramptime** – початкова точка відліку часу при аналізі перехідних процесів;

**Convstep** – відносний розмір кроку ітерації при розрахунку режиму по постійному струму;

**Convabsstep** – абсолютний розмір кроку ітерації при розрахунку режиму по постійному струму;

**Convlimit** – включення або вимикання додаткових засобів для забезпечення збіжності ітераційного процесу (наприклад, за рахунок використання методу варіації напруги джерел живлення);

**Rshunt** – припустимий опір витoku для всіх вузлів щодо загальної шини (заземлення).

**Temporary...** - обсяг дискової пам'яті для зберігання тимчасових файлів (у Мбайт).

**2. DC** – настроювання для розрахунку режиму по постійному струму (статичний режим). Для настроювання цього режиму використовується діалогове вікно (рис 5.6.), параметри якого мають наступне призначення:

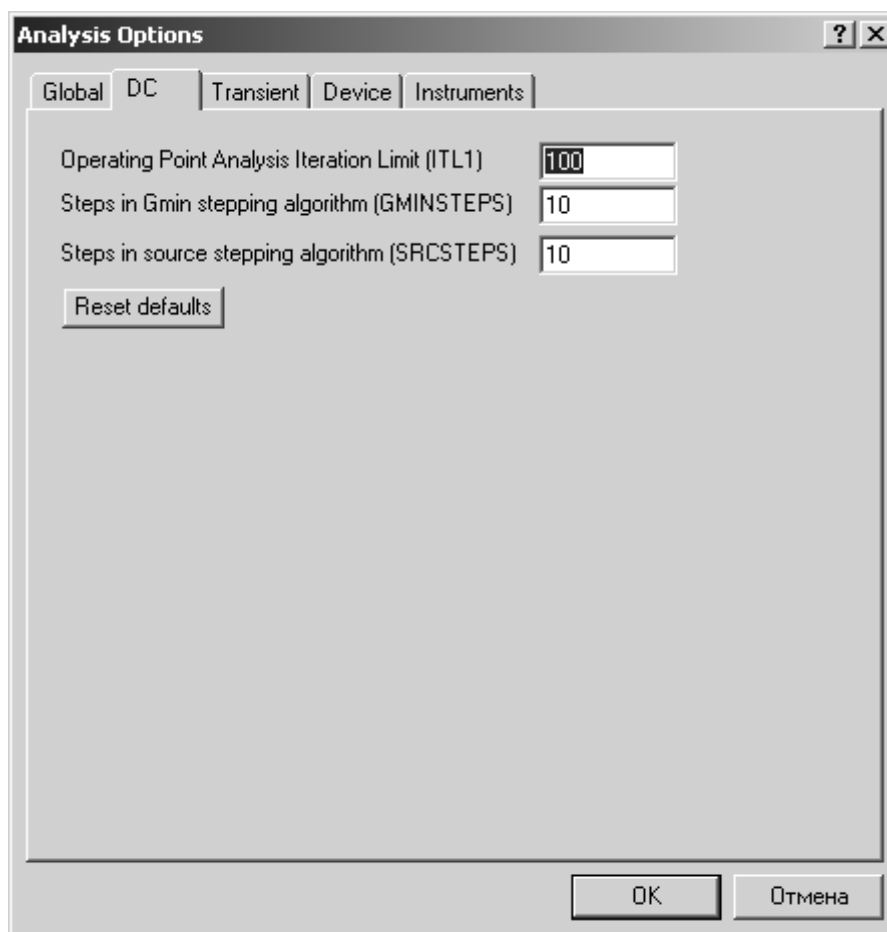


Рис. 5.6. Діалогове вікно установки параметрів режиму DC

**Itl1** – максимальна кількість ітерацій наближених розрахунків;

**Gminsteps** – розмір збільшення провідності у відсотках

**Gmin** (використається при слабкій збіжності ітераційного процесу);

**Srcsteps** – розмір збільшення напруги живлення у відсотках від його номінального значення при варіації напруги живлення (використається при слабкій збіжності ітераційного процесу).

Кнопка **Reset Defaults** призначена для установки за замовчуванням параметрів, показаних на рис 5.6. Використається в тому випадку, якщо після редагування необхідно повернутися до вихідних даних.

**3. Transient** – настроювання параметрів режиму аналізу перехідних процесів (діалогове вікно на рис. 5.7.):

**Itl4** – максимальна кількість ітерацій за час аналізу перехідних процесів;

**Maxord** – максимальний порядок (від 2 до 6) методу інтегрування диференціального рівняння;

**Trtol** – допуск на похибку обчислення змінної;

**Method** – метод наближеного інтегрування диференціального рівняння:

**Trapezoidal** – метод трапецій;

**Gear** – метод Гіра;

**Acct** – дозвіл на вивід статистичних повідомлень про процес моделювання.

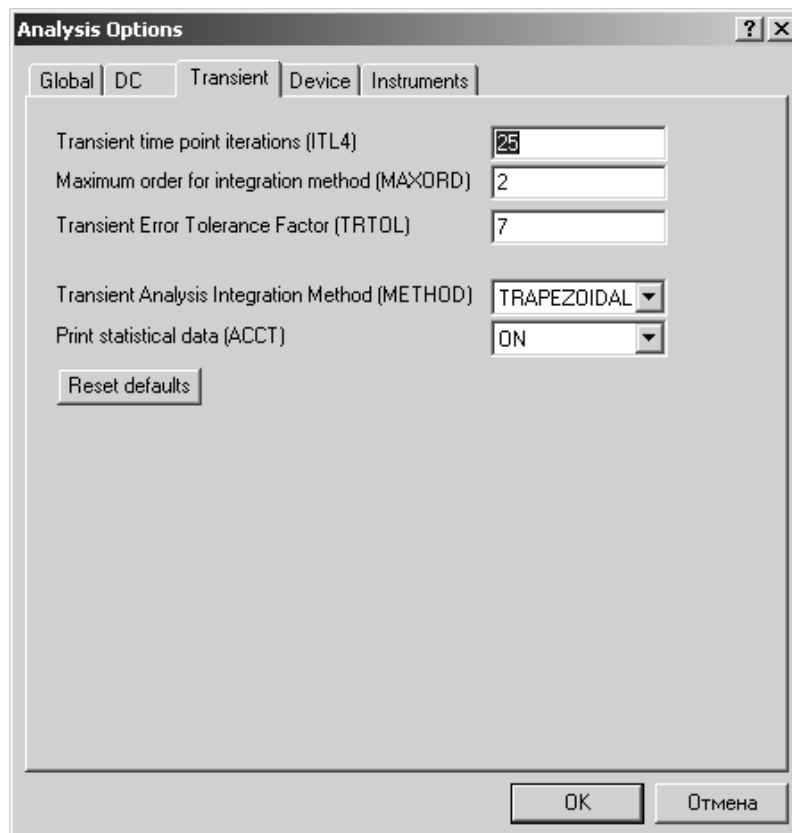


Рис. 5.7. Діалогове вікно настроювання режиму моделювання перехідних процесів

**4. Device** – вибір параметрів МОП-транзисторів (діалогове вікно показано на рис. 6.8.):

**Defad** – площа дифузійної області стоку,  $\text{м}^2$ ;

**Defas** – площа дифузійної області джерела,  $\text{м}^2$ ;

**Defl** – довжина каналу польового транзистора, м;

**Defw** – ширина каналу, м;

**Tnom** – номінальна температура компонента;

**Bypass** – включення або вимикання нелінійної частини моделі компонента;

**Trytocompact** – включення або вимикання лінійної частини моделі компонента;

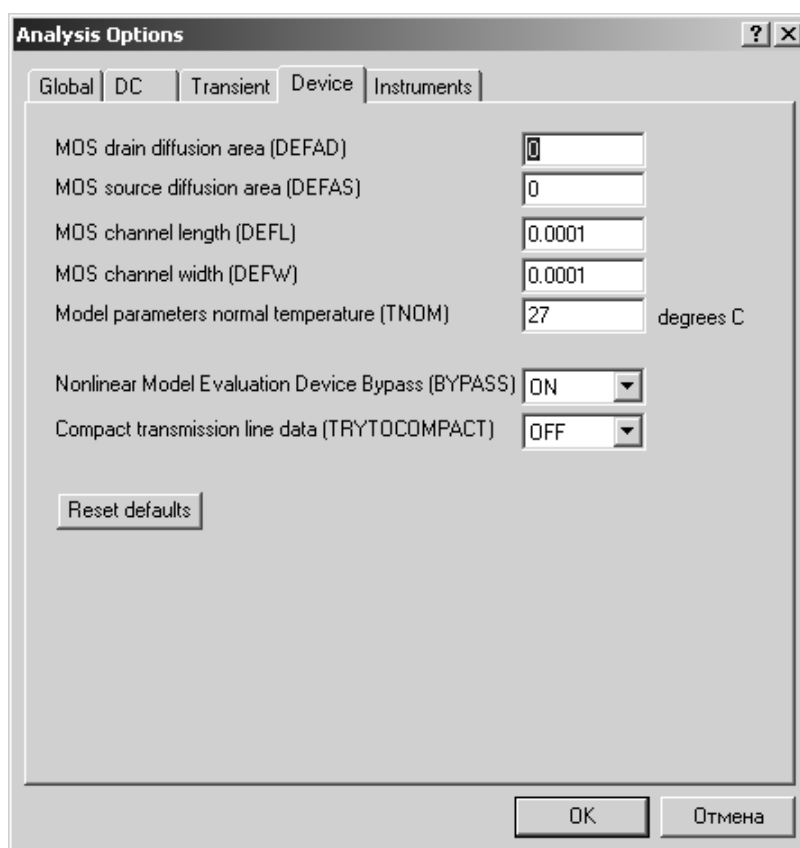


Рис. 5.8. Діалогове вікно вибору параметрів моделі Моп-транзистора

**5. Instruments** – настроювання параметрів контрольно-вимірювальних приладів (рис. 5.9.):

**Pause after each screen** – пауза (тимчасова зупинка моделювання) після заповнення екрана осцилографа по горизонталі (Oscilloscope);

**Generate time steps automatically** – автоматична установка кроку часу (інтервалу) виводу інформації на екран;

**Minimum number of time points** – мінімальна кількість відображуваних точок за період спостереження (реєстрації);

**Tmax** – проміжок часу від початку до кінця моделювання;

**Set to Zero** – установка у нульовий (вихідне) стан контрольно-вимірювальних приладів перед початком моделювання;

**User-defined** – керування процесом моделювання проводиться користувачем (ручний пуск і зупинка);

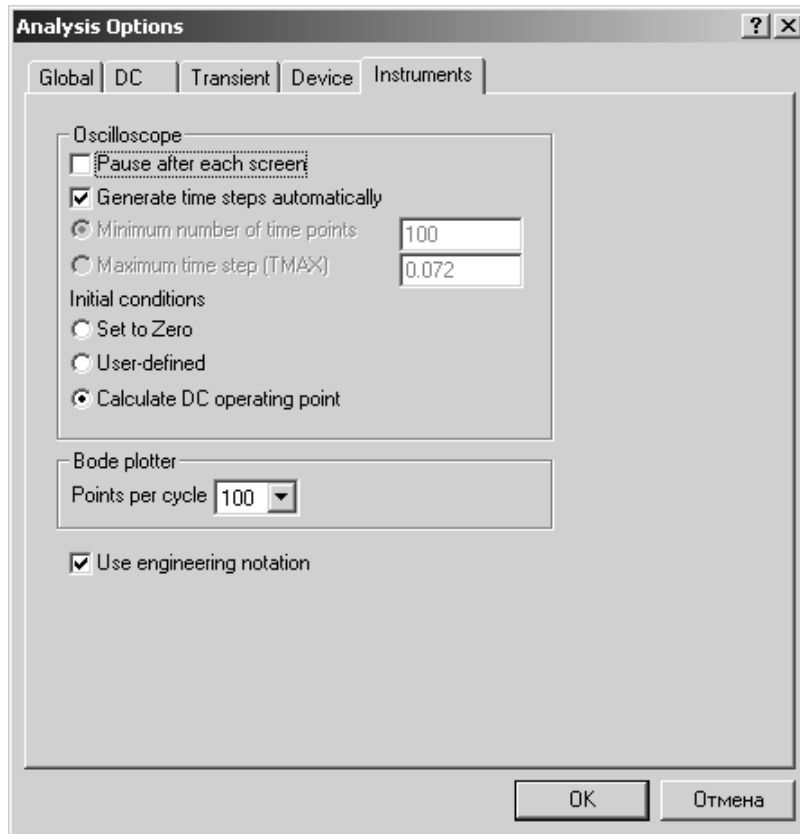


Рис. 5.9. Діалогове вікно настроювання параметрів контрольно-вимірювальних приладів

**Calculate DC operating point** – виконання розрахунку режиму по постійному струму;

**Points per cycle** – кількість відображуваних точок при виводі амплітудно-частотних і фазо-частотних характеристик (Bode plotter);

**Use engineering notation** – використання інженерної системи позначень одиниць виміру (наприклад, напруги будуть виводитися в мілівольтах (мВ), мікровольтах (мкВ), нановольтах (нВ) і т.д.).

**DC Operating Point** – розрахунок режиму по постійному струму.

З досвіду роботи з іншими програмами моделювання треба, що б в режимі DC у схемі, що моделюється, відключаються всі конденсатори і перемикаються всі індуктивності.

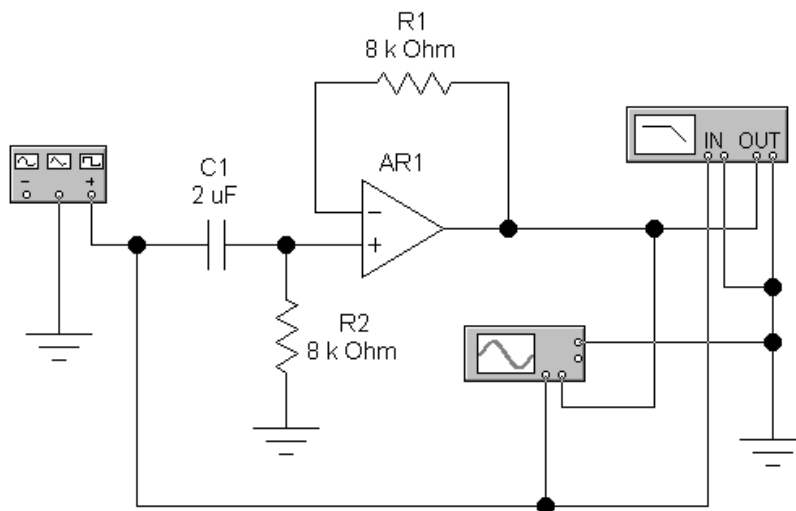


Рис. 5.10. Фільтр високих частот на операційному підсилювачі

Розгляд DC-режиму і наступних команд меню **Analysis** доцільно вести на прикладі практичних пристроїв. У якості таких використаємо фільтр верхніх частот на операційному підсилювачі (мал. 5.10.) і генератор Колпитца (мал. 5.11.). Відзначимо, що при використанні команд меню **Analysis** доцільно в меню **Circuit>Schematic Options>Show/Hide** включити опції **Show Reference ID** і **Show Nodes**. Відзначимо також, що в схемі фільтра входна напруга у всіх випадках прийнята рівною 100 мкВ. Результати розрахунку режиму генератора Колпитца по постійному струму показані на рис. 5.12. У верхній частині рисунка зазначене ім'я схемного файлу (для генератора Колпитца це 2m-oscil.ewb). Нижче наведені потенціали вузлів схеми в контрольних точках 1, 2, 3, 4 і на виводах транзистора. Змінні L0#branch і V0#branch позначають струми через індуктивність LO і джерело напруги VO відповідно.

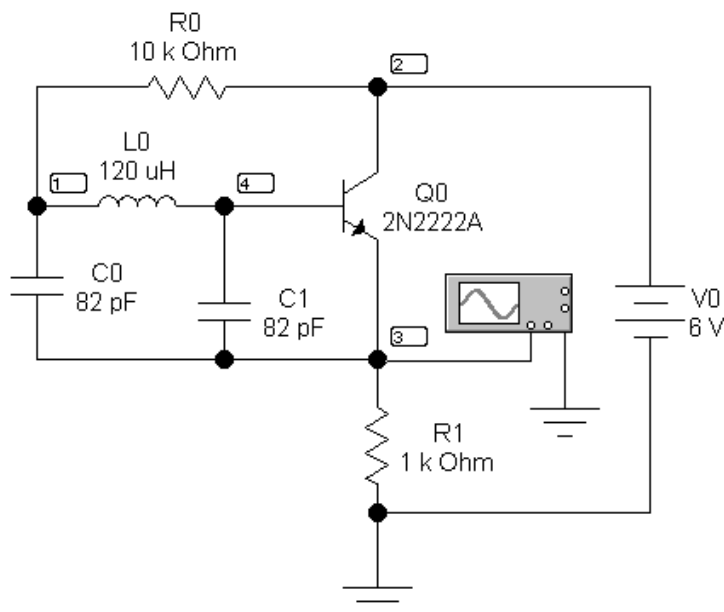


Рис. 5.11. Генератор Колпитца

Node/Branch	Voltage/Current
1	5.74516
2	6.00000
3	5.04971
4	5.74516
L0#branch	25.48369u
Q0#base	5.74512
Q0#collector	5.99915
Q0#emitter	5.05185
V0#branch	-5.04971m

Рис. 5.12. Результат розрахунку режиму по постійному струму генератора Колпитца

Якщо курсор миші помістити у вікно на рис. 5.12. і натиснути її праву кнопку, викликається діалогове вікно (рис. 5.13.), за допомогою якого можна відредагувати назву (за замовчуванням приймається назва схемного файлу), змінити його шрифт і т.д..

**AC Frequency...** – розрахунок частотних характеристик. Виконання команди починається із завдання в діалоговому вікні (рис. 5.14) наступних параметрів:

**Fstart, Fstop** – границі частотного діапазону (мінімальне і максимальне значення частоти відповідно);

**Sweep type** – масштабу по горизонталі: декадний (Decade), лінійний (Linear) і октавний (Octave);

Рис. 5.13 Вікно зміни розрахунку по постійному струму генератора Колпитца

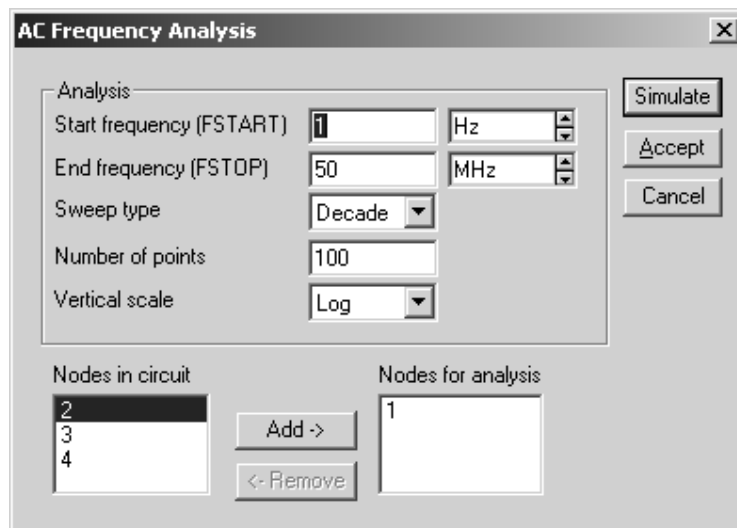


Рис. 5.14. Вікно вибору параметрів моделювання в режимі розрахунку частотних характеристик

**Number of points** – числа точок;

**Vertical scale** – масштабу по вертикалі: лінійний (Linear), логарифмічний (Log) і в децибелах (Decibel);

**Nodes in circuit** – списку всіх вузлів ланцюга;

**Nodes for analysis** – номерів вузлів, для яких розраховуються характеристики схеми, перелік таких вузлів встановлюється натисканням кнопок **Add ->** (дати) і **<- Remove** (видалити).

**Simulate** – кнопка запуску моделювання.

Результати моделювання фільтра (рис.6.10) представлені на рис. 5.15 у вигляді амплітудно-частотної (АЧХ – верхня крива) і фазо-частотної (ФЧХ - нижня крива) характеристик. Аналогічні характеристики можна одержати також і за допомогою вимірника АЧХ-ФЧХ, причому з більш високою точністю за рахунок сканування АЧХ і ФЧХ в обраних точках візирною лінійкою. Додаткові маніпуляції з результатами розрахунку виконуються за допомогою командних кнопок, розташованих у верхній частині вікна (рис. 5.15). Перші вісім кнопок є стандартними і пояснень не вимагають. Призначення третьої групи кнопок розглянуті нижче.



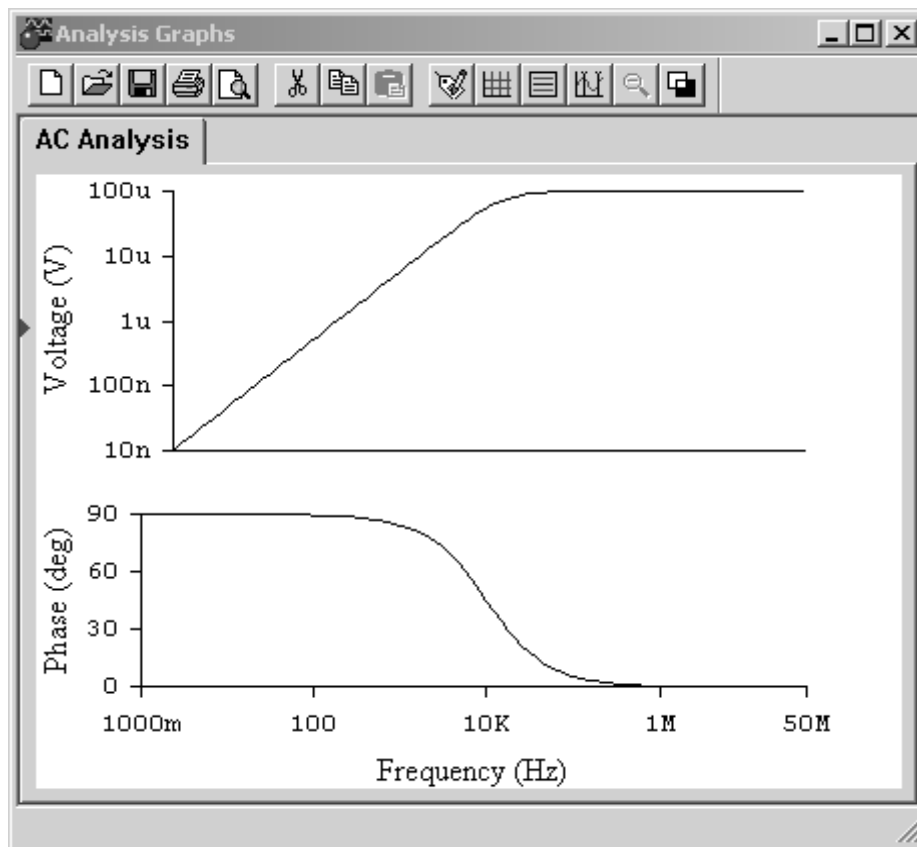



Рис. 5.15. Результати розрахунку частотних характеристик фільтра

6.  **Properties** – параметри графічного зображення, така назва першої кнопки. При її натисканні відкривається діалогове вікно (рис. 5.16), що має закладки **General**, **Left Axis**, **Bottom Axis**, **Right Axis**, **Top Axis** і **Traces**.

Вікно **General** складається із чотирьох блоків:

**Title** – редагування назви з можливістю зміни шрифту;

**Grid** – нанесення на графіки сітки з можливістю редагування товщини ліній і їхніх кольорів;

**Trace Legend** – відображення на екрані сигналу в контрольних точках схеми із вказівкою кольорів відповідних графіків;

**Cursors** – вивід на екран характеристик АЧХ і ФЧХ у табличному виді (див. рис 5.17) для одного або всіх обраних вузлів схеми.

При виборі заставки **Left Axis** діалогове вікно оформлення результатів моделювання має вигляд, показаний на рис 5.18. Воно складається з наступних блоків:

**Label** – редагування позначення осі Y з можливістю зміни шрифту і його атрибутів (наприклад, можна замінити символ позначення напруги V на U);

**Axis** – зміна товщини лінії осі Y і її кольорів;

**Division** – кількість розбивок в одному великому розподілі сітки;

**Range** – діапазон значень по осі Y;

**Scale** – установка масштабу по осі Y (лінійний, логарифмічний і т.д.).

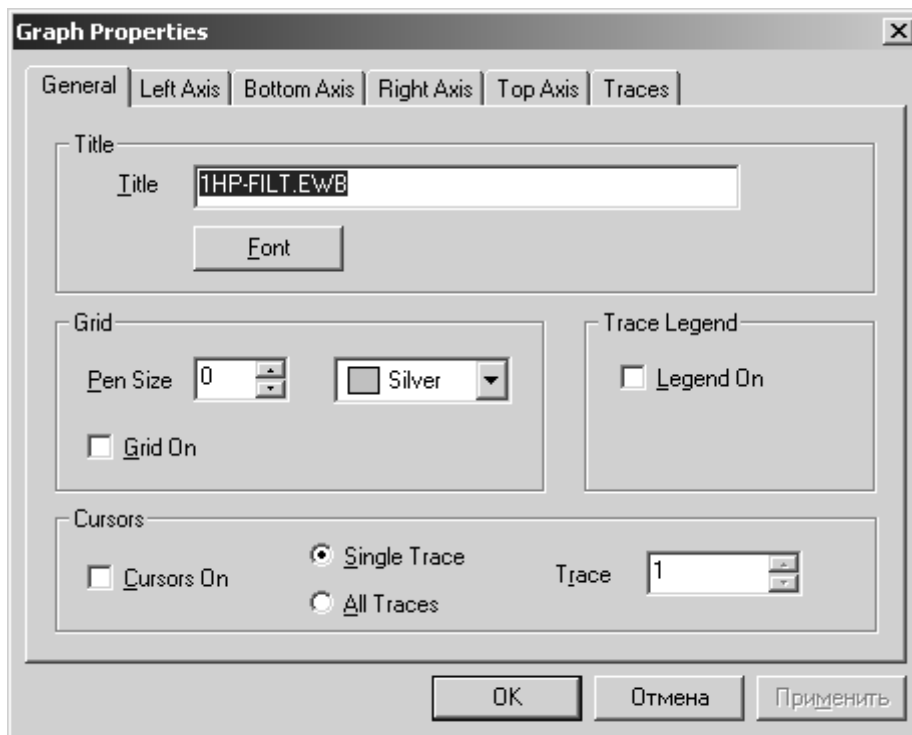


Рис. 5.16. Вікно оформлення результатів моделювання General

x1	383.1187
y1	3.8487u
x2	138.2375K
y2	99.7355u
dx	137.8544K
dy	95.8869u
1/dx	7.2540u
1/dy	10.4290K
min x	1.0000
max x	46.4159M
min y	10.0531n
max y	99.9999u

Рис. 5.17. Деякі табличні дані для АЧХ і ФЧХ , наведених на рис. 5.15.

Для заставок **Bottom Axis**, **Rigt Axis** і **Top Axis** вікна настроювань мають аналогічний вигляд. Для заставки **Traces** вікно настроювань показане на рис. 5.19. Воно складається з наступних блоків:

**Trace** – вибір номера контрольної точки, для якої редагується зображення характеристики;

**Label** – завдання мітки розглянутої точки (на рис. 5.19 вона збігається з номером контрольної точки, однак тут може бути розміщена і інша інформація у вигляді коментарів);

**Pen Size** – вибір ширини лінії для зображення характеристики;

**Color** – вибір кольорів лінії;

**Sample** – зразок лінії;

**X Range** – вибір оформлення для осі X, аналогічного обраному у вікні **Bottom Axis** або **Top Axis**;

**Y Range** – вибір оформлення для осі Y, аналогічного обраному у вікні **Left Axis** (рис. 5.19) або **Right Axis**;

**Offsets** – установка зсуву координат по осях X и Y.

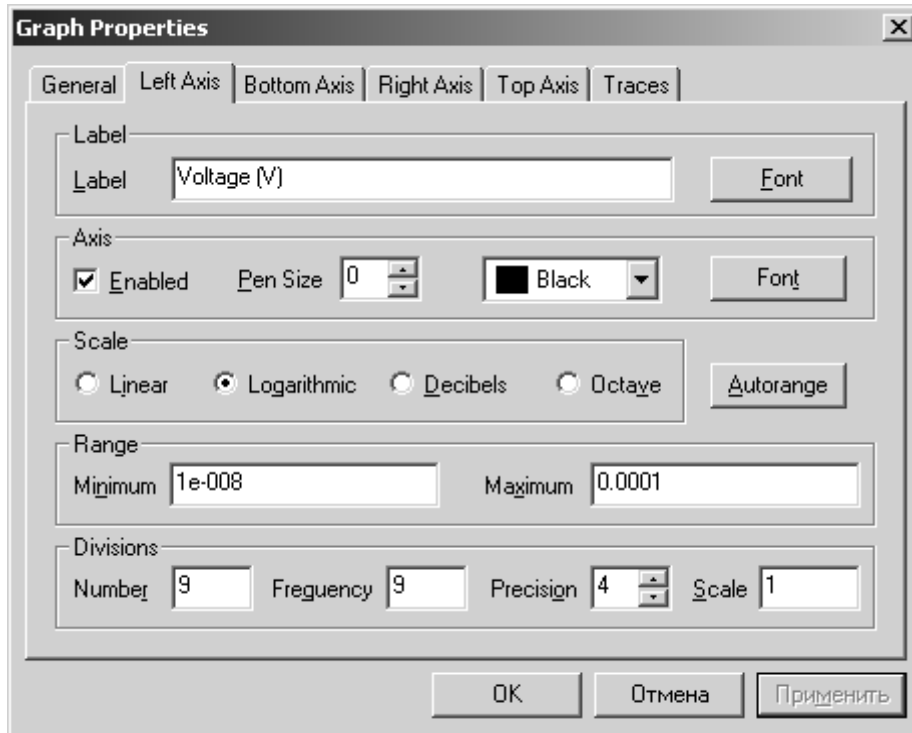


Рис. 5.18. Вікно оформлення результатів моделювання Left Axis

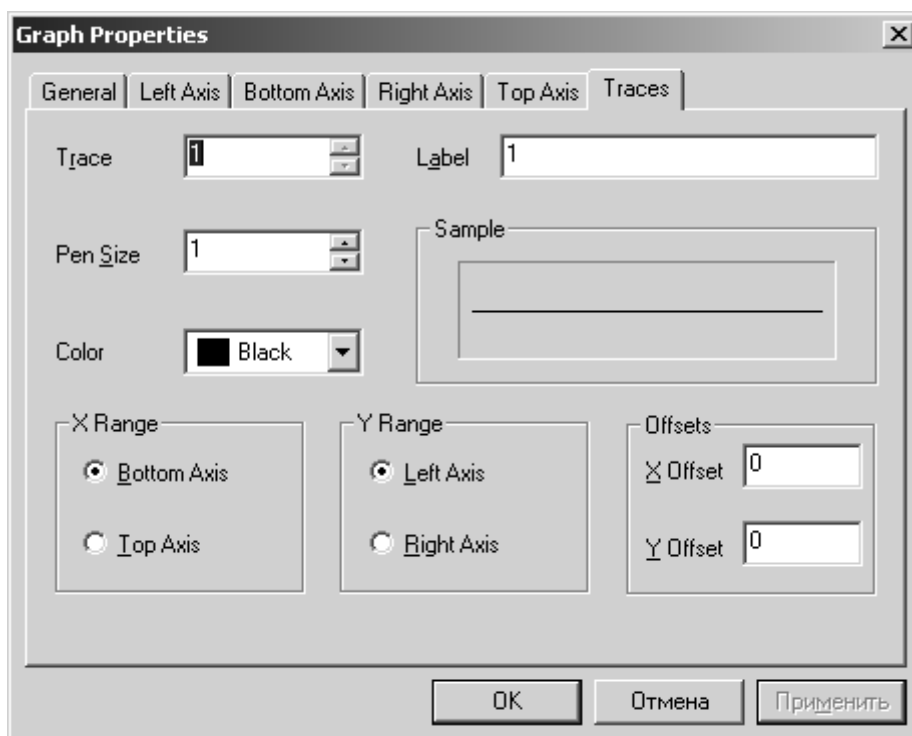


Рис. 5.19. Вікно оформлення результатів моделювання Traces

7.  – ці кнопки мають назви:

Toggle Grid - (вставити сітку),

Toggle Legend - (вставити позначення контрольної точки),

Toggle Cursor - (вивести числові дані),

Restore Graph - (відновити графічне позначення, тобто проігнорувати введені зміни) відповідно.

**8. Transient...** - розрахунок перехідних процесів.

Діалогове вікно команд (рис. 5.20) містить наступні дані:

**Initial conditions** – установка початкових умов моделювання; (розглядалися при описі вікна на рис. 5.9);

**Tstart** – час початку аналізу перехідних процесів;

**Tstop** – час закінчення аналізу;

**Generate time steps automatically** – розрахунок перехідних процесів зі змінним кроком, обраним автоматично відповідно до припустимої відносної помилки **RELTOL**, що задає у вікні на рис. 5.5; якщо ця опція виключена, то розрахунок ведеться з обліком двох інших опцій, описаних при розгляді вікна на рис. 5.2 .

**Tstep** – часовий крок виводу результатів моделювання на екран монітора.

Порядок використання параметрів **Nodes in circuit** описаний при розгляді вікна на рис. 5.14.



Рис. 5.20. Завдання режимів моделювання перехідних процесів

При зазначених у розглянутому вікні параметрах результати моделювання перехідних процесів у фільтрі представлені на рис. 5.14, на якому показаний також ярлик (він може бути розміщений у будь-якій місці екрана), за допомогою якого можна довідатися, що червона синусоїда знята в точці 1 схеми фільтра (вихід), а синя - у точці 4 (вхід фільтра). З рис. 5.14 видно запізнювання вихідного сигналу щодо вхідного.

**9. Fourier...** - проведення Фур'є-аналізу (спектрального аналізу). При виборі цієї команди необхідно задати параметри моделювання за допомогою діалогового вікна (рис. 5.14), у якому опції мають наступне призначення:

**Output node** – номер контрольної точки (вузла), у якій аналізується спектр сигналу;

**Fundamental frequency** – основна частота коливання (частота першої гармоніки);

**Number harmonic** – число гармонік, що підлягають аналізу;

**Vertical scale** – масштаб по осі Y (лінійний, логарифмічний, у децибелах);

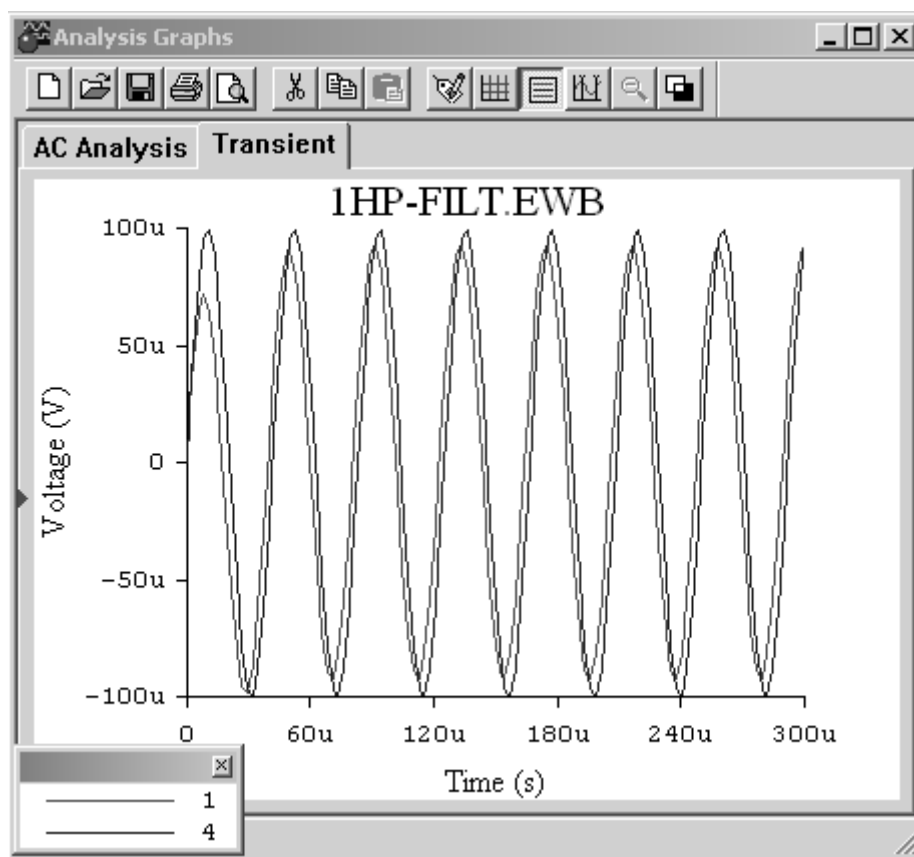


Рис. 5.21. Результати розрахунку перехідних процесів у фільтрі

**Advanced** – набір опцій цього блоку призначений для визначення більш тонкої структури аналізованого сигналу шляхом введення додаткових вибірок (за замовчуванням виключені);

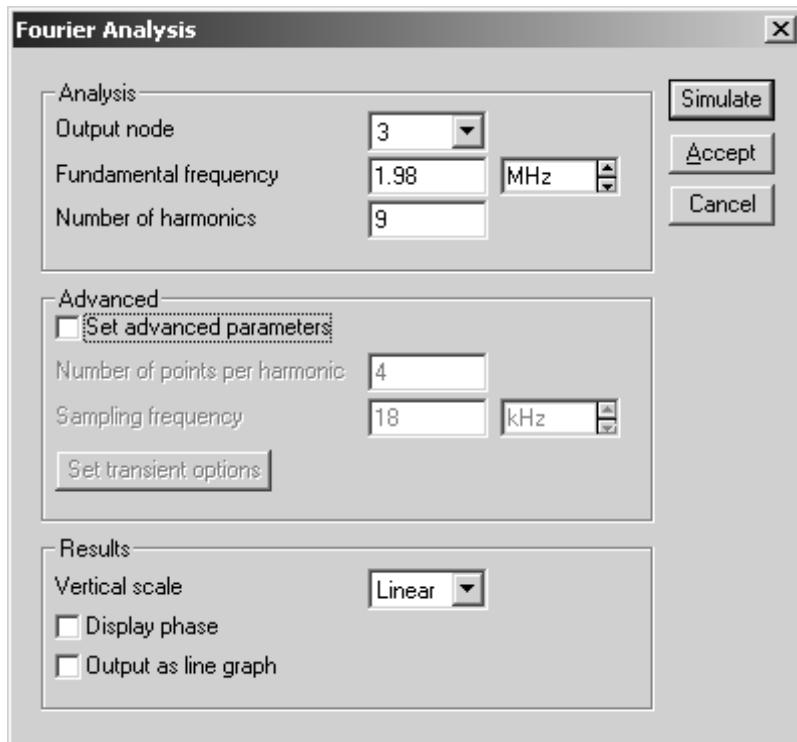
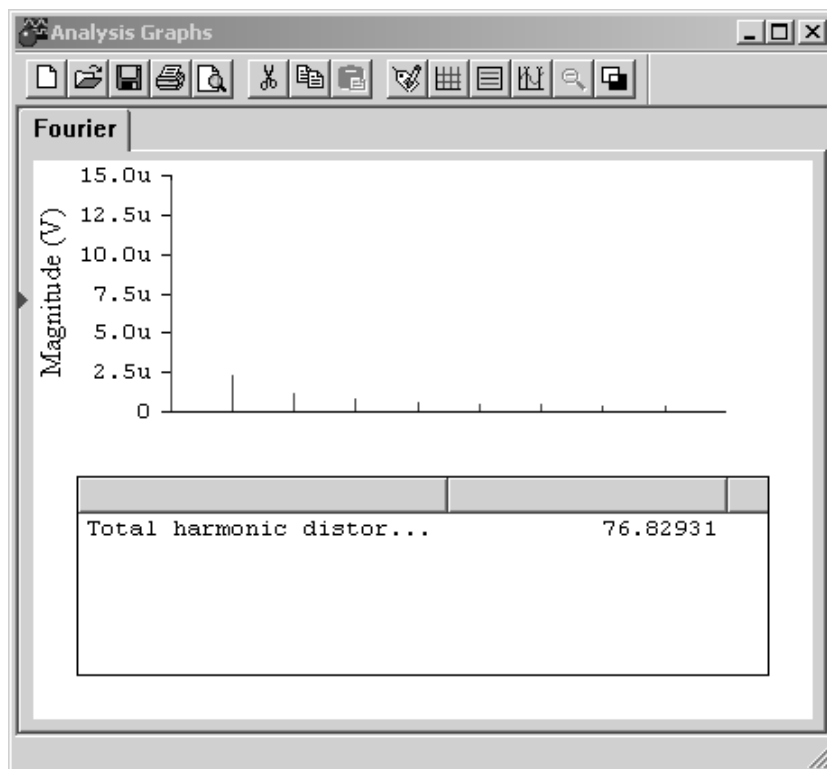


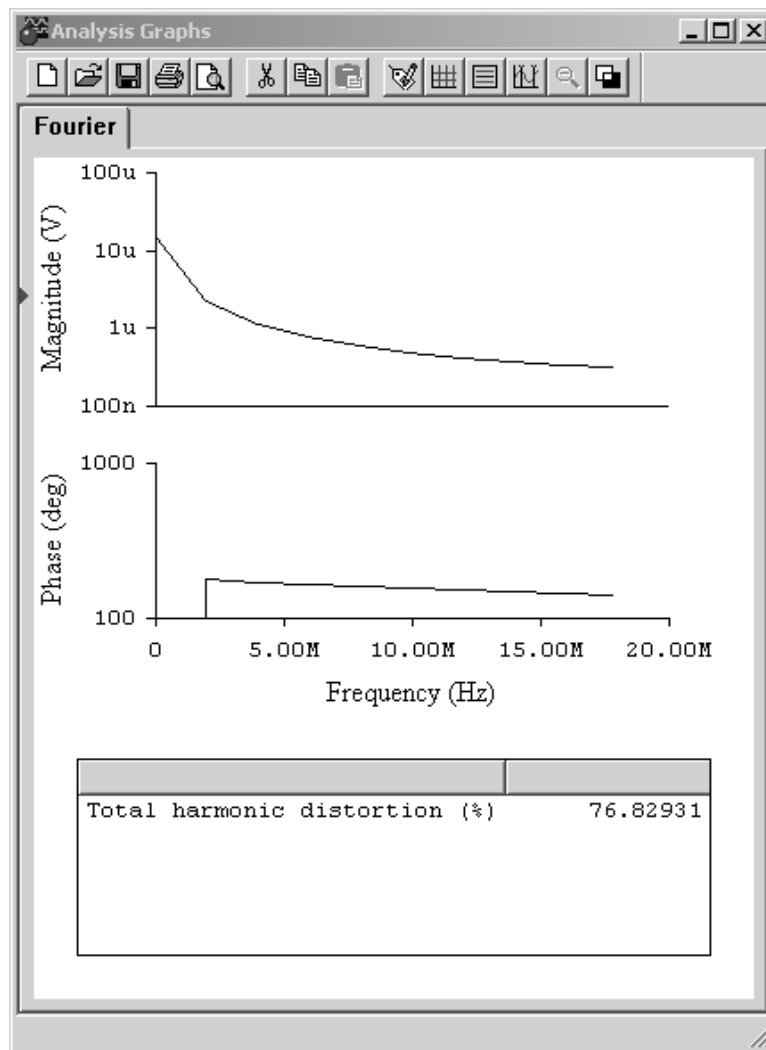
Рис. 5.22. Вікно установки режиму Фур'є-аналізу

**Number of points per harmonic** – кількість відліків (вибірок) на одну гармоніку;

**Sampling frequency** – частота проходження вибірок;



a



б

Рис. 5.23. Результати Фур'є-аналізу вихідного сигналу генератора Колпитца при різних режимах моделювання

Результатом Фур'є-аналізу є лінійчатий спектр досліджуваного сигналу, у нижній частині рисунка вказується коефіцієнт нелінійних перекручувань у відсотках. Якщо у вікні на рис. 5.22 встановити останні дві опції, то результати аналізу здобувають вид, показаний на рис. 5.23,б (верхня крива - розподіл амплітуд у логарифмічному масштабі, нижня - розподіл фаз гармонійних складових).

**10. Monte Carlo...** – статистичний аналіз за методом Монте-Карло. У діалоговому вікні установки параметрів моделювання для цієї команди (рис. 5.24) задаються наступні параметри:

**Number of runs** – кількість статистичних випробувань;

**Tolerance** – відхилення параметрів резисторів, конденсаторів, індуктивностей, джерел змінного і постійного струму і напруги;

**Seed** – початкове значення випадкової величини (цей параметр визначає початкове значення датчика випадкових чисел і може задаватися у межах 1...32767);

**Distribution type** – закон розподілу випадкових чисел: Uniform – рівноймовірним розподіл на відрізку (-1,+1) і Gaussian – гаусовський розподіл на відрізку (-1,+1) з нульовим середнім значенням і середньоквадратичним відхиленням 0,25. Необхідний закон розподілу вибирається після натискання кнопки в поле розглянутої опції. Інші параметри нам знайомі з команди **Worst Case**.

Результати статистичного аналізу генератора Колпितца при зазначених на рис. 5.24 значеннях параметрів наведені на рис. 6.25а, на якому ламана крива показує зміну постійної складової (напруги спокою) на виході схеми при випадковій зміні параметрів її компонентів при числі випробувань 20 (опис процесу проведення розрахунків за методом Монте-Карло наведено в роботах [ ]). У режимі аналізу перехідних процесів результати статистичних випробувань при числі випробувань 2 показані на рис. 5.25б (мале число випробувань обране із чисто оформлювальних міркувань, оскільки кожний результат випробувань відображається іншими кольорами й у чорно-білому виконанні це виглядало б не кращим чином).

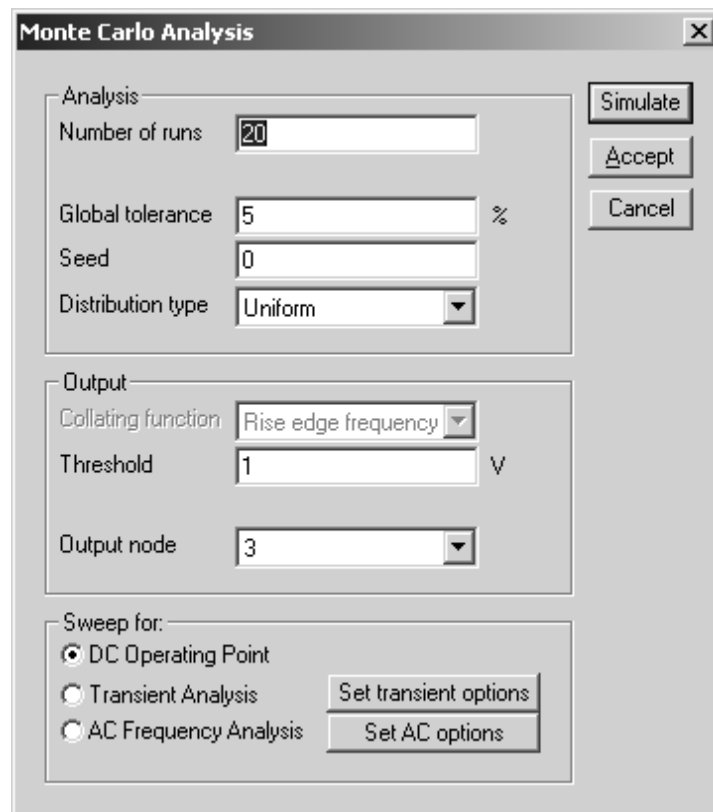
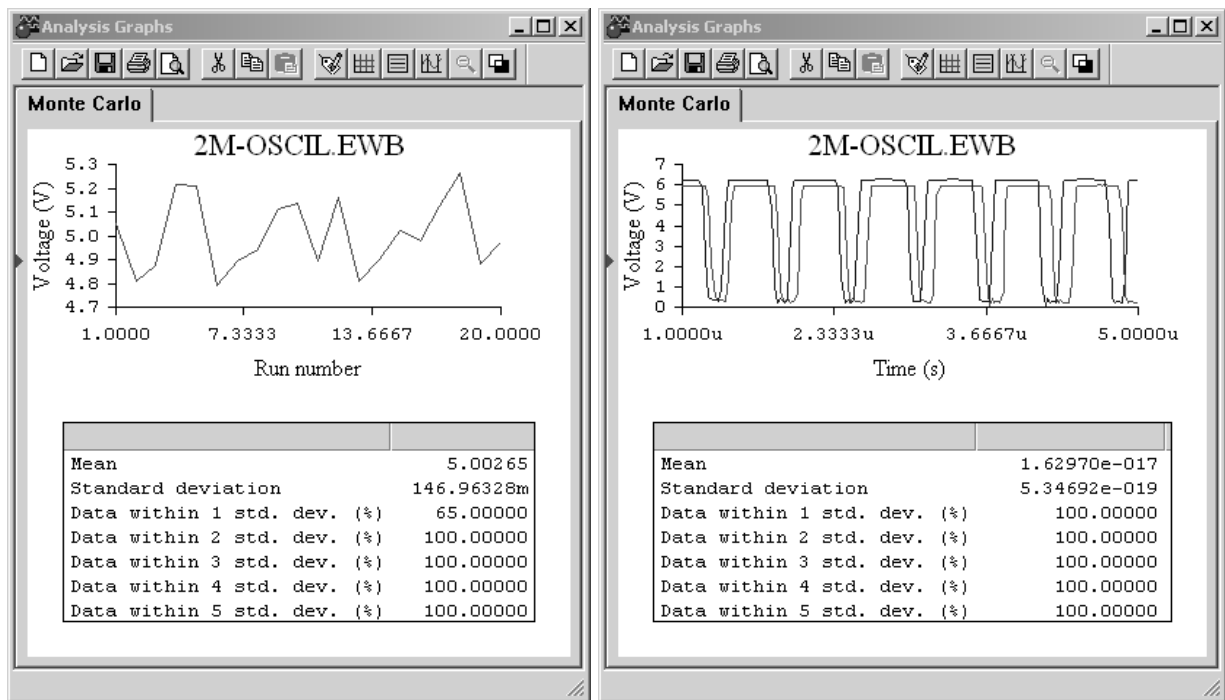


Рис. 5.24. Вікно установки значень параметрів для розрахунку за методом Монте-Карло





a)

б)

Рис. 5.25. Результати статистичних випробувань генератора Колпитца в статистичному режимі (а) і при аналізі перехідних процесів (б)

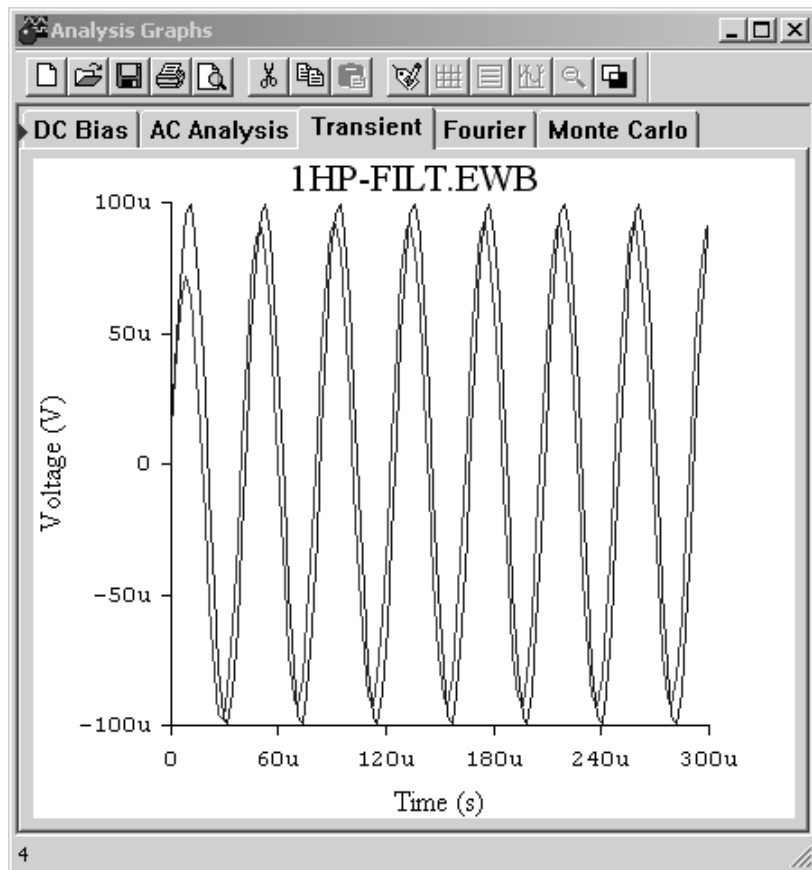


Рис. 5.26 Вікно з результатами виконання декількох команд із меню Analysis

На рис. 5.25 наведене також середнє значення контрольованої величини Mean, її середньоквадратичного відхилення Standard deviation (std) і процентний вміст даних з відхиленнями в  $\pm 1 \text{ std}$ ,  $\pm 2 \text{ std}$  і т.д.

**Display Graph** – цією командою викликаються на екран графіки результатів виконання однієї з команд моделювання. Якщо в процесі моделювання використано кілька команд цього меню, то результати їхні виконання накопичуються і на знайомому нам вікні (див. рис. 5.26) відображаються у вигляді закладок з найменуванням команд, які можуть переміщатися кнопками, розташованими у правому верхньому куті вікна. Це дозволяє оперативно переглядати результати моделювання без його повторного проведення. Відзначимо, що виклик команди відбувається автоматично при виконанні першої ж команди з меню **Analysis**. Якщо в схемі використовується осцилограф, то після запуску моделювання і попередньо встановленої команди **Display Graph** у її вікні з'являється закладка **Oscilloscope** із зображенням осцилограми; якщо використовується вимірник АЧХ-ФЧХ, то з'являється закладка **Bode** із зображенням АЧХ і ФЧХ і т.д. Одночасно графічна інформація виводиться також і на основні прилади.

### 5.1.5 Меню Window

Меню **Window** містить наступні команди:

1. **Arrange (CTRL+ W)** – упорядкування інформації в робочому вікні **EWB** шляхом перезапису екрана, при цьому виправляються перекручування зображень компонентів і сполучних провідників;
2. **Circuit** – вивід схеми на передній план;
3. **Description** – короткий опис схеми .

### 5.1.6 Меню Help

Меню **Help** побудовано стандартним для **Windows** способом. Воно містить короткі відомості по всім розглянутим вище командах, бібліотечним компонентам і вимірювальним приладам, а також відомості про саму програму. Відзначимо, що для одержання довідки по бібліотечному компоненту його необхідно відзначити на схемі щигликом миші (він висвітиться червоними кольорами) і потім натиснути клавішу F1.

## 5.2 ТЕХНОЛОГІЯ ПІДГОТОВКИ СХЕМ

Перш ніж створювати креслення принципової схеми засобами програми EWB, необхідно на аркуші паперу підготувати її ескіз зі зразковим розташуванням компонентів і з урахуванням можливості оформлення окремих фрагментів у вигляді підсхем. Доцільно також ознайомитися з бібліотекою готових схем програми (див. Додаток 1) для вибору аналога (прототипу) або використання наявних рішень у якості підсхем.

У загальному випадку процес створення схеми починається з розміщення на робочому полі EWB компонентів з бібліотек програми відповідно до підготовленого ескізу. Тринадцять розділів бібліотеки програми EWB 5.12 по черзі можуть бути викликані за допомогою меню Window або за допомогою іконок. Каталог обраної бібліотеки розташовується в горизонтальному вікні нижче лінійки робочого поля (установлюється в будь-яке місце перетаскуванням стандартним способом - за шапку заголовка). Для відкриття каталогу потрібної бібліотеки необхідно підвести курсор миші до відповідної іконки і натиснути один раз її ліву кнопку. Необхідний для створення схеми значок (символ) компонента переноситься з каталогу на робоче поле програми рухом миші при натиснутій лівій кнопці, після чого кнопка відпускається (для фіксування символу) і робиться подвійний щиклик по значку компонента. У діалоговому вікні, що розкривається, встановлюють необхідні параметри (опір резистора, тип транзистора й т.д.) і вибір підтверджується натисканням кнопки Assent або клавіші Enter. На цьому етапі необхідно передбачити місце для розміщення контрольних точок і іконок контрольно-вимірювальних приладів.

Якщо в схемі використовуються компоненти однакового номіналу (наприклад, резистори з однаковим опором), то номінал такого компонента рекомендується задати безпосередньо в каталозі бібліотеки, і потім переносити компоненти в потрібній кількості на робоче поле. Для зміни номіналу компонента необхідно два рази клацнути мишею по символі його графічного зображення і у вікні, що розкривається, внести зміни. При розміщенні компонентів схеми на робочому полі програми EWB 5.12 можна скористатися динамічним меню. Після розміщення компонентів робиться з'єднання їхніх виводів провідниками. При цьому необхідно враховувати, що до виводу компонента можна підключити тільки один провідник. Для виконання підключення курсор миші підводять до виводу компонента і після появи чорної точки натискається ліва кнопка і провідник, що з'являється при цьому, простягається до виводу іншого компонента до появи на ньому такої ж точки, після чого кнопка миші відпускається, і з'єднання готове. При необхідності підключення до цих виводів інших провідників у бібліотеці Passive вибирається точка (символ з'єднання) і переноситься на раніше встановлений провідник. Щоб точка почорніла (спочатку вона має червоний колір), необхідно клацнути мишею по вільному місцю робочого поля. Якщо ця точка дійсно має електричне з'єднання із провідником, то вона повністю офарблюється чорним кольором. Якщо на ній видно слід від провідника, що

перетинає, то електричного з'єднання немає і точку необхідно встановити заново. Після вдалої установки до точки з'єднання можна підключити ще два провідники. Якщо з'єднання потрібно розірвати, курсор підводить до одного з виводів компонентів або точки з'єднання і з появою площинки натискається ліва кнопка, провідник приділяється на вільне місце робочого поля, після чого кнопка відпускається. Якщо необхідно підключити вивід до наявного на схемі провідникові, то провідник від виводу компонента курсором підводить до зазначеного провідника і після появи точки з'єднання кнопка миші відпускається. Слід зазначити, що прокладка сполучних провідників робиться автоматично, причому перешкоди - компоненти й інші провідники - огинаються по ортогональних напрямках (по горизонталі або вертикалі).

Точка з'єднання може бути використана не тільки для підключення провідників, але й для введення написів (наприклад, вказівки величини струму в провіднику, його функціонального призначення й т.п.). Для цього необхідно двічі клацнути по точці й у вікні, що розкрилося, увести необхідний запис (не більше 14 символів), причому запис можна зміщати вправо шляхом введення ліворуч потрібної кількості пробілів. Ця властивість може бути використана і у тому випадку, коли позиційне позначення компонента (наприклад C1, R10) накладається на поруч минаючий провідник або інші елементи схеми.

Якщо необхідно перемістити окремий сегмент провідника, до нього підводить курсор, натискається ліва кнопка і після появи у вертикальній або горизонтальній площині подвійного курсору роблять потрібні переміщення.

Підключення до схеми контрольно-вимірювальних приладів виробляється аналогічно. Причому для таких приладів як осцилограф або логічний аналізатор з'єднання доцільно проводити кольоровими провідниками, оскільки їхні кольори визначає кольори відповідної осцилограми. Кольорові провідники доцільні не тільки для позначення провідників однакового функціонального призначення, але й для провідників, що перебувають у різних частинах схеми (наприклад, провідники шини даних до і після буферного елемента).

При позначенні компонентів необхідно дотримуватися рекомендацій і правил, передбачених ЕСКД (єдиною системою конструкторської документації). Що стосується пасивних компонентів, то при виборі їхніх позначень особливих труднощів не виникає. Труднощі виникають при виборі активних елементів - мікросхем, транзисторів і т.д., особливо при необхідності використання компонентів вітчизняного виробництва, коли потрібно встановити точну відповідність функціональних позначень виводів і параметрів закордонних і вітчизняних компонентів. Для полегшення цього завдання можна скористатися таблицями відповідності закордонних і вітчизняних компонентів. При імпортуванні в створювану схему іншої схеми або її фрагментів доцільно діяти в наступній послідовності:

- командою **FiloSave As** - записати у файл створювану схему, указавши його ім'я в діалоговому вікні (розширення імені файлу вказувати не обов'язково, програма зробить це автоматично);

- командою **File>Open** - завантажити на робоче поле імпортовану схему стандартним для Windows образом (деякі особливості описані наприкінці глави);

- командою **Edit>Select All** - виділити схему, якщо імпортується вся схема, або виділити її потрібну частину;

- командою **Edit>Copy** - скопіювати виділену схему в буфер обміну;

- командою **File>Open** - завантажити створювану схему;

- командою **Edit>Paste** - вставити вміст буфера обміну на робоче поле; після вставки імпортована схема буде виділена (і відзначена червоними кольорами) і може виявитися накладеною на створювану схему;

- клавішами керування курсором або мишею відбуксируйте імпортовану частину в потрібне місце, після чого можна скасувати виділення;

- після підключення імпортованої схеми необхідно щигликами миші пройтися по всіх її компонентах, щоб виключити їхнього зсуву, що виникає при буксируванні і приводить до східчастих перекручувань провідників.

Переміщення окремих фрагментів схеми при її компонуванні виконуються вищеописаним чином після виділення фрагмента. Після підготовки схеми рекомендується скласти її опис (вікно-ярлик викликається з меню **Window>Description**), у якому вказується її призначення; після проведення моделювання вказуються його результати. На жаль, програма EWB дозволяє вводити опис тільки англійською мовою. Крім того, в EWB не передбачені засоби для редагування графічних зображень компонентів, а також введення нових шрифтів. Перейдемо тепер до короткого огляду бібліотечних компонентів програми EWB. При описі бібліотек після назви компонента в дужках вказуються призначувані користувачем параметри. Наприклад, для конденсатора це ємність, значення якої може бути встановлене за допомогою діалогового вікна.

### 5.2.1 Група Favorites - допоміжні компоненти



Заповнення цього розділу моделями компонентів або підсхем здійснюється програмою автоматично одночасно із завантаженням схемного файлу і очищується після закінчення роботи з ним.

### 5.2.2 Група Sources – пасивні елементи



Розділ Sources містить наступні пасивні компоненти. Точка з'єднання провідників, використовувана також для введення на схему написів довжиною не більше 14 символів (інших способів введення тексту в EWB не існує). Наприклад, якщо на схемі потрібно вказати значення струму в якій-небудь вітці, то на провіднику цієї вітки ставиться точка, потім подвійним

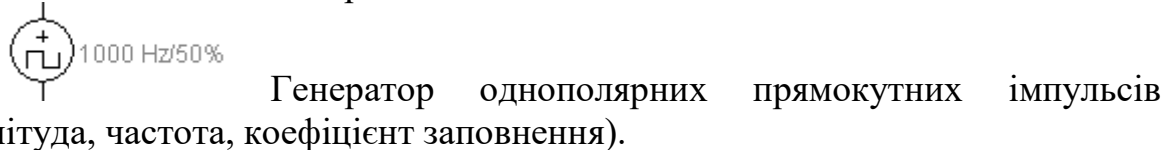
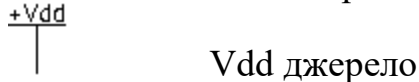
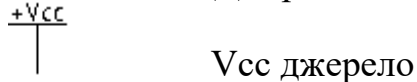
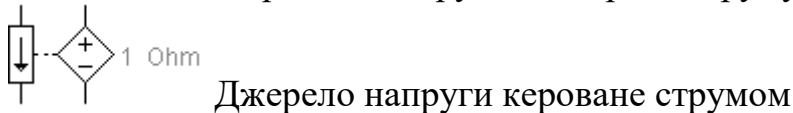
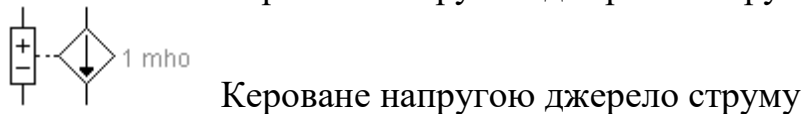
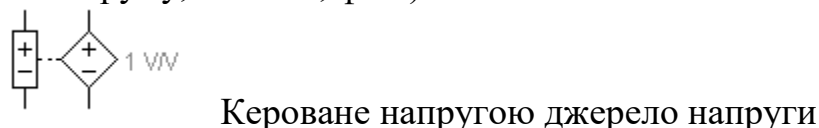
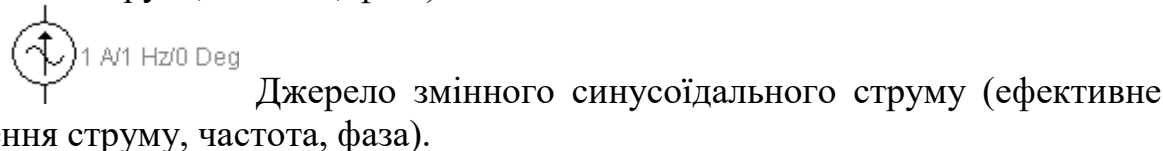
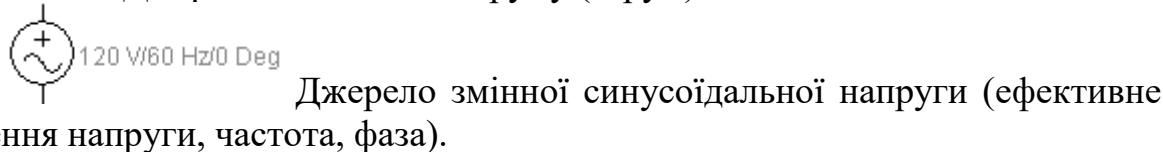
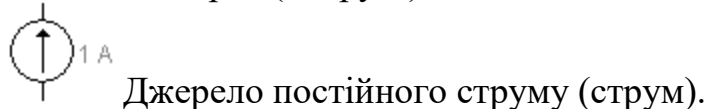
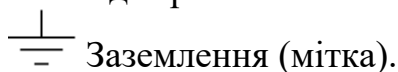
щигликом по точці викликається діалогове вікно, у якому і виконується відповідний напис.

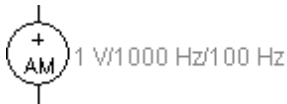
Джерела струму в EWB можуть бути представлені у вигляді генератора напруги або генератора струму. Джерела струму діляться на джерела постійного струму, змінного струму і керовані джерела. Крім того, вони підрозділяються на вимірювальні джерела і джерела електроживлення.

Джерела для електроживлення є самими масовими пристроями. Їх прийнято ділити на первинні і вторинні. До первинних джерел відносяться:

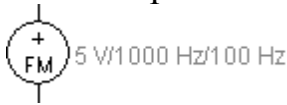
- електрогенератори, що перетворюють механічну енергію в електричну,
- термоелектрогенератори, сонячні і атомні батареї,
- електрохімічні джерела.

У вторинних джерелах струму відбувається перетворення струму первинного джерела.





Генератор амплітудно-модульованих коливань (напруга і частота несучої, коефіцієнт і частота модуляції; на значку графічного зображення компонента коефіцієнт модуляції не зазначений).



Генератор фазо-модульованих коливань (напруга й частота несучої, індекс і частота модуляції; на значку компонента індекс модуляції не зазначений).

Інші джерела використовуються в електронних схемах, тому при моделюванні електричних схем їх не застосовують.

### 5.2.3 Група Basic – активні елементи



Розділ, у якому зібрані всі пасивні компоненти, а також комутаційні пристрої і моделі з нелінійною індуктивністю, у тому числі трансформатори із сердечником.

● З'єднувач. Параметри можна задавати за допомогою діалогового вікна на рис. 5.27. Точка може бути наділена такими властивостями, як відсутність (Open) з'єднання між провідниками, підключеними до неї з відповідної сторони (цифри 1, 2, 3 і 4 на рис. 5.27 визначають кількість і напрямок провідників, що з'єднуються). Наприклад, при включених опціях 1, 3 і Open між провідниками, підключеними зі сторін 1 і 3, не буде електричного з'єднання.

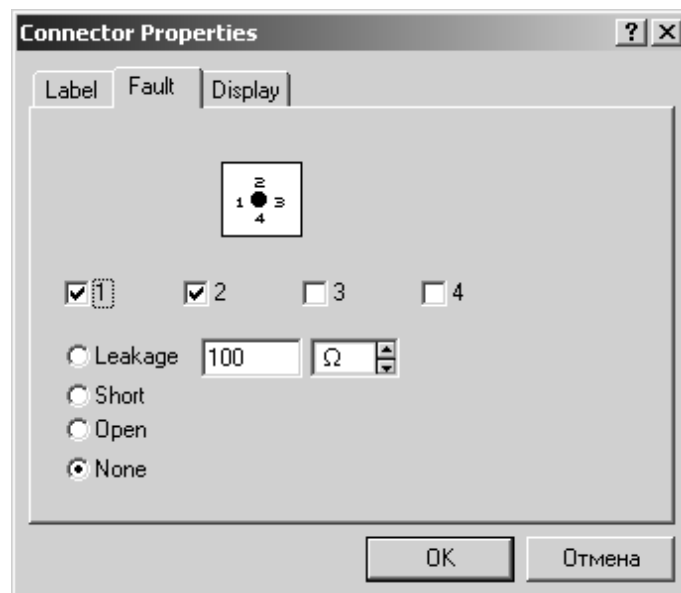


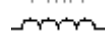



Рис. 5.27. Вікно установки параметрів точки з'єднання

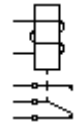
1 k Ohm  
 Резистор (опір).


1 uF  
 Конденсатор (ємність).


1 mH  
 Котушка (індуктивність).

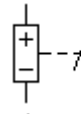
 Трансформатор з можливістю редагування:

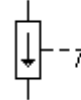
- коефіцієнта трансформації (Primary-to-secondary turns ration);
- індуктивності розсіювання (Leakage inductance  $L_e$ , Гн);
- індуктивності первинної обмотки (Magnetizing inductance  $L_m$ , Гн);
- опору первинної обмотки (Primary winding resistance  $R_p$ , Ом);
- опору вторинної обмотки (Secondary winding resistance  $R_s$ , Ом).

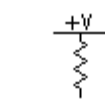
 Реле

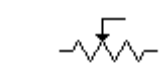
[Space]  
 Комутатор

0.5 s  
 Комутатор запізнювання

 Керований напругою комутатор

 Керований струмом комутатор

1 k Ohm /5 V  
 Джерело постійної напруги з послідовно включеним резистором (напруга, опір).

[R]/1 k Ohm /50%  
 Потенціометр, параметри задаються за допомогою діалогового вікна на рис. 5.28, у якому параметр Key визначає символ клавіші клавіатури (за замовчуванням R), натисканням якої опір зменшиться на задану величину в % (параметр Increment, рухливий контакт рухається вліво) або збільшиться на таку ж величину натисканням комбінації клавіш **Shift+R** (рухливий контакт рухається вправо); другий параметр - номінальне значення опору, третій - початкова установка опору в % (за замовчуванням - 50%).



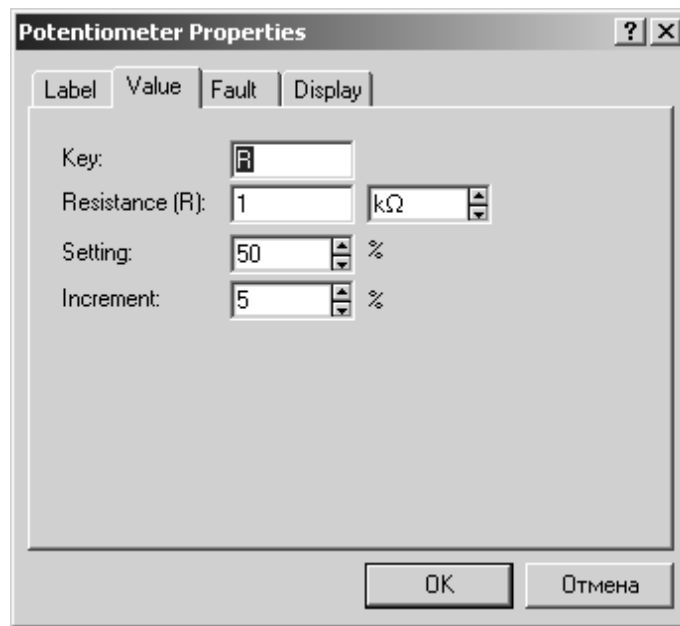
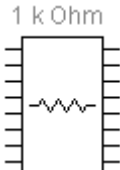
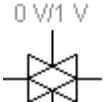
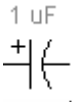
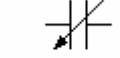


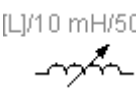
Рис. 5.28. Діалогове вікно параметрів потенціометра

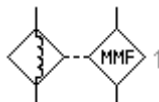
- 

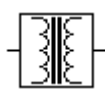
Зборка з восьми незалежних резисторів однакового номіналу (опір).
- 


Керований напругою аналоговий ключ
- 

Електролітичний конденсатор (ємність).
- 

Конденсатор змінної ємності (аналогічно потенціометру).
- 

Котушка змінної індуктивності (аналогічно потенціометру).
- 


Котушка індуктивності із сердечником
- 

Магнітна центральна частина ЗП
- 

Нелінійний трансформатор

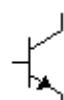
## 5.2.4 Група Diodes




-  Напівпровідниковий діод (тип).
-  Стабілітрон (тип).
-  Світлодіод (тип).
-  Випрямний міст (тип).
-  Діод Шоклі (тип).
-  Тиристор або діністор (тип).
-  Симетричний діністор або діак (тип).
-  Симетричний триністор або тріак (тип).

## 5.2.5 Група Transistors



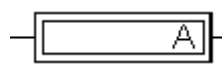
 Біполярні п-р-п транзистори

 Біполярні р-п-р транзистори

## 5.2.6 Група Indicators



 Вольтметр

 Амперметр


Вольтметри й амперметри забезпечують відлік вимірюваної величини з точністю до третього знака. Параметри приладів задаються в діалоговому вікні, показаному для вольтметра на рис. 5.29. У поле першого параметра задається вхідний опір вольтметра, у поле другого - режим виміру постійного (DC) або змінного (AC) струму. Діалогове вікно для амперметра таке ж, як і на рис. 5.29, з тією лише різницею, що перший параметр - це внутрішній опір амперметра, що значно менше вхідного опору вольтметра.



Рис. 5.29. Вікно установки параметрів вольтметра

Негативна клемма для підключення цих приладів позначена широкою чорною смугою і може бути розміщена на будь-якій грані іконки при обертанні зображення компонента (обертання виконується натисканням комбінації клавіш **Ctrl+R**).

10 W/12 V

 Лампа розжарювання. Лампа розжарювання характеризується потужністю і номінальною напругою. Напруга, при якій лампочка запалюється, приблизно дорівнює половині номінальної. При напрузі, що перевищує номінальну на невелику величину, лампочка перегорить і коло обривається, тобто цей компонент може бути використаний також як запобіжник, що спрацьовує при заданих значеннях напруги або струму, рівного відношенню потужності до напруги.

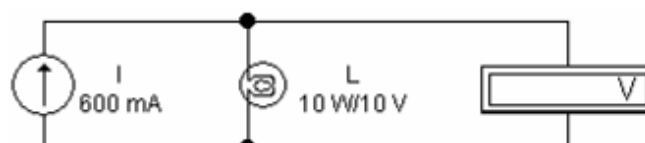


Рис. 5.30. Застосування лампи розжарювання як запобіжника

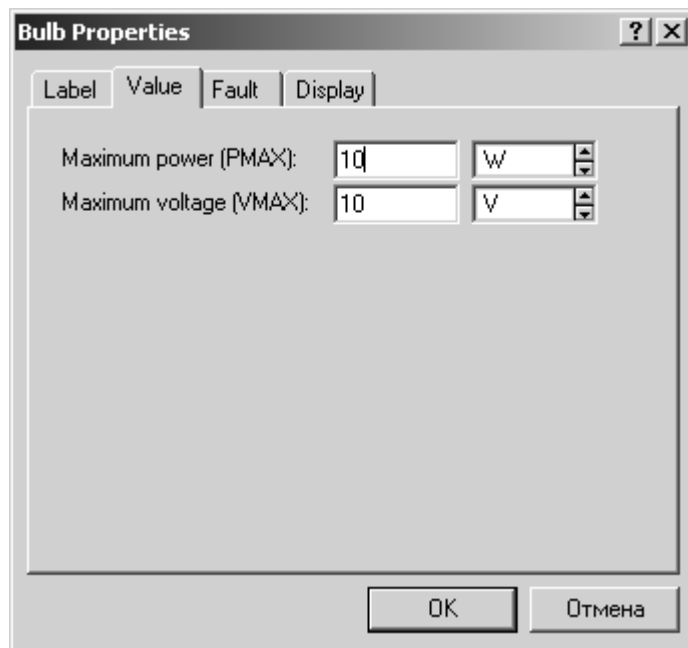



Рис. 5.31. Вікно установки параметрів лампи розжарювання


 Логічний пробник – характеризується напругою спрацьовування 2,4 В, що відповідає мінімальному значенню сигналу логічної одиниці цифрових ИМС ТТЛ-серії (з живленням +5В). Спрацьовування супроводжується червоним або синім світінням.

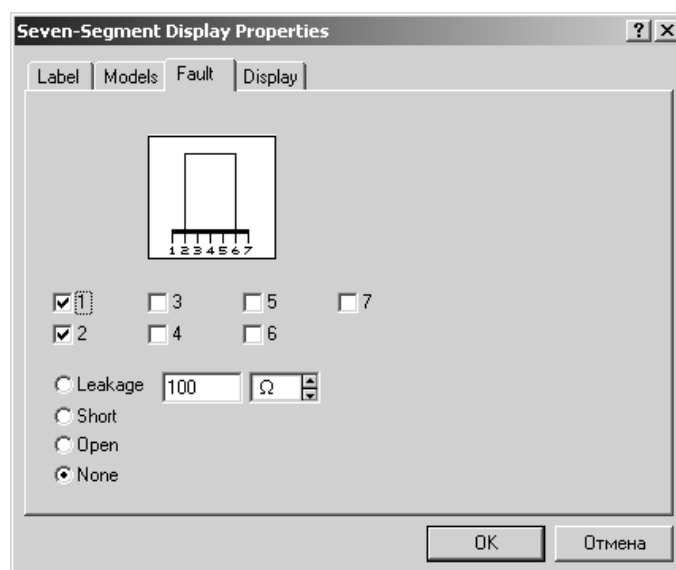
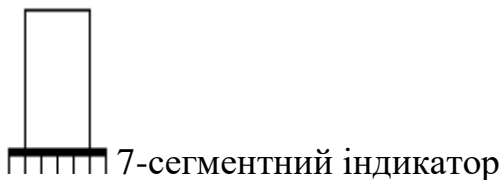


Рис. 5.32. Вікно установки параметрів 7-сегментний індикатора

7-сегментний цифровий індикатор. Модель широко використовуваних у цифровій техніці алфавітно-цифрових індикаторів. Параметри індикатора задаються в діалоговому вікні, показаному на рис. 5.32.

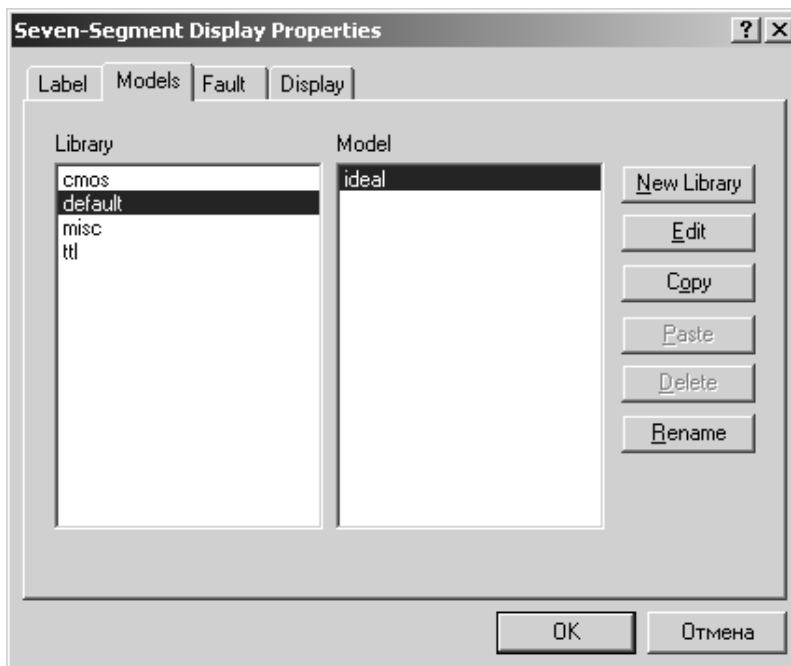
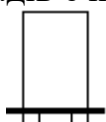


Рис. 5.33. Вікно установки параметрів 7-сегментного цифрового індикатора.

Перший параметр – максимальне значення вхідної напруги, другий – мінімальна вхідна напруга, третій і четвертий параметри – час затримки перемикавання при переході від низького (мінімального) рівня вхідної напруги до верхнього (максимальному) і навпаки, п'ятий параметр – гранична вхідна напруга, при якому починається світіння. Вітчизняними аналогами таких приладів є індикатори типу АЛС, ЗЛС і ін.



Декодований дисплей (сім сегментів) 4-входовий індикатор відрізняється від розглянутого вище наявністю убудованого дешифратора, що дозволяє підключати його безпосередньо до виходів двоїчно-десяткових лічильників з кодом 8-4-2-1. Правий вивід такого індикатора - молодший або нульовий розряд, при його активізації на індикаторі висвічується 1. Лівий вивід індикатора – старший або третій розряд, при його активізації відображається цифра 8. Якщо сигнал логічної одиниці подати на всі входи індикатора, то буде відображатися буква F, що позначає в шістнадцятиричній системі числення десяткове число 15 (сума чисел 8, 4, 2 і 1). При всіх можливих комбінаціях вхідних сигналів на індикаторі можна відображати числа 0...9 і букви А, В, З, D, Е и F. Вітчизняними аналогами таких приладів є індикатори типу 490ИП1, 490ИП2 з тією відмінністю, що вони можуть відображати тільки цифри.



Зумер. Звукова сигналізація - параметри задаються за допомогою діалогового вікна на рис. 5.34. Перший параметр – частота сигналу, що подається на гучномовець комп'ютера, два інших – напруга й струм спрацьовування.

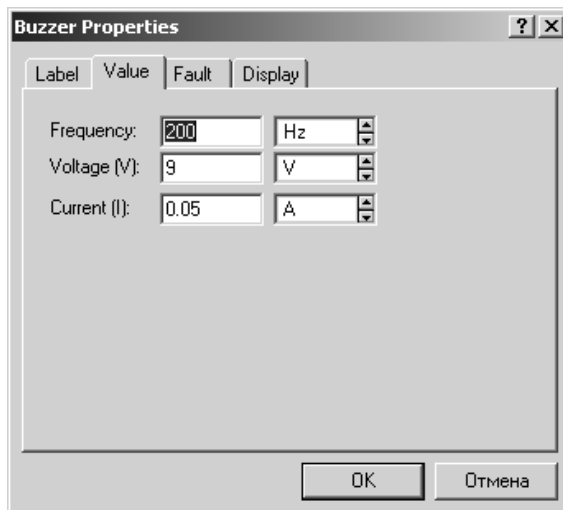
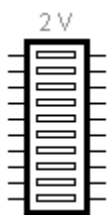


Рис. 5.34. Вікно установки параметрів звукової сигналізації



Дисплей гістограми

10-сегментний індикатор містить лінійку з десяти незалежних індикаторів, параметри яких встановлюються за допомогою діалогового вікна на рис. 5.35.

Перший параметр – напруга спрацьовування, другий і третій – номінальний і мінімальний струм. Вітчизняними аналогами цього індикатора є так називані шкальні індикатори типу ЗЛС317, ЗЛС343А, ЗЛС362 і ін.

Приклад використання 10-сегментного індикатора наведений на рис. 5.36. Ця схема у трохи зміненому виді запозичена з каталогу готових схем програми EWB. Вона містить 10 компараторів напруги на ОП. На один вхід кожного ОП подається опорна напруга, формована джерелом напруги  $U_0$ , і дільником на резисторах  $R_1 \dots R_{11}$ . Другі входи всіх ОП об'єднані і підключені до виходу функціонального генератора, використовуваного в режимі генерації синусоїдальних або трикутних коливань, що мають постійну складову. Амплітуда вихідного сигналу вибирається рівної  $U_0/2$ , частота – близько 1 Гц. Виходи ОП підключені до сегментів індикатора, додаткові резистори  $R_{12} \dots R_{21}$  служать для установки струму через кожний сегмент.

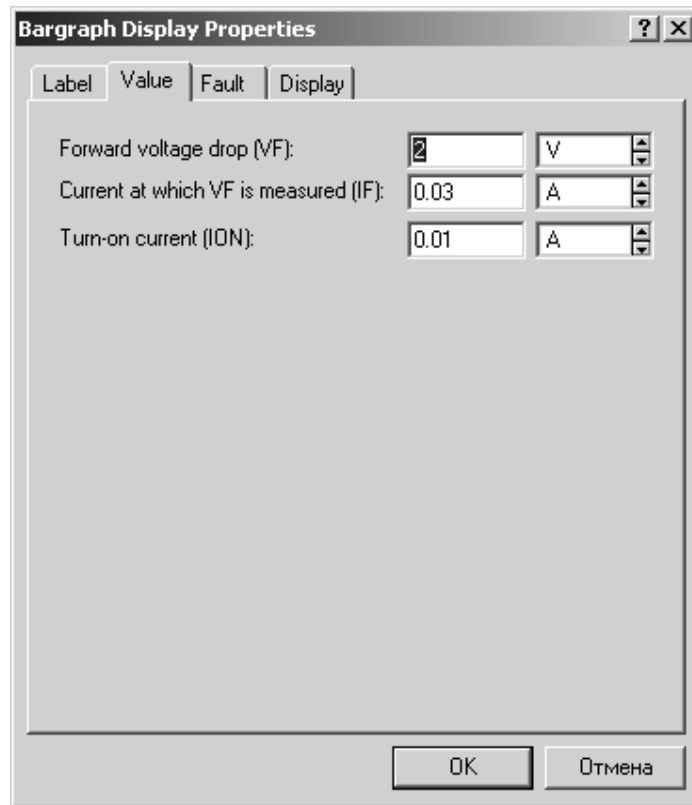


Рис. 5.35. Вікно установки параметрів 10-сегментного індикатора

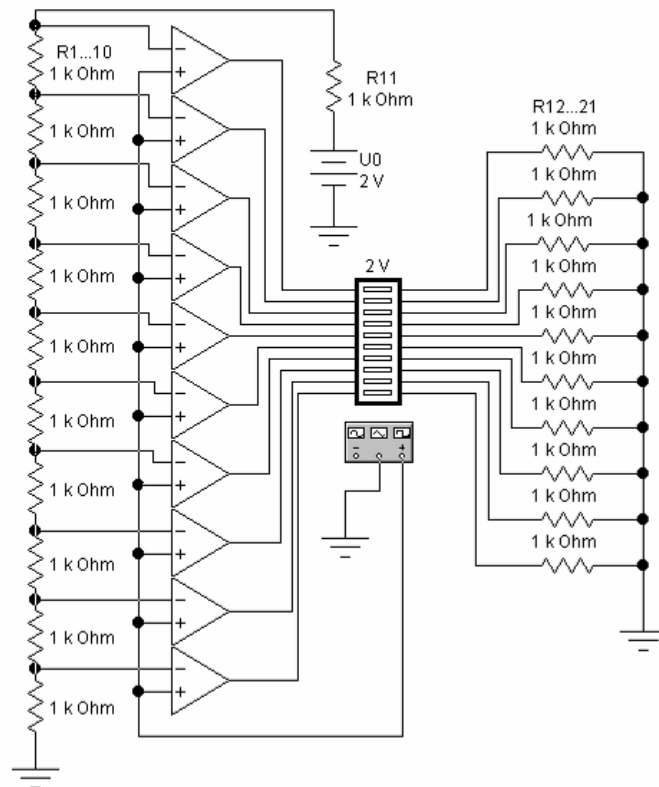
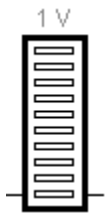


Рис. 5.36. Схема включення 10-сегментного індикатора



Декодований дисплей гістограми. Параметри індикатора задаються за допомогою діалогового вікна на рис. 5.37.

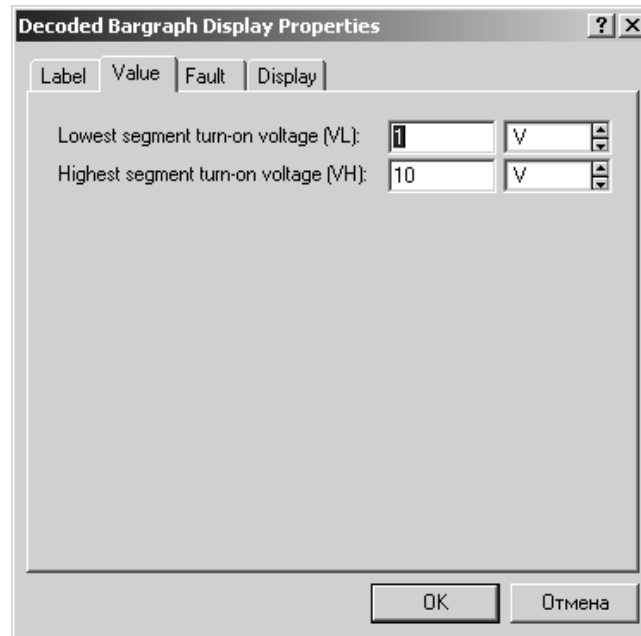


Рис. 5.37. Установка параметрів 10-сегментного індикатора з вбудованим АЦП

Перший параметр визначає напругу спрацьовування першого (нижнього) сегмента, другий - напругу спрацьовування верхнього (десятого) сегмента. Для визначення напруги спрацьовування інших сегментів можна скористатися простою схемою, що складається з послідовно включених індикатора і джерела постійної напруги. Змінюючи напругу джерела, неважко визначити напругу спрацьовування кожного сегмента по візуальному контролю за його світінням.

### 5.3. КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

Панель контрольно-вимірювальних приладів перебуває під полем меню робочого вікна програми EWB (рис. 5.38) і містить цифровий мультиметр, функціональний генератор, двоканальний осцилограф, вимірник амплітудно-частотних і фазо-частотних характеристик, генератор слів (кодовий генератор), 8-канальний логічний аналізатор і логічний перетворювач. Загальний порядок роботи із приладами такої: іконка приладу курсором переноситься на робоче поле і підключається провідниками до досліджуваної схеми. Для приведення приладу в робочий (розгорнутий) стан необхідно



двічі клацнути курсором по його іконці. Розглянемо кожний прилад докладно.



Рис. 5.38. Панель контрольно-вимірювальних приладів

Інші прилади використовуються в електронних схемах, тому при моделюванні електричних схем не використовуються.

### 5.3.1 Мультиметр (Multimeter)



На лицьовій панелі мультиметра (рис. 5.39.) розташований дисплей для відображення результатів виміру, клеми для підключення до схеми і кнопки керування:



Рис. 5.39. Лицьова панель мультиметра

**A** **V** **Ω** **dB** – вибір режиму виміру струму, напруги, опору і ослаблення (загасання);



– вибір режиму виміру змінного або постійного струмів;



– режим установки параметрів мультиметра. Після натискання на цю кнопку відкривається діалогове вікно (рис. 3.40), на якому позначене:

Ammeter resistance – внутрішній опір амперметра; Voltmeter resistance - вхідний опір вольтметра; Ohmmeter current - струм через контрольований об'єкт;

Decibel standard – установка еталонної напруги  $V_1$  при вимірі ослаблення або посилення в децибелах (за замовчуванням  $V_1=1V$  ). При цьому для коефіцієнта передачі використовується формула:  $K[\text{дБ}]=201\log(V_2/V_1)$ , де  $V_2$  – напруга у контрольованій точці. Приведемо приклад використання мультиметра в режимі dB.

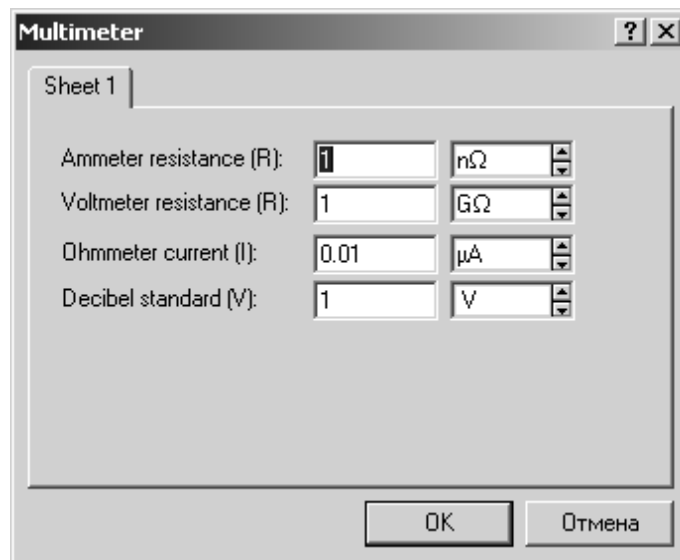


Рис. 5.40. Вікно установки режимів мультиметра

Припустимо, що необхідно виміряти коефіцієнт передачі аудіопідсилювача на частоті 20 кГц. Для цього до його входу підключимо джерело змінної синусоїдальної напруги частотою 20 кГц і напругою  $V_1=1\text{В}$ , а до виходу – мультиметр. Припустимо далі, що в режимі виміру напруги отримана величина вихідної напруги  $V_2=100\text{В}$ . Отже, коефіцієнт передачі підсилювача  $K=V_2/V_1=100$ . Переведемо мультиметр у режим dB, тоді одержимо значення коефіцієнта підсилення в децибелах  $K[\text{dB}]=20\log 100=40$  дБ. Припустимо далі, що частота вхідного сигналу збільшена до 100 кГц і отримана напруга на виході підсилювача  $V_2=0,1\text{В}$ , тобто коефіцієнт передачі в цьому випадку становить  $K=0,1/1=0,1$ . У режимі dB мультиметр виміряє  $K[\text{dB}]=20\log 0,1=-20$  дБ. Відзначимо, що мультиметр вимірює ефективне (діюче) значення змінного струму.

### 5.3.2. Функціональний генератор (Function Generator)



Лицьова панель генератора показана на рис. 5.41. Керування генератором здійснюється наступними органами керування:

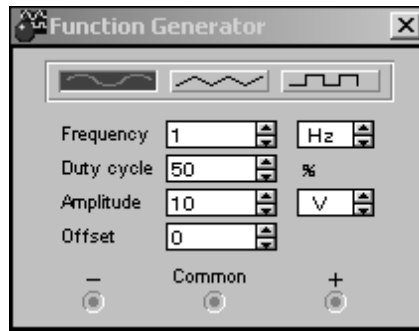




Рис. 5.41. Лицьова панель функціонального генератора

 – вибір форми вихідного сигналу: синусоїдальної (обрана по умовчанням) трикутної і прямокутної;  
 Frequency 1 Hz – установка частоти вихідного сигналу;  
 Duty cycle 50% – установка коефіцієнта заповнення в %: для імпульсних сигналів це відношення тривалості імпульсу до періоду повторення – величина, зворотна шпаруватості, для трикутних сигналів – співвідношення між тривалостями переднього й заднього фронту;  
 Amplitude 10 V – установка амплітуди вихідного сигналу;  
 Offset 0 – установка зсуву (постійної складової) вихідного сигналу;  
 – вихідні затискачі; при заземленні клеми **COM** (загальний) на клеммах "-" і "+" одержуємо парафазний сигнал.

### 5.3.3 Осцилограф (Oscilloscope)



Лицьова панель осцилографа показана на рис. 5.42. Осцилограф має два канали (CHANNEL) А і В з роздільним регулюванням чутливості в діапазоні від 10 мкВ/поділ (m/Div) до 5 кВ/поділ (k/Div) і регулюванням зсуву по вертикалі (Y POS). Вибір режиму по входу здійснюється натисканням кнопок **AC 0 DC**. Режим AC призначений для спостереження тільки сигналів змінного струму (його ще називають режимом "закритого входу", оскільки в цьому режимі на вході підсилювача включається розділовий конденсатор, який не пропускає постійну складову). У режимі 0 вхідний затискач замикається на землю. У режимі DC (включений за замовчуванням) можна проводити осцилографічні виміри як постійного, так і змінного струму. Цей режим ще називають режимом "відкритого входу", оскільки вхідний сигнал надходить на вхід вертикального підсилювача безпосередньо. Із правої сторони від кнопки DC розташований вхідний затискач.

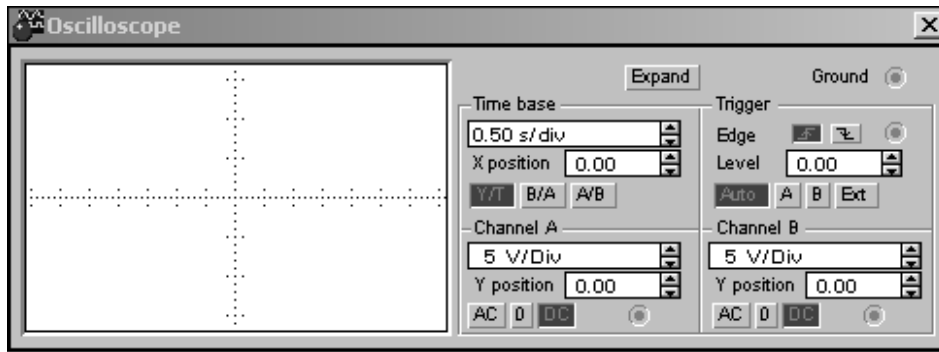




Рис. 5.42. Лицьова панель осцилографа

У режимі Y/T (звичайний режим, включений за замовчуванням) реалізуються наступні режими розгорнення: по вертикалі – напруга сигналу, по горизонталі – час; у режимі B/A: по вертикалі – сигнал каналу B, по горизонталі – сигнал каналу A; у режимі A/B: по вертикалі – сигнал каналу A, по горизонталі – сигнал каналу B. У режимі розгорнення Y/T тривалість розгорнення (TIME BASE) може бути задана в діапазоні від 0,1 нс/поділ (ns/div) до 1 с/поділ (s/div) з можливістю установки зсуву в тих же одиницях по горизонталі, тобто по осі X (X POS). У режимі Y/T передбачений також режим, що чекає (TRIGGER) із запуском розгорнення (EDGE) по передньому або задньому фронті сигналу, що запускає (вибирається натисканням  кнопок), при регульованому рівні (LEVEL) запуску, а також у режимі AUTO (від каналу A або B), від каналу A, від каналу B або від зовнішнього джерела (EXT), що підключається до затискача в блоці керування TRIGGER. Названі режими запуску розгорнення вибираються кнопками . Заземлення осцилографа здійснюється за допомогою клеми GROUND у правому верхньому куті приладу. При натисканні на кнопку EXPAND лицьова панель осцилографа істотно змінюється (див. рис. 5.44) - збільшується розмір екрана, з'являється можливість прокручування зображення по горизонталі і його сканування за допомогою вертикальних візирних ліній (синій і червоний кольори), які за трикутні вушка (вони позначені також цифрами 1 і 2) можуть бути курсором установлені в будь-яке місце екрана. При цьому в індикаторних віконцях під екраном приводяться результати виміру напруги, тимчасових інтервалів і їхніх збільшень (між візирними лініями). Зображення можна інвертувати натисканням кнопки REVERSE і записати дані у файл натисканням кнопки SAVE. Повернення до вихідного стану осцилографа - натисканням кнопки REDUCE.

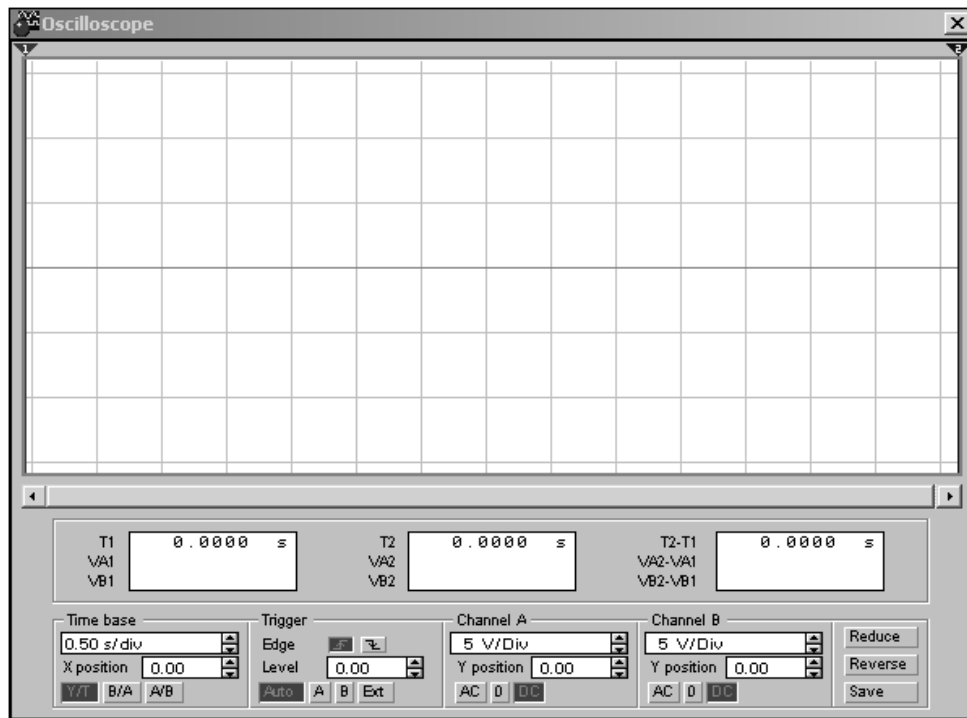


Рис. 5.44. Лицьова панель осцилографа в режимі EXPAND

### 5.3.4 Вимірник АЧХ і ФЧХ (Bode Plotter)



Лицьова панель вимірника АЧХ-ФЧХ показана на рис. 5.45. Вимірник призначений для аналізу амплітудно-частотних (при натиснутій кнопці MAGNITUDE, включена за замовчуванням) і фазо-частотних (при натиснутій кнопці PHASE) характеристик при логарифмічній (кнопка LOG включена за замовчуванням) або лінійній (кнопка LIN) шкалі по осях Y (VERTICAL) і X (HORIZONTAL). Настроювання вимірника полягає у виборі меж виміру коефіцієнта передачі і варіації частоти за допомогою кнопок у віконцях F-максимальне і I – мінімальне значення. Значення частоти і відповідне їй значення коефіцієнта передачі або фази відображається у віконцях у правому нижньому куті вимірника.

Підключення приладу до досліджуваної схеми здійснюється за допомогою затискачів IN (вхід) і OUT (вихід). Ліві клемі затискачів підключаються відповідно до входу і виходу досліджуваного пристрою, а праві – до загальної шини. До входу пристрою необхідно підключити функціональний генератор або інше джерело змінної напруги, при цьому яких-небудь настроювань у цих пристроях не потрібно.

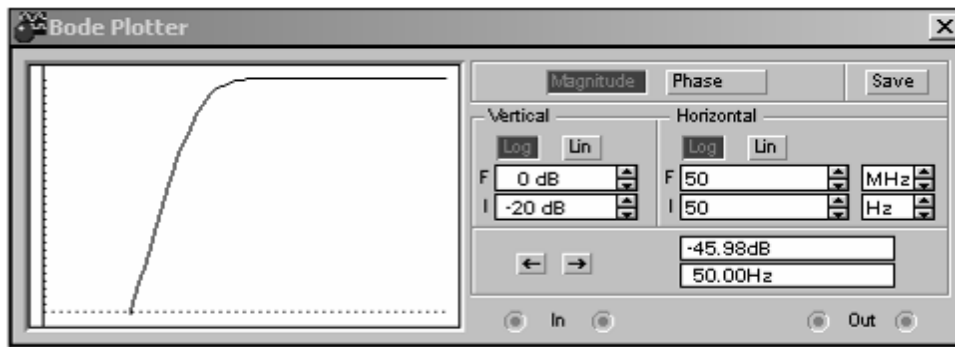


Рис. 5.45. Лицьова панель вимірника АЧХ і ФЧХ

У наступній главі розглянемо основи теоретичної електротехніки, що є базою, на якій побудоване моделювання на EWB.

## 6 ЗАСТОСУВАННЯ EWB В ЕЛЕКТРОРТЕХНІЦІ

### 6.1 Схеми на комп'ютері

Почнемо з найпростішого пристрою [4]. Електричне коло найпростішого ліхтарика складається з електрохімічного джерела струму, лампочки і вимикача, які з'єднані послідовно.

Складемо принципову схему ліхтарика (рис. 6.1). Для цього скористаємося програмою EWB. У цій програмі реалізований стандартний багатовіконний інтерфейс зі спадаючими меню, що розвертаються.

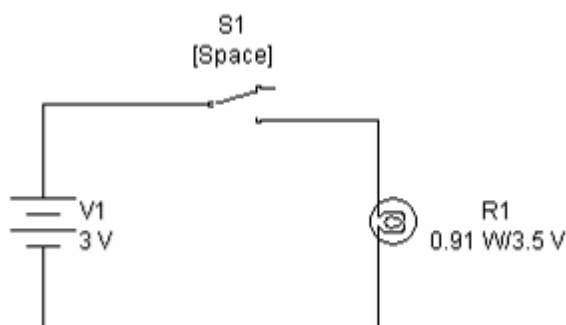








Рис. 6.1. Принципова схема ліхтарика

Відкриємо на панелі компонентів піктограму групи Source (джерела)  і виберемо в ньому Battery (батарея). Утримуючи ЛКМ (ліву кнопку миші) у натиснутому стані, перетаскуємо зображення батареї в ліву частину робочої області екрана й відпускаємо ЛКМ (ця процедура далі називається буксируванням).

Потім аналогічно переносимо в центр екрана з розділу  Basic (основні компоненти) Switch (перемикач)  і з розділу  Indicators (індикатори) компонентів Bulb  (лампа розжарювання), які поміщаємо в праву частину екрана. Упорядковуємо розташування обраних компонентів на екрані, якщо воно не відповідає уявлюваній схемі. Для цього ЛКМ виділяємо необхідний компонент і переміщаємо (буксируємо) його в потрібне положення. Можливо, на цьому етапі, буде потрібно змінити просторову орієнтацію компонентів. У даному конкретному випадку зручніше повернути лампу на 90° проти годинкової стрілки, для цього виділимо лампу (одноразовим натисканням ЛКМ), при цьому вона прийме активний (червоний) вид, і натиснемо на кнопку (піктограму) Rotate (обертання)  горизонтального ряду інструментів. Цю ж операцію можна провести із клавіатури, виділивши лампу й натиснувши Control+R (зрозуміло, перебуваючи при англійській розкладці клавіатури – АРК) або, після виділення компонента, увійшовши в меню Circuit (схема) і скориставшись командою Rotate.

Далі виконуємо з'єднання компонентів. Установлюємо стрілку курсору у верхню частину виводу: там з'являється жирна чорна точка символ нероз'ємного з'єднання. Натискаємо ЛКМ і найкоротшим шляхом ведемо лінію до крайнього лівого виводу перемикача. Після того як там виникне символ з'єднання, відпускаємо ЛКМ. На екрані виникає зображення сполучного провідника у вигляді двох ортогональних відрізків.

Для успішного позиціювання місць з'єднань зручніше працювати при більших масштабах зображення, наприклад 100%, накресливши частину схеми, можна повертатися в більше зручний режим скажемо 80%. Не намагайтеся розташовувати сполучні вузли близько до компонентів. Після того, як з'єднання виконане вузол, компонент або провідник можна виділити і перемістити стрілками на клавіатурі в потрібне місце.

Загальне креслення принципової схеми виконане і тепер треба відредагувати параметри (властивості) компонентів. Починаємо з батареї. Двічі клацаємо на ній ЛКМ. На екрані з'являється підменю (рис. 6.2). Battery Properties (властивості батареї). Вибираємо в цьому підменю Value (значення) і набираємо у відповідному віконці цифру 3, залишаючи одиницю виміру В, тобто Вольт. Потім виділяємо Label (позначення) і друкуємо буквений символ ЕРС Е і підтверджуємо зроблений вибір властивостей натисканням на кнопку «ОК».

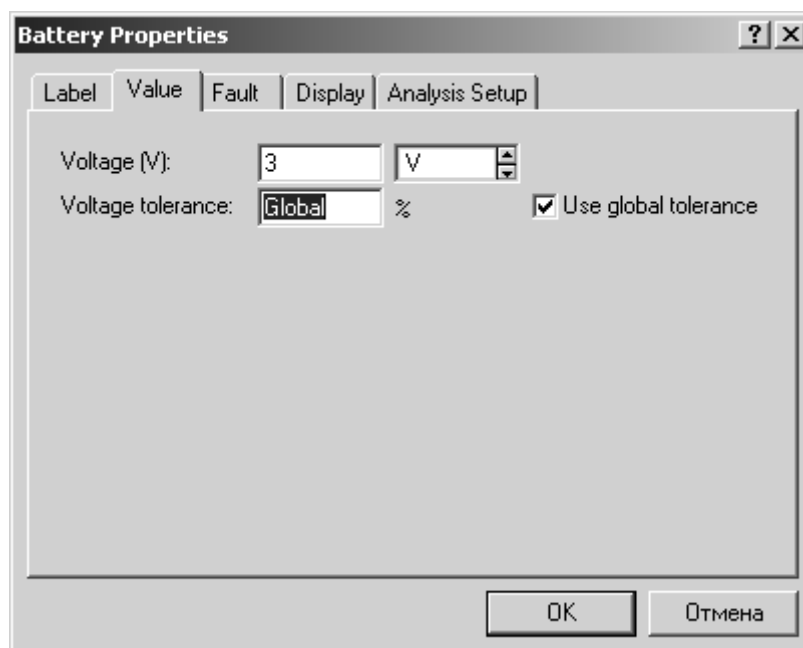



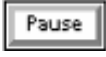
Рис. 6.2. Діалогове вікно вибору параметрів батареї

Переходимо до лампи. Діючи аналогічно попередньому, виділяємо лампу, викликаючи діалогове вікно для редагування її параметрів. Набираємо у віконці Label «Lamp». Установлюємо в позиції Value PMAX (максимальна потужність) 0.91 W (Ват). Тут же набираємо у віконці VMAX (максимальна напруга) 3.5.



Роздільником цілої і дробової частини десяткового числа є точка. Звертайте увагу на одиниці виміру і при необхідності переходьте до кратних, наприклад к (кВт), м (мВ) і т.п. .

Вибір чисельного значення параметрів можна зробити для іншої конкретної або уявленої батареї і лампочки. При необхідності можна, діючи аналогічно, перейменувати позиційне позначення перемикача, перейшовши відповідно до іншої клавіші, що їм керує, наприклад [X] замість [Space], прийнятої за замовчуванням.

Перевіримо працездатність зібраної схеми. Установлюємо у віртуальному вимикачі Activate simulation (включення моделювання) , розміщеному у верхній правій частині панелі інструментів показчик на I (In - включено), і робимо щиглика ЛКМ. Клавіша цього вимикача переходить у положення «включене». Переривається моделювання натисканням на розташовану нижче кнопку  «Pause» (пауза), повторне натискання скасовує цю команду. Вимикається моделювання натисканням на O (Out - виключено). Цю процедуру можна здійснити і з меню Analysis: Activate, Pause, Stop або із клавіатури: «Control+G», «F9», «Control+T».

Після запуску моделювання переводимо вимикач [X] на схемі (рис. 6.3) у положення «включене» (натиснувши на клавішу літери X на АРК) і спостерігаємо, як лампочка офарблюється в чорні кольори (імітація її горіння).

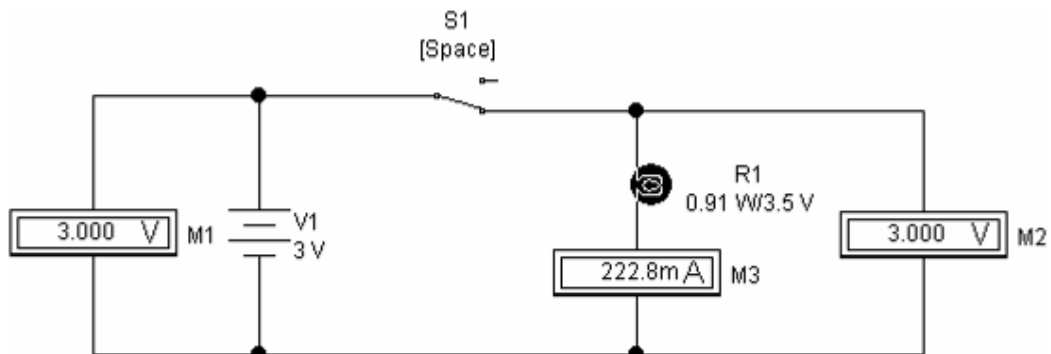



Рис. 6.3. Вимір напруг і струму в моделі

Зробимо віртуальні виміри напруг на компонентах віртуального кола (рис. 6.3). Щоб залишити вихідне коло без змін, зробимо її копію. Для цього спочатку робимо її виділення, натискаючи на ЛКМ і обводячи її рамкою, що виділяє, або з меню Edit>Select All і далі, користуючись стандартними командами Windows – Copy і Past. (Можна також зберегти цей файл під новим ім'ям і працювати із цим новим файлом.) Після того як копія виникне на екрані, наводимо курсор на будь-який її активний елемент (виділеними червоними кольорами) показчик – він перетвориться в зображення руки, натиснемо ЛКМ і буксируємо схему вниз. При досягненні потрібного положення (схеми не повинні перетинатися) треба відпустити ЛКМ.

Буксируйте схему на нове місце відразу після копіювання (поки вона активна - «червона»), інакше, особливо в складних схемах, повторно виділити

накладені одна на одну схеми і «розтаскати» їх практично не вдасться. При вставці копії в схему потрібно «прокрутити» екран, клацнути ЛКМ на вільному полі й тільки після цього робити вставку.

Стиснемо» небагато схему ліворуч і праворуч щодо центра, щоб згодом схема не «вилазила» за межі видимої частини екрана. Для цього виділяємо батарею і переміщаємо її не багато вправо, потім аналогічно, але вліво –

лампу. Відкриваємо панель Indicators (індикатори) , і «беремо» з її необхідні прилади: два вольтметри й один амперметр. Ліворуч і праворуч від формованої схеми поміщаємо по вольтметру, а внизу, по центрі - амперметр. Вольтметри за замовчуванням мають розташування з «стовщенням-мінусом» унизу, оскільки негативному полюсу джерела відповідає нижній вивід, то їх можна приєднати паралельно батареї й лампі (див. рис. 9.3), не міняючи просторової орієнтації. Амперметр орієнтований протилежним до «мінуса» батареї чином: його «мінус» розташований праворуч. Тому його треба повернути навколо вертикальної осі. Після цього його треба «включити» у розрив нижнього проводу, і отут є два варіанти. Перший полягає в тім, щоб утворити такий розрив, усунувши з'єднання «мінуса» батареї з лампочкою.

Для усунення якого-небудь з'єднання досить виділити будь-яку його кінцеву точку, відвести її разом із провідником у вільне місце й відпустити ЛКМ, тобто як би один кінець проводу кинути в порожнечу. Можна також виділити провідник одноразовим натисканням ЛКМ і потім видалити його будь-яким стандартним прийомом, наприклад, скориставшись клавішею «Delete». Аналогічно видаляється будь-який непотрібний компонент або навіть частина схеми, але після її стандартного рамкового виділення.

Після утворення розриву включимо амперметр між «мінусом» батареї й нижнім виводом лампи.

Інший, більше простий спосіб включення амперметра, та й будь-якого іншого схемного двополюсного компонента в існуючу вітку, полягає в наступному. Компонент виділяється, а потім буксирується й накладається на те місце провідника, де він повинен розташовуватися так, щоб його виводи збіглися із провідником.

При включенні двополюсного компонента в схему при необхідності спочатку заготовте шляхом її розтягання потрібне місце. Для зміни геометрії схеми без зміни характеру з'єднань виділите частину схеми й буксируйте її на потрібне місце. Після того як операція закінчена, перевірте пробним буксируванням, чи з'єднався компонент зі схемою: при його переміщеннях він повинен «тягти» за собою приєднані проводи. Якщо після підключення компонента схема виглядає не акуратно (є заплутані з'єднання, зайві злами й перетинання провідників і т.п.), то поправте її графіку.

Простежимо за показаннями приладів. Перемикач [X] поставимо в положення ВІКЛ і включимо моделювання. Як і слід було сподіватися,  $V1 = 3.5 \text{ В}$ ,  $V2 = 0$ ,  $A = 0$ . При замиканні [X] відповідно,  $V1 = 3.5 \text{ В}$ ,  $V2 = 3.5 \text{ В}$ ,  $A = 260 \text{ мА}$ , а потужність  $0,91 \text{ Вт}$ .

Тепер перейдемо до більш детального моделювання, а саме складемо схему заміщення електричного кола ліхтарика у включеному стані. Спочатку будемо вважати, що внутрішній опір батареї  $R_0$  дорівнює нулю, її ЕРС постійна і не залежить від часу. Це ідеальне джерело напруги. Всі сполучні елементи: провідники, замкнений контакт і інші місця з'єднань (патрон - лампа, елементів між собою й з патроном і т.д.) будемо вважати такими, що не мають опору. Лампу представимо у вигляді ідеального лінійного резистивного елемента з опором рівним  $R = 3,5/0,26 = 13,46$  Ом.

Скопіюємо останню схему. Потім видалимо з неї лампу й на її місце включимо резистивний елемент. Для цього відкриємо в панелі компонентів групу Basic (основні) і з неї виберемо резистор. Виділивши властивості компонента, установимо його позначення R і значення 13,46 Ом.

Зібравши схему заміщення з резистивним елементом, включасмо моделювання й переконуємося в правильності отриманих результатів (див. рис. 6.4).

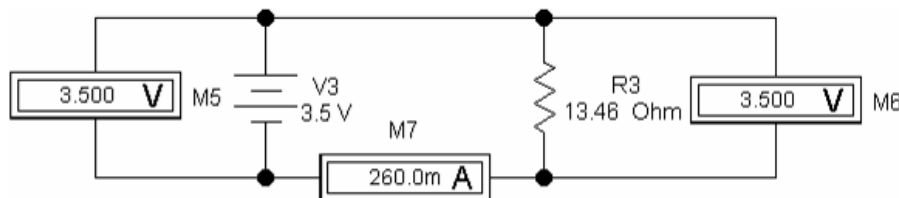



Рис. 6.4. Електрична схема заміщення кола ліхтарика з вимірювальними приладами

Проведемо експеримент із реальною батарейкою й лампочкою. Для вимірів струму використаємо мультиметр приєднавши його між лампочкою і батарейкою. Потім, відновивши з'єднання, вимірюємо напруга на палаючій лампочці  $V$ . Виключаємо лампочку й вимірюємо напруга на батареї – це її ЕРС  $E$ . Вигвинчуємо лампочку й вимірюємо її опір у не робочому (холодному) стані  $R_0$ . Припустимо, що ми одержали наступні результати:  $E = 2,8$  В,  $V = 2,6$  В,  $I = 0,21$  А,  $R_0 = 1$  Ом .

Зіставляємо віртуальний і реальний експерименти. Розглядаючи ці результати, ми виявляємо, принаймні, дві невідповідності в поведженні реального об'єкта й моделі. По-перше, напруга, при включенні лампочки, знижується з 2,8 В до 2,6 В. По-друге, якщо ми розділимо напругу, виміряну на лампі, на опір, то одержимо струм  $2,6/1 = 2,6$  А. У той час, як в експерименті вийшло всього 0,21 А. Якщо ж ми будемо при проведенні експерименту тривалий час не виключати лампочку, то виявимо, що показання, що знімають із приладів, ( $E$ ,  $V$ ,  $I$ ), повільно зменшуються. Повторимо вимір опору лампи, але у віртуальній моделі. Із групи Instruments

(інструменти)  візьмемо Multimetr (мультиметр), скопіюємо лампу й зберемо модель вимірювального кола (рис. 6.5).

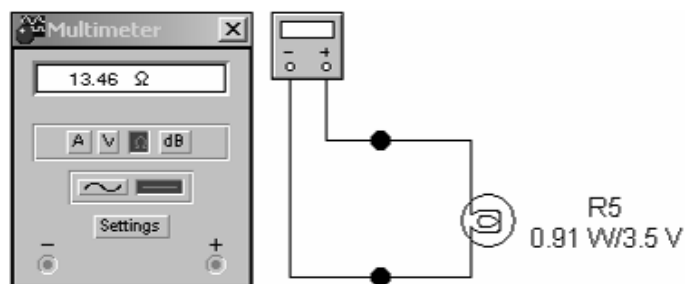


Рис. 6.5. Виміру опору лампочки мультиметром

Результат вимірів на перший погляд здається несподіваним: 13,46 Ом замість 1 Ом, що характеризує недосконалість прийнятої моделі. Зменшення напруги на 0,2 В при струмі 0,21 А можна пояснити, наприклад, наявністю в реальному колі ще одного опору  $R_0$ , включеного послідовно з лампою й рівного  $0,2/0,21 = 0,94$  Ом, який і є внутрішнім опором батареї  $R_0 = 0,94$  Ом.

Зберемо моделюючу схему, скориставшись даними експерименту (рис. 6.6). Включимо моделювання, результати збігаються з похибкою до декількох відсотків, що цілком пояснюється похибками вимірів і округленнями в розрахунках.

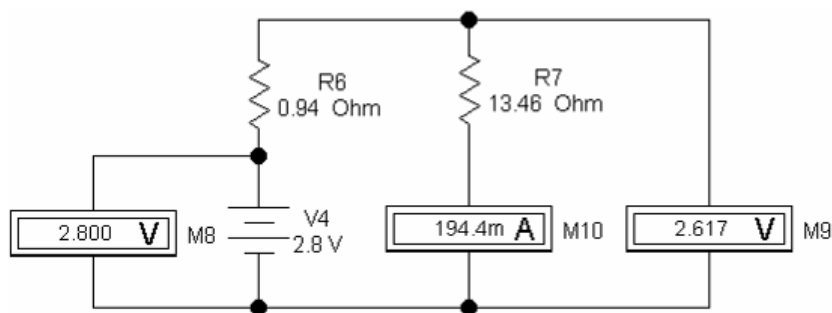


Рис. 6.6. Моделювання роботи «реальної» батареї

Ототожнення віртуальної моделі з реальним об'єктом, що вона моделює, за межами тих умов, які були закладені при формулюванні моделі, неприпустимо. Розбіжності у вимірах і результатах моделювання при холодній і розпеченій нитці розжарювання пов'язані зі збільшенням на порядок опору при нагріванні до  $3000^{\circ}\text{C}$ , тобто її опір залежить від температури нитки, що у свою чергу залежить від струму, що протікає. У подібних випадках у схему заміщення замість лінійного вводять нелінійний резистивний елемент, але це сильно ускладнює аналіз.

Варто звернути увагу на те, що для ряду приладів (мультиметр, осцилограф і ін.) у програмі в схему включають зменшене схемне зображення приладу, на якому є активні виводи. Показання ж знімаються з віртуальних зображень цих приладів, що містять лицьові панелі з органами керування, не зв'язаними проводами зі схемою. Ці зображення викликаються подвійним щикликом ЛКМ на схемному зображенні приладу. Віртуальне зображення розгорнутої лицьової панелі можна вільно буксирувати в будь-яке зручне місце екрана, у тому числі поверх схеми, як звичайне додаткове вікно. Виводи на цих зображеннях не активні: не намагайтеся до них що-небудь приєднати,

зате активні настановні кнопки, і ними треба правильно користуватися для роботи.

## 6.2 Структура схем

У схемотехніці проведена класифікація типових компонентів і блоків, у які вони входять і, нарешті, закінчених у функціональному відношенні пристроїв і систем із цих пристроїв. Ця класифікація разом із законами й правилами поведінки окремих елементів і складних систем, зібраних з них, дозволяє аналізувати існуючі електронні пристрої або проектувати нові. Одним із ключових ознак класифікації в схемотехніці є власно конфігурація схеми всього пристрою й окремих його частин. Ця конфігурація визначає спосіб зв'язку елементів цілого, а, отже, поряд із властивостями самих елементів, визначає властивості цього цілого. Так, два компоненти кола: конденсатор і індуктивна котушка, з'єднані послідовно або паралельно, утворюють коливальні контури із протилежними частотними характеристиками.


Перший приклад відносився до дуже простого за своїми функціями пристрою (ліхтарику), що працює на постійному струмі, тому і його модель виявилася дуже простій.

У пристроях з більше складними функціями використовується, як правило, більше число компонентів, які можуть бути досить складними. Крім того, конфігурація кіл, тобто спосіб з'єднання компонентів, також стає більше складною. Тому при схемотехнічному моделюванні використовують велику розманітність типових схемних елементів і способів їхніх з'єднань.

Найпростішим компонентом будь-якого кола є місце електричного з'єднання елементів або ділянок між собою: вивід, електрод, контакт, затискач, полюс тощо. За змістом - це деякий ідеальний «однополюсник», який може спеціально позначатися на схемах точкою з відповідним маркуванням, а може й не позначатися (ізолюваний компонент або з'єднання двох не однополюсних компонентів). В останньому випадку його присутність мається на увазі.


При комп'ютерних розрахунках поняття вузла кола ширше, ніж це прийнято в електротехніці, де за вузол приймається місце з'єднання тільки трьох і більше провідників, що диктується застосуванням правила Кірхгофа для струмів. В електроніці необхідно знати потенціали вузлів при з'єднанні в них і двох виводів від відповідних компонентів і на виводі, до якого взагалі нічого ні приєднано (наприклад, на виході підсилювача без навантаження).

У програмі EWB графічне позначення вузлів на схемах виникає автоматично при з'єднанні в точці трьох або чотирьох провідників або може вводитися при створенні схем з розділу компонентів Basic (основні) і виборі

компонента  Connector (з'єднувач). З вузла може виходити не більше чотирьох ортогональних провідників. Вузол може мати при його виділенні Label (текстову мітку) у вікні Connector Properties. Нумерація вузлів (Node) при моделюванні виконується програмою автоматично і її можна виявити,

активує відповідний вузол і натиснувши у вікні, що з'явилося, Connector Properties на кнопку Node (вузол). Ці номери використовуються при моделюванні поведінки кіл в опції Analysis.

Намагайтеся акуратно виділяти елементи: тільки клацати кнопкою, не зрушуючи мишу з місця, інакше може порушитися конфігурація схеми. Якщо це не вдалося, то для відновлення початкового виду схеми скористайтеся переміщенням виділеного елемента відповідними стрілками на клавіатурі й, у крайньому випадку, заново відтворите порушене з'єднання. Для роботи з одиничним компонентом наведіть на нього стрілку-курсор: вона перетвориться в зображення руки. Натисніть *праву* кнопку миші (ПКМ) і в меню, що з'явився, виберіть необхідну команду.

Особливим схемним компонентом-вузлом, потенціал (і номер), якого приймається рівним нулю, є заземлення (Ground). Його вибір робиться в програмі з меню Sources (джерела) вибором піктограми .

Оскільки розрахунки при моделюванні проводяться щодо цього «нульового» вузла (Ground), то не забувайте виконувати заземлення. Програма не працює, якщо не заземлений хоча б один вузол у схемах, де використовуються трансформатори. Для спрощення накреслення складних схем часто зручно не проводити загальну шину, а заземлювати компоненти локально в необхідному місці.

У програмі є можливість звернутися до допомоги (Help) – не соромтеся нею користуватися. Вона хоч і англійською мовою, але іноді допомагає. Крім того, корисно переглянути файли із прикладами, прикладеними до програм. Наступним компонентом кіл, відображуваних на всіх схемах, є з'єднувальні провідники (Wire). У програмі EWB графічне позначення провідників на схемах виникає автоматично при з'єднанні виводів двох будь-яких компонентів, що перебувають на екрані. Графічний редактор по-своєму оптимізує з'єднання за допомогою ортогональних провідників. Вид отриманого з'єднання можна відредагувати, виділивши відповідний відрізок і переміщаючи його в одному з напрямків, двонаправленою стрілкою, показаною на ньому. Можна також заздалегідь спланувати шлях провідника, розташовуючи в необхідних місцях «монтажні» вузли, до яких можна приєднати не більше чотирьох ортогональних провідників. Бажано виконувати схеми з мінімальною кількістю перетинань, провідників, що з'єднують не між собою. Для наочності з'єднань провідники й вузли можуть бути розфарбовані за командою вибору їхніх властивостей, причому розфарбовування вузла автоматично приводить до розфарбовування в ті ж кольори провідників, що з'єднують їм.

Провідники на схемах приймаються ідеальними, тобто надпровідними, на відміну від всієї іншої, не зайнятої компонентами площини креслення схеми, що теж передбачається ідеальною, але ізолятором. Не ідеальність реальних провідників ураховується при необхідності введенням у моделюючу схему додаткових елементів.

Для того самого провідника всі вузли, що лежать на ньому й взагалі будь-які його точки на схемі є еквіпотенційними, тобто мають той самий потенціал щодо заземленого вузла. Таким чином, схемні провідники також є своєрідними однополюсниками.

Наступним типом компонентів кіл і відповідно схемним компонентом є двополюсники. Стан двополюсника однозначно визначається різницею потенціалів між двома виводами і його властивостями.

На схемах заміщення використовують наступні елементарні (одноелементні) ідеалізовані двополюсники: резистивні (R), індуктивні (L), ємнісні (C), джерела напруги (E) і джерела струму (J). Параметри, що визначають властивості цих двополюсників відповідно такі: опір R, індуктивність L, ємність C, ЕРС E и струм I.

Намагайтеся розрізнити поняття ідеалізованих двополюсників на схемах заміщення й реальних компонентів стосовно до кіл, принципівих схем і схем заміщення. Зробити це не завжди просто, тому що їх умовні графічні зображення часто збігаються, а в мікросхемах вони часто зливаються. Ототожнення цих різних класифікаційних ознак може привести до невірної ідеалізації й, отже, до помилки. Наприклад, резистор, як реальний елемент, на високих частотах володіє ще і ємністю, і індуктивністю, отже, його схема заміщення повинна складатися із трьох різних двополюсників. У конденсаторі ж можуть з'явитися втрати на нагрівання, отже, у схемі заміщення треба додати резистивний елемент. Тоді як індуктивна котушка має крім реактивного (індуктивного) і активний опір, а на високих частотах у ній може виявитися й міжвиткова ємність.

Наступним компонентом кіл і відповідно схемним елементом є триполюсник, наприклад транзистор, що має три виводи: емітер, базу й колектор.

Зручніше розглядати триполюсник як чотириполюсник, у якому один з виводів як би роздвоюється і є загальним для вхідного й вихідного ланцюга. У загальному випадку чотириполюсник має дві пари полюсів: першу на вході й другу на виході. Наприклад, двообмоточний трансформатор має два вхідних затискачі, що з'єднують його із джерелом живлення й два вихідних, до яких підключається навантаження.

Стан чотириполюсника і виконувани їм функції визначаються двома парами напруги й струму і параметрами, що їх зв'язують, які характеризують його властивості, заданими в тій або іншій формі. Звичайно схеми розташовують, орієнтуючи їх так, щоб джерело корисного сигналу (вхід) перебував ліворуч, а навантаження (вихід) – праворуч. Це відповідає прийнятим правилам європейської писемності й читання: ліворуч - праворуч. Не слід розуміти буквально так, що тільки один який-небудь компонент, залежно від його пристрою, є дво або чотириполюсником: це лише окремі випадки. Будь-яка частина електричного кола, що має N виділених полюсів (затискачів) є N-полюсником (при  $N > 2$  – багатополюсником).

Взагалі ж все це моделі типу «чорного ящика», з якого виходять одна або дві пари проводів, що враховують у конкретній задачі. Наприклад,

телевізор, розглянутий як споживач електричної енергії з мережі, незважаючи на всю складність внутрішньосхемних з'єднань, є всього лише електричним двополюсником. Однак цей же телевізор, але розглянутий стосовно інформаційного сигналу, що надходить на його антенний вхід і після перетворень, що попадає на виводи звукової котушки електродинамічного гучномовця, є типовим чотиріполюсником.

Взагалі ж модель у вигляді того або іншого багатополюсника може бути поширена на входи й виходи й не електричної природи.

Систематичне застосування описаного підходу становить сутність електричного моделювання фізичних систем.

Таким чином, при бажанні, описувані програми можуть бути в принципі застосовані не тільки по прямому призначенню: для моделювання електронних кіл, але й набагато ширше.

Розглянемо деякі абстрактні двополюсники, не наділяючи їх ніякими характерними властивостями реальних компонентів за винятком виводів, якими вони можуть бути з'єднані між собою й із зовнішніми колами. Залежно від числа й способу з'єднання таких абстрактних двополюсників можуть бути одержані різні конфігурації схем. Для їхнього зображення застосуємо графіку програми EWB, використовуючи базове позначення резистора й увівши тільки нумерацію цих схемних компонентів. Одиничний двополюсник (рис. 6.7, а), якщо не враховувати його можливою полярність, оскільки ця додаткова властивість, має тільки один варіант розміщення (з'єднання його тільки одним виводом еквівалентно відсутності). Правда можна одержати два вироджених чотиріполюсники в сполученні із провідниками й вузлами (рис. 6.7, б, в).

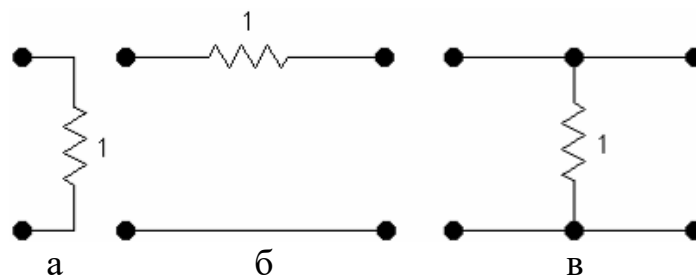


Рис. 6.7. Одноелементні двополюсники й чотиріполюсники

Для двох двополюсників можливі два види з'єднань: послідовне (рис. 6.8, а), що характеризується загальним струмом і паралельне (рис. 6.8, б), що характеризується загальною напругою. Утворилися два нових двополюсника, причому переставляння в них елементів з урахуванням зроблених допущень нічого не міняють. Двополюсник з послідовним з'єднанням (рис. 6.8, а) можна перетворити в триполюсник, якщо зробити додатковий вивід від внутрішнього з'єднання (рис. 6.8, в) і в чотиріполюсник, зробивши один будь-який вивід загальним (рис. 6.8, г), зображуваним також як Г-образний чотиріполюсник (рис. 6.8, д). Тут вже в загальному випадку переставляння елементів приводять до зміни властивостей.



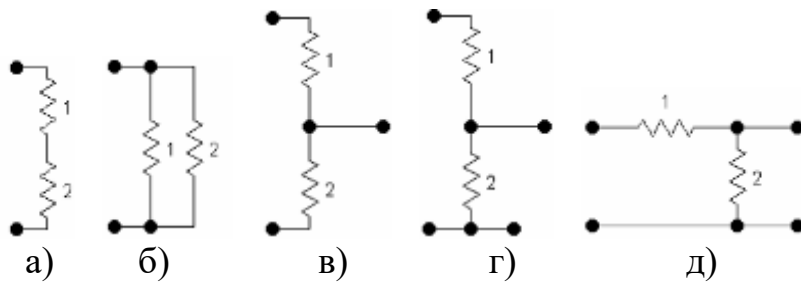


Рис. 6.8. Двоелементні двополюсники і багатополіусники

При аналізі схем намагаються зменшити число елементів, що входять до них, але так щоб стосовно вхідного (а для чотириполюсника й до вихідного) затискачам поведіння схеми не змінилося. Це так називані еквівалентні перетворення. Для простих схем на постійному струмі це завдання вирішується елементарно. У той же час для складних схем і складних сигналів вона може виявитися проблематичною.

Як приклад розглянемо еквівалентну заміну багатоеlementного двополюсника на одноелементний; дев'ять резисторів з номінальним опором 1 Ом кожний з'єднані за схемою, показаною на рис. 6.9, а. Потрібно визначити вхідний опір кола  $R_{ab}$ .

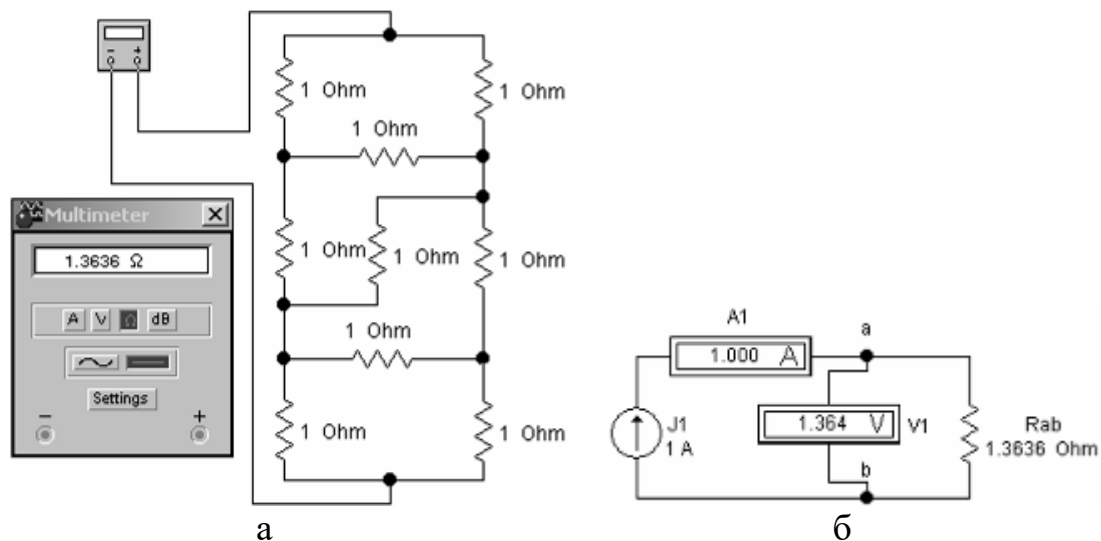


Рис. 6.9. Моделювання заміни

Аналітичне рішення задачі полягає у використанні законів Кірхгофа. При цьому прийдеться скласти й потім розв'язати систему з дев'яти рівнянь. Інший метод полягає в послідовних еквівалентних перетвореннях з використанням правил перерахування типу «зірка» – «трикутник», послідовних і паралельних з'єднань.

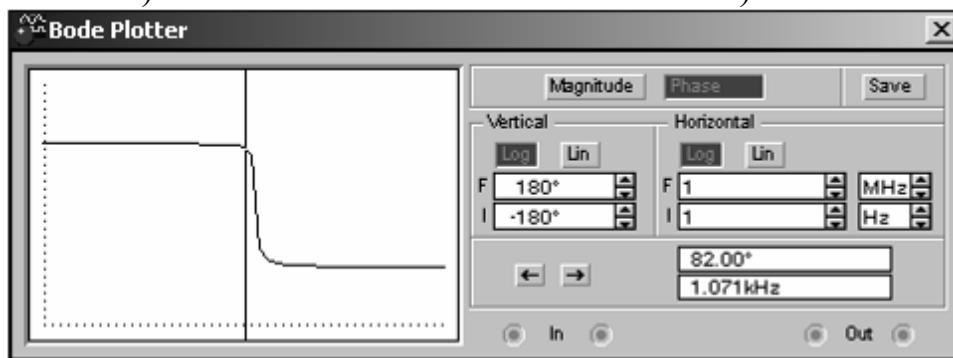
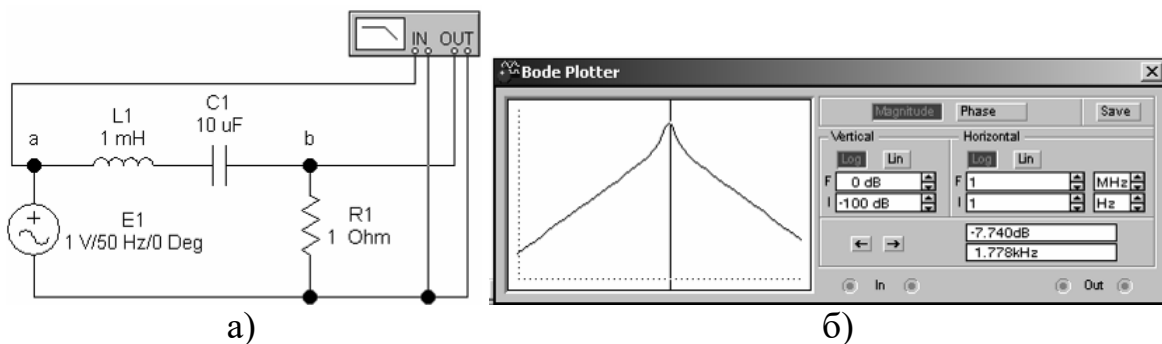
Використовуючи віртуальну схемотехніку одержуємо розв'язання цієї задачі досить тривіальним віртуальним експериментом. Для цього просто мультиметром вимірюється опір на вході схеми (рис. 6.9, а). Як слідує із цього експерименту, приблизно  $R_{ab} = 1,3636$  Ом (тоді як точна відповідь  $15/11$  Ом).

Таким чином, розглянутий багатоелементний двополюсник може бути замінений усього лише одним еквівалентним резистивним елементом, що й показано на рис. 6.9, б.

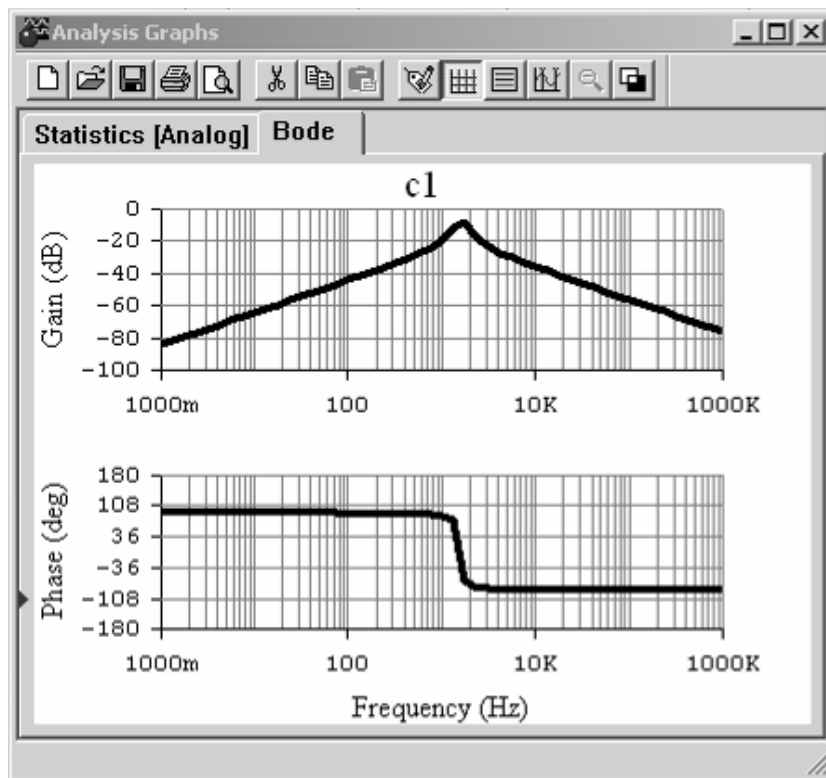
Використовуючи джерела і прилади на змінному струмі й підключаючи їх до входних затискачів, можна аналогічно визначити повний вхідний опір на змінному струмі й більше складних схем, у яких присутні поряд з резистивними й реактивні (індуктивні і ємнісні) елементи. У цьому випадку можна також визначити, як цей опір залежить від частоти.

Нехай вихідними двополюсниками будуть індуктивний і ємнісний елементи. З'єднуючи ці елементи двома можливими способами, одержуємо два коливальні контури: послідовний (рис. 6.10) і паралельний (рис. 6.11).

Досліджуємо їхні частотні характеристики. Опис поведінки кіл у частотній області, де аргументом є частота, настільки ж природно, як і опис у часовій області, де аргументом є час, тому що частота й час – це дві обернено пропорційні величини.

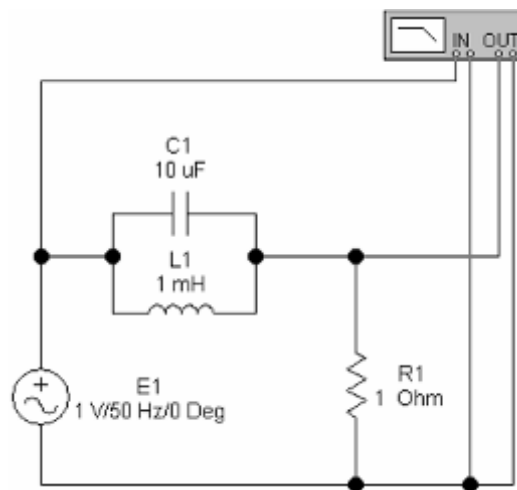


В)

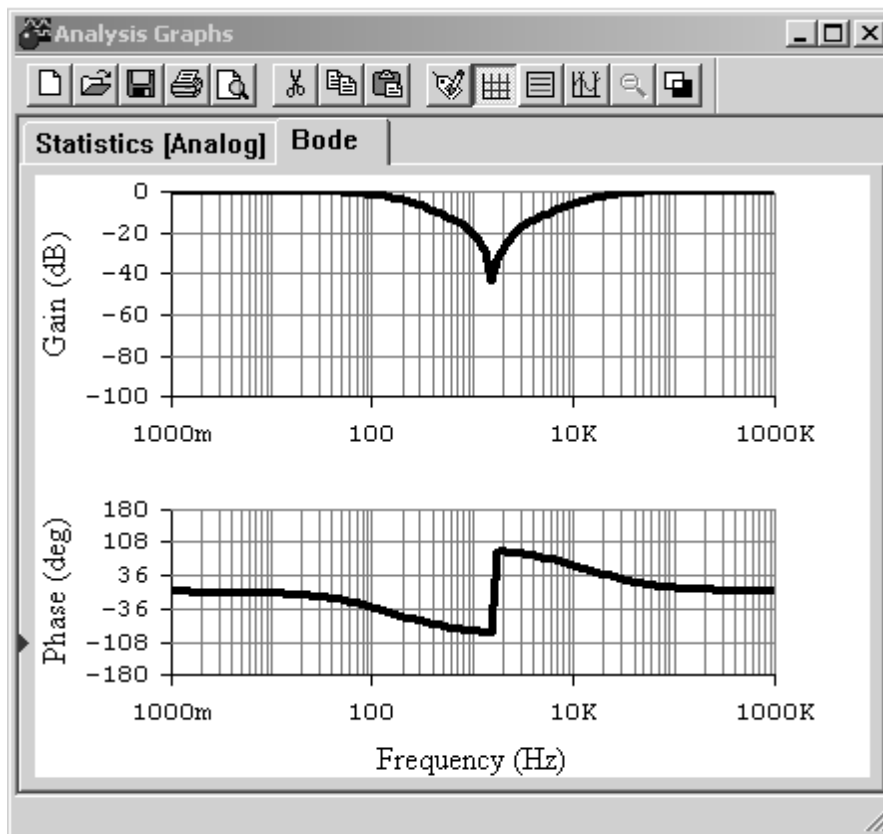


г)

Рис. 6.10. Послідовний коливальний контур



а)






б)

Рис. 6.11. Паралельний коливальний контур


Якщо розглядаються питання фільтрації, то сигнали представляються у вигляді спектрів, тобто залежностей амплітуди гармонік, що входять до них, від частоти. Фільтруюче коло також описується через залежність коефіцієнта передачі по напрузі (відношення напруги вихідного сигналу до напруги на вході) від частоти. Фільтр, як чотириполосник, може мати різні за характером смуги пропускання частот. В одних – сигнал проходить із малим загасанням, а в інші, навпаки, сигнал сильно загасає. Подібна залежність зветься амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ). Знаючи спектр вхідного сигналу й АЧХ фільтра, можна судити про те, який буде сигнал на виході.

Для визначення зміни фази сигналу після проходження через коло, використовують фазочастотну характеристику (ФЧХ).

У програмі EWB для одержання АЧХ і ФЧХ користуються спеціальним приладом Бодє-плотером (Bode Plotter). Цей прилад знаходиться у розділі Instruments.

Зберемо схему згідно рис. 6.10, а. Досліджуваний контур L1C1 підключений до генератора E1. Бодє-плотер вибирається по піктограмі  у групі Instruments . Вхід плотера IN на умовному графічному зображенні приладу  треба з'єднати із входом контуру, а його вихід OUT із джерелом вихідного сигналу (з допоміжного вимірювального резистора R1, який вносить невеликі втрати).

Для одержання частотних характеристик після збірки схеми необхідно викликати зображення лицьової панелі, двічі клацнувши ЛКМ по умовному графічному зображенню приладу. За замовчуванням у повному зображенні, що з'явилося, лицьової панелі приладу (див. рис. 6.10, б) кнопки Magnitude (амплітуда) і Log (логарифмічний масштаб) перебувають в «утопленому» положенні й для спостереження АЧХ треба лише у вертикальному і горизонтальному розгорненнях зробити установки діапазонів моделювання по амплітуді F (від First – початкове значення) і I (від In - кінцеве значення) і натиснути на кнопку, що вмикає моделювання. Далі для спостереження ФЧХ треба «утопити» кнопку Phase (фаза) і аналогічно попередньому встановити початкове F і кінцеве I значення фази, а потім включити моделювання. У результаті на екрані віртуального схемного приладу одержуємо спочатку АЧХ, а потім ФЧХ (рис. 6.10, в). Для проведення кількісних вимірів на цих графіках можна скористатися вертикальною візирною лінією, переміщеною з лівої частини екрана курсором або кнопками із зображенням стрілок  $\leftarrow$   $\rightarrow$ , що знаходяться на лицьовій панелі віртуального схемного Боде-плотера. Відповідні відліки в цифровій формі для точки перетинання візира з лінією графіка виникають у нижніх віконцях лицьової панелі приладу (див. рис. 6.10, б, в).

Програма EWB дозволяє одержати частотні характеристики, зведені на один екран. Для цього, після установки діапазонів і проведення моделювання, треба натиснути на піктограму  Display Graphs (графік на дисплеї). У результаті одержимо графіки резонансної АЧХ рис. 6.10, г, де Gain – коефіцієнт підсилення, виражений у децибелах, і ФЧХ рис. 6.10, г, де Phase – фазовий кут, виражений у градусах (Degrees). У верхній частині панелі Analysis Graphs є набір інструментів для редагування отриманих графіків. З'єднавши котушку й конденсатор паралельно, одержимо паралельний контур (рис. 6.11, а). Виконаємо команди моделювання аналогічно попередньому випадку і одержимо АЧХ і ФЧХ (рис. 6.11, б) зворотні попереднім (рис. 6.10, г).

Чотириполюсник, показаний на рис. 6.8, г, якщо обидва двополюсника є резистивними елементами, часто використовується як найпростіший подільник (атенюатор – послаблювач) напруги. Зібравши відповідну схему (рис. 6.12, а), можна переконатися, що вихідна напруга  $U_1$  стосовно вхідного  $U_2$  ділиться у відношенні  $R_2/(R_1+R_2)$ . Однак, це співвідношення порушується для навантаженого резистором  $R_3$  ділянки (рис. 6.12, б). Плавне регулювання вихідної напруги забезпечує потенціометр (рис. 6.12, в).

Три двополюсника можуть бути з'єднані послідовно (рис. 6.13, а), паралельно (рис. 6.14, а), а також утворивши змішане з'єднання (рис. 6.13, в). З них можна також утворити ще два нових триполюсника: трипроменеві зірки (рис. 6.14, а) і трикутник (рис. 6.14, б).

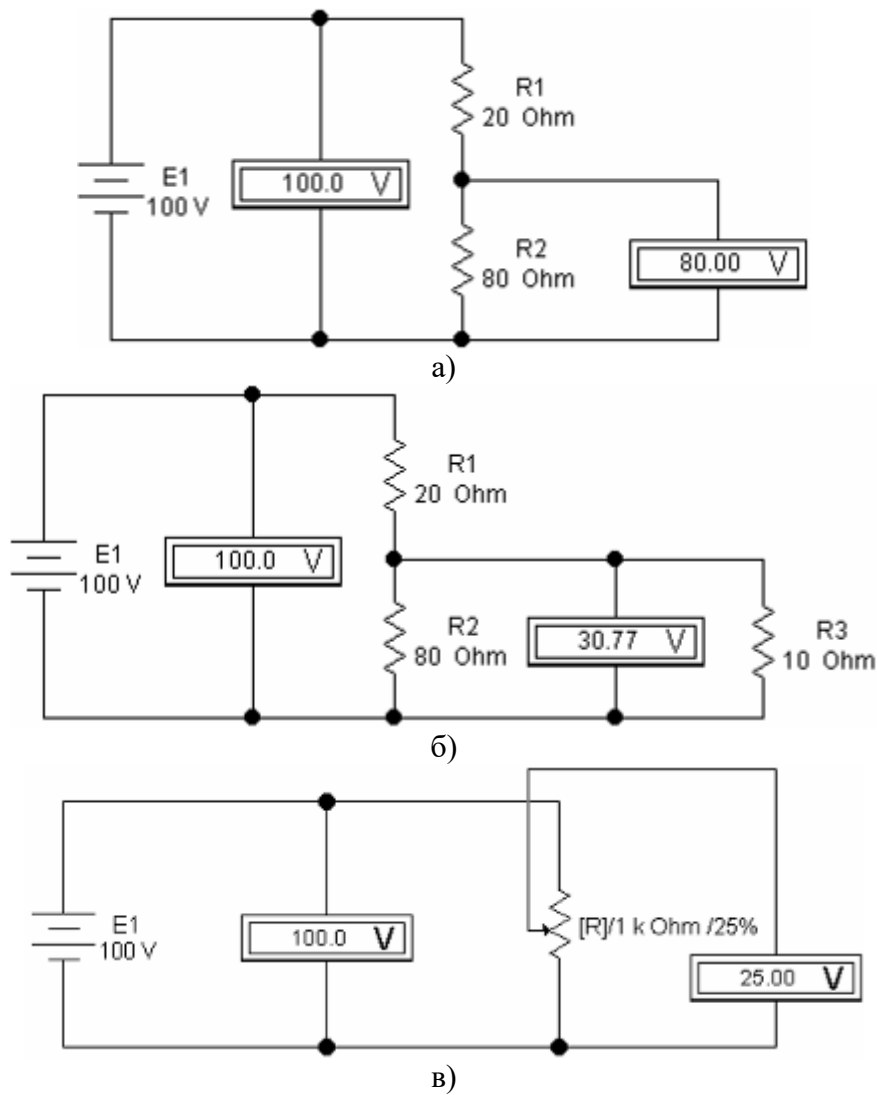


Рис. 6.12. Подільник напруги

Тут важливий не геометричний вид картин з'єднання, а сам спосіб з'єднання, хоча вони й одержали свою назву тому, що в принципі їх можна намалювати й у вигляді, що дійсно нагадує зірку й трикутник (у цьому випадку це не передбачено графічним схемним редактором).

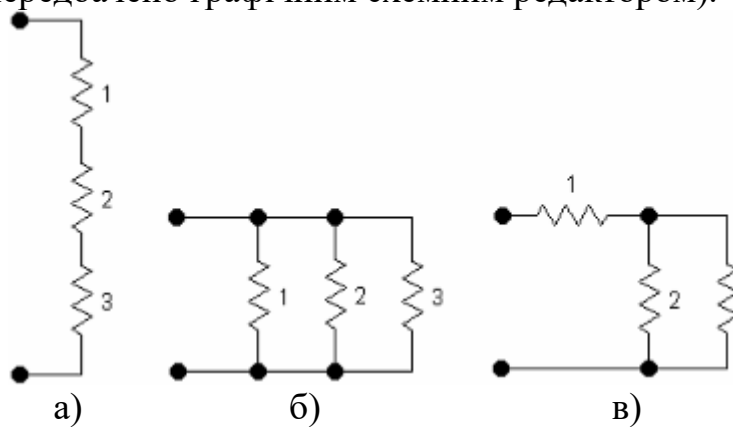


Рис. 6.13. Триелементні двополюсники

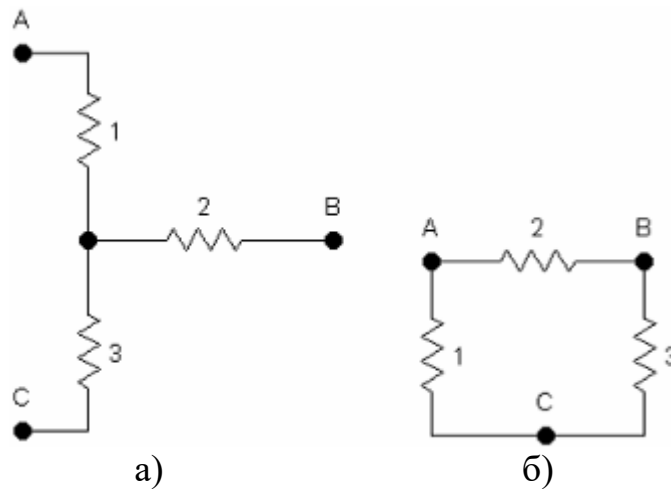


Рис. 6.14. Триелементні триполіусники

Три двополіусника можуть також бути з'єднані як П- і Т- образні чотириполіусники (рис. 6.15, а, б). Якщо вихідні двополіусники є резистивними, то чотириполіусники, що утворюються ними, виконують функції атенуаторів (послаблювачів) сигналу. Якщо ж вихідні двополіусники є частотно залежними елементами (індуктивний і ємнісними), то коло працює як пасивний фільтр.

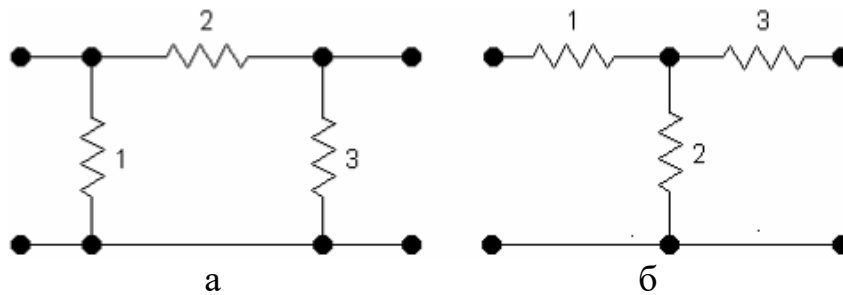


Рис. 6.15. Триелементні чотириполіусники

В електричних фільтрах відбувається необхідна частотна селекція сигналів: складові в деякій смузі пропускаються, а в іншій – затримуються.

Досліджуємо частотні характеристики П- образних фільтрів.

Зберемо симетричний фільтр, що складається з одного індуктивного й двох ємнісних елементів (рис. 6.16, а). На Бодє-плотере одержуємо АЧХ і ФЧХ (рис. 6.16, б). Видно, що фільтр, що вийшов, пропускає сигнали низької частоти, починаючи із сигналу нульової частоти, тобто з постійного струму, до сигналів з деякою граничною частотою (частотою зрізу). Тому такий фільтр зветься фільтра низької частоти (ФНЧ).

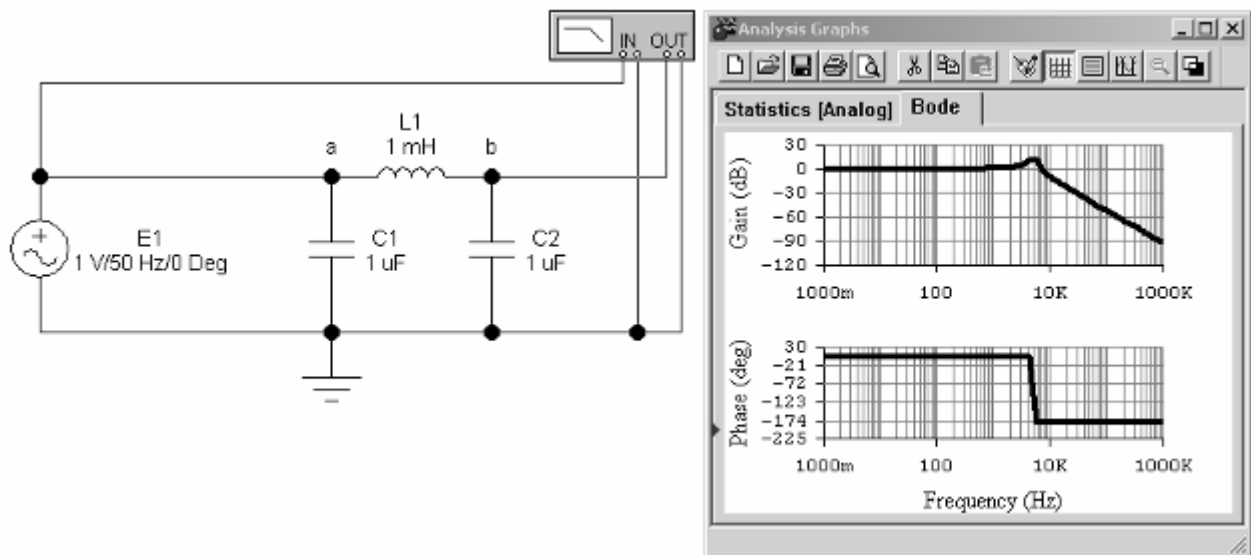


Рис. 6.16. Фільтр низької частоти

Фільтр високої частоти (ФВЧ) вийде, якщо замість «поздовжньої» індуктивності, включити ємність, а замість «поперечних» ємностей – індуктивності (див. рис. 6.17, а). Резистор R1 на схемі має підсобне значення: у його відсутність джерело напруги E1 виявляється короткозамкненим через індуктивності L1 і L2, і програма не робить розрахунків. Повторюючи моделювання, одержуємо відповідні АЧХ і ФЧХ (рис. 6.17, б).

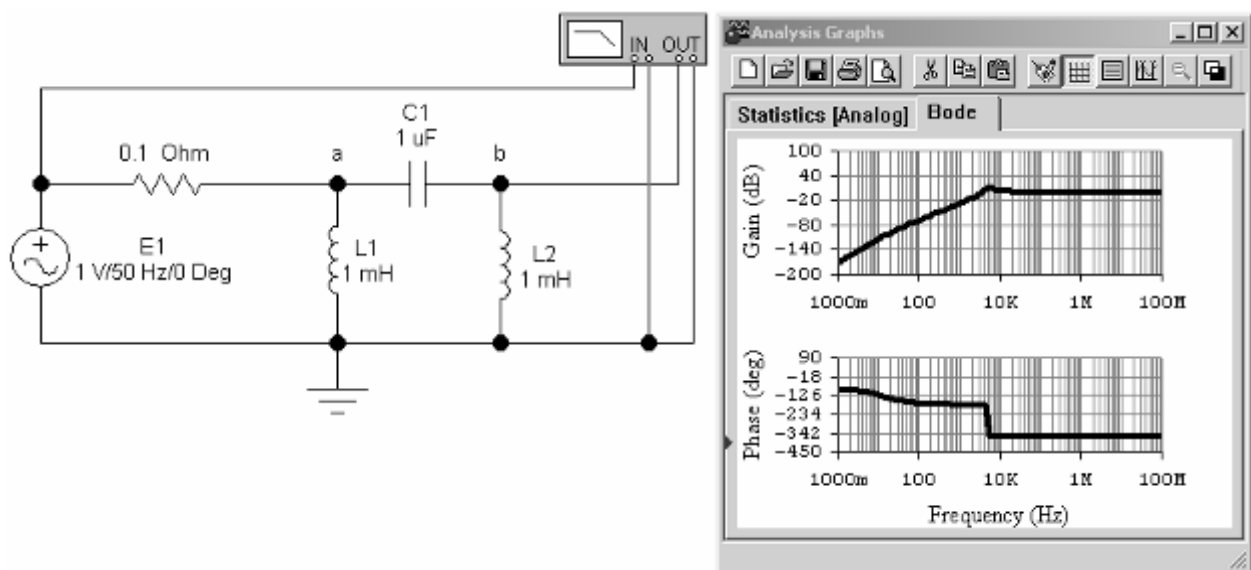


Рис. 6.17. Фільтр високої частоти

Як уже вказувалося раніше, електричною схемою заміщення можна моделювати не тільки чисто електричні кола, але й фізичні пристрої з більше складними видами перетворення енергії.

Не приводячи можливих подальших варіантів побудови багатополосників, укажемо лише на мостову структуру із чотирьох елементів (рис. 6.18, а) і приклад її реалізації з напівпровідникових діодів (рис. 6.18, б). Останній приклад показує, що треба звертати увагу не тільки на те, як намальована схема, але і як у ній з'єднані елементи, де взяті входи й виходи.



Число способів накреслення однієї й тієї ж схеми нескінченно, тому що в схемотехнічній графіці довжини сполучних провідників, їхній геометричний вид і розташування елементів не впливають на властивості схем (поки мова не йде про трасування друкованих плат і мікросхем).

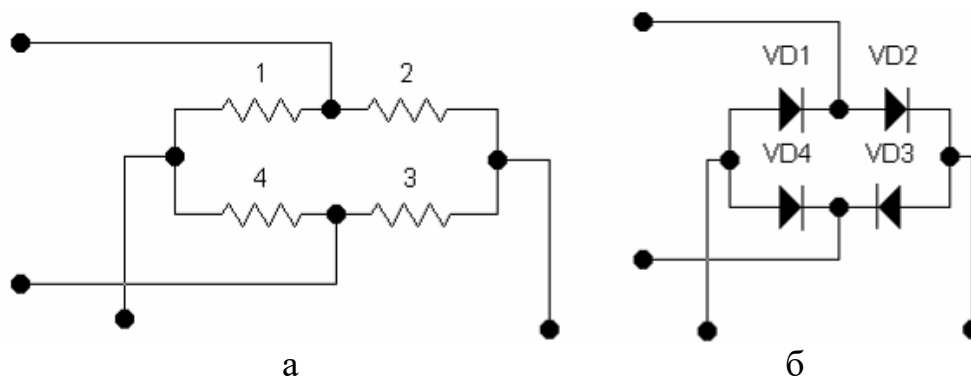


Рис. 6.18. Мостова схема

При переході до реальних кіл, наприклад до друкованих плат, ці фактори також починають впливати на характеристики пристрою за рахунок перехресних наведень, неоднорідного нагрівання й тому подібних явищ.

### 6.3 Сигнали

В електроніці розрізняють напруги й струми, що задають режими роботи кіл, як правило, це постійні величини, і електричні сигнали, що залежать від часу й несуть певну інформацію.

Аналогові електричні сигнали, на відміну від дискретних (у тому числі й цифрових), представляють у вигляді напруг і струмів, значення яких визначені в будь-який момент часу. Сам термін «аналоговий» перейшов в електроніку в спадщину від аналогових електронних машин. Ці сигнали безупинно відображають фізичні процеси, що їх породжують: вони є їхніми прямими аналогами.

Серед аналогових сигналів з ряду причин особливе місце займають синусоїдальні (гармонійні) сигнали.










По-перше, багато природних процесів підкоряються гармонійним законам.

По-друге, будь-які негармонійні сигнали можна представити певною сукупністю елементарних гармонік.


По-третє, характеристики гармонійного сигналу - амплітуда, фаза й частота - є ємними й простими інформаційними параметрами.

По-четверте, гармонійні сигнали зручні в технічній реалізації при їхній генерації, передачі, прийомі й обробці.

Програма **EWB** надає користувачеві багатий інструментарій для моделювання сигналів і поведження кіл.

Відкривши в програмі групу Source  (джерела), можна вибрати в ній по піктограмі  AC Voltage Source (джерело змінної напруги) і по піктограмі  AC Current Source (джерело змінного струму). Ці джерела допускають необхідну установку параметрів (амплітуди, частоти й початкової фази). Тут же є генератор однополярних прямокутних імпульсів, що вибирається по піктограмі  Clock (тактовий генератор), для якого можна задати максимальну напругу, частоту повторення (проходження) імпульсів і виражений в % коефіцієнт заповнення (Duty cycle), який дорівнює відношенню тривалості імпульсу до періоду його повторення. Крім того, у групі Instruments (інструменти)  перебуває ще спеціальний функціональний генератор (Function Generator), що вибирається по піктограмі . Цей генератор дозволяє створювати як гармонійні сигнали, так і періодичні послідовності знакозмінних трикутних і уніполярних прямокутних імпульсів з різними характеристиками. Залежно від того, які характеристики сигналів підлягають вимірам, у програмі використовуються різні прилади. Для виміру діючих значень синусоїдальних напруг і струмів вольтметри й амперметри встановлюють у режим виміру на змінному струмі: Mode AC (Alternate Current). Цієї ж величини можна виміряти універсальним мультиметром, натиснувши на кнопку  й відповідно на кнопку  або  на зображенні його розгорнутої лицьової панелі.

Необхідно встановлювати відповідний рід струму віртуальних вимірювальних приладів: постійний DC (за замовчуванням) або змінний AC.

Основним приладом, за допомогою якого досліджують сигнали, безумовно, є осцилограф (Oscilloscope), що має спеціальну піктограму  в групі інструментів.

Розглянемо поведінку RC-кіл, як приклад дослідження сигналів. Зберемо схему Г-подібного чотириполосника, розташували у його поздовжній вітці конденсатор  $Z = 1 \text{ нФ}$ , а в поперечній – резистор  $R = 1 \text{ кОм}$ . Одержуємо коло, що диференціює (рис. 6.19). Канал А осцилографа з'єднаємо з виходом генератора прямокутних коливань, а канал В – з виходом чотириполосника. Постійна часу  $\tau$  у секундах для RC-кола дорівнює  $\tau = R \cdot C$  (де R треба взяти в омах, а C в фарадах).

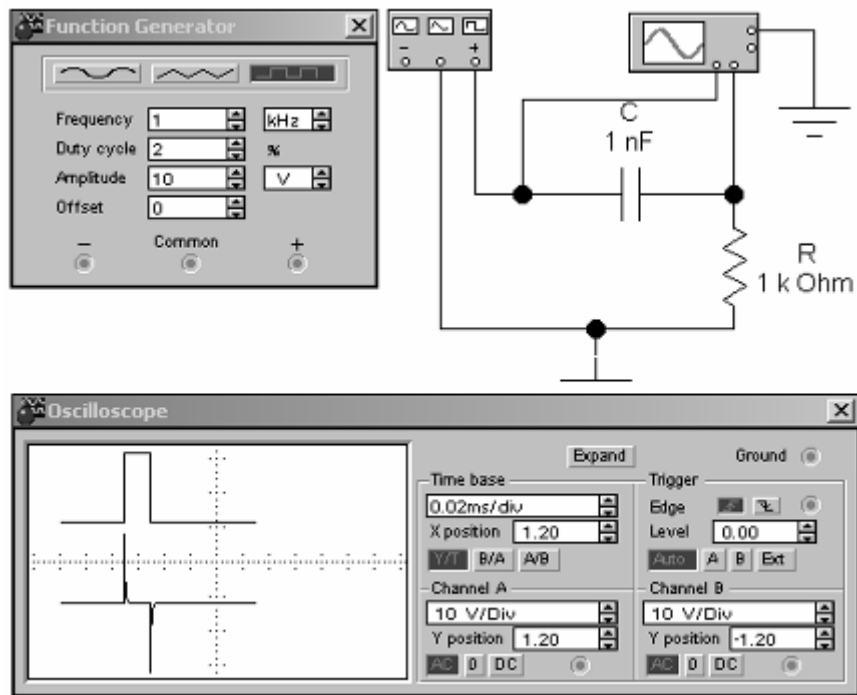


Рис. 6.19. RC-коло, що диференціює (EWB)

У наведеному прикладі  $\tau = 1000 \cdot 1 \cdot 10^{-9} \text{ s} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 1 \text{ мкс}$ . Визначимо період повторення імпульсів на панелі генератора и довжину імпульсів  $T_{\text{імп}}$  (що залежить від коефіцієнта заповнення), так щоб вони були багато більше сталої часу RC-кола. У конкретному прикладі вибрана частота 1 кГц, тобто, період повторення, як величина зворотна, складає 0,001с або 1 мс. Тоді, при коефіцієнті заповнення в 2%, одержимо  $T_{\text{імп}} = 0,02 \text{ мс} = 20 \text{ мкс}$ .

Для зручного спостереження імпульсу на екрані осцилографа вибираємо тривалість горизонтального розгорнення (Time base) 5 мкс на одну (велику) поділку шкали  $0,02 \text{ мс/div}$ . Початок  $x \text{ position } 1,60$  розгорнення зміщаємо на 1,16 поділки установкою. Чутливість вертикального розгорнення по каналах вибираємо 10 В/поділ, узгоджуючи її з величиною максимальної напруги на генераторі 10 В.

Оскільки зображення чорно-біле й ніяких додаткових міток нема, то для того, щоб промені каналів А и В не зливалися, розсовуємо їхньою установкою положення по осі Y (Y position) нагору на 1,20 і вниз на -1,20 відповідно. При проведенні моделювання можна розфарбувати кольори променів осцилограм.

Робимо також установки Y/T, Auto і AC (рис. 6.19). Нарешті, для спостереження одного кадру, увійшовши в Analysis і далі Analysis Option і Instrument, установлюємо Pause after each screen (пауза після кожного кадру). Включаємо моделювання. З характеру осцилограм (рис. 6.19) видно, що прямокутні вхідні імпульси перетворюються на виході в гострі, спадаючі за експонентою. Величина вихідної напруги приблизно дорівнює похідній від вхідної напруги за часом, якщо постійна часу кола  $\tau = R \cdot C$  менше довжини імпульсів  $T_{\text{імп}}$ .

Помінявши R і C місцями, при  $R \cdot C > T_{\text{імп}}$ , одержуємо інтегрувальне коло: вихідна напруга пропорційна інтегралу за часом від вхідної напруги (рис. 6.20).

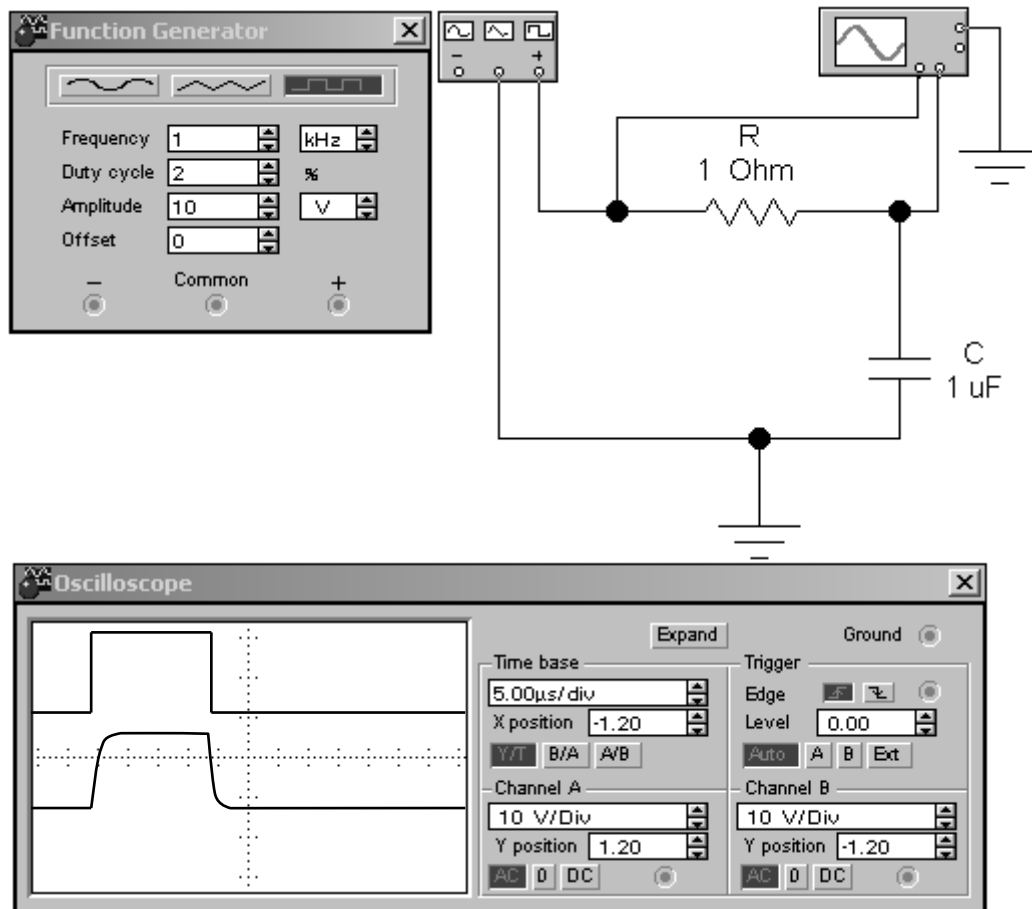


Рис. 6.20. Інтегруюче RC-коло

## 6.4 Діодні схеми

Особливість роботи діода в колі визначається в його ампер-вольтною характеристикою. На практиці її часто називають «вольт-амперною характеристикою» (ВАХ), хоча, строго говорячи, ці характеристики зворотні одна одній. Статичні характеристики діода або транзистора в діодному включенні можна одержати якщо зібрати схему відповідно до рис. 6.21.

Тут використаний функціональний генератор (Function Generator) і осцилограф (Oscilloscope) з розділу Інструменти (Instruments). Резистор R1 є струмообмежуючим, а резистор R2 – відіграє роль датчика струму (оскільки напруга на ньому відповідно до закону Ома прямо пропорційна струму, що протікає). Установки режимів генератора й осцилографа підібрані для одержання необхідної картини. Перемикаючи клавішу Space і включаючи моделювання, можна спостерігати відповідні характеристики на екрані.

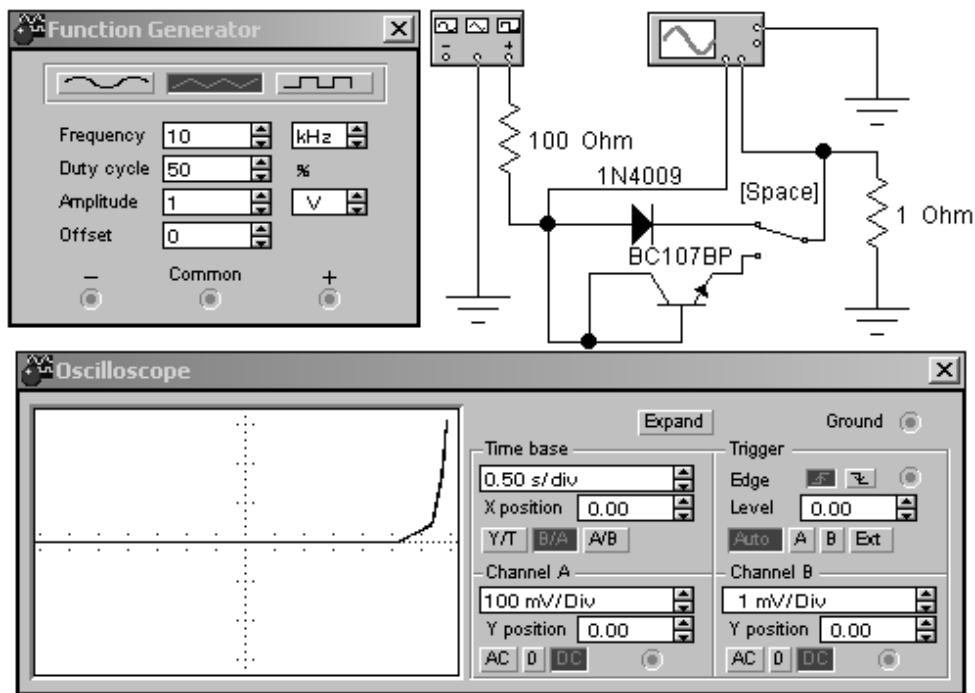


Рис. 6.21. ВАХ діода

Є також можливість спостереження їх у розширеному масштабі (рис. 6.22). Для цього треба натиснути на кнопку (розширення) на лицьовій панелі осцилографа (див. рис. 6.21). Тут же можна переустановити режими розгорнення й провести детальні виміри за допомогою двох спеціальних курсорів. Можна також одержати більше детальну картину по-іншому: увійшовши в опцію Analysis і далі Display Graphs (графік на дисплеї). Результат показаний на рис. 6.23. В останньому випадку можна розгорнути картину на весь екран, нажавши на кнопку розширення, що перебуває у вікні Analysis Graphs .

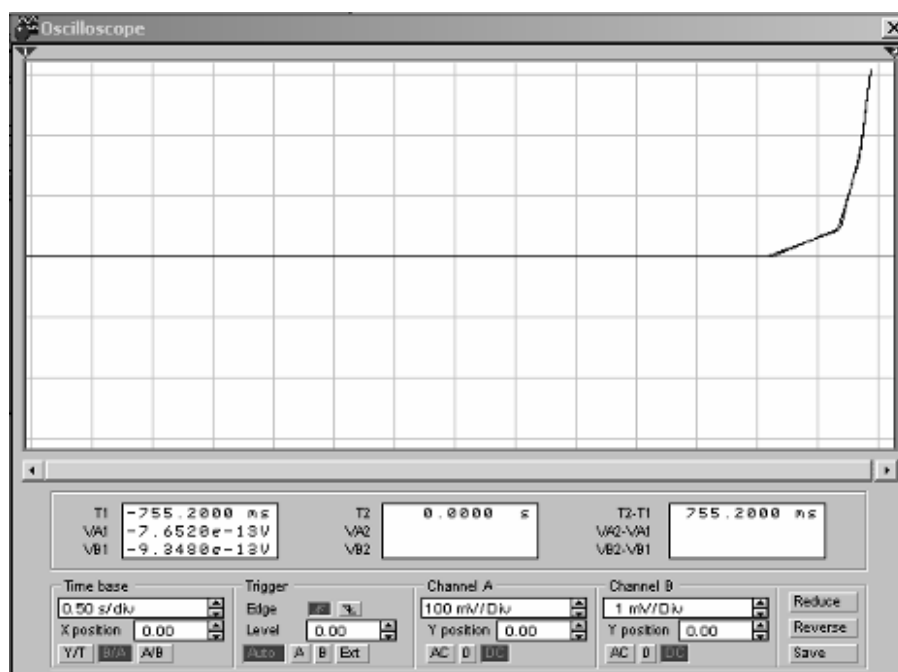


Рис. 6.22. ВАХ діода в режимі Expand

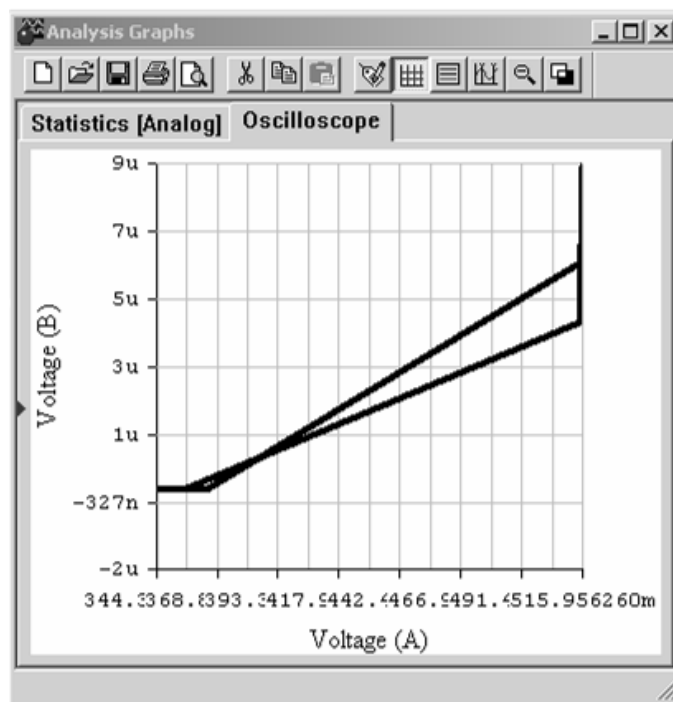


Рис. 6.23. ВАХ діода в опції Analysis

Діоди широко використовуються як елементи випрямлячів, для детектування й обмеження сигналів.

### 6.5 Однопівперіодний випрямляч

Схема без трансформатора (рис. 6.24). Віртуальні компоненти. Джерело змінної напруги E1: діюче значення напруги (Voltage) – 24 V (Вольт), частота (Frequency) – 50 Hz (Герц) і фаза (Phase) – 0 Deg (Degree – градусів).

Діод VD1 кремнієвий типу 1N4009 (аналог КД226А, КД103).

Резистор R1 -100 Ом.

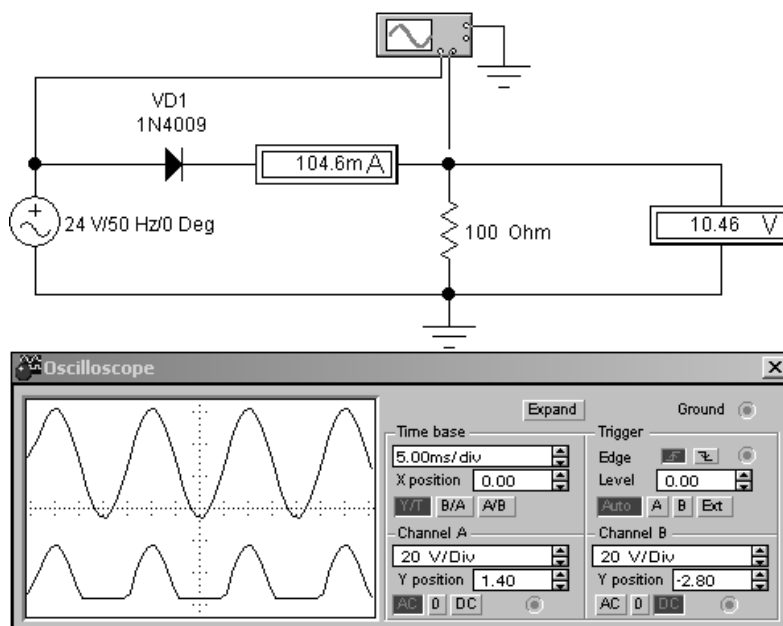


Рис. 6.24. Моделювання однопівперіодного випрямляча

Віртуальні схемні прилади.

Амперметр і вольтметр постійного струму (DC - Direct Current).

Осцилограф двопробеневий (двоканальний): тривалість горизонтального розгорнення (Time base) – 5 мс/поділ (ms/div – мілісекунд на поділ шкали); чутливість вертикального розгорнення – 20 V/div (Вольт на розподіл), канал А -верхній промінь зміщений по вертикалі (Y position) на 1,40, канал В -нижній промінь зміщений (X position) додатково вниз на – 2,80. Результати.

Прилади показують, що округлено середній струм, що протікає через навантаження (резистор R1) дорівнює 100 мА, при напрузі 10 В. Верхня осцилограма дає картину синусоїдальної напруги, прикладеної до діода, а нижня - на виході випрямляча (навантаженню). Видно, що діод «відкритий» тільки в ті півперіоди, коли на нього діє позитивна півхвиля напруги. Зіставимо ці результати з теорією. Видно, що якісна картина збігається. Розрахуємо струм через навантаження. При діючому значенні напруги 24 В амплітуда в  $\sqrt{2}$  раз більше й дорівнює приблизно 31,4 В, а середнє значення випрямленої напруги (постійна складова) для однопівперіодного випрямляча в  $\pi$  раз менше, тобто дорівнює  $31,4/\pi = 10$  В. Тоді струм у навантаженні дорівнює  $10 \text{ В} / 100 \text{ Ом} = 0,1 \text{ А} = 100 \text{ мА}$ . Таким чином, дані, отримані в результаті віртуального моделювання й теоретичного розрахунку, збігаються. Для виміру коефіцієнтів пульсацій струму й напруги можна перемкнути прилади на змінний струм АС і взяти відношення нових показань до попередніх.

Віртуальні схемні прилади (амперметр і вольтметр) мають інерцію, пов'язану із проведенням розрахунків перехідних процесів, тому при обмеженні часу спостереження їхні показання можуть бути помилковими. Наприклад, це може трапитися, якщо для спостереження одного кадру, увійшовши в Analysis і далі Analysis Option і Instrument, установити Pause after each screen (пауза після кожного кадру).

## 6.6 Схеми з понижуючим трансформатором

У моделюючій схемі, у порівнянні з розглянутими вище схемами, з'являється новий компонент – трансформатор. Крім того, джерело вхідної напруги тепер моделює живлення від однофазної мережі змінного струму, що відбивається в переустановці його параметрів. Для простоти тут обрана модель трансформатора без магнітопровода, при необхідності більше докладного моделювання реальних пристроїв треба спеціально підбирати й модель трансформатора. Параметри трансформатора вибираються так, щоб при діючому значенні напруги 220 В на первинній обмотці, на вторинній (у режимі холостого ходу, тобто без навантаження) було -24 В, що дає коефіцієнт трансформації 9. Діод і навантажувальний резистор залишаємо без змін. Все це дозволяє зберегти налаштування режимів моделювання, хоча ці вимоги не обов'язкові.

Віртуальна модель (рис. 6.25).

Віртуальні компоненти.

Джерело змінної напруги E1: діюче значення напруги (Voltage) 220 V, частота (Frequency) 50 Hz і фаза (Phase) 0 Deg (Degree - градусів).

Трансформатор T1 з коефіцієнтом трансформації 9.

Діод VD1 кремнієвий типу 1N4009.

Резистор R1 = 100 Ом.

Віртуальні схемні прилади.

Мультиметр, установлений у режим вольтметра постійного струму (DC).

Осцилограф двохпроменевий: тривалість горизонтального розгорнення (Time base) 5 мс/поділ (ms/div – мілісекунд на розподіл шкали); чутливість вертикального розгорнення 20 V/div (Вольт на поділку), канал А – верхній промінь зміщений по вертикалі на 1.40, канал В – нижній промінь зміщений відповідно на – 2.80.

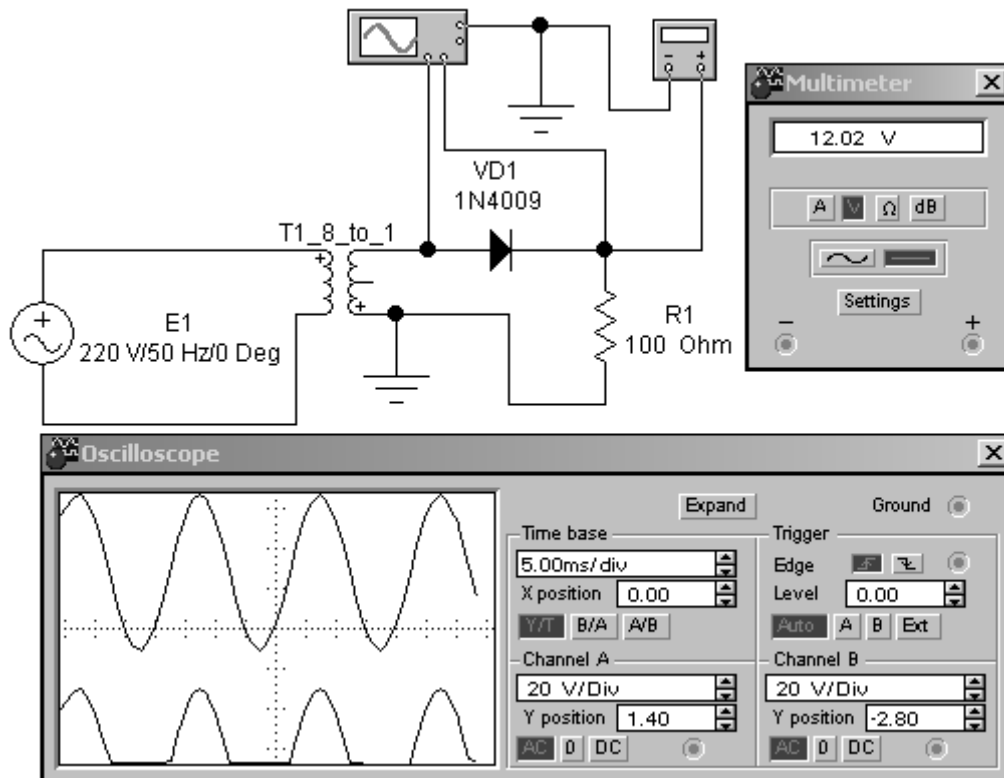


Рис. 6.25. Моделювання однопівперіодного випрямляча

Результати. Прилади показують, що округлено напруга на навантаженні (резистор R1) дорівнює 10 В. Картина на осцилографі залишилася незмінною.

## 6.7 Двопівперіодні випрямлячі

В однопівперіодних випрямлячах струм протікає в навантаженні тільки протягом половини періоду, що привде до значних пульсацій і малому ККД. Ці недоліки усуваються у випрямлячах, зібраних по двопівперіодним (двотактним) схемах: із середньою точкою.



Для двопівперіодного випрямляча із середньою точкою необхідний трансформатор, у вторинній обмотці якого є додатковий вивід від її середини (середня точка). Цей вивід звичайно заземлюють, і на ньому знаходиться негативний полюс випрямляча. Модель такого трансформатора є в EWB; вона була використана раніше (рис. 6.25). У зв'язку з особливостями зняття осцилограм щодо виводу, що заземлюється, утворимо модель складеного трансформатора із середньою точкою із двох ідентичних трансформаторів T1 і T2. Для дотримання наступності моделювання з попередніми випадками змінимо тільки коефіцієнти трансформації. Віртуальна модель в EWB (рис. 6.26).

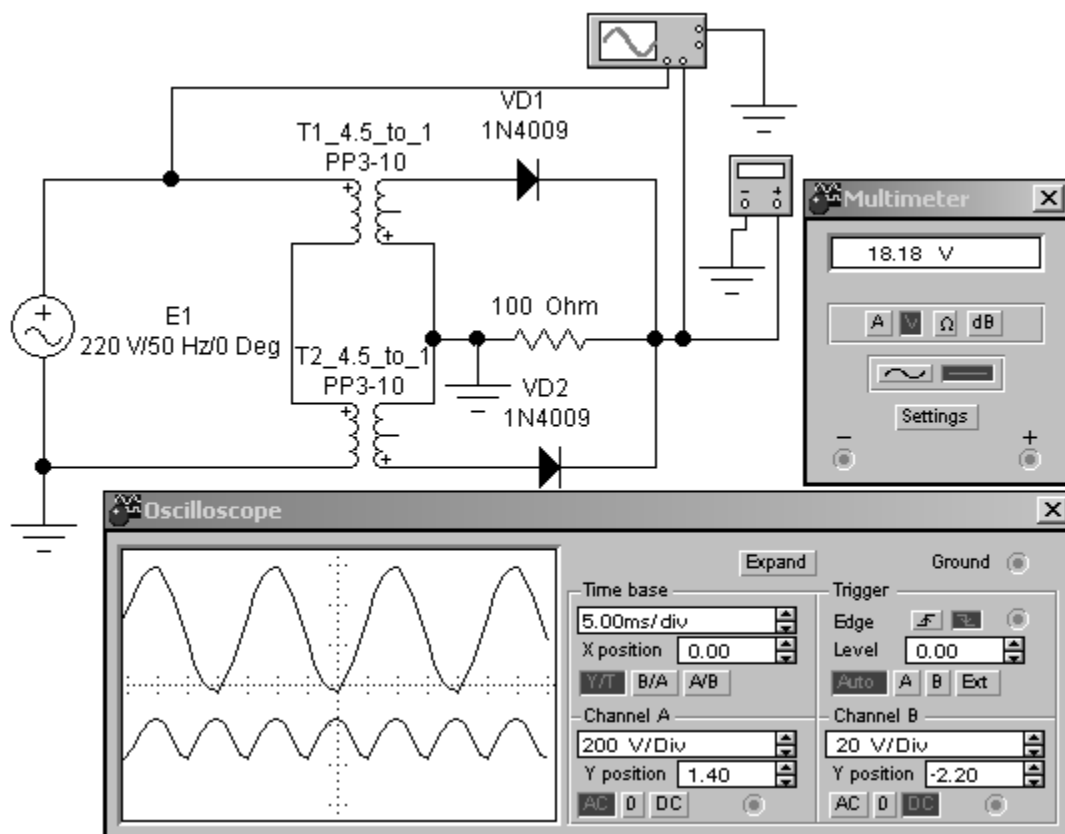


Рис. 6.26. Моделювання двопівперіодного випрямляча із середньою точкою

Віртуальні компоненти.

Джерело змінної напруги E1: діюче значення напруги (Voltage) - 220 V, частота (Frequency) - 50 Hz і фаза (Phase) - 0 Deg (Degree - градусів).

Трансформатори T1 і T2, що мають коефіцієнти трансформації 4.5.

Діоди VD1 і VD2 кремнієві типу 1N4009 .

Резистор R1 = 100 Ом.

Віртуальні схемні прилади.

Мультиметр, установлений у режим виміру вольтметром постійного струму.

Осцилограф двопроневий: тривалість горизонтального розгорнення (Time base) – 5 мс/поділ; канал А включений до живильної мережі, чутливість вертикального розгорнення – 200V/div і зсув по вертикалі на 1.40; канал В

включений до виходу випрямляча чутливість – 20 V/div і зсув відповідно на - 2.20.

Результати.

Випрямлення відбувається в обох півперіодах. Прилади показують, що округлена напруга на навантаженні (резистор R1) збільшилося у два рази й дорівнює 20 В.

# ВПРАВИ

## 1 ПЕРЕДМОВА

Наведені приклади і задачі розбиті за окремими розділами, що відповідають розділам теоретичної частини підручника. Найбільшу увагу приділено методам розрахунку електричних кіл. Задачі можуть бути використані як складова частина лабораторних робіт. Для більш поширеного вивчення методів розрахунку електричних і магнітних кіл, визначення характеристик електричних машин і трансформаторів, а також параметрів випрямлячів і підсилювачів може бути використана література [8, 9, 10, 11]. У деяких розділах використані окремі задачі з цих навчальних посібників.

## 2. КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

**Задача 2.1** Використовуючи закон Ома знайти струм у колі (рис. 2.1), яке містить джерело ЕРС, величина якого дорівнює 80 В, і два опори з'єднані послідовно, величина яких дорівнює відповідно  $R_1=5$  Ом,  $R_2=15$  Ом.

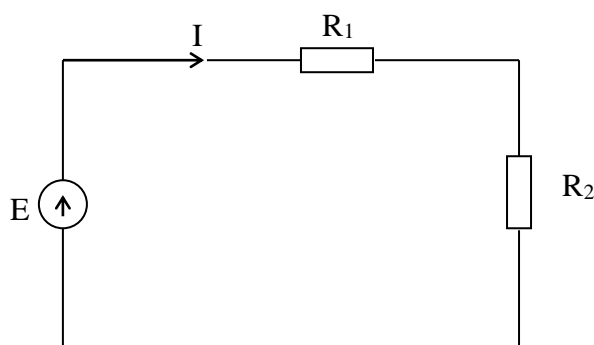
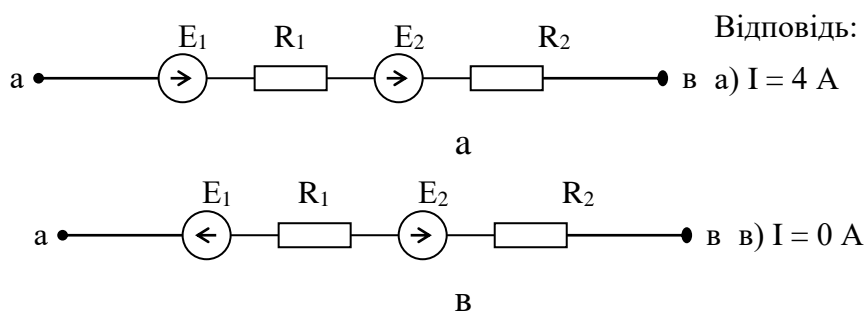


Рис. 2.1

Відповідь:  $I = 4$  А.

**Задача 2.2** До затискачів кола "а – в" прикладена напруга  $U_{ав}$ , що дорівнює 40 В, крім того у колі розташовані дві ЕРС,  $E_1=80$  В,  $E_2=40$  В і опори  $R_1=10$  Ом,  $R_2=30$  Ом. Визначити струми у вітках при різних сполученнях напрямів дії ЕРС (Рис. 2.2 а, в, с).



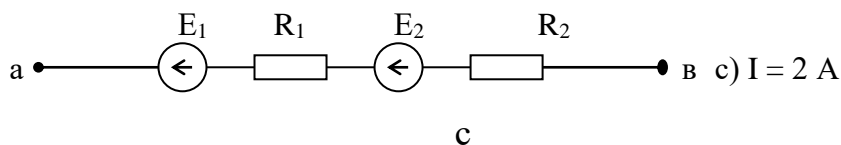


Рис. 2.2

**Задача 2.3** Для кола зображеного на рис. 2.3. визначити еквівалентний опір  $R_{\text{екв}}$  відносно затискачів "а – в", якщо опори кола мають такі величини:  $R_1=4$  Ом,  $R_2=3$  Ом,  $R_3=6$  Ом,  $R_4=2$  Ом,  $R_5=4$  Ом,  $R_6=4$  Ом,  $R_7=9$  Ом.

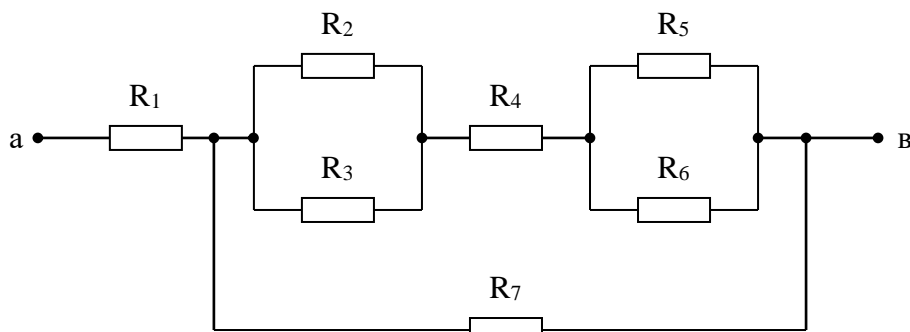


Рис. 2.3.

Відповідь:  $R_{\text{екв}}=7,6$  Ом

**Задача 2.4** Визначити струми у вітках і напруги на ділянках кола  $U_{\text{ав}}, U_{\text{вс}}, U_{\text{cd}}$ ; зображеного на рис. 2.4, якщо опори мають величині:  $R_1=12$  Ом,  $R_2=30$  Ом,  $R_3=24$  Ом,  $R_4=40$  Ом,  $R_5=14$  Ом,  $R_6=6$  Ом, а напруга, що прикладена до затискачів  $U_{\text{ад}}$  дорівнює 80 В.

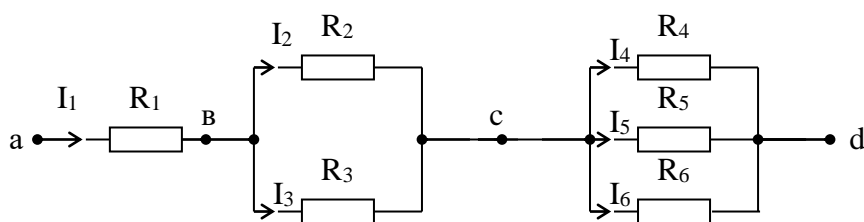


Рис. 2.4.

Відповідь:  $U_{\text{ав}}=32,95$  В,  $U_{\text{вс}}=36,61$  В,  $U_{\text{cd}}=10,44$  В  
 $I_1=2,7458$  А,  $I_2=1,2203$  А,  $I_3=1,5254$  А  
 $I_4=0,2609$  А,  $I_5=0,7453$  А,  $I_6=1,7398$  А.

**Задача 2.5** Визначити еквівалентний опір кола (рис. 2.5) відносно затискачів "а – в", якщо опори елементів кола мають такі величини:  $R_1=2$  Ом,  $R_2=5$  Ом,  $R_3=4$  Ом,  $R_4=6$  Ом,  $R_5=10$  Ом,  $R_6=10$  Ом.

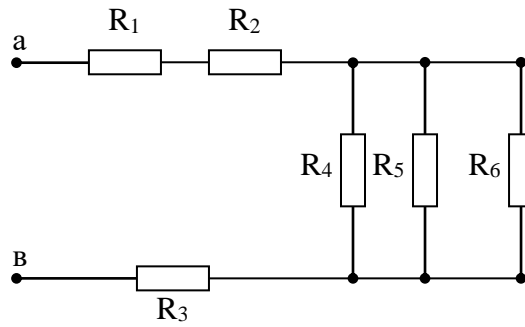


Рис. 2.5.

Відповідь: 13,73 Ом.

**Задача 2.6** Напруга, що прикладена до затискачів кола (рис. 2.6) дорівнює  $U_{ab}=220$  В. Знайти розподіл струмів у вітках кола, якщо опори мають такі величини:  $R_1=1$  Ом,  $R_2=8$  Ом,  $R_3=10$  Ом,  $R_4=2$  Ом,  $R_5=10$  Ом,  $R_6=3$  Ом.

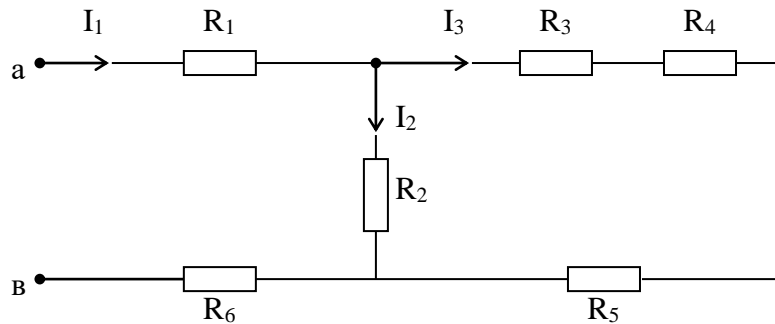


Рис.2.6.

Відповідь:  $I_1=24,57$ А,  $I_2=15,21$ А,  $I_3=9,36$ А.

**Задача 2.7** Коло, зображене на рис. 2.7, складене з опорів, величини яких дорівнюють:  $R_1=5$  Ом,  $R_2=3$  Ом,  $R_3=2$  Ом,  $R_4=4$  Ом,  $R_5=4$  Ом,  $R_6=4$  Ом. У вітці “ $a - b$ ” тече струм  $I_1=5$ А, а у вітці “ $c - f$ ”  $I_2=8$ А. Визначити різницю потенціалів між токами “ $a - f$ ”, “ $f - e$ ”, “ $e - a$ ”.

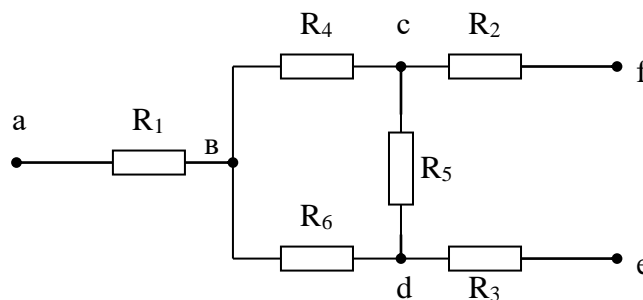


Рис. 2.7.

Відповідь:  $U_{a-f} = 4,75$  В       $U_{f-e} = 8,75$  В       $U_{e-a} = 13,5$  В

**Задача 2.8** Коло (рис. 2.8) складене з опорів, величини яких дорівнюють:  $R_1 = 2 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 1 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 2 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 3 \text{ Ом}$ ,  $R_5 = 3 \text{ Ом}$ ,  $R_6 = 6 \text{ Ом}$ . До точок  $a$ ,  $c$  підключене джерело ЕРС, величина якого дорівнює  $20 \text{ В}$ . Визначити струми, що течуть через опори.

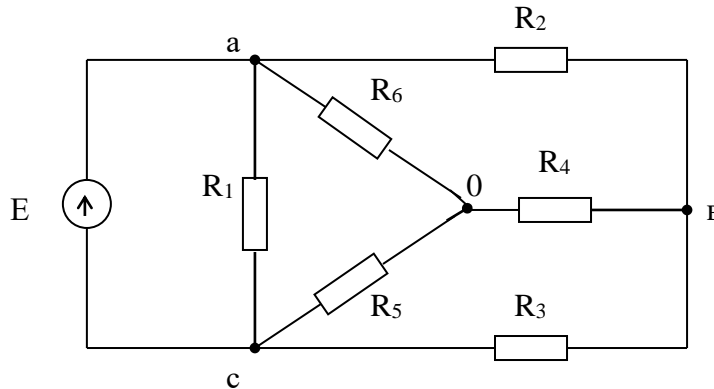


Рис. 2.8.

Відповідь:  $I_1 = 9,98 \text{ А}$ ,  
 $I_2 = 7,435 \text{ А}$   
 $I_3 = 6,261 \text{ А}$   
 $I_4 = 1,174 \text{ А}$   
 $I_5 = 3,001 \text{ А}$   
 $I_6 = 1,827 \text{ А}$ .

**Задача 2.9** Користуючись методом розрахунку розгалужених кіл за законами Кірхгофа визначити струми у вітках кола (рис 2.9.), якщо елементи кола містять такі величини:  $E_1 = 20 \text{ В}$ ,  $E_2 = 25 \text{ В}$ ,  $E_3 = 40 \text{ В}$ ,  $R_1 = 5 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 70 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 12 \text{ Ом}$ .

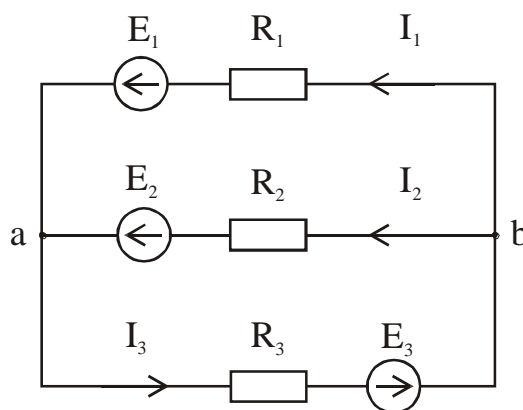


Рис. 2.9.

Відповідь:  $I_1 = 5,362 \text{ А}$ ,  $I_2 = 2,597 \text{ А}$ ,  $I_3 = 2745 \text{ А}$ .

**Задача 2.10** Застосовуючи метод накладання визначити струми у вітках кола (рис. 2.10) при різних напрямках дії електрорушійних сил. Елементи, що

складають коло мають такі величини:  $E_1 = 8 \text{ В}$ ,  $E_2 = 5 \text{ В}$ ,  $R_1 = 3 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 5 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 6 \text{ Ом}$ .

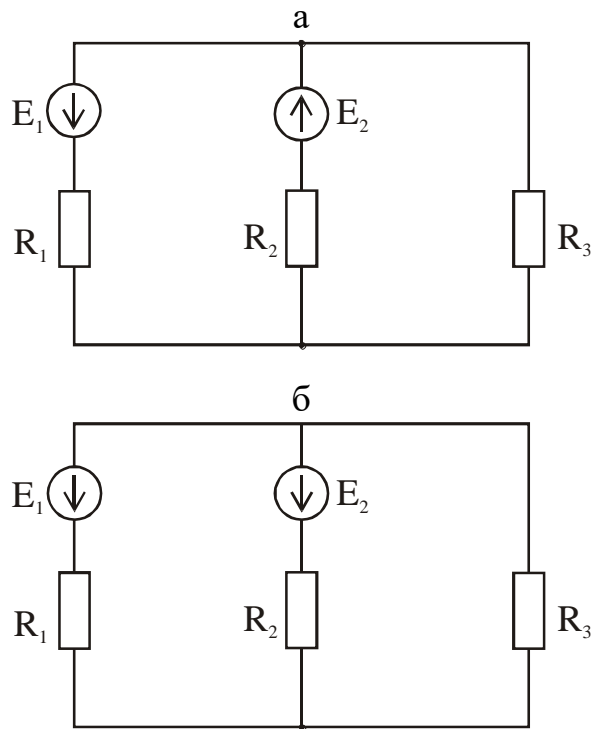


Рис. 2.10.

Відповідь: а)  $I_1 = 1,958 \text{ А}$ ;  $I_2 = 1,519 \text{ А}$ ;  $I_3 = 0,349 \text{ А}$   
 б)  $I_1 = 0,825 \text{ А}$ ;  $I_2 = 0,095 \text{ А}$ ;  $I_3 = 0,920 \text{ А}$

**Задача 2.11** Для кола наведеного на рис. 2.11, визначити напругу між точками а – б і струмами, що течуть у вітках. Відомо, що  $E_1 = 127 \text{ В}$ ,  $E_2 = 65 \text{ В}$ ,  $E_3 = 110 \text{ В}$ ,  $R_1 = 6 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 12 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 10 \text{ Ом}$ .

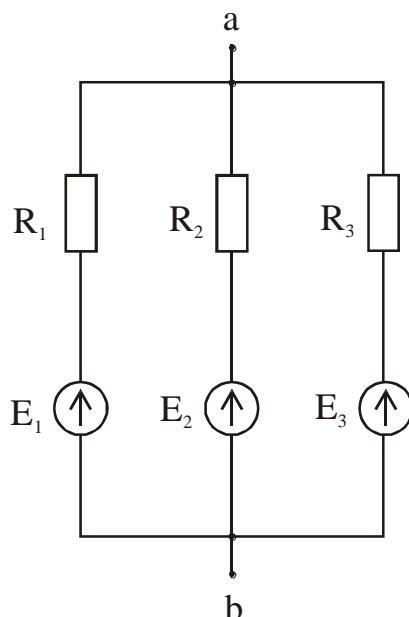


Рис 2.11.

Відповідь:  $I_1 = 3,269 \text{ A}$ ;  $I_2 = 3,531 \text{ A}$ ;  $I_3 = 0,262 \text{ A}$ ;  $U_{ab} = 107,4 \text{ В}$ .

**Задача 2.12** Визначити струми у вітках кола (рис. 2.12) користуючись методом контурних струмів, якщо величини елементів кола мають такі значення:  $E_1 = 20 \text{ В}$ ,  $E_4 = 30 \text{ В}$ ,  $R_1 = 1 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 2 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 3 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 1 \text{ Ом}$ ,  $R_5 = 2 \text{ Ом}$ .

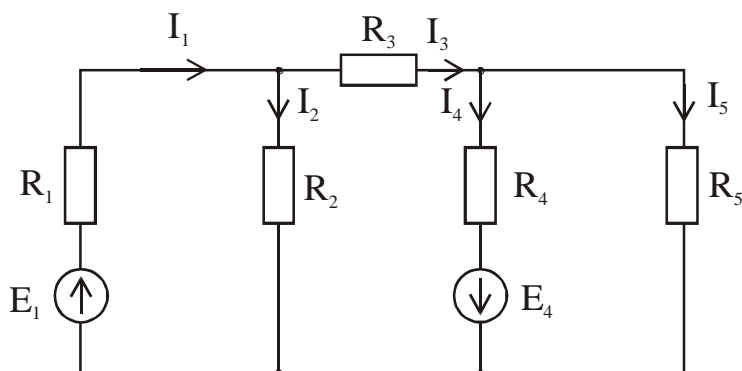


Рис 2.12.

Відповідь:  $I_1 = 11,79 \text{ A}$ ;  $I_2 = 4,098 \text{ A}$ ;  $I_3 = I_4 = 15,12 \text{ A}$ ;  $I_5 = 7,429 \text{ A}$ .

**Задача 2.13** Для кола, зображеного на рис 2.13, визначити струми у вітках користуючись методом контурних струмів. Елементи кола мають такі параметри:  $E_1 = 70 \text{ В}$ ,  $E_2 = 15 \text{ В}$ ,  $E_3 = 10 \text{ В}$ ,  $E_4 = 20 \text{ В}$ ,  $R_1 = 5 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 8 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_5 = 3 \text{ Ом}$ .

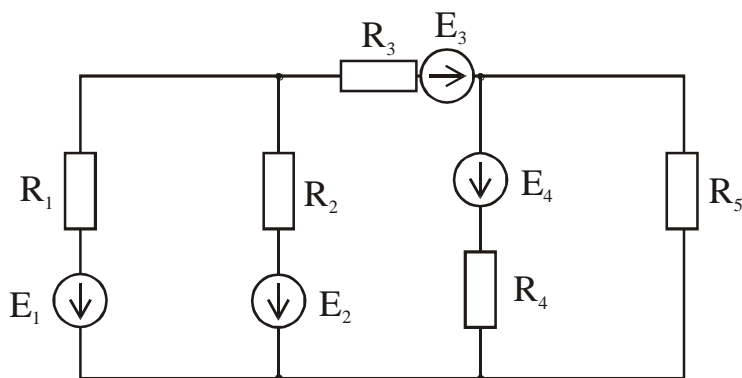


Рис. 2.13.

Відповідь:  $I_1 = 5,477 \text{ A}$ ;  $I_2 = 2,761 \text{ A}$ ;  $I_3 = 2,716 \text{ A}$ ;  $I_4 = 0,911 \text{ A}$ ;  
 $I_5 = 3,627 \text{ A}$ .

**Задача 2.14** Визначити струми у вітках кола (рис. 2.14) використовуючи метод суперпозиції та контурних струмів. Елементи кола мають такі параметри:  $E_1 = 120 \text{ В}$ ,  $E_4 = 200 \text{ В}$ ,  $R_1 = 50 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 70 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 150 \text{ Ом}$ ,  $R_5 = 60 \text{ Ом}$ .



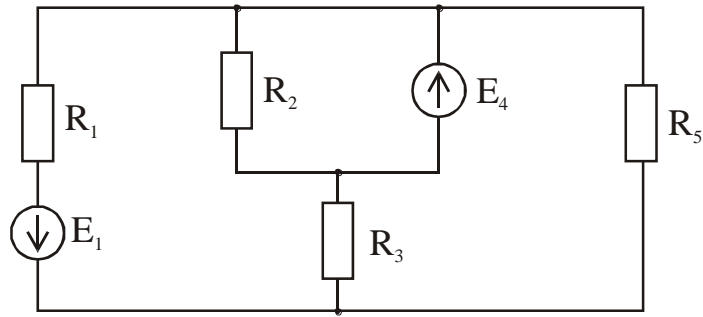


Рис. 2.14.

Відповідь:  $I_1 = 1,908 \text{ A}$ ;  $I_2 = 2,857 \text{ A}$ ;  $I_3 = 1,497 \text{ A}$ ;  $I_4 = 4,354 \text{ A}$ ;  
 $I_5 = 0,410 \text{ A}$ .

**Задача 2.15** На рис. 2.15 наведена схема розгалуженого кола, ЕРС джерел і опори резисторів мають такі величини:  $E_1 = 80 \text{ В}$ ,  $E_2 = 60 \text{ В}$ ,  $E_4 = 100 \text{ В}$ ,  $E_5 = 70 \text{ В}$ ,  $E_6 = 20 \text{ В}$ ,  $R_1 = 1 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 2 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 3 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 2 \text{ Ом}$ ,  $R_5 = 1 \text{ Ом}$ ,  $R_6 = 3 \text{ Ом}$ . Визначити струми у вітках користуючись методом контурних струмів.

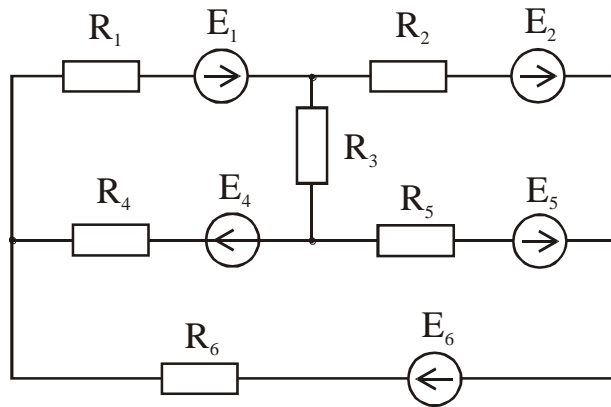


Рис. 2.15.

Відповідь:  $I_1 = 49,55 \text{ А}$ ;  $I_2 = 26,32 \text{ А}$ ;  $I_3 = 23,24 \text{ А}$ ,  $I_4 = 30,31 \text{ А}$ ,  
 $I_5 = 7,075 \text{ А}$ ,  $I_6 = 19,24 \text{ А}$ .

**Задача 2.16** Для кола зображеного на рис. 2.16 відомі параметри елементів, що його складають:  $E_5 = 200 \text{ В}$ ,  $E_6 = 150 \text{ В}$ ,  $R_1 = 20 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 30 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 10 \text{ Ом}$ . Визначити струми у вітках користуючись методом накладання.

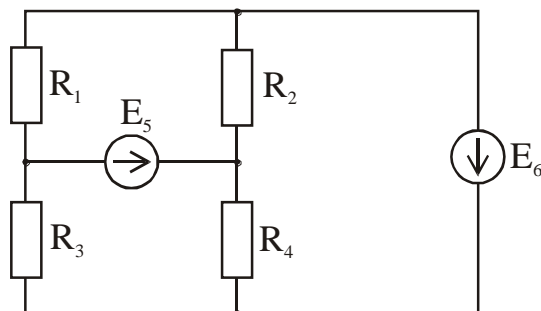


Рис. 2.16.

Відповідь:  $I_1 = 1,6 \text{ A}$ ;  $I_2 = 5,6 \text{ A}$ ;  $I_3 = 4,8 \text{ A}$ ,  $I_4 = 0,8 \text{ A}$ ,  $I_5 = 6,4 \text{ A}$ ,  
 $I_6 = 4,0 \text{ A}$ .

**Задача 2.17** У колі (рис. 2.17) найпростішим методом визначити струми у вітках, якщо відомі ЕРС джерел і опори резисторів:  $E_1 = 60 \text{ В}$ ,  $E_2 = 40 \text{ В}$ ,  $E_3 = 30 \text{ В}$ ,  $R_1 = 8 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 12 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 16 \text{ Ом}$ .

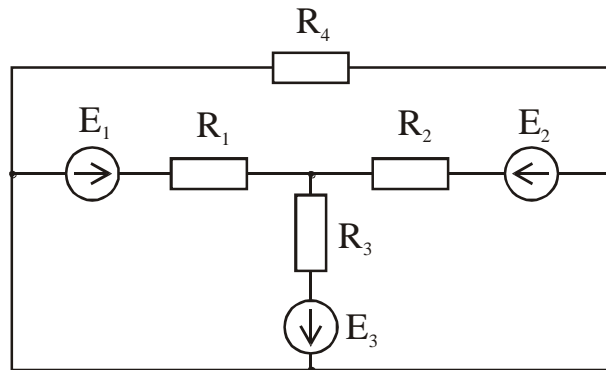


Рис. 2.17.

Відповідь:  $I_1 = 3,85 \text{ A}$ ;  $I_2 = 1,081 \text{ A}$ ;  $I_3 = 4,932 \text{ A}$ ,  $I_4 = 0 \text{ A}$ ,  $I_6 = 4,0 \text{ A}$ .

**Задача 2.18** Використовуючи найпростіший метод розрахунку кіл визначити величини електрорушійних сил, що містяться у колі наведеному на рис. 2.18. Величини струмів у вітках дорівнюють:  $I_1 = 3,85 \text{ A}$ ,  $I_2 = 15,38 \text{ A}$ ,  $I_3 = 11,53 \text{ A}$ , а опори мають величини:  $R_1 = 6 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 4 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 8 \text{ Ом}$ .

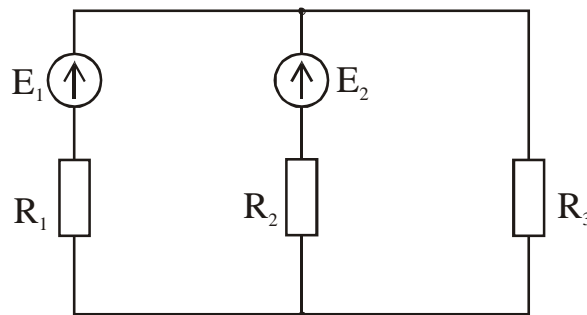


Рис. 2.18.

Відповідь:  $E_1 = 146,14 \text{ В}$ ,  $E_2 = 169,16 \text{ В}$ .

**2.19** На рис. 2.19 наведена схема нерозгалуженого кола з двома джерелами, електрорушійні сили яких дорівнюють  $E_1 = 18 \text{ В}$ , і  $E_2 = 12 \text{ В}$ . Опори мають такі величини:  $R_1 = 6 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 4 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 2 \text{ Ом}$ . Визначити струм, що протікає у колі, і потенціали точок та побудувати потенціальну діаграму.

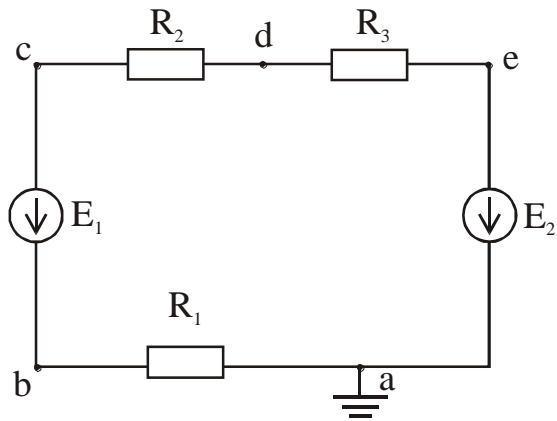


Рис. 2.19.

Відповідь:  $I = 0,5 \text{ A}$ ,  $\varphi_a = 0 \text{ В}$ ,  $\varphi_b = 3 \text{ В}$ ,  $\varphi_c = -15 \text{ В}$ ,  $\varphi_d = -13 \text{ В}$ ,  $\varphi_e = -12 \text{ В}$ .

**Задача 2.20** Електричне коло (рис. 2.20.1) має три вітки і два вузли. Величини елементів, що складають коло, дорівнюють:  $E_1 = 10 \text{ В}$ ,  $E_2 = 7 \text{ В}$ ,  $R_1 = 50 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 100 \text{ Ом}$ . Визначити струми у вітках методами рівнянь Кірхгофа, контурних струмів, накладання і вузлових потенціалів.

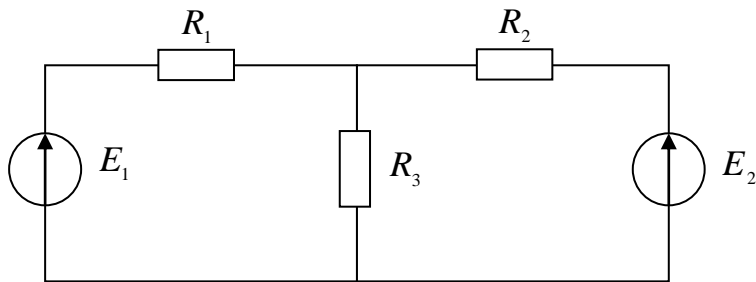


Рис. 2.20.

Розв'язання

1. Визначимо струми методом рівнянь Кірхгофа, для чого довільно виберемо напрями струмів у вітках (рис. 2.21)

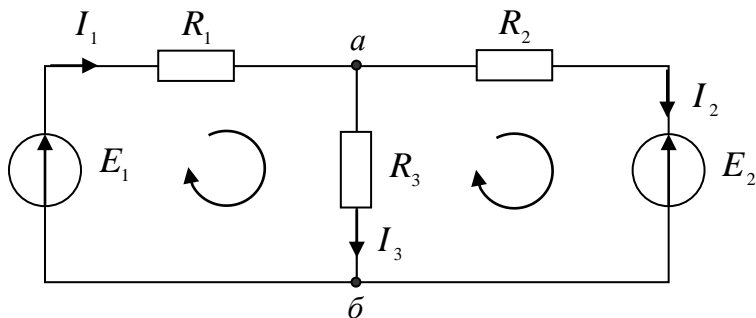


Рис. 2.21.

Так як невідомих три ( $I_1, I_2, I_3$ ), то треба скласти три рівняння. Перше рівняння складаємо за першим законом Кірхгофа для вузла „а”.

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

Взагалі кількість рівнянь, що складається за першим законом Кірхгофа дорівнює кількості вузлів мінус одиниця

$$N_{\text{рівн}} = N_{\text{вуз}} - 1$$

За другим законом Кірхгофа кількість рівнянь дорівнює кількості незалежних контурів, або

$$N_{\text{рівн}} = N_{\text{віток}} - N_{\text{вуз}} + 1$$

Тобто від кількості віток віднімають кількість рівнянь, що складені за першим законом Кірхгофа.

Для того, щоб скласти рівняння за другим законом Кірхгофа треба довільно вибрати напрями обходу контурів. Вибираємо одностайні напрями у кожному з контурів за годинниковою стрілкою.

Рівняння складені за другим законом Кірхгофа будуть мати вигляд:

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 = E_1$$

$$I_2 R_2 - I_3 R_3 = -E_2$$

Знак плюс перед добутком  $I \cdot R$  ставиться тоді, якщо напрям обходу і напрями струму у вітці сходяться, а мінус тоді коли вони мають протилежні напрями. Це правило стосується і знаків при ЕРС тобто, якщо напрям дії ЕРС сходиться з напрямом обходу контуру, то ЕРС у правій частині рівнянь має знак плюс, якщо вони мають протилежні напрями, то знак мінус.

Таким чином маємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} I_1 - I_2 - I_3 = 0 \\ I_1 R_1 + I_3 R_3 = E_1 \\ I_2 R_2 - I_3 R_3 = -E_2 \end{cases}$$

Підставляємо значення параметрів елементів і вирішуємо систему рівнянь.

$$\begin{cases} I_1 - I_2 - I_3 = 0 \\ I_1 50 + I_3 100 = 10 \\ I_2 100 - I_3 100 = -7 \end{cases}$$

Підставляємо у друге рівняння вираз для струму  $I_1$ , який одержуємо з першого рівняння

$$I_1 = I_2 + I_3$$

$$(I_1 + I_3) 50 + I_3 100 = 10$$

$$I_2 100 - I_3 100 = -7$$

Одержуємо систему з двох рівнянь

$$I_1 50 + I_3 150 = 10$$

$$I_2 100 - I_3 100 = -7$$

Помножимо перше рівняння на 2 і віднімемо від нього друге рівняння. Маємо

$$I_3 \cdot 400 = 27 \quad I_3 = \frac{27}{400} = 0,0675 \text{ A}$$

Підставляючи значення  $I_3$  у друге і третє рівняння визначаємо

$$I_1 = 0,065 \text{ A}$$

$$I_2 = -0,0025 \text{ A}$$

### 2.20.2 Метод контурних струмів.

У цьому методі виходять з умови, що у кожному контурі тече незалежний від суміжних контурів електричний струм, а струми віток визначаються алгебраїчною сумою струмів контуру, що розглядається, і суміжних контурів, для яких вітка є загальною.

Система рівнянь контурних струмів  $I_{11}, I_{22}, I_{33}$  у загальному вигляді для схеми з трьома незалежними контурами має вигляд:

$$I_{11}R_{11} + I_{22}R_{12} + I_{33}R_{13} = E_{11},$$

$$I_{11}R_{21} + I_{22}R_{22} + I_{33}R_{23} = E_{22},$$

$$I_{11}R_{31} + I_{22}R_{32} + I_{33}R_{33} = E_{33}.$$

Струм у окремій вітці дорівнює різниці або сумі контурних струмів суміжних контурів, для яких ця вітка є загальною, в залежності від напрямку струмів у цій вітці.

Визначимо струми у вітках наведеної раніше схеми (рис. 2.22) методом контурних струмів.

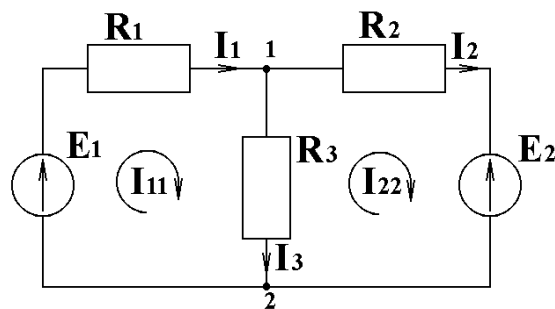


Рис. 2.22

Розв'язання:

Наведена схема рис. 2.22 має два незалежних контури. Довільно вибираємо позитивні напрями контурних струмів і позначаємо їх на схемі. Для кожного з контурів складаємо рівняння і одержуємо, таким чином, систему рівнянь, в яких невідомими є контурні струми:

$$\begin{cases} I_{11}R_{11} + I_{22}R_{12} = E_{11}, \\ I_{11}R_{21} + I_{22}R_{22} = E_{22}, \end{cases}$$

де:  $R_{11} = R_1 + R_3 = 150 \text{ Ом}$  – власний опір першого контуру;

$R_{22} = R_2 + R_3 = 200 \text{ Ом}$  – власний опір другого контуру;

$E_4 = 100 \text{ В}$ , Ом – опір суміжної вітки між 1 і 2 контурами. Знак мінус ставиться у тому випадку, коли контурні струми течуть через опір назустріч.

$E_{11} = E_1 = 10 \text{ В}$ - контурна ЕРС 1-го контуру;

$E_{22} = -E_2 = -7 \text{ В}$ - контурна ЕРС 2-го контуру.

Підставляємо цифрові значення у систему і вирішуємо її:

$$\begin{cases} 150I_{11} - 100I_{12} = 10 \\ -100I_{21} + 200I_{22} = -7 \end{cases}$$

$$\Delta_{11} = \begin{vmatrix} 10 & -100 \\ -7 & 200 \end{vmatrix} = 1300; \quad \Delta_{22} = \begin{vmatrix} 150 & 10 \\ -100 & -7 \end{vmatrix} = -50;$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} 150 & -100 \\ -100 & 200 \end{vmatrix} = 20000.$$

$$I_{11} = \frac{\Delta_{11}}{\Delta} = 0,065 \text{ А}; \quad I_{22} = \frac{\Delta_{22}}{\Delta} = -0,0025 \text{ А}.$$

Визначаємо струми у вітках схеми:

$$I_1 = I_{11} = 0,065 \text{ А};$$

$$I_2 = I_{22} = -0,0025 \text{ А};$$

$$I_3 = I_{11} - I_{22} = 0,0675 \text{ А}.$$

### 2.2.3 Метод накладання (суперпозиції)

Метод накладання базується на принципі накладання, який формулюється таким чином. Струм будь-якої вітки електричного кола дорівнює алгебраїчній сумі струмів, викликаних дією кожного джерела окремо.

Для схеми кола (рис. 2.20.4) струм методом накладання визначається у такій послідовності.

1. Визначаємо струми, які виникають у колі від дії ЕРС  $E_1$  (рис. 2.23)

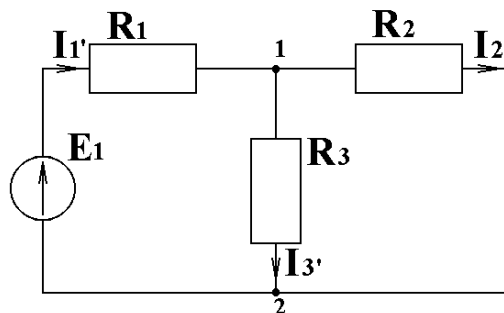


Рис. 2.23

$$I'_1 = \frac{E_1}{R_1 + R_2 R_3 / (R_2 + R_3)} = \frac{10}{50 + 100 \cdot 100 / (100 + 100)} = 0,1 \text{ А};$$

$$I'_2 = I'_1 \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 0,1 \frac{100}{100 + 100} = 0,05 \text{ А};$$

$$I'_3 = I'_1 \frac{R_2}{R_2 + R_3} = 0,1 \frac{100}{100 + 100} = 0,05 \text{ A.}$$

2. Визначаємо струми, що течуть у колі від дії ЕРС  $E_2$  (рис. 2.24).

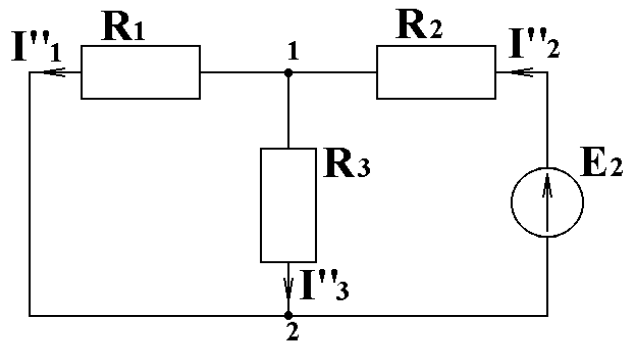


Рис. 2.24

$$I_2'' = \frac{E_1}{R_2 + R_1 R_3 / (R_1 + R_3)} = \frac{7}{100 + 50 \cdot 100 / (50 + 100)} = 0,0525 \text{ A;}$$

$$I_1'' = I_2'' \frac{R_3}{R_1 + R_3} = 0,0525 \cdot 100 / (50 + 100) = 0,035 \text{ A;}$$

$$I_3'' = I_2'' \frac{R_1}{R_1 + R_3} = 0,0525 \cdot 50 / (50 + 100) = 0,0175 \text{ A.}$$

Дійсні струми у вітках дорівнюють:

$$I_3 = I_3' + I_3'' = 0,05 + 0,0175 = 0,0675 \text{ A;}$$

$$I_2 = I_2'' - I_2' = 0,0525 - 0,05 = 0,0025 \text{ A;}$$

$$I_1 = I_1' - I_1'' = 0,1 + 0,035 = 0,065 \text{ A.}$$

#### 2.2.4 Метод вузлових потенціалів

За цим методом визначаються потенціали вузлів при заданому нульовому значенні потенціалу будь-якого вузла кола. Метод значно спрощує розрахунки, у порівнянні з методом контурних струмів, коли кількість незалежних вузлів розгалуженого кола менше кількості незалежних контурів.

Основою метода є 1-й закон Кірхгофа і закон Ома.

Система рівнянь для трьох незалежних вузлів має вигляд:

$$\begin{cases} \varphi_1 G_{11} - \varphi_2 G_{12} - \varphi_3 G_{13} = I_{11} \\ -\varphi_1 G_{21} + \varphi_2 G_{22} - \varphi_3 G_{23} = I_{22}, \\ -\varphi_1 G_{31} - \varphi_2 G_{32} + \varphi_3 G_{33} = I_{33} \end{cases}$$

де  $G_{kk}$ - алгебраїчна сума провідностей, що сходяться у вузлі “к”;

$G_{km}$ - алгебраїчна сума провідностей між “к” і “m” вузлами;

$I_{kk}$ - вузловий струм “к”- вузла.

Розв’язуючи цю систему рівнянь при відомих ЕРС і провідностях, можна визначити потенціали вузлів, а потім значення струмів у вітках.

Для вихідної схеми визначимо струми у вітках методом вузлових потенціалів.

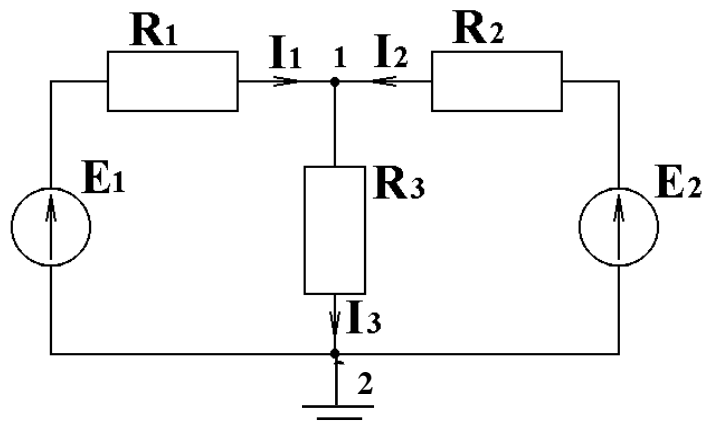


Рис. 2.25

Рішення:

У схемі рис. 2.20.8 два вузла. Один з вузлів заземляємо, тобто приймемо  $\varphi_2 = 0$ .

Запишемо рівняння для вузла 1:

$$\varphi_1 G_{11} = I_{11},$$

$$\text{де } G_{11} = G_1 + G_2 + G_3 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{50} + \frac{1}{100} + \frac{1}{100} = 0,04 \text{ см.}$$

$$I_{11} = E_1 G_1 + E_2 G_2 = 10 \frac{1}{50} + 7 \frac{1}{100} = 0,27 \text{ А.}$$

Визначаємо  $\varphi$

$$\varphi_1 = \frac{I_{11}}{G_{11}} = 0,27 / 0,04 = 6,75 \text{ В.}$$

По закону Ома визначаємо струми у вітках схеми:

$$I_1 = \frac{\varphi_2 - \varphi_1 + E_1}{R_1} = \frac{-6,75 + 10}{50} = 0,065 \text{ А;}$$

$$I_2 = \frac{\varphi_2 - \varphi_1 + E_2}{R_2} = \frac{-6,75 + 7}{100} = 0,0025 \text{ А;}$$

$$I_3 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_3} = \frac{6,75}{100} = 0,0675 \text{ А.}$$

### 3 Кола синусоїдного струму

**Задача 3.1** До джерела живлення, діюче значення напруги якого дорівнює  $U = 110 \text{ В}$ , а частота  $f = 50 \text{ Гц}$ , по чергово вмикаються активний опір  $R = 36 \text{ Ом}$ , індуктивність  $L = 50 \text{ мГн}$  і ємність  $C = 150 \text{ мкФ}$  (рис. 2.3.1).



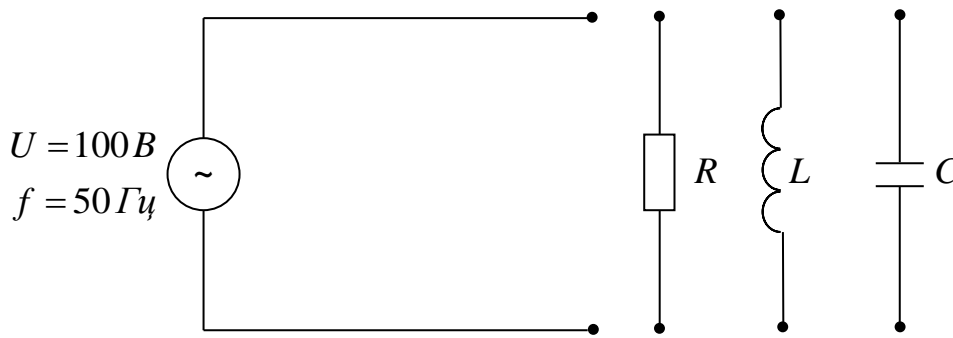


Рис. 3.1.

**Визначити:**

1. Амплітудне значення напруги.
2. Діючі і амплітудні значення струмів при включенні кожного з елементів.
3. Записати вирази миттєвих значень напруги і струмів.
4. Побудувати векторну діаграму.

**Рішення.**

1. Амплітудне значення напруги дорівнює

$$U_m = \sqrt{2}U = 1,41 \cdot 110 = 155,1\text{ B};$$

2. Миттєве значення напруги

$$u = 155 \sin \omega t;$$

3. Діючі, амплітудні і миттєві значення струмів у колі при включенні:

а) активного опору:

$$I_R = \frac{U}{R} = \frac{110}{36} = 3,05\text{ A};$$

$$I_{mR} = \sqrt{2}I = 1,41 \cdot 3,05 = 4,3\text{ A};$$

$$i = 4,3 \sin \omega t.$$

б) індуктивність:

$$I_L = \frac{U}{X_L} = \frac{U}{\omega L} = \frac{110}{314 \cdot 50 \cdot 10^{-3}} = 7\text{ A};$$

$$\omega = 2\pi f \quad \omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$I_{mL} = \sqrt{2} \cdot I = 1,41 \cdot 7 = 9,9\text{ A}$$

$$i_L = 9,9 \cdot \sin (\omega t - 90^\circ);$$

с) ємності

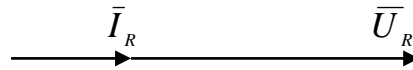
$$I_C = \frac{U}{X_C} = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = \omega CU = 314 \cdot 150 \cdot 10^{-6} \cdot 110 = 5,2\text{ A};$$

$$I_{mC} = \sqrt{2}I_C = 1,41 \cdot 5,2 = 7,3\text{ A};$$

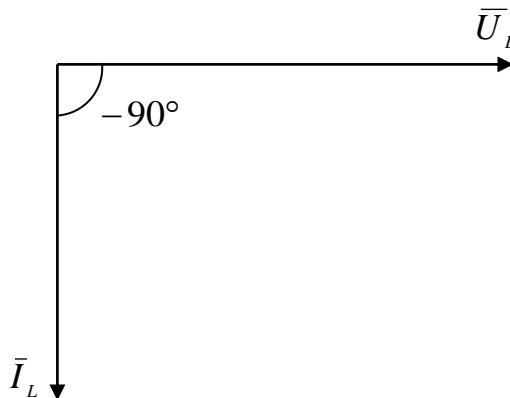
$$i_C = 7,3 \sin (\omega t + 90^\circ).$$

#### 4. Побудуємо векторні діаграми

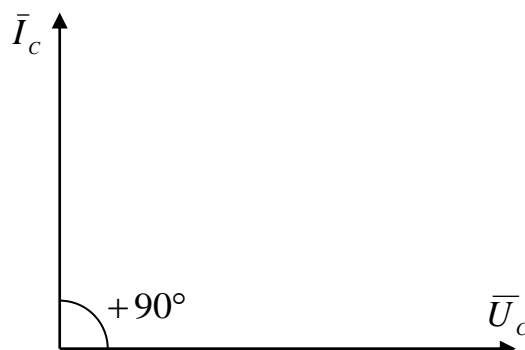
а) Для активного опору векторна діаграма являє собою графічне зображення векторів діючих, або амплітудних значень напруги і струму, які мають однаковий напрям. У вибраному масштабі  $m_U = 20 \frac{B}{cm}$   $m_i = 2 \frac{A}{cm}$  векторна діаграма має вигляд.



б) Для індуктивності векторна діаграма являє собою вектор напруги  $\bar{U}_L$ , розташований горизонтально, і вектор струму  $\bar{I}_L$ , розташований під кутом  $-90^\circ$  до вектора напруги  $\bar{U}_L$ , які відображені з однієї точки у вибраному масштабі. Вектор струму  $\bar{I}_L$ , відстає від вектора напруги  $\bar{U}_L$  на кут  $90^\circ$  при їх обертанні у позитивному напрямі (проти годинникової стрілки).



с) Для ємності векторна діаграма являє собою вектор  $\bar{U}_C$  розташований горизонтально і вектор струму  $\bar{I}_C$ , що випереджає вектор напруги на  $90^\circ$ .



**Задача 3.2** Коло містить послідовно з'єднані елементи: резистор, котушку і конденсатор (рис. 3.2). Опір резистора  $R = 6 \text{ Ом}$ , активний опір котушки  $R_k = 2 \text{ Ом}$ , індуктивність котушки  $L_k = 50 \text{ мГн}$ , ємність конденсатора

$C = 150 \text{ мкФ}$ . До затискачів кола підведена напруга  $U = 100 \text{ В}$  частотою  $f = 100 \text{ Гц}$ .

Визначити струм, що тече у колі і напругу на всіх елементах. Побудувати векторну діаграму.

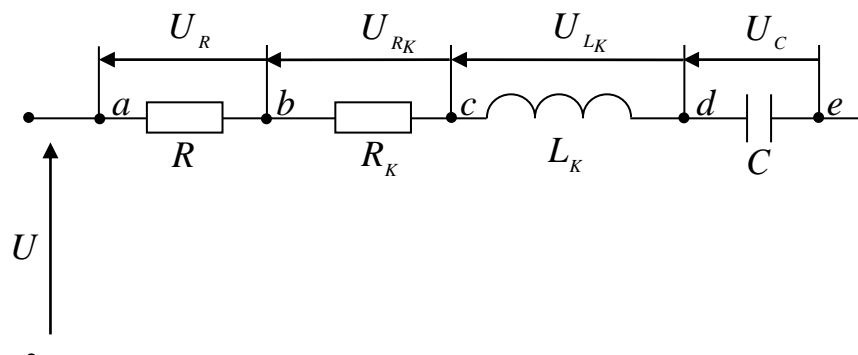


Рис. 3.2.

Розв'язання.

Визначимо повний опір кола:

$$Z = \sqrt{(R_k + R)^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 100 = 628 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$X_k = X_L = \omega L_k = 628 \cdot 30 = 18,84 \text{ Ом}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{628 \cdot 150 \cdot 10^{-6}} = 10,62 \text{ Ом}$$

$$Z = \sqrt{(6+2)^2 + (18,84 - 10,62)^2} = \sqrt{64 + 67,57} = 11,47 \text{ Ом}$$

Визначаємо повний опір котушки

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = \sqrt{2^2 + 18,84^2} = \sqrt{4 + 354,9} = 18,94 \text{ Ом.}$$

Струм у колі буде дорівнювати:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{100}{11,47} = 8,72 \text{ А.}$$

Напруга на окремих ділянках кола:

$$U_{ab} = U_R = I \cdot R = 11,47 \cdot 6 = 68,82 \text{ В}$$

$$U_{bc} = U_{R_k} = I \cdot R_k = 11,47 \cdot 2 = 22,94 \text{ В}$$

$$U_{cd} = U_{L_k} = I \cdot X_k = 11,47 \cdot 18,84 = 216,09 \text{ В}$$

$$U_{dc} = U_C = I \cdot X_C = 11,47 \cdot 10,62 = 121,81 \text{ В}$$

$$U_{bd} = U_k = I \cdot Z_k = 11,47 \cdot 18,84 = 217,24 \text{ В}$$

Визначаємо кут між векторами напруги  $\bar{U}$ , що прикладена до затискачів кола і струмом  $\bar{I}$ .

$$\varphi = \arctg \frac{X_k - X_C}{R_k + R_C} = \arctg \frac{18,84 - 10,62}{6 + 2} = \arctg \frac{8,22}{8} = \arctg 1,03 = 45,8^\circ.$$

Вектор напруги на котушці  $\bar{U}_\kappa$  випереджає вектор струму  $I$  на кут:

$$\varphi_\kappa = \arctg \frac{X_\kappa}{R_\kappa} = \arctg \frac{18,84}{2} = \arctg 9,42 = 83,9^\circ.$$

Для побудови векторної діаграми виберемо масштаб для напруг  $m_U = 20 \frac{B}{cm}$  і

струму  $m_I = 1 \frac{A}{cm}$ . Побудова векторної діаграми (рис. 3.3) починається з

розташування горизонтально, не зважаючи на початкову фазу, у масштабі вектора струму  $\bar{I}$ , який має однакову величину у всіх елементах схеми і є базовим, від якого йде відлік кутів всіх інших векторів. Потім відкладають вектор напруги  $\bar{U}_R = \bar{U}_{ab}$ , що сходяться за напрямом зі струмом. Під кутом  $\varphi_\kappa = 83,9^\circ$  у позитивному напрямі відліку кутів, тобто проти годинникової стрілки, відкладають вектор напруги на котушці  $\bar{U}_\kappa = \bar{U}_{bd}$ , а під кутом  $-90^\circ$  до вектора струму  $\bar{I}$ , тобто у негативному напрямку відліку кутів, вектор напруги на ємності  $\bar{U}_C = \bar{U}_{dc}$ . Геометрична сума векторів напруг ділянок кола  $\bar{U}_R, \bar{U}_\kappa, \bar{U}_C$  визначає вектор напруги  $\bar{U}$  на затискачах кола.

Векторна діаграма частіше будується по іншому рис. 3.4. Також відкладається у масштабі  $m_I$  вектор струму  $\bar{I}$ . За його напрямом відкладається у масштабі  $m_U$  вектор напруги на резисторі  $\bar{U}_R$ , а з кінця цього вектора відкладається напруга на активному опорі котушки  $\bar{U}_{R\kappa}$  за напрямом струму. Сума цих векторів визначає напругу на ділянці кола  $a - c$   $U_{ac}$ . З кінця вектора  $\bar{U}_{R\kappa}$  під кутом  $90^\circ$  у позитивному напрямі відліку кутів від вектора струму  $\bar{I}$  відкладають вектор напруги  $\bar{U}_{L\kappa} = \bar{U}_{cd}$ , а з його кінця у протилежному напрямі, тобто під кутом  $-90^\circ$  до вектора Струму відкладають вектор напруги  $\bar{U}_C = \bar{U}_{dc}$ . Вектор напруги  $\bar{U}$ , що прикладена до затискачів кола, з'єднує початок вектора  $\bar{U}_R$  з кінцем вектора  $\bar{U}_C$  і являє собою геометричну суму векторів напруг кола на окремих його елементах.

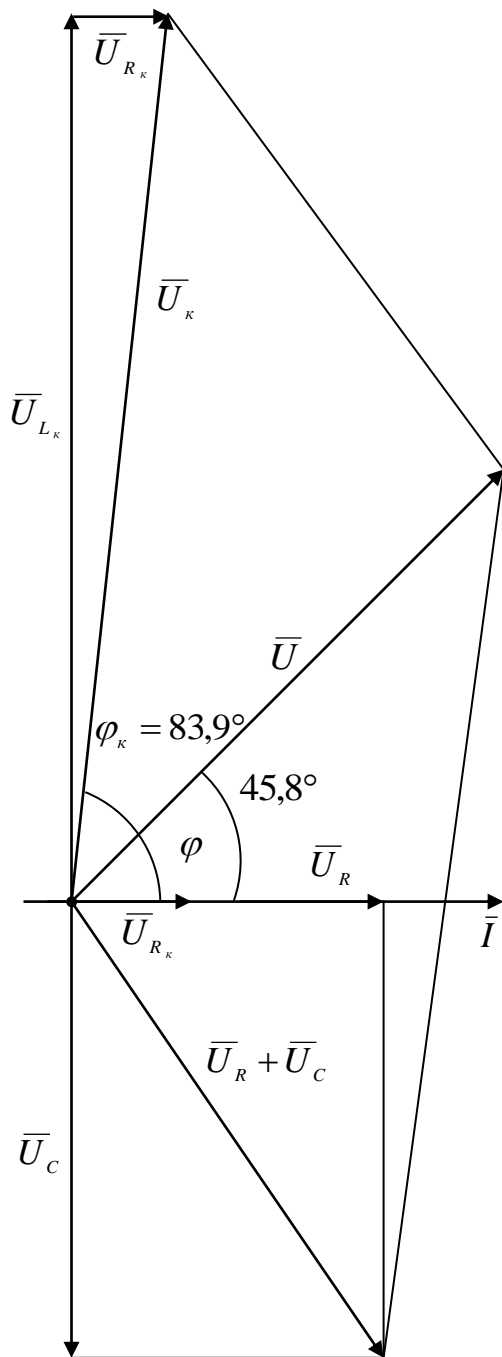


Рис. 3.3

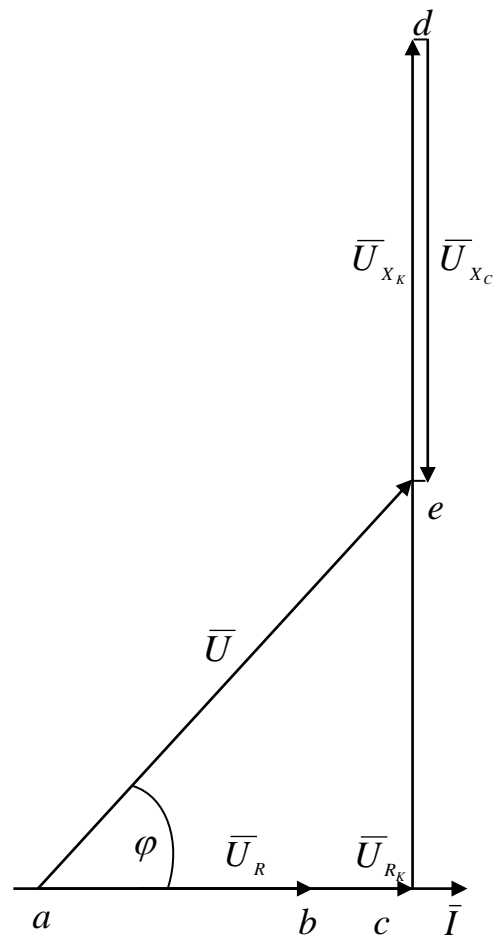


Рис. 3.4

**Задача 3.3** До кола з активним опором  $R = 20 \text{ Ом}$  прикладена напруга  $u = 140 \sin 314t$ . Написати вираз для миттєвого значення струму і побудувати графік зміни струму і напруги.  
Відповідь:  $i = 7 \sin (314t - 90^\circ)$

**Задача 3.4** Коло містить конденсатор ємністю  $10 \text{ мкФ}$  який знаходиться під напругою  $u = 640 \sin \omega t$ . Написати вираз для миттєвого значення струму і побудувати графік струму і напруг.  
Відповідь:  $i = 10 \sin (\omega t + 90^\circ)$ .

**Задача 3.5** Коло з послідовним з'єднанням резистора, опір якого дорівнює  $20 \text{ Ом}$ , і конденсатора, ємність якого  $100 \text{ мкФ}$ , підключено до джерела живлення з напругою  $220 \text{ В}$  і частотою  $50 \text{ Гц}$ . Визначити діюче значення і вираз для миттєвого значення струму і побудувати векторну діаграму.

Відповідь:  $i = \sqrt{2} \cdot 6,9 \cdot \sin(3,14 \cdot t + 87^\circ)$ .

**Задача 3.6** Реактивний опір котушки дорівнює її активному опору. При напрузі  $200 \text{ В}$ , підведеної до неї, потужність котушки дорівнює  $2000 \text{ Вт}$ . Визначити діюче значення струму, активний опір і коефіцієнт потужності.

Відповідь:  $I = 10 \text{ А}$ ,  $R = 20 \text{ Ом}$ ,  $\cos \varphi = 0,707$ .

**Задача 3.7** Коло містить котушку, індуктивність якої дорівнює  $0,04 \text{ Гн}$ , а активний опір  $10 \text{ Ом}$ , яка послідовно з'єднана з конденсатором ємністю  $400 \text{ мкФ}$ . Напруга живлення дорівнює  $220 \text{ В}$ , а частота  $50 \text{ Гц}$ .

Визначити дійсне значення струму і кут зсуву фаз між напругою і струмом, а також напруги на котушці і конденсаторі.

Відповідь:  $I = 20 \text{ А}$ ,  $\varphi = 24,7^\circ$ ,  $U_K = 321 \text{ В}$ ,  $U_C = 159 \text{ В}$ .

**Задача 3.8** Опір  $R$ , індуктивність  $L = 0,15 \text{ Гн}$  і ємність  $C$  з'єднані послідовно і підключені до джерела живлення  $220 \text{ В}$  чистотою  $50 \text{ Гц}$ . Струм у колі  $11 \text{ А}$ , активна потужність  $300 \text{ Вт}$ . Визначити активний опір і ємність. Побудувати векторну діаграму.

Відповідь:  $R = 2,48 \text{ Ом}$   $C = 7 \text{ мкФ}$ .

**Задача 3.9** Визначити співвідношення між активною і реактивною потужностями при  $\cos \varphi = 0,707$ .

Відповідь:  $P : Q = 1 : 1$ .

**Задача 3.10** Для кола рис. 3.5 відомо, що  $I_1 = 10 \text{ А}$ ,  $I_2 = 16 \text{ А}$ ,  $I = 20 \text{ А}$ ,  $f = 50 \text{ Гц}$ ,  $R_1 = 10 \text{ Ом}$ . Визначити активний опір  $R_2$ , індуктивність  $L_2$  і  $\cos \varphi_2$ .

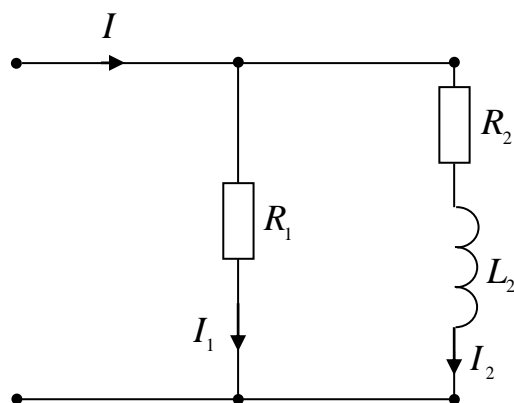


Рис. 3.5

Відповідь:  $R_2 = 0,87 \text{ Ом}$ ,  $L_2 = 19,7 \text{ мГн}$ ,  $\cos \varphi = 0,14$ .

**Задача 3.11** Коло містить дві активно-індуктивні вітки (рис. 3.6)  $R_1 = 20 \text{ Ом}$ ,  $X_{L1} = 15 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 15 \text{ Ом}$ ,  $X_{L2} = 20 \text{ Ом}$ . Напруга, що прикладена до затискачів, має діюче значення  $125 \text{ В}$ , частота  $50 \text{ Гц}$ . Визначити струми у вітках і нерозгалуженій частині кола, активну і реактивну потужності кожної вітки і всього кола.

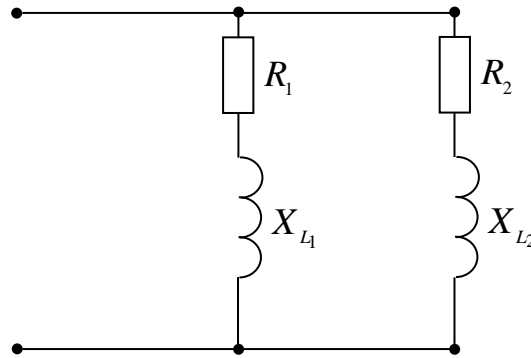


Рис. 3.6

Відповідь:  $I = 9,9 \text{ А}$ ,  $I_1 = 5 \text{ А}$ ,  $I_2 = 5 \text{ А}$ ,  $P_1 = 500 \text{ Вт}$ ,  $Q_1 = 375 \text{ ВАр}$ ,  
 $P_2 = 375 \text{ Вт}$ ,  $Q_2 = 500 \text{ ВАр}$ ,  $P = 875 \text{ Вт}$ ,  $Q = 875 \text{ ВАр}$ .

**Задача 3.12** Коло, схема якого наведена на рис. 3.7, має три паралельно з'єднаних вітки, величини опорів елементів мають такі значення:  $R_1 = 8 \text{ Ом}$ ,  $X_1 = 6 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 10 \text{ Ом}$ ,  $X_2 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 12 \text{ Ом}$ .

Визначити активні і реактивні провідності, струми кожної з віток і всієї схеми, якщо діюче значення напруги на затискачах дорівнює  $110 \text{ В}$ , а частота  $50 \text{ Гц}$ .

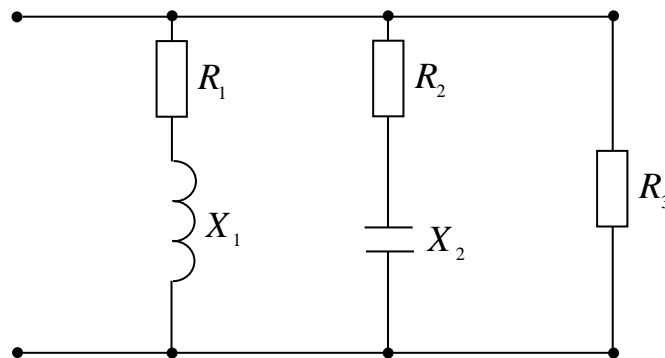


Рис. 3.7

Відповідь:  $I_1 = 11 \text{ А}$ ,  $I_2 = 7,8 \text{ А}$ ,  $I_3 = 9,16 \text{ А}$ ,  $I = 23,1 \text{ А}$ .  $g_1 = 0,08 \text{ сим}$ ,  
 $b_1 = 0,06 \text{ сим}$ ,  $g_2 = 0,05 \text{ сим}$ ,  $b_2 = 0,05 \text{ сим}$ ,  $g_3 = 0,08 \text{ сим}$ ,  $b_3 = 0 \text{ сим}$ ,  
 $g = 0,213 \text{ сим}$ ,  $b = 0,11 \text{ сим}$ .

**Задача 3.13** Для кола (рис. 3.8), що містить дві вітки, визначити еквівалентний опір відносно затискачів  $a, b$ , якщо  $R_1 = 8 \text{ Ом}$ ,  $X_1 = 6 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 6 \text{ Ом}$ ,  $X_2 = 8 \text{ Ом}$ ,

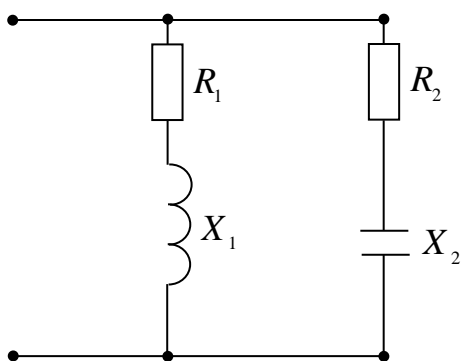


Рис. 3.8.

Відповідь:  $Z_{екв} = 5 \text{ Ом}$ .

**Задача 3.14** На рис. 3.9 наведена схема розгалуженого кола. Визначити струми у вітках, якщо діюче значення напруги на затискачах кола, при частоті  $50 \text{ Гц}$  дорівнює  $100 \text{ В}$ . Параметри елементів кола такі:  $R_1 = 1 \text{ Ом}$ ,  $X_{L1} = 5 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 6 \text{ Ом}$ ,  $X_{L2} = 5 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 8 \text{ Ом}$ ,  $X_C = 6 \text{ Ом}$ .

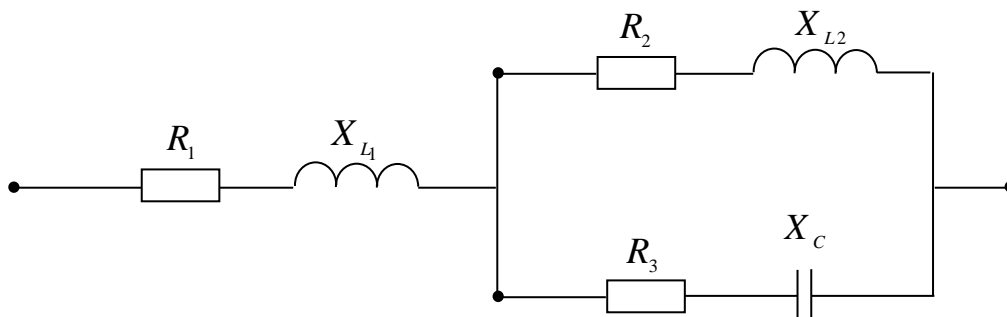


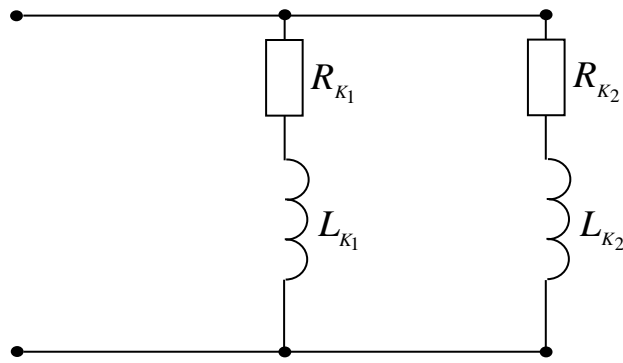
Рис. 3.9

Побудувати векторну діаграму.

Відповідь:  $I_1 = 7,9 \text{ А}$ ,  $I_2 = 7,6 \text{ А}$ ,  $I_3 = 6 \text{ А}$ .

**Задача 3.15** У мережу з напругою  $U = 127 \text{ В}$  і чистотою  $f = 60 \text{ Гц}$  ввімкнуті з'єднані паралельно дві котушки з параметрами:





$$\begin{aligned}
 R_{K_1} &= 3,5 \text{ Ом} \\
 L_{K_1} &= 29,4 \text{ мГн} \\
 R_{K_2} &= 8,7 \text{ Ом} \\
 L_{K_2} &= 8,1 \text{ мГн}
 \end{aligned}$$

Рис. 4.15

Визначити струми у колі, напруги на індуктивностях і опорах, а також потужності кожної котушки.

Відповідь:  $I = 17,1 \text{ А}$ ,  $I_1 = 10,9 \text{ А}$ ,  $I_2 = 13,8 \text{ А}$ ,  $U_{R_{K_1}} = 38,2 \text{ В}$ ,  $U_{R_{K_2}} = 120 \text{ В}$ ,  
 $U_{L_{K_1}} = 121 \text{ В}$ ,  $U_{L_{K_2}} = 42,1 \text{ В}$ .

**Задача 3.16** Коло з послідовно з'єднаними котушкою, з активним опором  $8 \text{ Ом}$  і індуктивність  $0,07 \text{ Гн}$ , і конденсатором, з ємністю  $122 \text{ мкФ}$ , підключене до мережі з діючим значенням напруги  $120 \text{ В}$ , частотою  $50 \text{ Гц}$ . Визначити струм у колі, напруги на котушці і конденсаторі, активну і реактивну потужності. Побудувати векторну діаграму. Визначити частоту  $f_0$  при якій має місце резонанс напруг.

Відповідь:  $I = 4,5 \text{ А}$ ,  $U_C = 115 \text{ В}$ ,  $U_K = 36 \text{ В}$ ,  $P = 481 \text{ Вт}$ ,  $Q = 243 \text{ ВАр}$ ,  
 $f_0 = 55 \text{ Гц}$ .

**Задача 3.17** При частоті  $50 \text{ Гц}$  синусоїдного струму повний опір котушки дорівнює  $41 \text{ Ом}$ , а при постійному струмові  $9 \text{ Ом}$ . При якій частоті у контурі виникне резонанс, якщо цю котушку з'єднати послідовно з конденсатором  $51 \text{ мкФ}$ .

Відповідь:  $62 \text{ Гц}$ .

**Задача 3.18** Паралельно котушці з параметрами  $R = 4 \text{ Ом}$ ,  $L = 0,01 \text{ Гн}$  приєднано конденсатор, ємність якого  $100 \text{ мкФ}$ . Визначити резонансну частоту.

Відповідь:  $159 \text{ Гц}$ .

**Задача 3.19** Задані комплексні значення напруг і струмів

$$U = (+20 + j40) \text{ В}; \quad I = (5 + j3) \text{ А};$$

$$U = (-20 - j40) \text{ В}; \quad I = (5 - j3) \text{ А};$$

$$U = (20 - j40) \text{ В}; \quad I = (-5 - j3) \text{ А};$$

Записати ці значення у показниковій і тригонометричній формах.

$$U = 44,7 \cdot e^{j63,4^\circ} \quad I = 5,8 \cdot e^{j31^\circ} = 5,8 \cos 31^\circ + j5,8 \sin 31^\circ$$

Відповідь:  $U = 44,7 \cdot e^{j243,4^\circ} \quad I = 5,8 \cdot e^{-j31^\circ} = 5,8 \cos 31^\circ - j5,8 \sin 31^\circ$

$$U = 44,7 \cdot e^{-j63,9^\circ} \quad I = 5,8 \cdot e^{j211^\circ} = 5,8 \cos 211^\circ + j5,8 \sin 211^\circ$$

**Задача 3.20** Використовуючи закон Ома визначити струм у колі з послідовним з'єднанням  $R, L, C$ , якщо  $R = 4 \text{ Ом}$ ,  $X_L = j10 \text{ Ом}$ ,  $X_C = -j7 \text{ Ом}$ . Напряга, що прикладена до затискачів кола, дорівнює  $\dot{U} = 125 + j5 \text{ В}$ .

Розв'язання. У відповідності до закону Ома струм дорівнює

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}};$$

$\underline{Z}$  – повний опір кола

$$\underline{Z} = R + jX_L - jX_C = R + j(X_L - X_C) = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} e^{j \arctg \frac{X_L - X_C}{R}} = Z \cdot e^{j \arctg \frac{X_L - X_C}{R}};$$

$$\underline{Z} = 4 + j(10 - 7) = 4 + j3 = \sqrt{4^2 + 3^2} e^{j \arctg \frac{10-7}{4}} = 5 \cdot e^{j37^\circ} \text{ Ом.};$$

$$\dot{I} = \frac{125 + j5}{4 + j3} \text{ Ом.}$$

Помножимо знаменники і чисельник на спряжене комплексне число,

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \frac{(125 + j5)(4 - j3)}{(4 + j3)(4 - j3)} = \frac{500 + j20 - j375 + 15}{16 + j12 - j12 + 9} = \frac{515 - j355}{25} = \\ &= 20,6 - j14,2 = 25e^{-j35^\circ} \text{ А.} \end{aligned}$$

#### 4 Трифазні електричні кола

**Задача 4.1** Навантаження складається з трьох однофазних споживачів (рис. 4.1), активний опір кожного з яких однаковий і дорівнює 50 Ом ( $\cos \varphi = 1$ ), з'єднаних зіркою і приєднаних до джерела, лінійна напруга якого дорівнює 380 В, за допомогою трьох фазних і нульового проводів.

Визначити фазну напругу і струми, побудувати векторні діаграми для симетричного і несиметричного навантаження, тобто коли всі споживачі ввімкнуті, включено два споживача і один споживач. Опором нульового і фазного проводів нехтувати.

Розв'язання

1. Визначаємо фазні напруги:

$$\dot{U}_{ao'} = \frac{\dot{U}_\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1,73} = 220 \text{ В};$$

$$\dot{U}_{bo'} = 220e^{-j120^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{co'} = 220e^{j120^\circ} \text{ В.}$$

2. Визначаємо струми при симетричному навантаженні.

$$\dot{I}_a = \frac{220}{50} = 4,4 \text{ А};$$

$$i_b = \frac{220e^{-j120^\circ}}{50} = 4,4e^{-j120^\circ} \text{ A};$$

$$i_c = \frac{220e^{j120^\circ}}{50} = 4,4e^{j120^\circ} \text{ A};$$

$$i_{oo'} = i_a + i_b + i_c = 4,4(1 + e^{-j120^\circ} + e^{j120^\circ}) = 4,4 \times 0 = 0 \text{ A}.$$

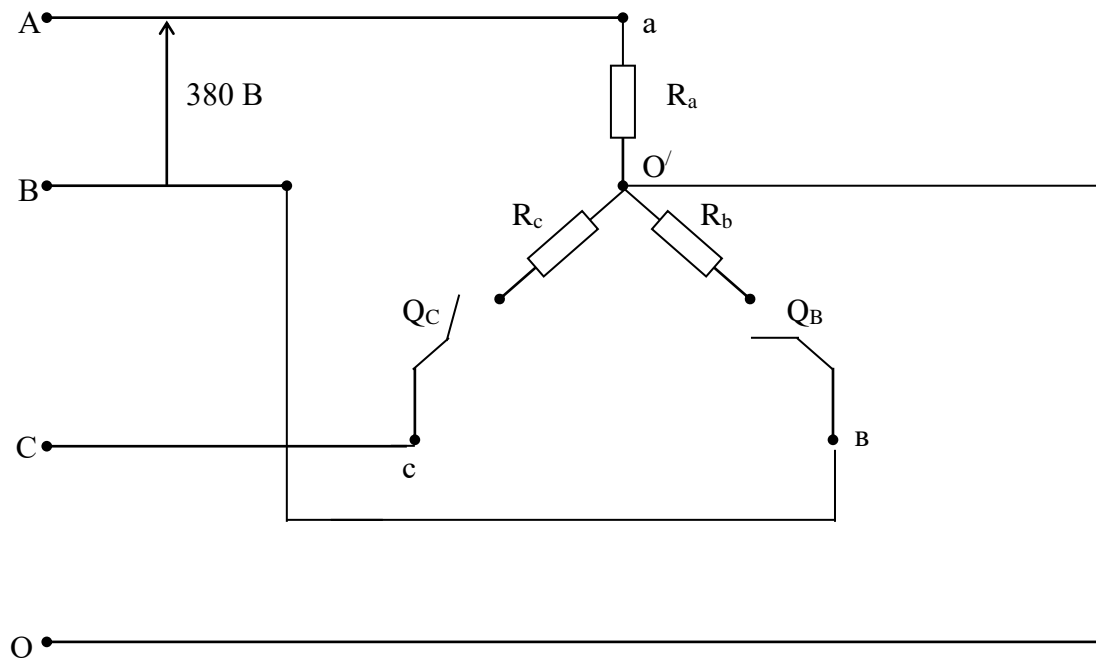


Рис. 4.1

Векторна діаграма має вигляд:

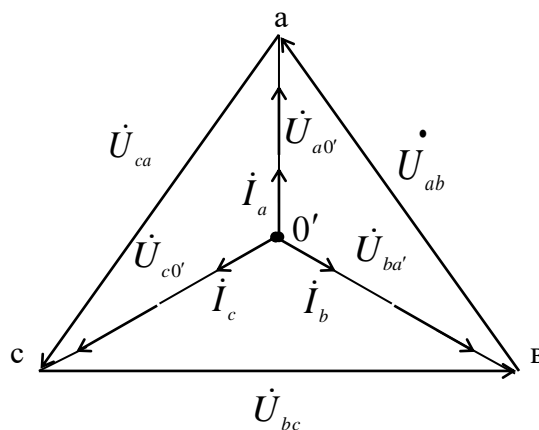


Рис. 4.2

Якщо ввімкнути у мережу тільки один споживач  $R_A$ , вимикачі  $Q_B, Q_C$  розімкнуті, то струми будуть текти тільки в фазі  $A$  і нульовому проводі, тобто  $I_A = I_N$ :

$$I_a = I_N = \frac{U_{a0'}}{R_a} = \frac{220}{50} = 4,4 \text{ А.}$$

Векторна діаграма для цього випадку має вигляд:

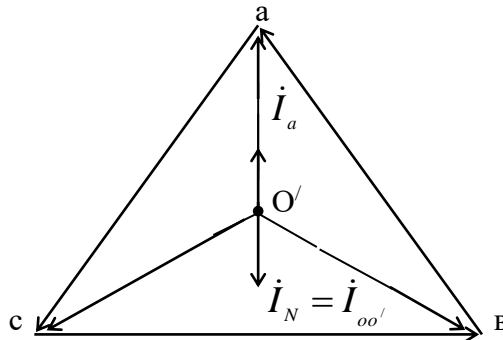


Рис. 4.3

Якщо будуть ввімкнуті два споживача  $R_A$  і  $R_B$  (вимикач  $Q_B$  ввімкнутий), то струми, що течуть крізь опори споживачів, будуть однакові за величиною, а аргументи будуть відрізнятися на кут  $120^\circ$ .

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_{a0'}}{R_A} = \frac{220}{50} = 4,4 \text{ А}$$

$$\dot{I}_b = \frac{\dot{U}_{b0'}}{R_b} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{50} = 4,4e^{-j120^\circ} = 4,4e^{j240^\circ} \text{ А}$$

Струм у нульовому проводі буде дорівнювати сумі струмів:  
 $\dot{I}_N = \dot{I}_{00'} = \dot{I}_a + \dot{I}_b = \dot{I}_a + \dot{I}_b = \dot{I}_a e^{j0^\circ} + \dot{I}_b e^{j240^\circ} = I_a + I_b \cos 240^\circ + jI_b \sin 240^\circ =$   
 $= 4,4 + 4,4 \cos 240^\circ = j4,4 \sin 240^\circ = 4,4(1 + \cos 240^\circ + j \sin 240^\circ) =$   
 $= 4,4(1 - 0,5 - j0,86) = 2,2 - j3,8 = 4,4e^{-j60^\circ} \text{ А.}$

Векторна діаграма для цього випадку має вигляд:

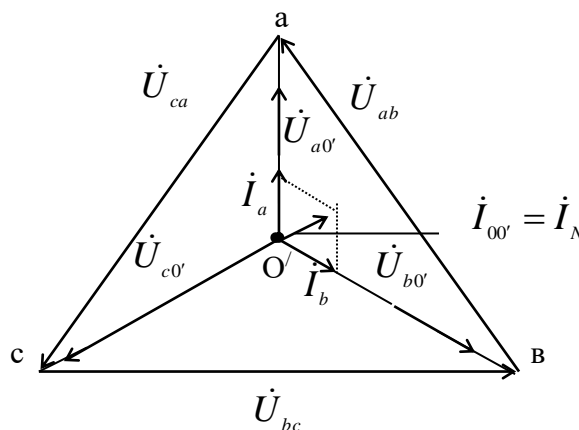


Рис. 4.4

**Задача. 4.2** Визначити модуль комплексного опору кола з послідовним з'єднанням активного опору  $R = 4 \text{ Ом}$ , індуктивності  $L = 0,03 \text{ Гн}$  і ємності  $C = 0,0005 \text{ Ф}$ . Частота мережі  $f = 50 \text{ Гц}$ .

Розв'язання

Визначаємо модуль комплексного опору кола:

$$\underline{Z} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad \varphi = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с}$$

$$X_L = \omega L = 314 \cdot 0,03 = 9,4 \text{ Ом}$$

$$X_C = \frac{1}{0,0005 \cdot 314} = \frac{1}{0,157} = 6,4 \text{ Ом}$$

$$\underline{Z} = 4 + j(9,4 - 6,4) = 4 + j3 = \sqrt{4^2 + 3^2} e^{j \arctan \frac{3}{4}} = 5 \cdot e^{j36^\circ,86^\circ} \text{ Ом}$$

$$\underline{Z} = 4 + j3 = 5 \cdot e^{j36^\circ,86^\circ} = 5 \cdot \cos 36^\circ,86^\circ - j5 \sin 36^\circ,86^\circ = 3,686 \text{ Ом}$$

**Задача 4.3** Три приймача, рис. 4.5, що з'єднані у трикутник, підключені до мережі, лінійні напруги якої симетричні, а діючі значення дорівнюють  $380 \text{ В}$ . Комплексні опори дорівнюють:

$$\underline{Z}_{AB} = 33 + j19 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{BC} = 33 - j19 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{CA} = 38 \text{ Ом}.$$

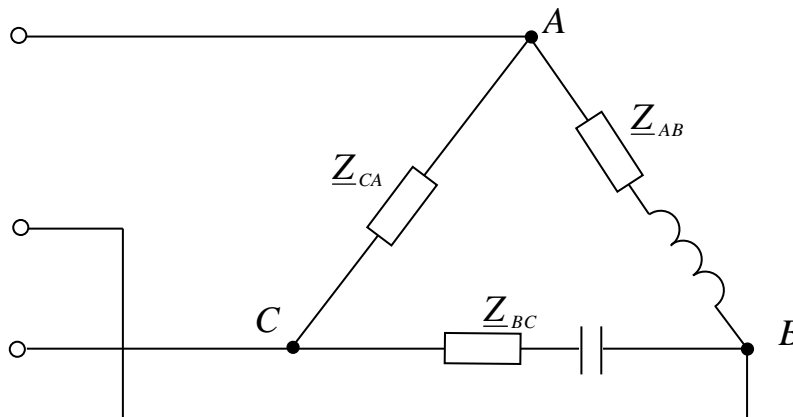


Рис. 4.5

Визначити лінійні і фазні струми, побудувати векторну діаграму.

Розв'язання

1. Для приймачів з'єднаних у трикутник маємо наступні співвідношення між фазними струмами і напругами:

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{ф}}; \quad U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}.$$

Опір  $\underline{Z}_{AB} = 33 + j19 \text{ Ом}$  має активно-індуктивний характер, так як перед  $j$  стоїть знак плюс.

Опір  $\underline{Z}_{BC} = 33 - j19 \text{ Ом}$  має активно - ємнісний характер, так як перед  $j$  стоїть знак мінус.

Опір  $\underline{Z}_{CA}$  має активний характер так як у виразі  $\underline{Z}_{CA} = 38 \text{ Ом}$  відсутня уявна частина.

2. Визначимо фазні струми

$$\dot{i}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}} = \frac{380}{33 + j19} = \frac{380}{\sqrt{33^2 + 19^2} e^{j \arctg \frac{19}{33}}} = 10e^{-j30^\circ} = 10e^{j330^\circ} = 8,6 - j5 \text{ A.}$$

$$\dot{i}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}} = \frac{380e^{j240}}{38 \cdot e^{-j30}} = 10e^{j270^\circ} = -j10 \text{ A.}$$

$$\dot{i}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\underline{Z}_{CA}} = \frac{380e^{j120}}{38} = 10e^{j120} = -5 + j8,6 \text{ A}$$

Визначимо лінійні струми

$$\dot{I}_A = \dot{i}_{AB} - \dot{i}_{CA} = 8,6 - j5 + 5 - j8,6 = 13,6 - j13,6 \text{ A}$$

$$\dot{I}_B = \dot{i}_{BC} - \dot{i}_{AB} = -j10 - 8,6 + j5 = -8,6 - j5 \text{ A}$$

$$\dot{I}_C = \dot{i}_{CA} - \dot{i}_{BC} = -5 + j8,6 + j10 = -5 + j18,6 \text{ A}$$

## 5 ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ

**Задача 5.1** Визначити зміну струму у колі (рис. 5.1) з послідовно з'єднаними активними опорами і індуктивністю, яке живиться від джерела постійної напруги. Параметри кола такі:  $R_1 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 20 \text{ Ом}$ ,  $L = 200 \text{ мГн}$ ,  $U = 90 \text{ В}$ . Перехідний процес виникає за рахунок зміни схеми вимикачем  $S$ .

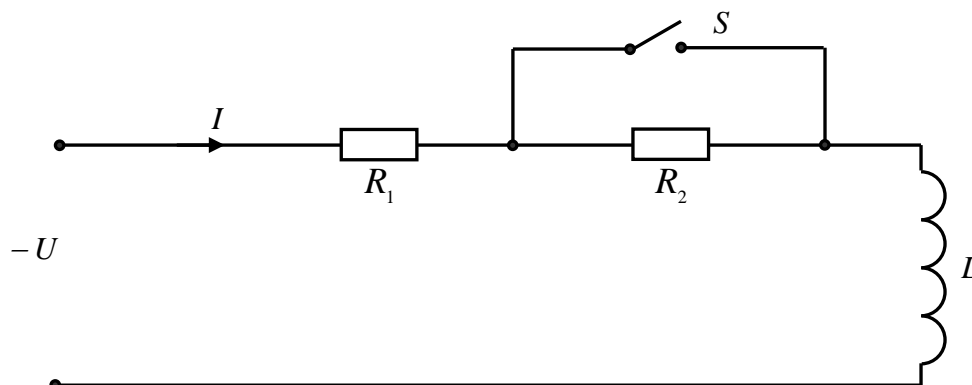


Рис. 5.1

Розв'язання.

1. Опір кола до комутації, тобто до моменту включення вимикача  $S$ , дорівнював:

$$R = R_1 + R_2 = 10 + 20 = 30 \text{ Ом,}$$

(При постійному струмові  $X_L = 0$ )

а струм:

$$I_1 = \frac{U}{R} = \frac{90}{30} = 3 \text{ A.}$$

2. У момент початку перехідного процесу струм у колі, тобто після комутації, згідно першому закону комутації буде таким, як і до комутації:

$$i(-0) = i(+0) = I,$$

де:  $i(-0)$  – струм безпосередньо перед комутацією,

$i(+0)$  – струм безпосередньо після комутації:

3. Струм сталого режиму, який буде у колі після закінчення перехідного процесу, так званий примушений струм, буде дорівнювати

$$i_{np} = I_2 = \frac{U}{R_1} = \frac{90}{10} = 9 \text{ A};$$

4. Застосувавши другий закон Кірхгофа для кола у після комутаційному режимі будемо мати

$$U = U_{R_1} + U_L = iR_1 - e_L,$$

з цього виразу

$$i = \frac{U}{R_1} + \frac{e_L}{R_1},$$

це є струм перехідного процесу, який складається з примушеного або сталого

струму  $i_{np} = \frac{U}{R_1}$  і вільного  $i_{\text{вільн}} = \frac{e_L}{R_1}$

$$i_{\text{пер}} = i_{np} + i_{\text{вільн}}$$

$$i = \frac{e_L}{R_1} = -\frac{1}{R_1} L \frac{di}{dt} = -\frac{1}{R_1} L \left( \frac{di_{np}}{dt} + \frac{di_{\text{вільн}}}{dt} \right) = -\frac{L}{R_1} \cdot \frac{di_{\text{вільн}}}{dt}$$

$$\left( \frac{di_{np}}{dt} = 0, \text{ так як } i_{np} \text{ величина стала} \right).$$

З попереднього виразу одержимо диференціальне рівняння:

$$\frac{L}{R_1} \frac{di_{\text{вільн}}}{dt} + i_{\text{вільн}} = 0$$

Рішення якого буде вираз:

$$i_{\text{вільн}} = A \cdot e^{-\frac{1}{L/R_1} t}$$

або, якщо врахувати, що стала кола  $\tau = \frac{L}{R_1}$ , то маємо:

$$i_{\text{вільн}} = A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$A$  – стала інтегрування, яка визначається з початкових умов, тобто це значення струму, яке було у колі при включенні вимикача  $S$ , що відповідає моменту комутації ( $t = 0$ ).

$$i = \frac{U}{R_1} + A e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{U}{R_1} + A$$

$$I_1 = I_2 + A$$

$$A = I_1 - I_2 = 3 - 9 = -6 \text{ A}$$

Тоді струм перехідного процесу дорівнює

$$i_{\text{пер}} = i_{np} + i_{\text{вільн}} = I_1 + (I_1 - I_2) e^{-\frac{t}{\tau}} = 9 - 6e^{-50t} \text{ A.}$$

$$\tau = \frac{L}{R_1} = \frac{0,2}{10} = 0,02 c$$

5. Задаємося рядом значень  $t$  (табл. 5.1) і будемо графік зміни струму перехідного процесу (рис. 5.2)

6.

Табл. 5.1.

$t, c$	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
$I_{np}, A$	9	9	9	9	9	9	9	9
$I_{вил.}, A$	-6	-3,6	-2,2	-1,3	-0,8	-0,5	-0,3	-0,18
$i, A$	3	5,4	6,8	7,7	8,2	8,5	8,7	8,82

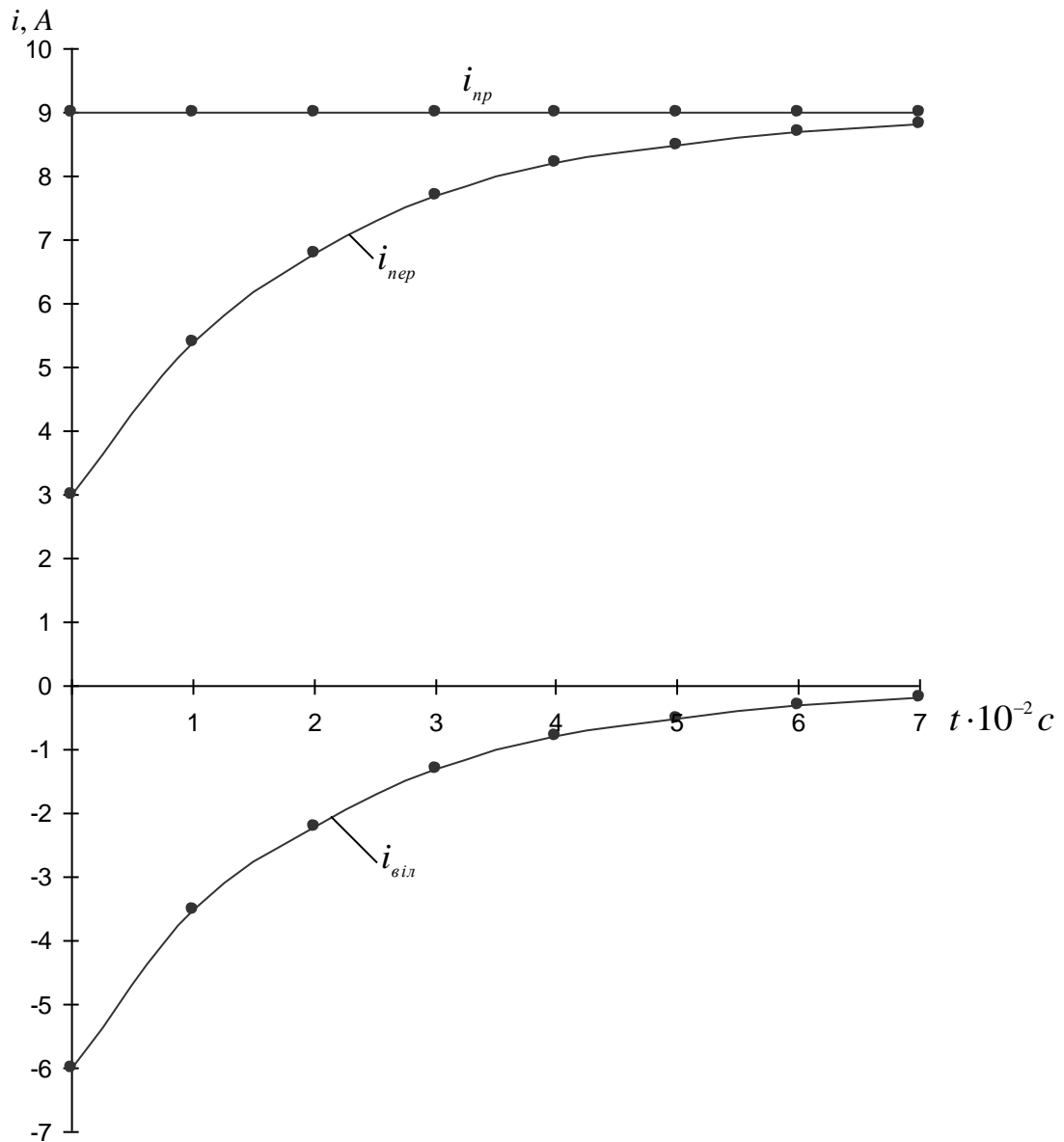


Рис. 5.2



**Задача 5.2** Коло, (рис. 5.2) яке містить в собі послідовно з'єднані опір  $R = 50 \text{ Ом}$  та конденсатор  $C = 100 \text{ мкФ}$  вмикається у мережу з напругою  $120 \text{ В}$ . Визначити закон зміни струму та напруги на конденсаторі при перехідному процесі.

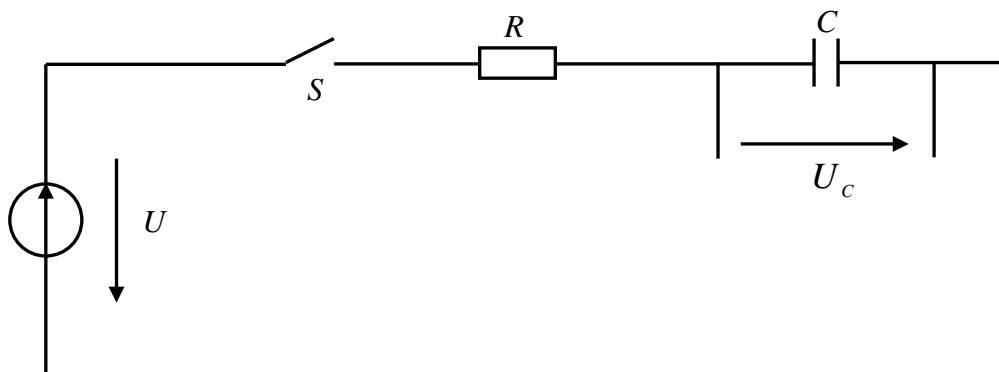


Рис. 5.3

Розв'язання

1. Напруга на конденсаторі при перехідному процесі буде дорівнювати

$$U_c = U_{\text{нр.}} + U_{\text{світ}}$$

$$U = U - Ue^{-\frac{t}{\tau}} = 120(1 - e^{-\frac{t}{0,005}}) \text{ В.}$$

Стала кола з опором та ємністю дорівнює  $\tau = R \cdot C = 50 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 0,005 \text{ с}$ .

2. Струм буде змінюватися згідно виразу:

$$i = C \frac{dU_c}{dt} = C \frac{U}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} = 100 \cdot 10^{-6} \frac{120}{0,005} e^{-\frac{t}{0,005}} = 2,4 \cdot e^{-\frac{t}{0,005}} \text{ А.}$$

**Задача 5.3.** Коло (рис. 5.4) містить в собі послідовно з'єднані опори  $R_1 = 20 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 5 \text{ Ом}$  і індуктивність  $L = 0,25 \text{ Гн}$ . До замикання вимикача  $S$  постійний струм дорівнював  $I = 5 \text{ А}$ . Записати закон зміни струму і побудувати графік його зміни за часом після включення вимикача.

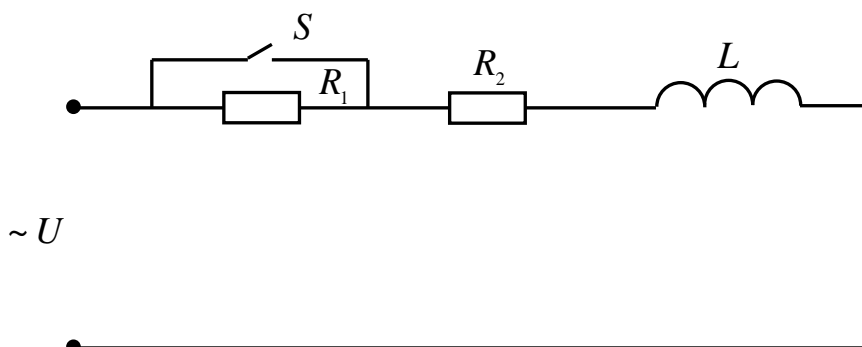


Рис. 5.4

Відповідь:  $i = 1 + 4e^{-100t} \text{ А}$ .

**Задача 5.4** Котушку, яка має активний опір  $R=10\text{ Ом}$  і індуктивність  $L=100\text{ Гн}$ , вмикають на постійну напругу  $110\text{ В}$ . Через який час струм у котушці досягне 50% свого усталеного значення.  
Відповідь:  $0,0069\text{ сек}$ .

**Задача 5.5.** Коло (рис. 5.5) з послідовно з'єднаним опором  $R=50\text{ Ом}$  і конденсатором  $C=100\text{ мкФ}$  вмикається на сталу напругу  $U=200\text{ В}$ . Визначити закон зміни струму і напруги на конденсаторі у залежності від часу.

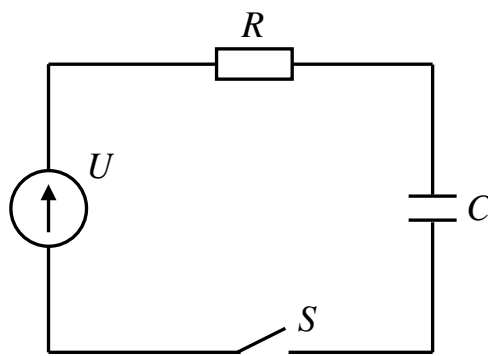


Рис. 5.5

Відповідь:  $u_c = 200(1 - e^{-\frac{t}{0,005}})\text{ В}$ ,  $i = 4 \cdot e^{-\frac{t}{0,005}}\text{ А}$ .

**Задача 5.6** Електричне коло (рис. 5.6) містить в собі послідовно з'єднані резистор  $R_1=4\text{ Ом}$ , котушку індуктивності  $R_k=1\text{ Ом}$ ,  $L_k=80\text{ мГн}$  і джерело постійного струму  $U=12\text{ В}$ . Визначити сталу перехідного процесу. Побудувати графік зміни струму і ЕРС котушки за період часу  $t=5\text{ сек}$ , з моменту включення вимикача  $S$ .

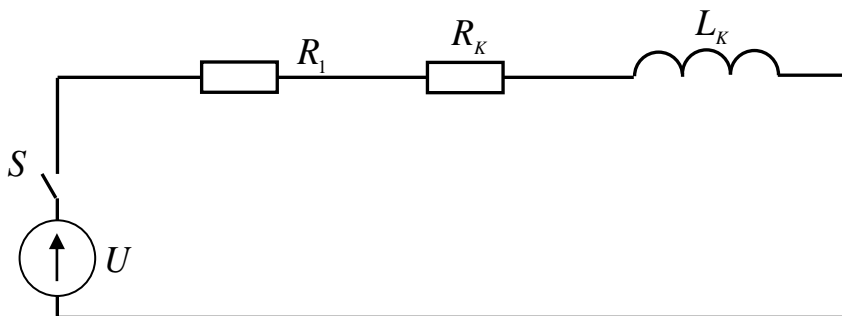


Рис. 5.6

Відповідь:  $\tau = 0,016\text{ с}$ .

## ДОДАТОК

### Список поєднань клавіш для роботи в EWB 5.12

Команда	Призначення команди
File>New (Ctrl+N)	Відкриття нового документа
File>Open (Ctrl+O)	Відкриття існуючого документа
File>Save (Ctrl+S)	Збереження документа
File>Save As...	Збереження документа на носії
File>Revert to Saved...	Стирання всіх змін
File>Print...(Ctrl+P)	Підготовка даних до друку
File>Print Setup...	Настройка принтера
File>Exit (Alt+F4)	Вихід з програми
File>Install...	Установка додаткових програм
File>Import from Spice	Імпорт файлів з Spice
File>Export to Spice	Експорт файлів в Spice
Edit>Cut (Ctrl+X)	Стирання із збереженням в буфері
Edit>Copy (Ctrl+C)	Копіювання в буфер
Edit>Paste (Ctrl+V)	Вставка вмісту буфера
Edit>Delete (Delete)	Стирання виділеної частини
Edit>Select All (Ctrl+A)	Виділення всієї схеми
Edit>Show Clipboard	Показ вмісту буфера
Circuit>Label...(Ctrl+L)	Введення позиційного позначення
Circuit>Value...(Ctrl+U)	Введення значення параметра елемента
Circuit>Zoom In (Ctrl++)	Збільшення масштабу
Circuit>Zoom Out (Ctrl+-)	Зменшення масштабу
Circuit>Rotate (Ctrl+R)	Обертання виділеної частини
Circuit>Subcircuit...(Ctrl+B)	Перетворення виділеної частини
Analysis>Activate Option...(Ctrl+G)	Запуск моделювання
Analysis>Stop (Ctrl+T)	Зупинка моделювання
Analysis>Pause (F9)	Переривання моделювання
Analysis>Options...(Ctrl+Y)	Виклик команд моделювання
Analysis>DC Operating Point	Розрахунок режиму постійного струму
Analysis>AC Frequency...	Розрахунок частотних характеристик
Analysis>Transient...	Розрахунок перехідних процесів
Analysis>Fourier...	Спектральний аналіз по Фур'є
Analysis>Monte Carlo...	Статистичний аналіз
Window>Arrange (Ctrl+W)	Впорядкування інформації
Window>Circuit	Виведення схеми на передній план
Window>Description (Ctrl+D)	Виведення опису схеми

## ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЗНИК

Амплітуда – 83

Багатополюсник – 238

ВАр – 91

Ват – 57

Вольт-ампер – 49

Двополюсник – 68, 99, 238

Джерело ЕРС – 48, 56

- струму – 48

Діаграма векторна – 99

Добротність контуру – 113

Елементи електричного кола – 46

- лінійні – 46

- контурні – 60, 63

- лінійні – 136

Ємність конденсатора – 273

Закон

- Кірхгофа другий – 56, 102

- - перший – 56,

- Ома – 13, 14

Згасання контуру – 108

Індуктивність котушки – 273

Коефіцієнт потужності – 277

- з параметрами зосередженими – 5, 168

- магнітні – 46, 146

- несинусоїдного струму – 145, 146

- симетричні – 13

Напруга електрична – 50

- магнітна – 124

Напруги лінійні – 151

Обмотки фазні – 133, 146, 215  
Опір контуру хвильовий – 80  
- - взаємний – 96  
- провідника – 149  
Опори індуктивний та ємносний – 85, 89, 92  
- комплексний – 95

Параметри кіл (елементів) електричних – 85  
Перетворення  
- схеми електричного кола еквівалентне – 49  
Потік котушок основний – 77  
- магнітний – 77  
- - самоіндукції та взаємоіндукції – 86  
Потокозчеплення – 86  
- само- та взаємоіндукції – 77  
Потужність електрична – 72  
- - активна – 102  
- - миттєва – 87  
- - - активна й реактивна – 102  
- - реактивна – 72  
- - середня – 59  
- у колах несинусоїдного струму – 119  
Принцип аналізу перехідних процесів – 168  
Провідність електрична – 47  
- кола – 105  
Процеси перехідні – 168  
Процес перехідний електричного кола – 168  
П-схема лінії – 239  
- пасивного чотириполюсника – 238

Режим електричного кола усталений  
Резонанс – 107  
- напруг – 107  
- струмів – 108  
Резистори – 210, 221  
Рівняння характеристичне – 171, 177, 182  
Ротор – 146

Складова вільна – 171  
Статор – 146  
Струм гармонійний – 112  
- несинусоїдний – 138  
- постійний – 46  
- провідності – 46  
- синусоїдний – 76

Струми контурні – 60

Теорема компенсації – 74

- розкладання – 142

Трансформатори – 133

Трансформатор повітряний – 133

Фази – 76

- початкові – 76

Характеристики кола резонансні – 110

## ЛІТЕРАТУРА

1. Карлашук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение. – М.: Солон-Р, 2001. – 726 с.
2. Электроника и электротехника в экспериментах и упражнениях. Практикум по Electronics Workbench / Под ред. Д.И. Панфилова. Т1. – М.: Додэка 1999.
3. «Наука и жизнь» Ж. № 1, 3 2003г., № 7 2002г.
4. Кардашев Г.А. Виртуальная электроника. М. (Горячая линия – Телеком) 2002. – 260 с.
5. Паначевний Б.І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка. –К.: Каравела, 2004 – 438 с.
6. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. М.; Наука, 1973. 311с.
7. Ивашев-Мусатов О.С. Теория вероятностей и математическая статистика. М.; Наука, 1979. 225с.
8. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: В 2т. – М.,1978.Т.1.-528с.; Т.2.-304с.
9. Сборник задач по теоретическим основам электротехники. Под ред. Бессонова Л.А.-М. «Высшая школа», 2000. -528с.
10. Шебес М.Р., Каблукова М.В. Задачник по теории линейных электрических цепей. М. «Высшая школа», 1990.-544с.
11. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум. - К., Каравелла, 2003.-368 с.

*Навчальне видання*

**Свергун Юрій Федорович**

Аналіз електричних кіл на персональному комп'ютері

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний  
посібник для студентів вищих навчальних закладів*

Редактор *П.О.Кравченко*  
Комп'ютерна верстка *М.В.Котенко*  
Коректор *М.В.Котенко*

Здано на складання 20.05 2008 р. Підписано до друку 2.06.2008 р.  
Формат 60 x 84/16.Папір офсетний. Гарнітура Times. Друк офсетний. Ум.  
друк. арк.. 17,21. Ум. фарбовідб.17,73. Обл.-вид. арк..17,7. Тираж 300 прим.  
Зам. №

Видавництво «Факт»  
Україна, 61072, м. Харків, вул.. 23 Серпня, 27, оф. 30  
Тел./факс (057) 751-58-82, 340-52-26, 756-43-75  
E-mail: [publish\\_fakt@mail.ru](mailto:publish_fakt@mail.ru).  
Свідоцтво про держреєстрацію: серія ДК №314 від 23.01.2001 р.