

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

С. Ш. Каців Ю. Г. Ведміцький А. М. Коваль І. К. Говор

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ
ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ**

***КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ
ТА ЕЛЕКТРОННИХ КІЛ В СЕРЕДОВИЩІ MICROCAP***

Лабораторний практикум

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2014

УДК 621.3(075)

ББК 31.211я73

ТЗЗ

Рецензенти:

М. Й. Бурбело, доктор технічних наук, професор

О.Д. Азаров, доктор технічних наук, професор

Рекомендовано до видання Ученою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

Каців С. Ш.

ТЗЗ Теоретичні основи електротехніки. Комп'ютерне моделювання електричних та електронних кіл в середовищі MicroCap.

Лабораторний практикум : навчальний посібник / С. Ш. Каців, Ю. Г. Ведміцький, А. М. Коваль, І. К. Говор. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 212 с.

ISBN

В посібнику викладене комп'ютерне моделювання електричних та електронних кіл за допомогою програми схемотехнічного моделювання MicroCap. Посібник розрахований на студентів, аспірантів та викладачів електротехнічних та інших споріднених спеціальностей.

УДК 621.3

ББК 31.211я73

ISBN

© С. Каців, Ю. Ведміцький, А. Коваль, І. Говор 2014

ЗМІСТ

Інструкція з використання програми схемотехнічного моделювання MicroCap.....	4
Лабораторна робота № 1мс. Дослідження лінійних електричних кіл постійного струму з керованими джерелами живлення.....	37
Лабораторна робота № 2мс. Дослідження нелінійних електричних кіл постійного струму.....	43
Лабораторна робота № 3мс. Дослідження лінійних електричних кіл зі взаємною індуктивністю.....	51
Лабораторна робота № 4мс. Дослідження трифазного кола синусоїдного струму при з'єднанні приймачів енергії зіркою.....	63
Лабораторна робота № 5мс. Дослідження трифазного кола синусоїдного струму при з'єднанні приймачів енергії трикутником.....	76
Лабораторна робота № 6мс. Дослідження трифазного кола несинусоїдного струму при з'єднанні приймачів енергії зіркою.....	86
Лабораторна робота № 7мс. Дослідження перехідного процесу в лінійному колі постійного струму першого порядку.....	97
Лабораторна робота № 8мс. Дослідження перехідного процесу в лінійному колі постійного струму другого порядку.....	108
Лабораторна робота № 9мс. Дослідження перехідного процесу в лінійному колі синусоїдного струму другого порядку.....	118
Лабораторна робота № 10мс. Дослідження складних резонансів в розгалужених колах синусоїдного струму.....	124
Лабораторна робота № 11мс. Дослідження лінії з розподіленими параметрами.....	136
Лабораторна робота № 12мс. Дослідження характеристик біполярних транзисторів.....	150
Лабораторна робота № 13мс. Дослідження підсилювального каскаду на біполярному транзисторі.....	161
Лабораторна робота № 14мс. Дослідження компенсаційного стабілізатора постійної напруги.....	177
Лабораторна робота № 15мс. Дослідження трифазного однофазного випрямляча (схема Міткевича) в некерованому режимі роботи.....	189
Лабораторна робота № 16мс. Дослідження трифазного мостового випрямляча (схема Ларіонова) в некерованому режимі роботи.....	200
Література.....	211

ІНСТРУКЦІЯ

з використання програми схмотехнічного моделювання MicroCap

1. Загальні положення.

Програма схмотехнічного моделювання MicroCap призначена для моделювання й аналізу електричних та електронних схем.

Програма MicroCap дозволяє моделювати аналогові, цифрові і цифро-аналогові схеми великого ступеня складності. Наявні в програмі бібліотеки містять у собі великий набір широко поширених електронних компонентів. Є можливість підключення і створення нових бібліотек компонентів. Параметри компонентів можна змінювати в широкому діапазоні.

В бібліотеки компонентів програми входять пасивні елементи, транзистори, керовані джерела, керовані ключі, гібридні елементи, індикатори, логічні елементи, тригерні пристрої, цифрові й аналогові елементи, спеціальні комбінаційні та послідовні схеми. Активні елементи можуть бути подані моделями як ідеальних, так і реальних елементів. Можливо також створення своїх моделей елементів і додавання їх у бібліотеки елементів.

На рис. 1 зображене головне вікно програми MicroCap.

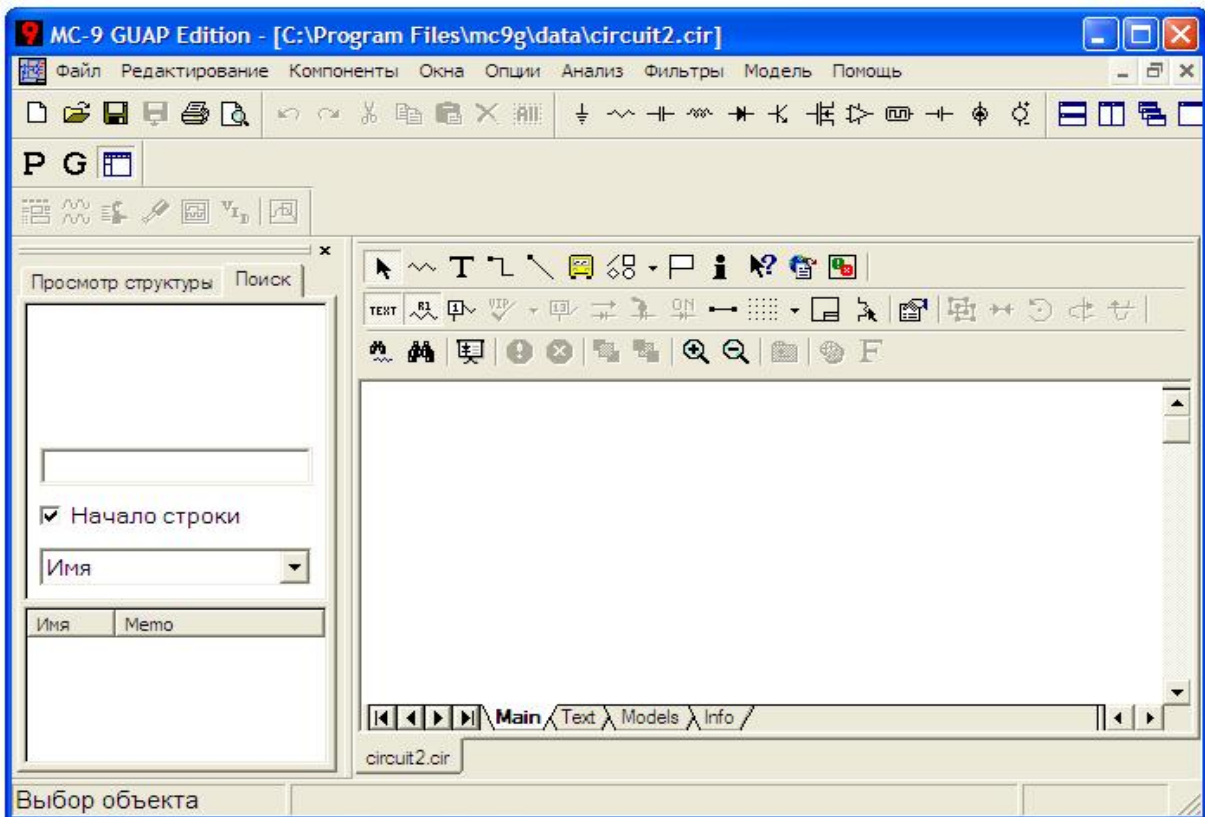


Рисунок 1 – Головне вікно програми MicroCap

В цьому вікні, окрім звичайних для Windows опцій, у верхньому рядку зображені найбільш вживані компоненти електричних та електронних схем, які будуть розглянуті нижче.

2. Основні компоненти MicroCap електричних та електронних схем

Найбільш вживаними компонентами електричних та електронних схем є заземлення, резистор, ємність, індуктивність, діод, біполярний транзистор, польовий транзистор, операційний підсилювач, джерела напруги та струму тощо.

Відзначимо, що числові параметри всіх компонентів задаються без вказівки на одиницю виміру, якщо вона відповідає системі СІ. У випадку, якщо значення параметру в багато разів менше або більше за одиницю виміру використовують умовні позначення (табл. 1).

Таблиця 1

10^{-15}	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	10^3	10^6	10^9	10^{12}
фемто	піко	нано	мікро	мілі	кіло	мега	гіга	тера
F(f)	P(p)	N(n)	U(u)	M(m)	K(k)	MEG(meg)	G(g)	T(t)

Заземлення

Компонент "заземлення" має нульову напругу й у такий спосіб забезпечує опорну точку для відліку потенціалів. В середовищі MicroCap всі схеми потребують обов'язкового заземлення.

Резистор

Атрибути резистора задаються у вікні (рис. 2), яке з'являється при перенесенні резистора на робоче поле програми.

В цьому вікні можна задати такі атрибути:

- *PART* – ім'я резистора;
- *RESISTANCE* – величину опору;
- *FREQ* – вираз, який замінює *VALIE* при проведенні частотного аналізу (на постійному струмі цей вираз не враховується);
- *MODEL* – ім'я моделі;
- *COST* – вартість;
- *POWER* – потужність розсіювання;
- *SAPEGROUP=Default*;

- *PACRAGE* – тип корпуса.

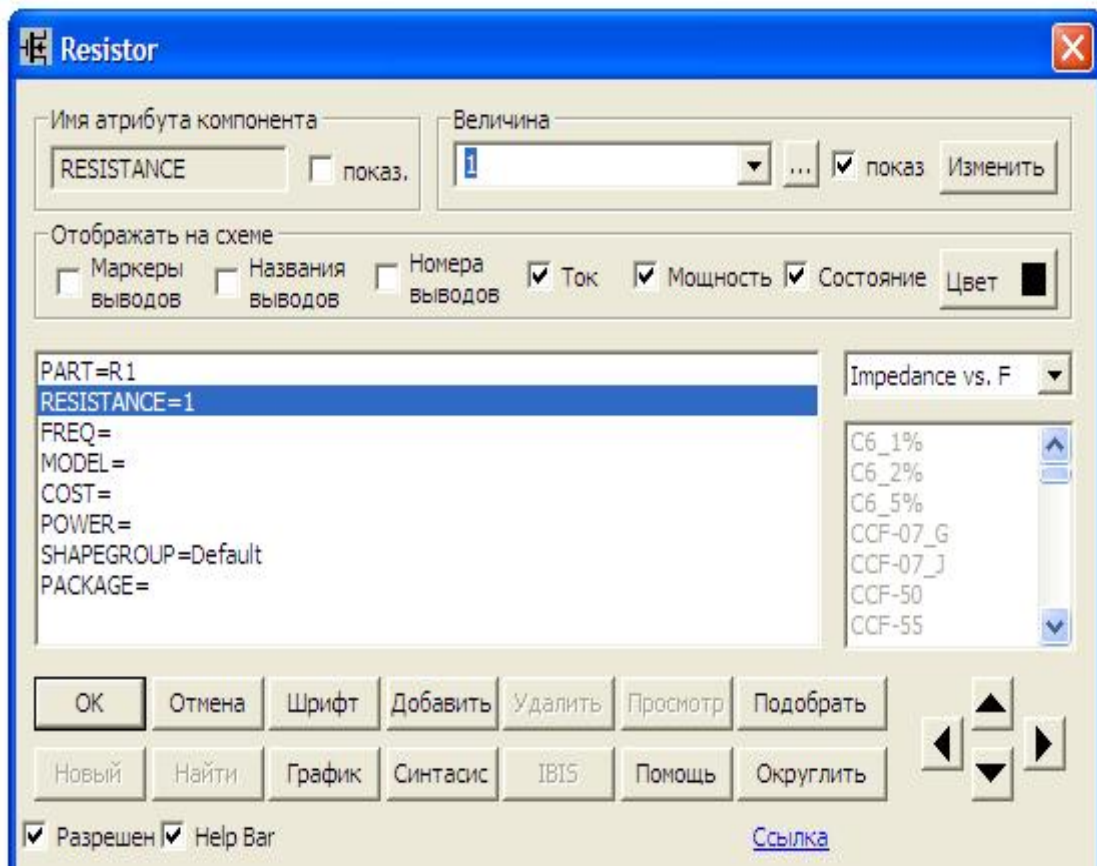


Рисунок 2 – Атрибути резистора

Обов'язковими для задання є атрибути *PART* та *RESISTANCE*, решту можна не задавати.

Конденсатор $\text{—}||\text{—}$

Атрибути конденсатора задаються у вікні (рис. 3), яке з'являється при перенесенні конденсатора на робоче поле програми.

В цьому вікні можна задати такі атрибути:

- *PART* – ім'я конденсатора;
- *CAPACINANCE* – величину ємності;
- *CARGE* – вираз для обчислення величини електричного заряду;
- *FREQ* – вираз, який замінює *VALIE* при проведенні частотного аналізу (на постійному струмі цей вираз не враховується);
- *MODEL* – ім'я моделі;
- *COST* – вартість;
- *POWER* – потужність розсіювання;

- *SHAPEGROUP=Default*
- *PACKAGE* – тип корпусу.

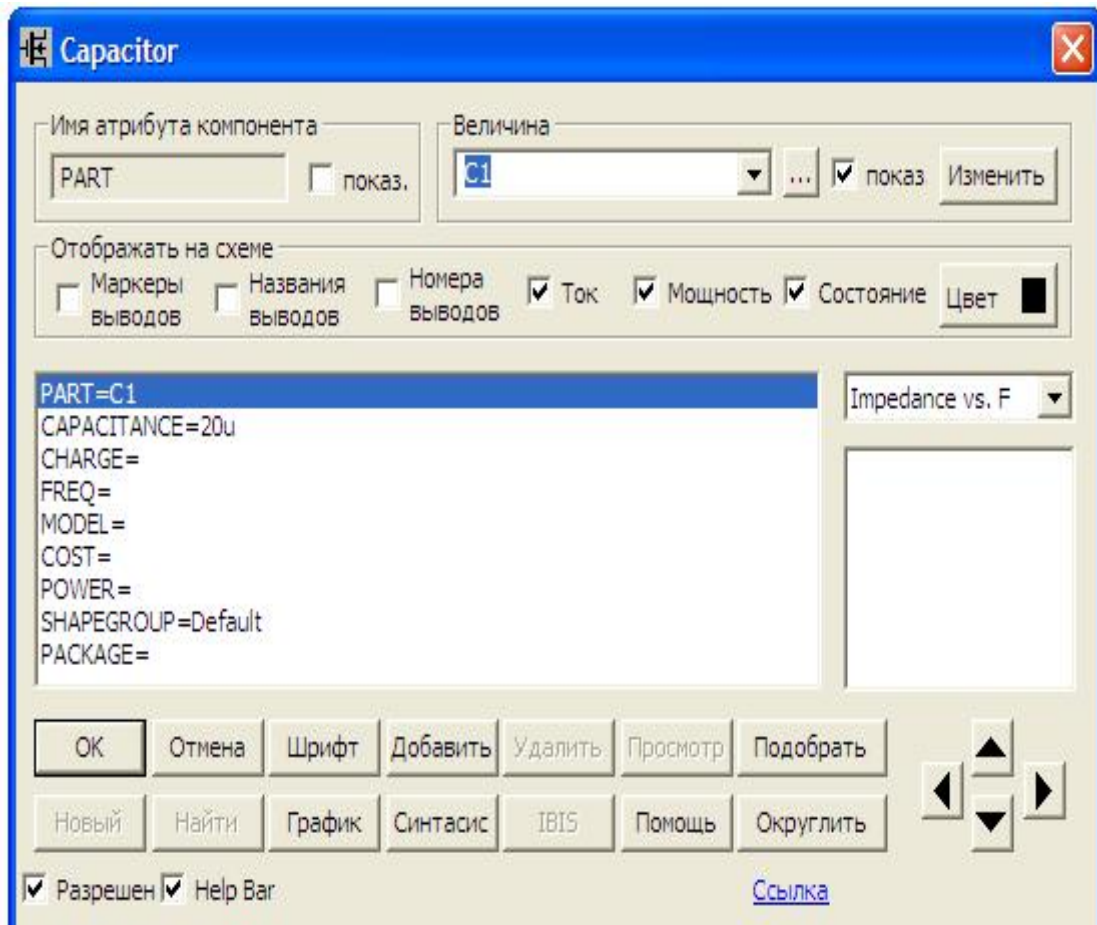


Рисунок 3 – Атрибути конденсатора

Обов'язковими для задання є атрибути *PART* та *CAPACITANCE*, решту можна не задавати.

Індуктивність 

Атрибути індуктивності задаються у вікні (рис. 4), яке з'являється при перенесенні індуктивності на робоче поле програми.

В цьому вікні можна задати такі атрибути:

- *PART* – ім'я індуктивності;
- *INDUCTANCE* – величину індуктивності;
- *FLUX* – вираз для обчислення величини магнітного потоку;
- *FREQ* – вираз, який замінює *VALUE* при проведенні частотного аналізу (на постійному струмі цей вираз не враховується);
- *MODEL* – ім'я моделі;

- *COST* – вартість;
- *POWER* – потужність розсіювання;
- *SHAPEGROUP=Default*
- *PACRAGE* – тип корпусу.

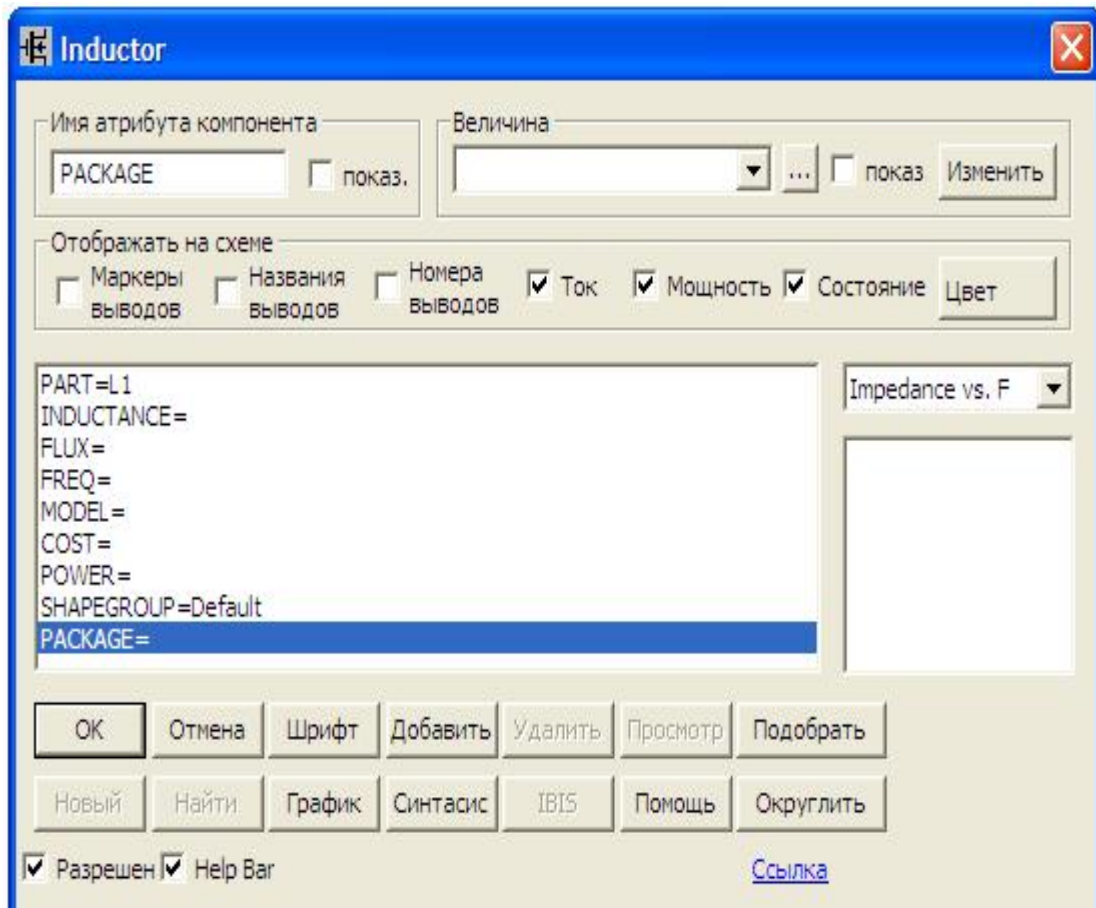


Рисунок 4 – Атрибути індуктивності

Обов'язковими для задання є атрибути *PART* та *INDUCTANCE*, решту можна не задавати.

Діод —▶—

Атрибути діода задаються у вікні (рис. 5), яке з'являється при перенесенні діода на робоче поле програми.

В цьому вікні можна задати такі атрибути:

- *PART* – ім'я діода;
- *VALUE* – множник площі для діода;
- *MODEL* – ім'я моделі;
- *COST* – вартість;

- *POWER* – потужність розсіювання;
- *SHAPEGROUP=Default*
- *PACKAGE* – тип корпусу.

Обов'язковими для задання є атрибути *PART* та *MODEL*, решту можна не задавати.

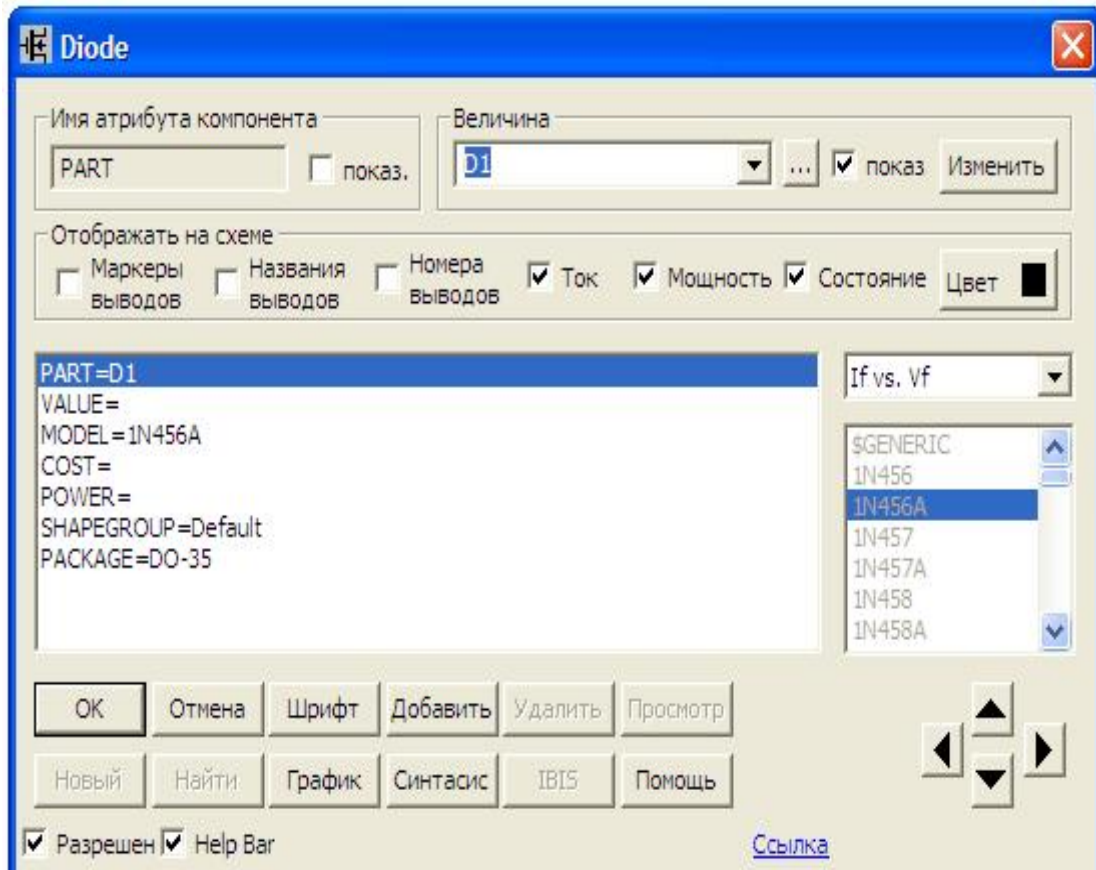


Рисунок 5 – Атрибути діода

Біполярний транзистор (npn-типу)



Атрибути біполярного транзистора задаються у вікні (рис. 6), яке з'являється при перенесенні транзистора на робоче поле програми.

В цьому вікні можна задати такі атрибути:

- *PART* – ім'я транзистора;
- *VALUE* – множник площі для транзистора;
- *MODEL* – ім'я моделі;
- *COST* – вартість;
- *POWER* – потужність розсіювання;
- *SHAPEGROUP=Default*

- *PACRAGE* – тип корпуса.

Обов'язковими для задання є атрибути *PART* та *MODEL*, решту можна не задавати.

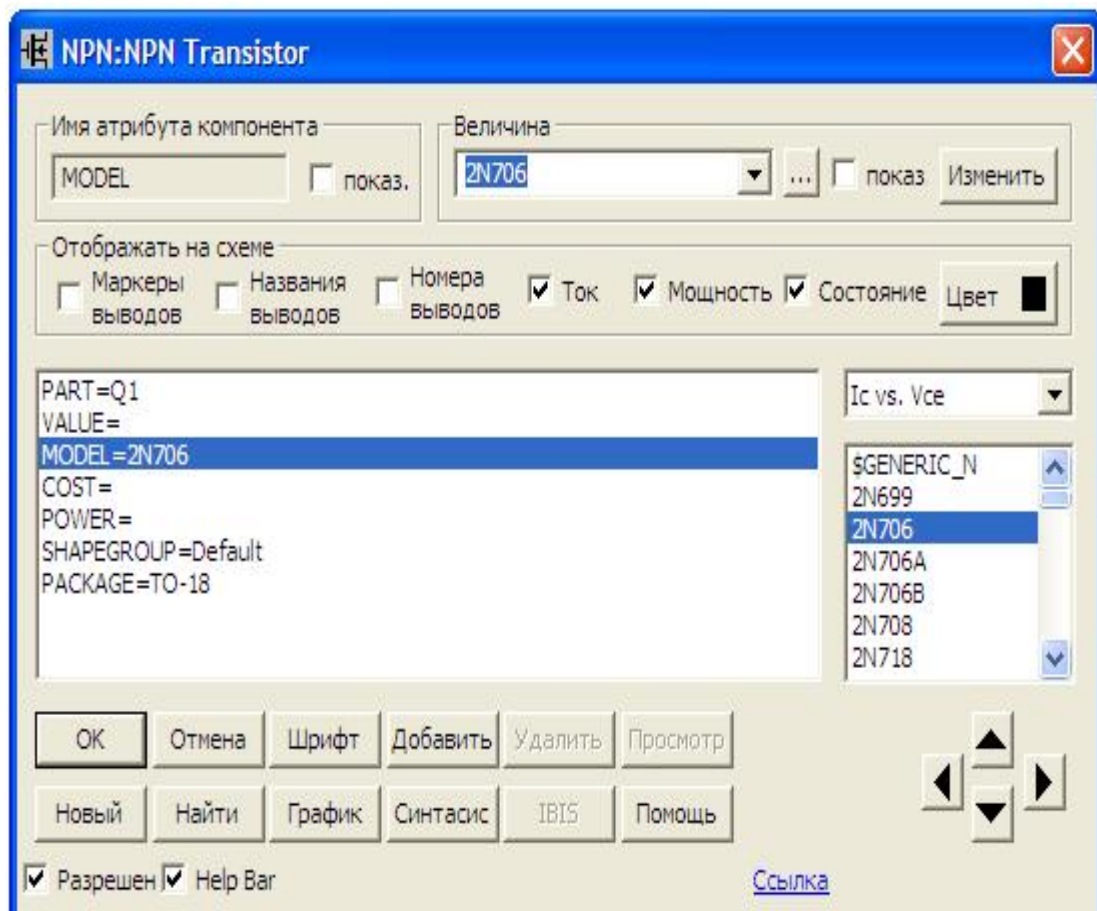


Рисунок 6 – Атрибути біполярного транзистора

Якщо необхідно побудувати схему з транзистором *pnp*-типу, слід відкрити опцію «Компоненты / Analog Primitives / Active Devices / PNP»

Польовий транзистор з ізольованим затвором

Атрибути польового транзистор з ізольованим затвором (*МОН*-типу) задаються у вікні (рис. 7), яке з'являється при перенесенні транзистора на робоче поле програми.

В цьому вікні можна задати такі атрибути:

- *PART* – ім'я транзистора;
- *VALUE* – параметри стока, виток та затвора;
- *MODEL* – ім'я моделі;
- *COST* – вартість;
- *POWER* – потужність розсіювання;

- *SHAPEGROUP=Default*
- *PACKAGE* – тип корпусу.

Обов'язковими для задання є атрибути *PART* та *MODEL*, решту можна не задавати.

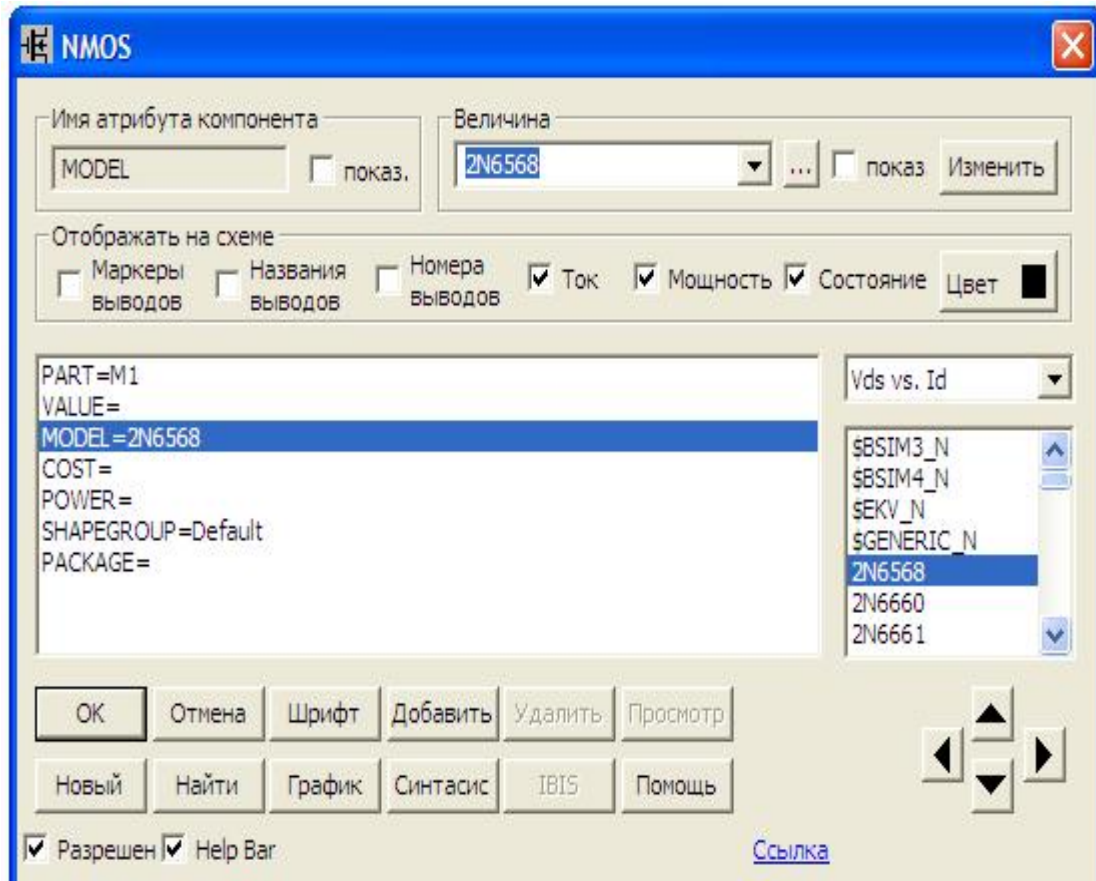


Рисунок 7 – Атрибути біполярного транзистора

Якщо необхідно побудувати схему з польовим транзистором із затвором у вигляді *pn*-переходу, слід відкрити опцію «Компоненты / Analog Primitives / Active Devices / NJFET»

Джерело постійної напруги 

Атрибути джерела постійної напруги задаються у вікні (рис. 8), яке з'являється при перенесенні джерела на робоче поле програми.

В цьому вікні можна задати такі атрибути:

- *PART* – ім'я джерела;
- *VALUE* – напруга джерела;
- *COST* – вартість;
- *POWER* – потужність розсіювання;

- *SHAPEGROUP=Default*
- *PACRAGE* – тип корпуса.

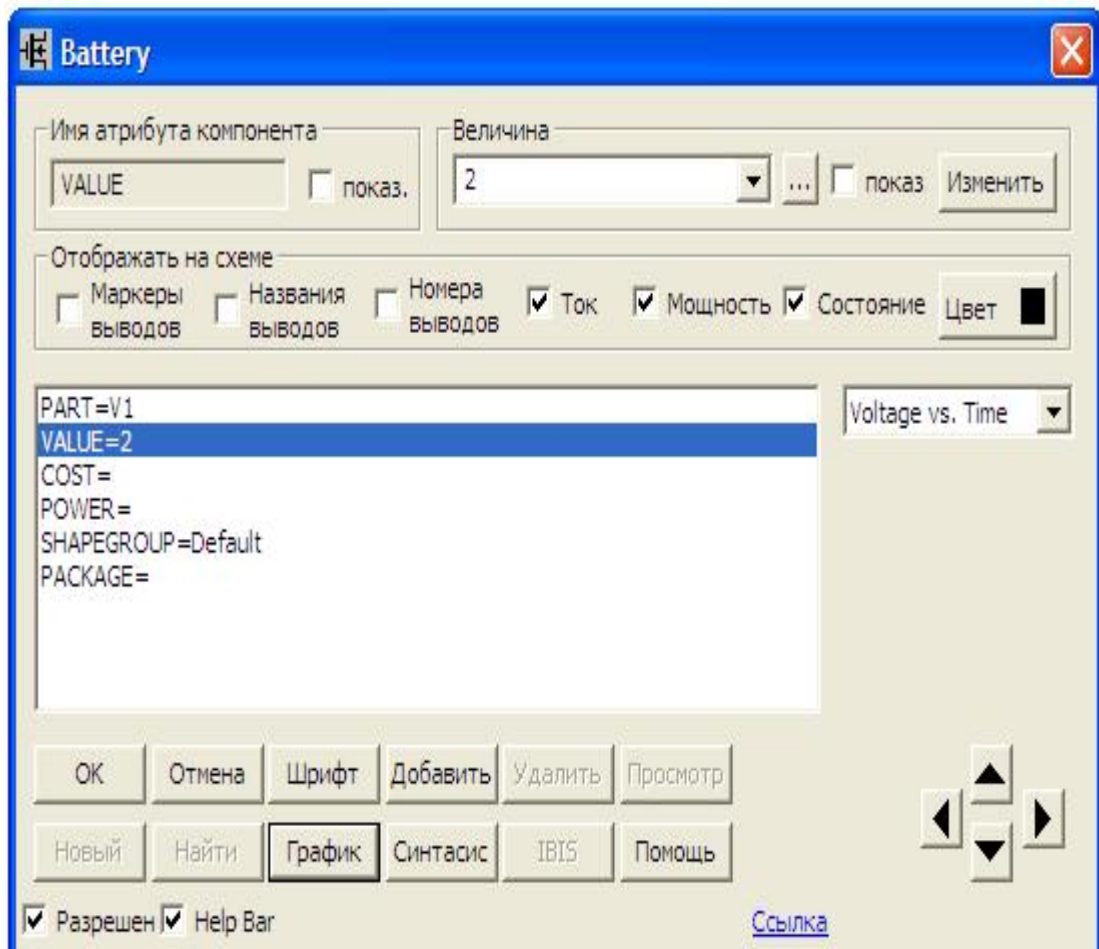


Рисунок 8 – Атрибути джерела постійної напруги

Обов'язковими для задання є атрибути *PART* та *VALUE*, решту можна не задавати.

Джерело напруги довільної форми 

Атрибути такого джерела задаються у вікні (рис. 9), яке з'являється при перенесенні джерела на робоче поле програми.

В цьому вікні можна задати такі атрибути:

- *PART* – ім'я джерела;
- *VALUE* – форма та значення напруги джерела;
- *COST* – вартість;
- *POWER* – потужність розсіювання;
- *SHAPEGROUP=Default*
- *PACRAGE* – тип корпуса.

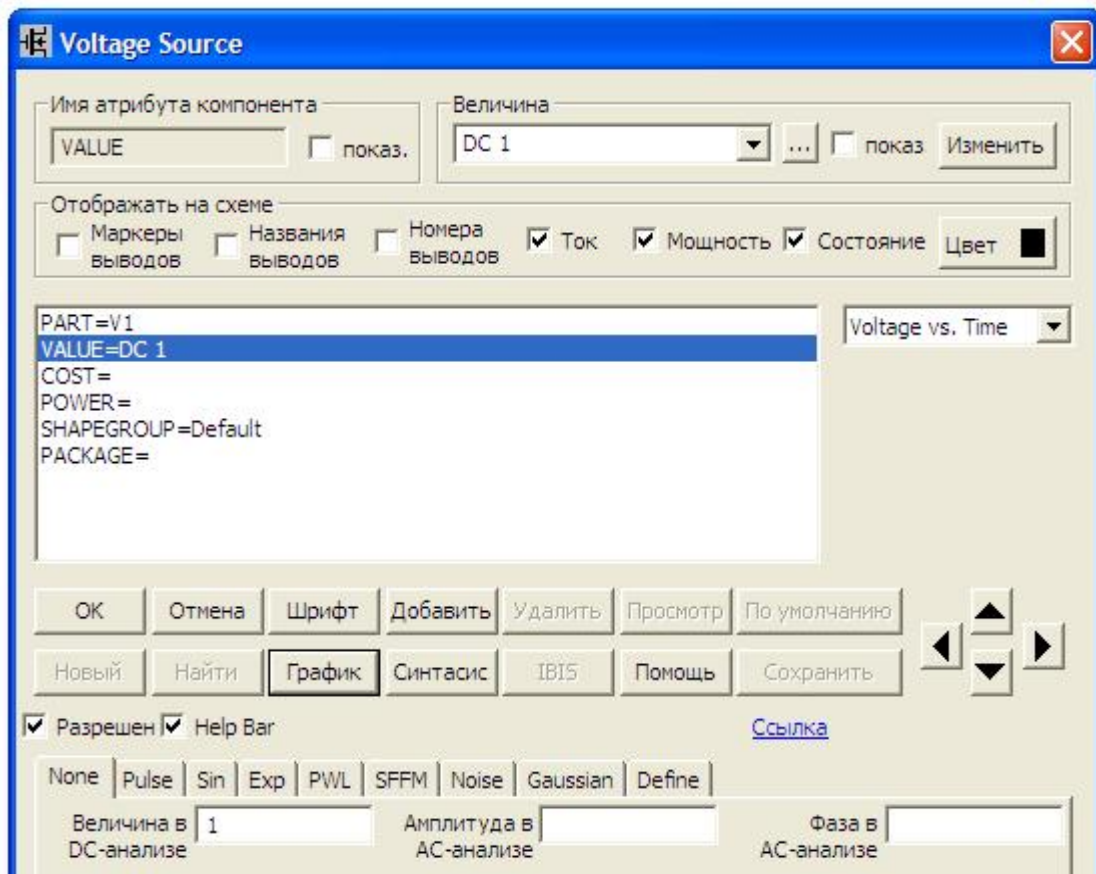


Рисунок 9 – Атрибути джерела напруги довільної форми

Форму та значення напруги джерела можна задати як атрибутом *VALUE* (на рис. 9 задано DC1, що відповідає постійній напрузі 1 В), так і за допомогою таких вкладинок:

- *None* – постійна напруга (рис. 9);
- *Pulse* – імпульсна напруга, параметри якої показані у віконцях на рис. 10, графік – на рис. 11;

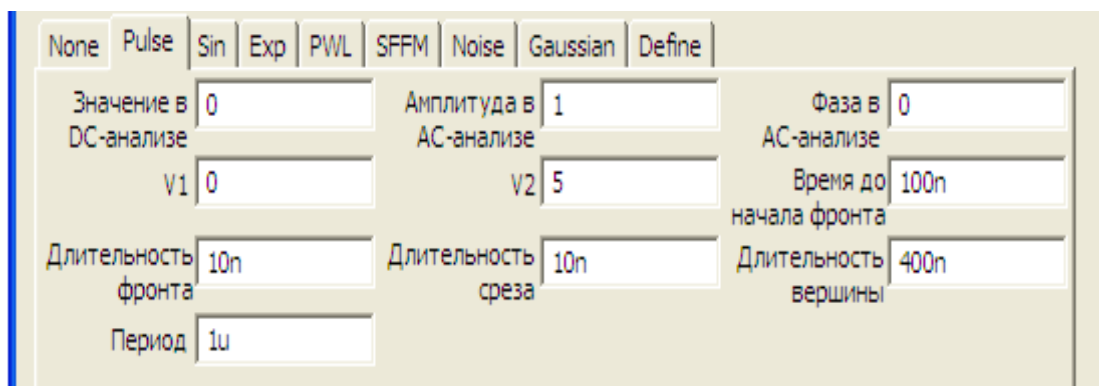


Рисунок 10 – Атрибути джерела імпульсної напруги

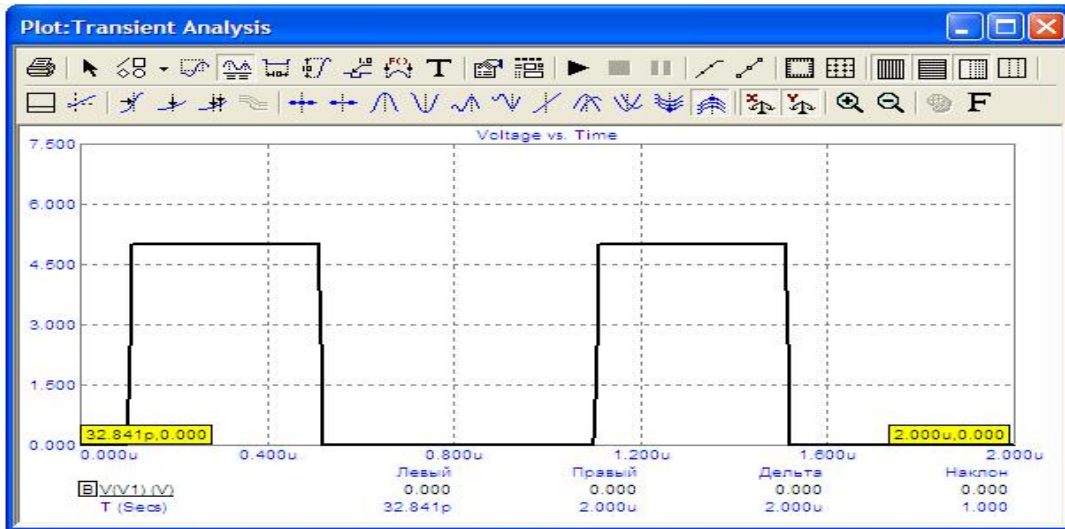


Рисунок 11 – Графік імпульсної напруги

• *Sin* – синусоїдна напруга, параметри якої показані у віконцях на рис. 12, графік – на рис. 13;

None	Pulse	Sin	Exp	PWL	SFFM	Noise	Gaussian	Define
Величина в DC-анализе	0	Амплитуда в AC-анализе	1	Фаза в AC-анализе	0			
VO	0	VA	1	Частота	1meg			
Задержка	0	Затухание	0	Фазовый СДВИГ	0			

Рисунок 12 – Атрибути джерела синусоїдної напруги

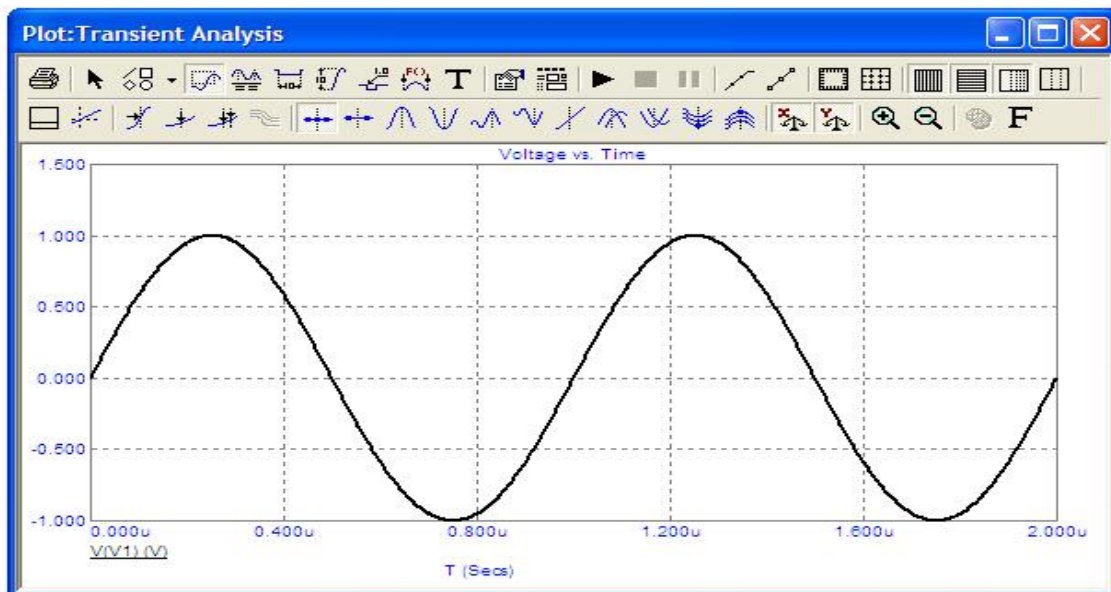


Рисунок 13 – Графік синусоїдної напруги

• *Exp* – експоненціальна напруга, параметри якої показані у віконцях на рис. 14, графік – на рис. 15;

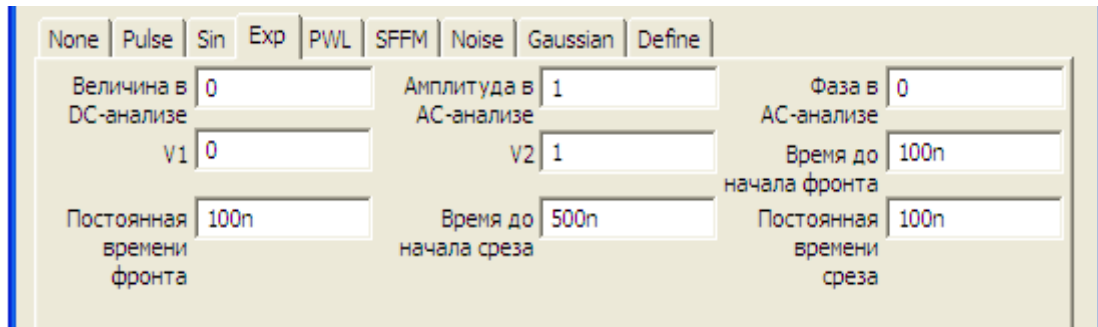


Рисунок 14 – Атрибути джерела експоненціальної напруги

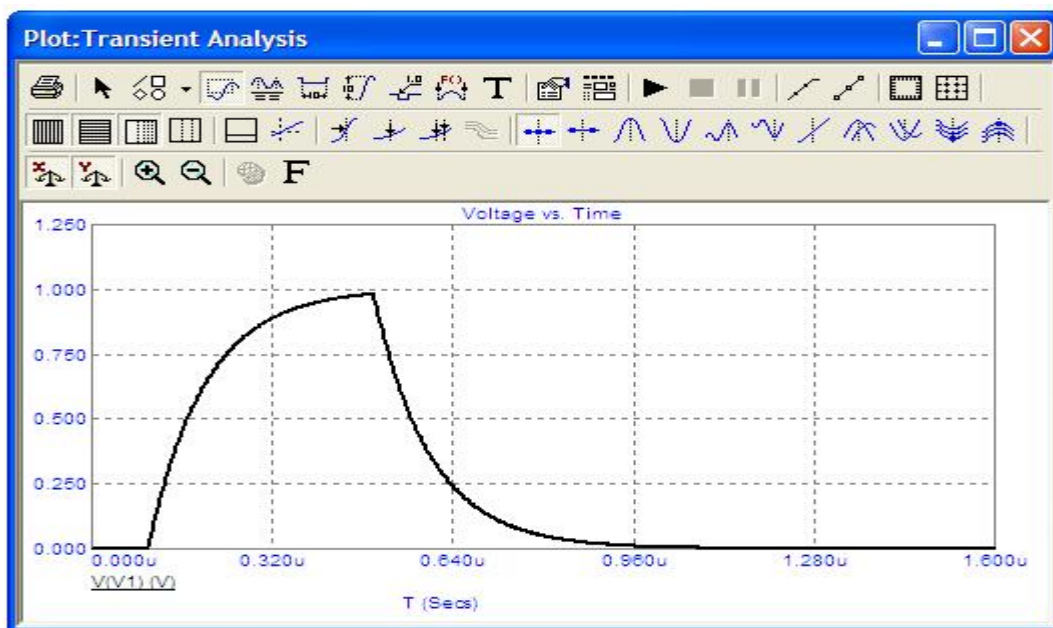


Рисунок 15 – Графік синусоїдної напруги

• *PWL* – кусково-лінійна напруга, параметри якої показані у віконцях на рис. 16, графік – на рис. 17;

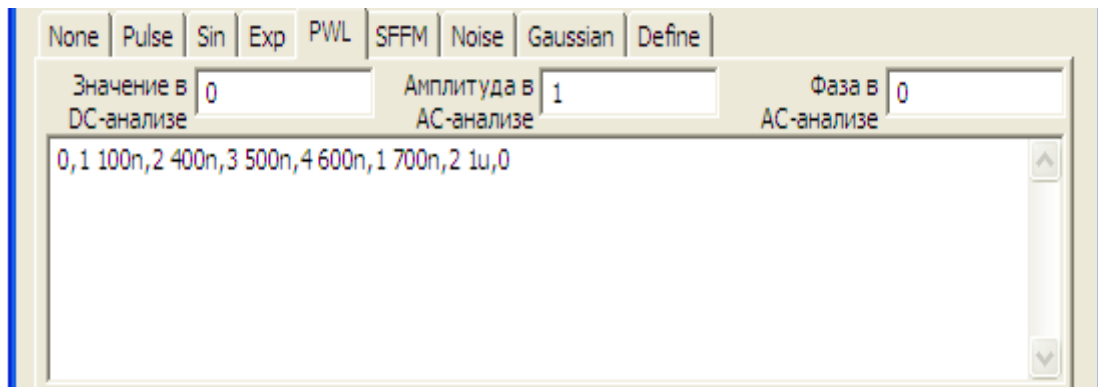


Рисунок 16 – Атрибути джерела кусково-лінійної напруги

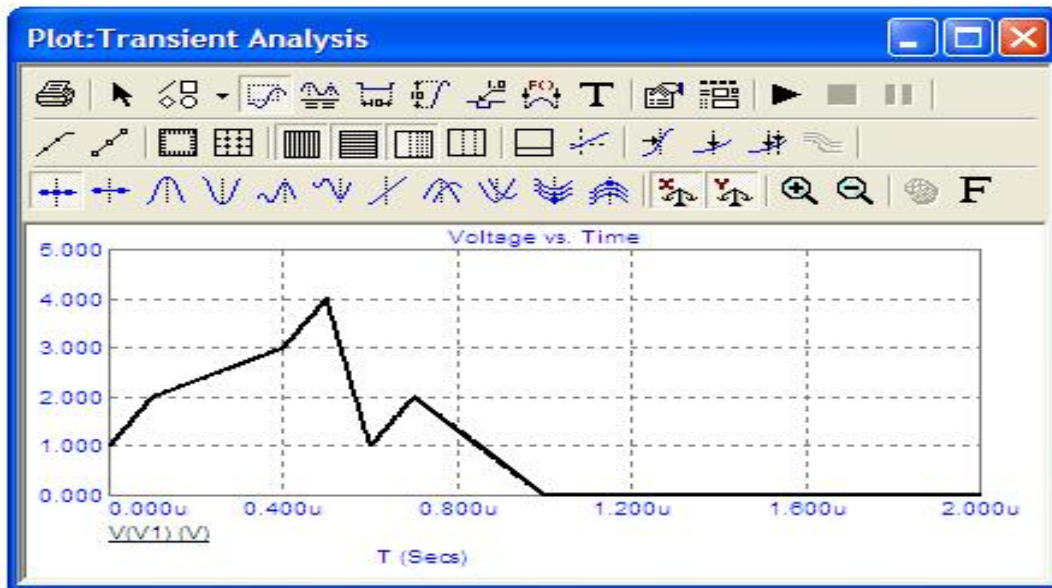


Рисунок 17 – Графік кусково-лінійної напруги

• *SFFM* – модульований сигнал, параметри якого показані у віконцях на рис. 18, графік – на рис. 19;

None	Pulse	Sin	Exp	PWL	SFFM	Noise	Gaussian	Define
Значення в DC-аналізі	VO	0	Амплітуда в AC-аналізі	VA	1	Фаза в AC-аналізі	0	
Індекс ЧМ	.5	Модулююча частота	1e7	Частота несущей	1e6			

Рисунок 18 – Атрибути модульованого сигналу

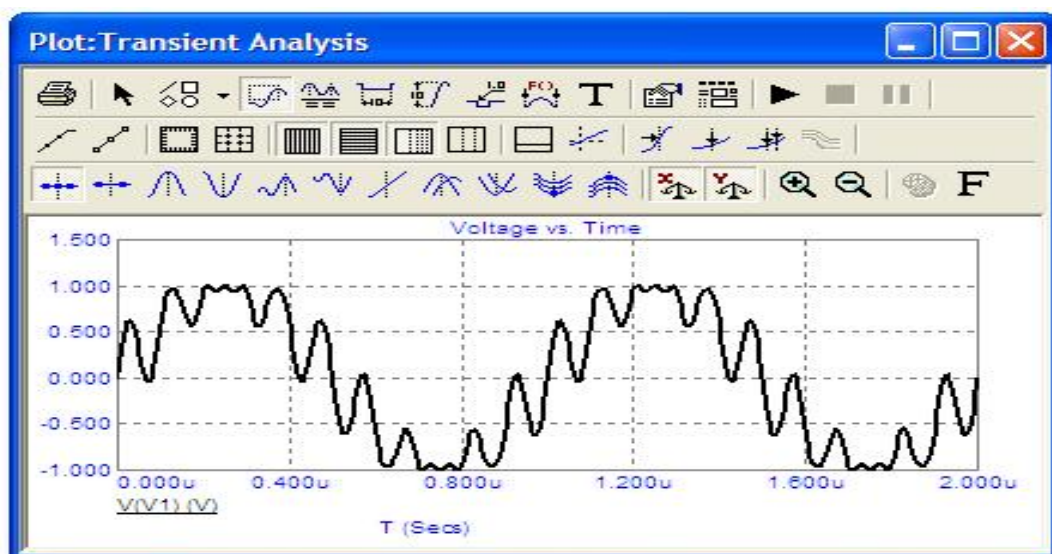


Рисунок 19 – Графік модульованого сигналу

• *Noise* – випадковий сигнал, параметри якого показані у віконцях на рис. 20, графік – на рис. 21;

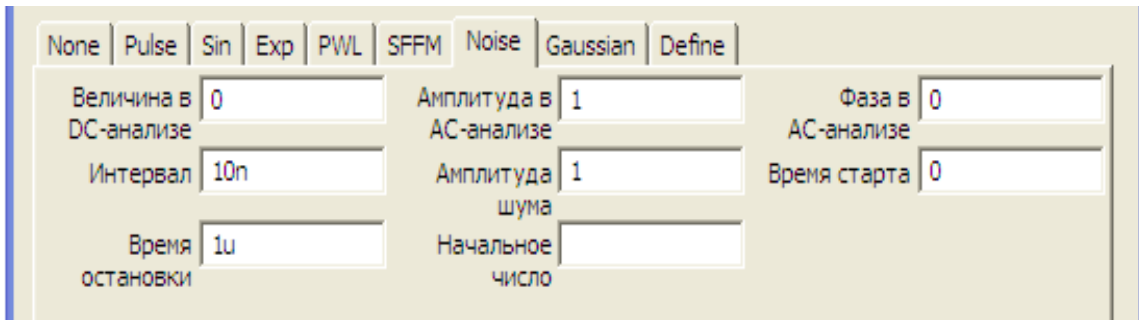


Рисунок 20 – Атрибути випадкового сигналу

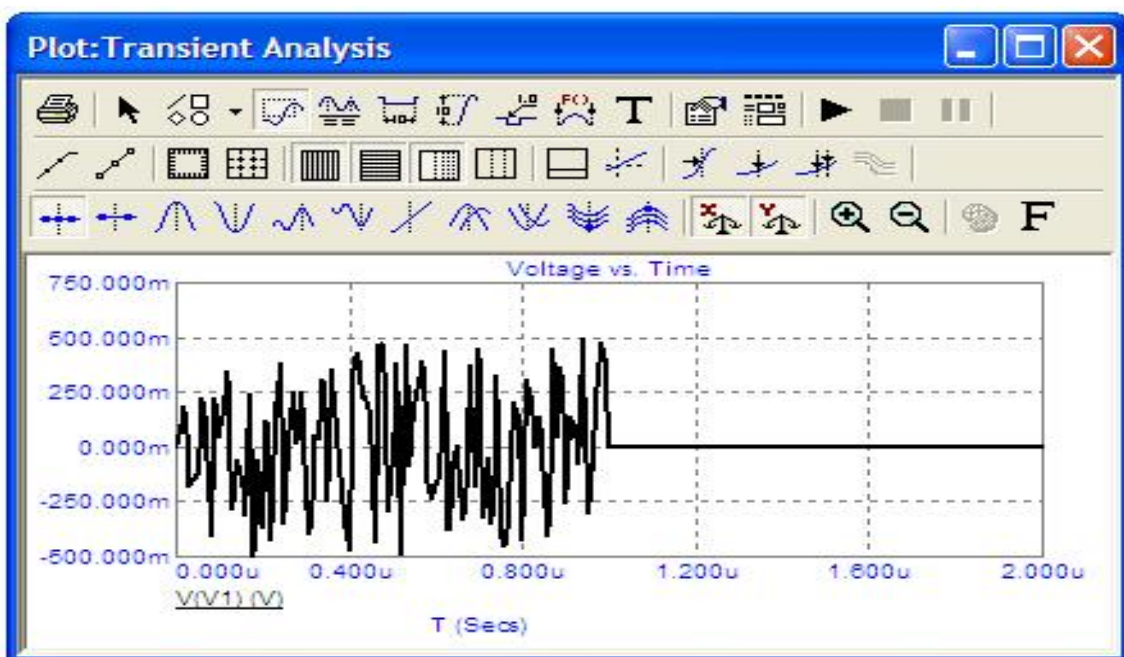


Рисунок 21 – Графік випадкового сигналу

• *Gaussian* – напруга, що має форму гаусової кривої, параметри якої показані у віконцях на рис. 22, графік – на рис. 23;

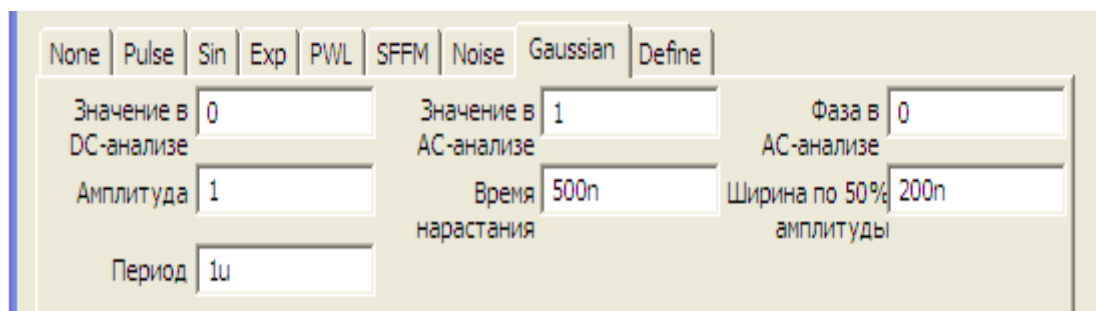


Рисунок 22 – Атрибути джерела напруги, що має форму гаусової кривої

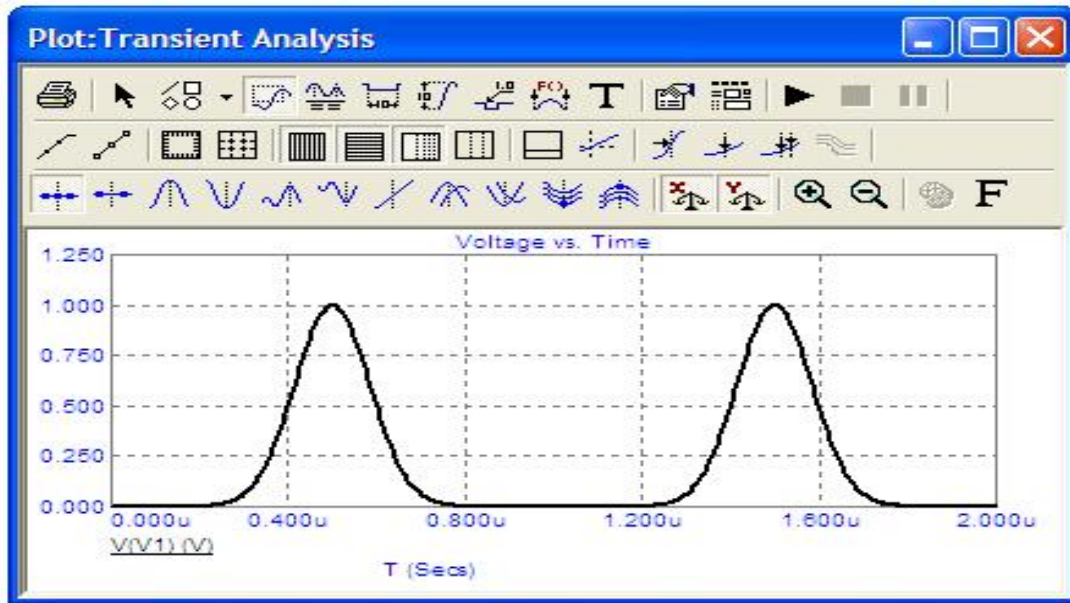


Рисунок 23 – Графік джерела напруги, що має форму гаусової кривої

Джерело струму довільної форми 

Атрибути такого джерела задаються у вікні (рис. 24), яке з'являється при перенесенні джерела на робоче поле програми.

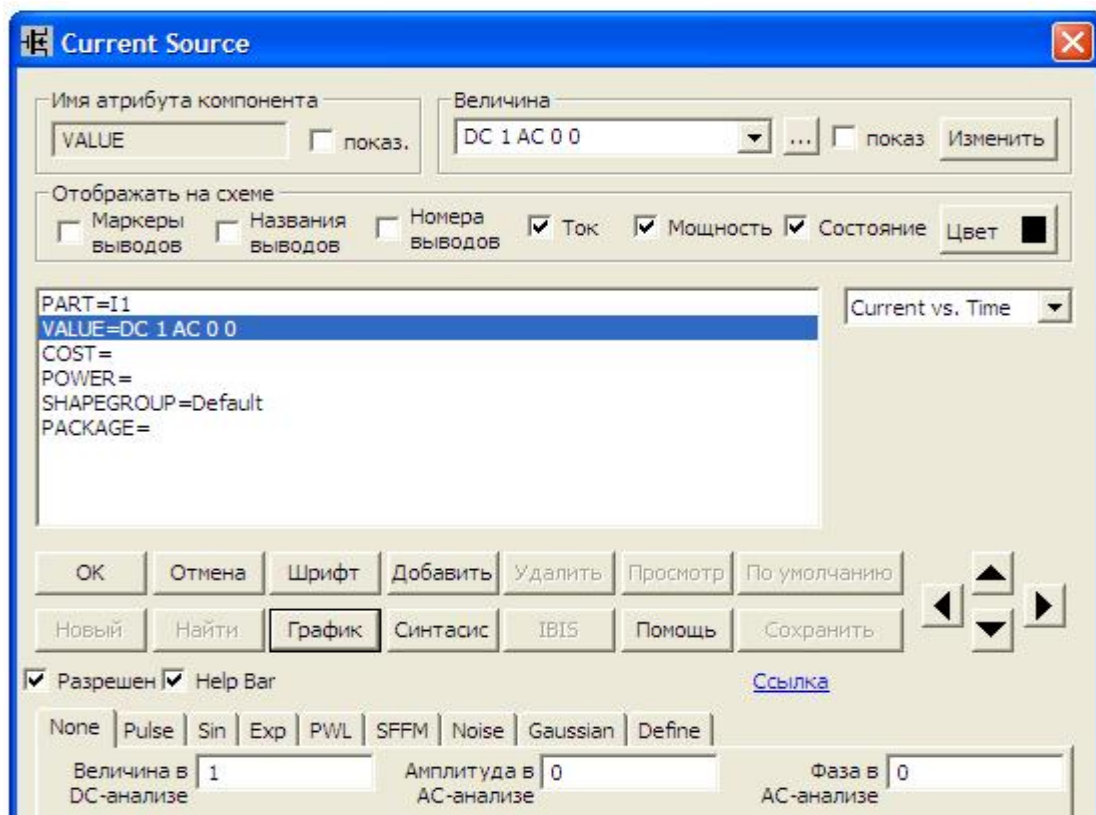


Рисунок 24 – Атрибути джерела струму довільної форми

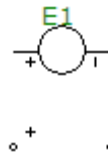
В цьому вікні можна задати такі атрибути:

- *PART* – ім'я джерела;
- *VALUE* – форма та значення напруги джерела;
- *COST* – вартість;
- *POWER* – потужність розсіювання;
- *SHAPEGROUP=Default*
- *PACKAGE* – тип корпусу.

Форму та значення струму джерела можна задати як атрибутом *VALUE* (на рис. 24 задано DC1, що відповідає постійному струму 1 А), так і за допомогою вкладинок *Pulse*, *Sin*, *Exp*, *PWL*, *SFFM*, *Noise*, *Gaussian*. Атрибути і графіки джерел струму, які можна задати за допомогою цих вкладинок аналогічні рис. 10 – 23.

Окрім вищенаведених найбільш вживаних компонентів, розглянемо ще деякі компоненти, які можуть бути корисними.

Джерело постійної напруги кероване напругою



Таке джерело можна викликати на екран опцією «Компоненты / Analog Primitives / Dependent Sources / VofV». Атрибути такого джерела задаються у вікні (рис. 25), яке з'являється при перенесенні джерела на робоче поле програми.

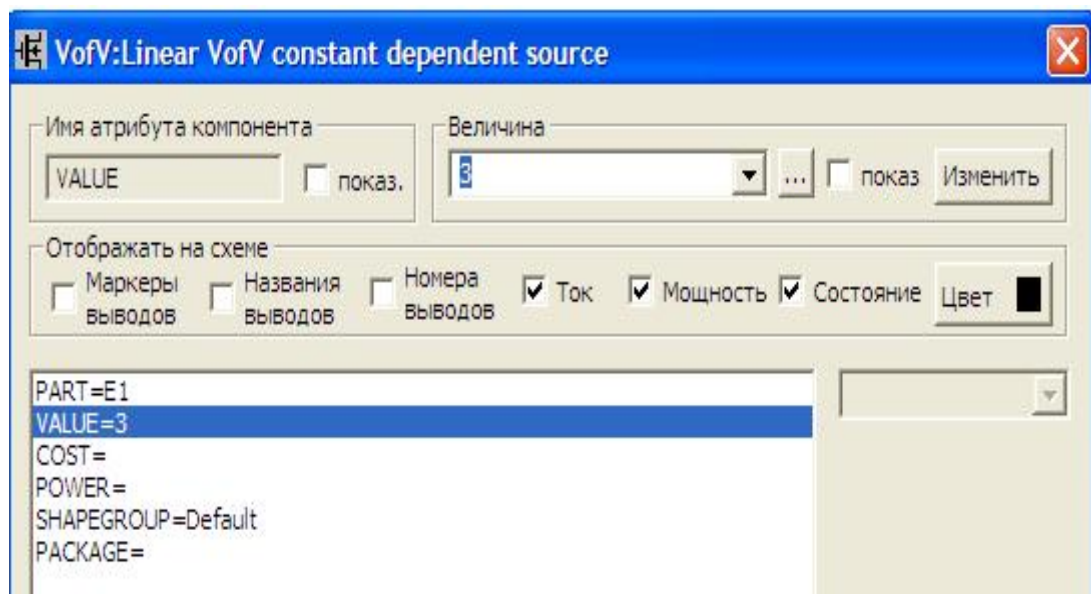
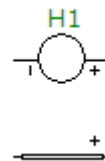


Рисунок 25 – Атрибути джерела напруги керованого напругою

В цьому вікні можна задати такі атрибути:

- *PART* – ім'я джерела;
- *VALUE* – коефіцієнт залежності напруги джерела від напруги на якійсь ділянці кола іншої вітки;
- *COST* – вартість;
- *POWER* – потужність розсіювання;
- *SHAPEGROUP=Default*
- *PACRAGE* – тип корпусу.

Джерело постійної напруги кероване струмом



Таке джерело можна викликати на екран опцією «Компоненты / Analog Primitives / Dependent Sources / VofI ». Атрибути такого джерела задаються у вікні (рис. 26), яке з'являється при перенесенні джерела на робоче поле програми.

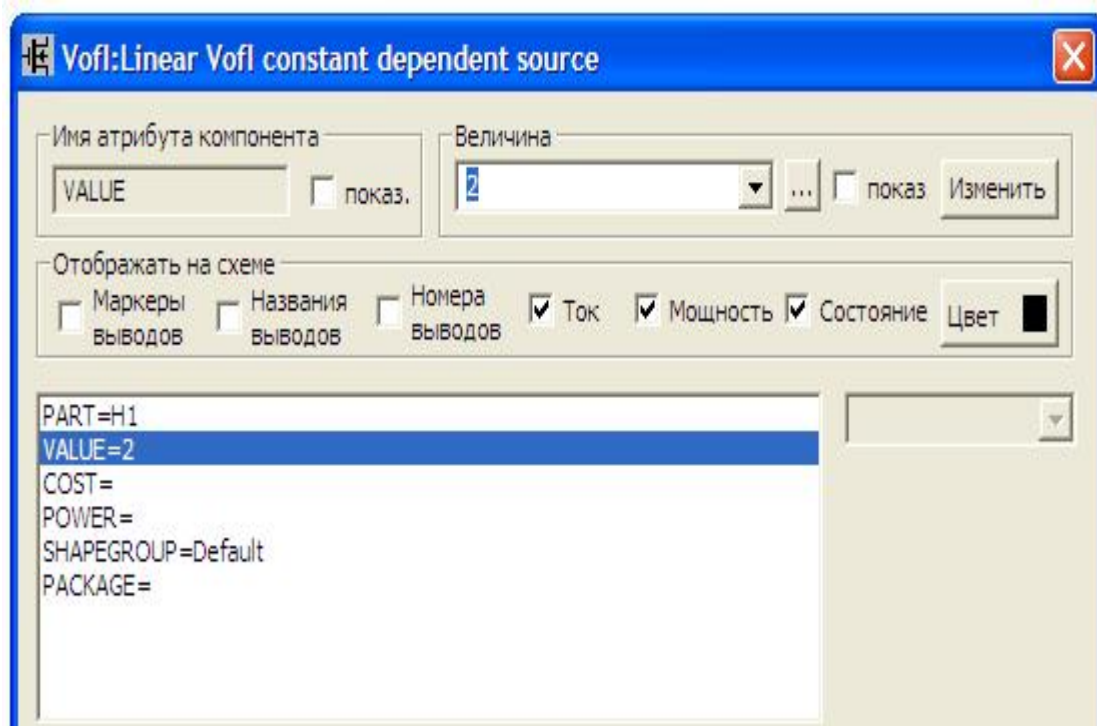


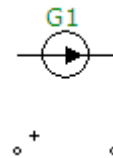
Рисунок 26 – Атрибути джерела напруги керованого струмом

В цьому вікні можна задати такі атрибути:

- *PART* – ім'я джерела;

- *VALUE* – коефіцієнт залежності напруги джерела від струму в іншій вітці;
- *COST* – вартість;
- *POWER* – потужність розсіювання;
- *SHAPEGROUP=Default*
- *PACRAGE* – тип корпусу.

Джерело постійного струму кероване напругою



Таке джерело можна викликати на екран опцією «Компоненты / Analog Primitives / Dependent Sources / IofV». Атрибути такого джерела задаються у вікні (рис. 27), яке з'являється при перенесенні джерела на робоче поле програми.

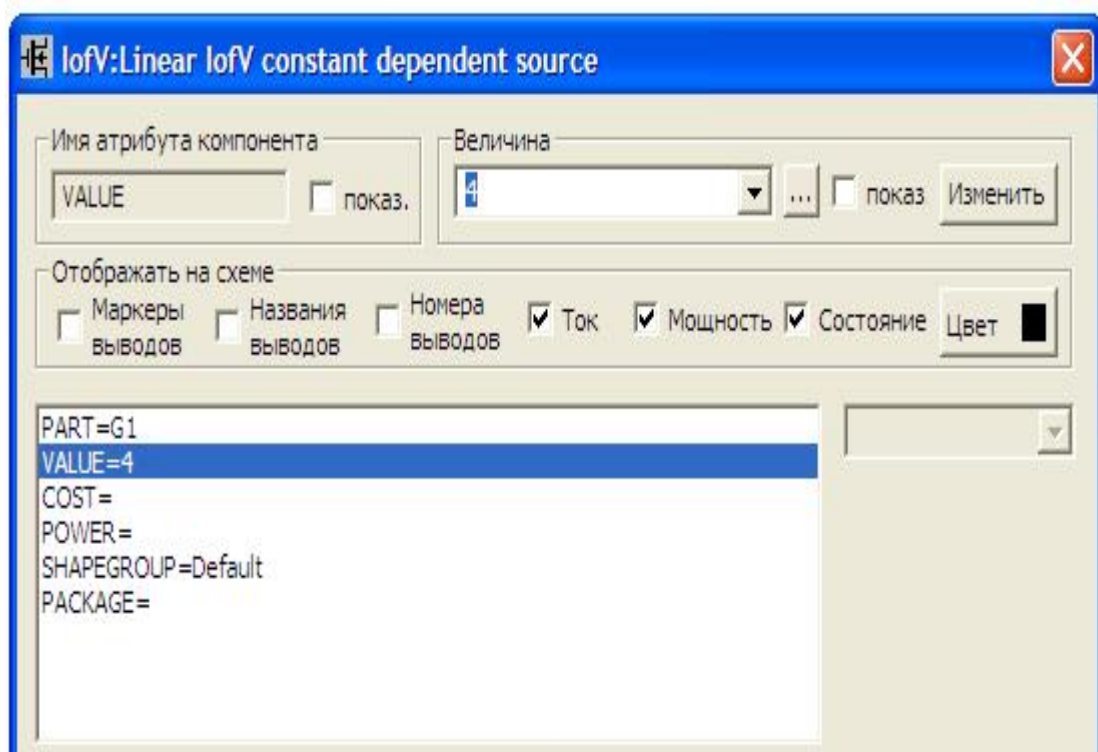
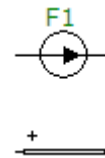


Рисунок 27 – Атрибути джерела струму керованого напругою

В цьому вікні можна задати такі атрибути:

- *PART* – ім'я джерела;
- *VALUE* – коефіцієнт залежності струму джерела від напруги на якійсь ділянці кола іншої вітки;

- *COST* – вартість;
- *POWER* – потужність розсіювання;
- *SHAPEGROUP=Default*
- *PACRAGE* – тип корпусу.



Джерело постійного струму кероване струмом

Таке джерело можна викликати на екран опцією «Компоненти / Analog Primitives / Dependent Sources / IofI». Атрибути такого джерела задаються у вікні (рис. 28), яке з'являється при перенесенні джерела на робоче поле програми.

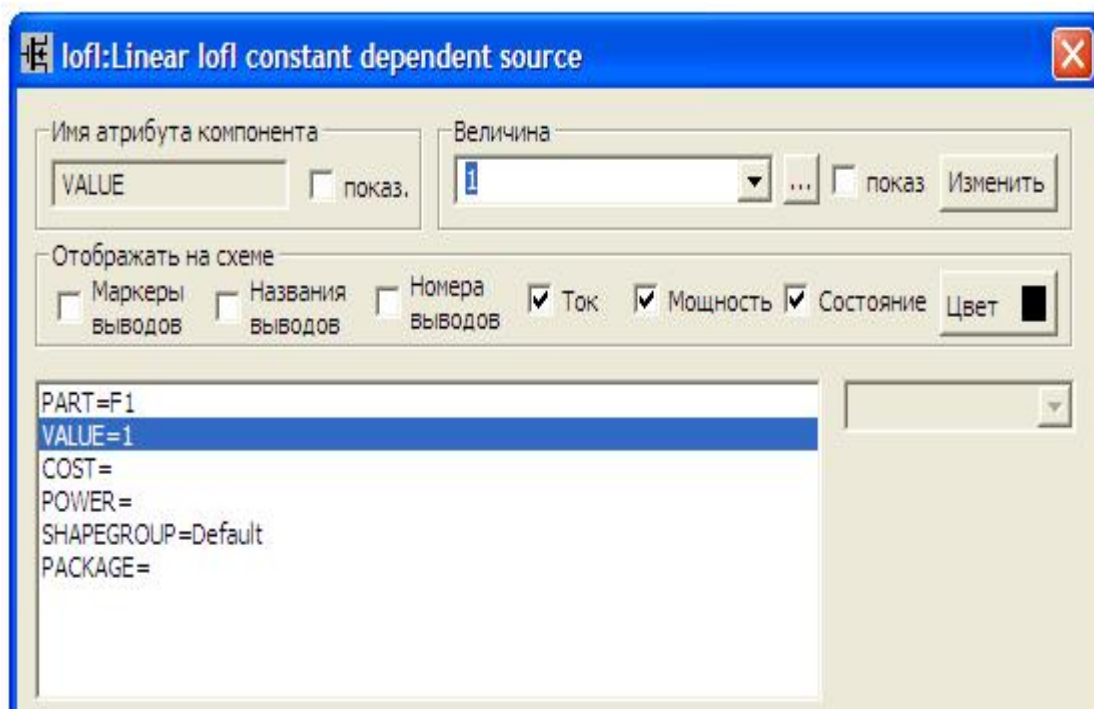


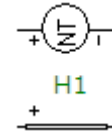
Рисунок 28 – Атрибути джерела струму керованого струмом

В цьому вікні можна задати такі атрибути:

- *PART* – ім'я джерела;
- *VALUE* – коефіцієнт залежності струму джерела від струмів іншої вітці;
- *COST* – вартість;
- *POWER* – потужність розсіювання;
- *SHAPEGROUP=Default*

- *PACRAGE* – тип корпуса.

**Джерело постійної напруги кероване струмом
(таблична форма задання)**



Таке джерело можна викликати на екран опцією «Компоненты / Analog Primitives / Function Sources /NTVofI». Атрибути такого джерела задаються у вікні (рис. 29), яке з'являється при перенесенні джерела на робоче поле програми.

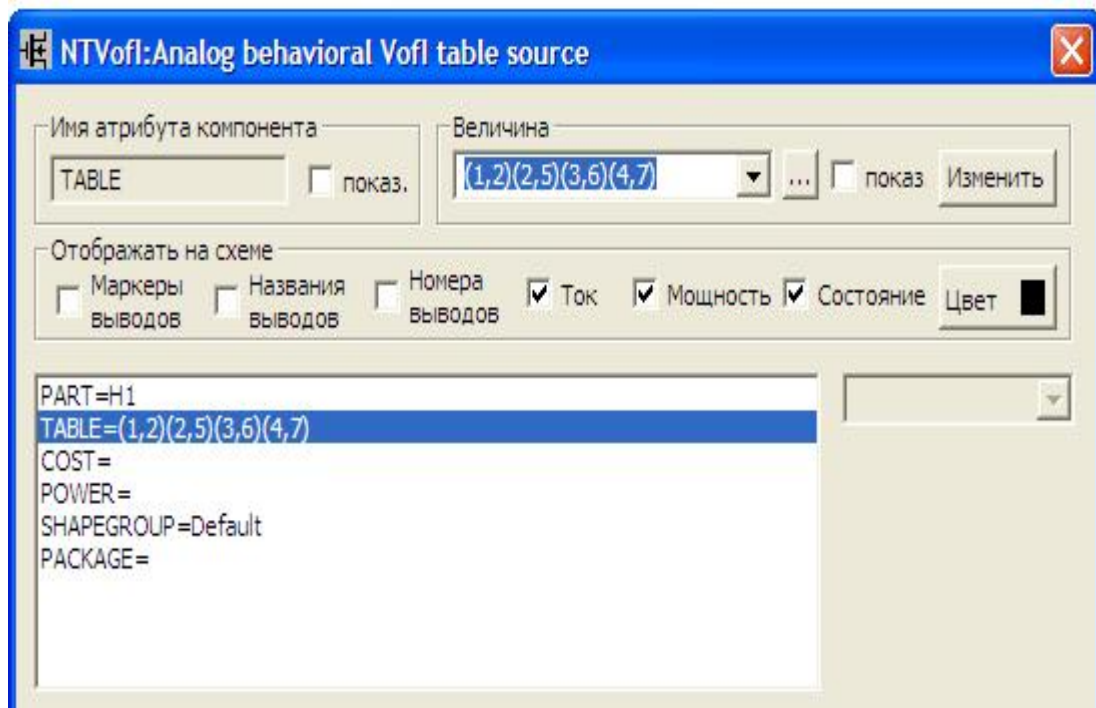


Рисунок 29 – Атрибути джерела напруги керованого струмом
(в табличній формі задання)

В цьому вікні можна задати такі атрибути:

- *PART* – ім'я джерела;
- *TABLE* – таблична залежність напруги джерела від струму;
- *COST* – вартість;
- *POWER* – потужність розсіювання;
- *SAPEGROUP=Default*
- *PACRAGE* – тип корпуса.

Таке джерело, враховуючи теорему компенсації, можна використовувати як нелінійний резистор з довільно заданою ВАХ.

Магнітне осердя

Цей компонент можна викликати на екран опцією «Компоненты / Analog Primitives / Passive Components /K». Його атрибути задаються у вікні (рис. 30), яке з'являється при перенесенні компонента на робоче поле програми.

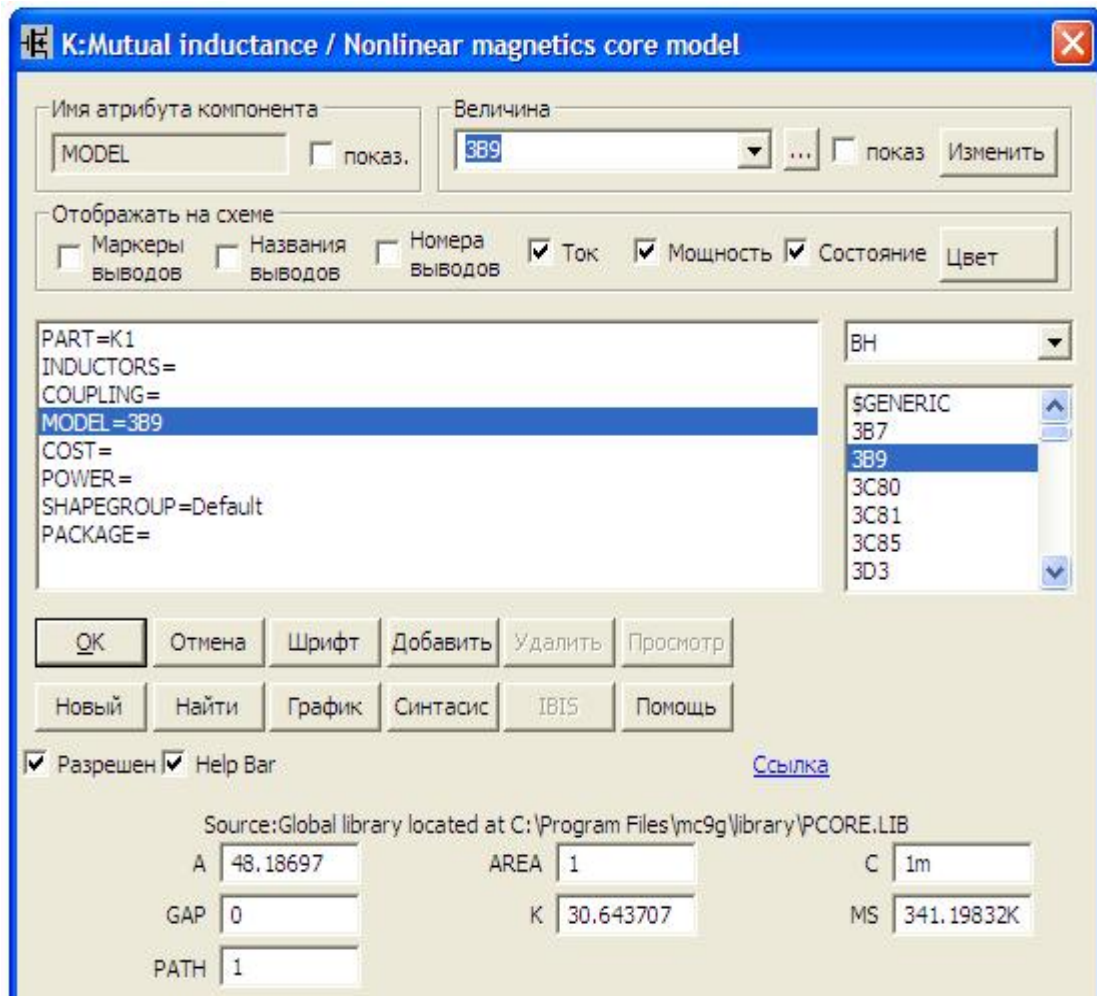


Рисунок 30 – Атрибути магнітного осердя

В цьому вікні можна задати такі атрибути:

- *PART* – ім'я магнітного осердя;
- *INDUCTORS* – список позиційних позначень (імен) індуктивно зв'язаних котушок (в списку може міститися як декілька котушок, так і одна);
- *COUPLING* – коефіцієнт магнітного зв'язку (у випадку, якщо на осерді міститься лише одна котушка, не задається);

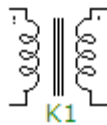
- *MODEL* – модель магнітного осердя (вибирається із списку у правому вікні);

- *COST* – вартість;
- *POWER* – потужність розсіювання;
- *SAPEGROUP=Default*
- *PACRAGE* – тип корпусу.

Якщо модель осердя не задати, то його крива намагнічування вважається лінійною. У випадку завдання певної моделі осердя вважається нелінійним і у вікні з'являються додаткові параметри, а саме:

- *AREA* – площа перерізу магнітного осердя (одиниця виміру см^2);
- *PATH* – середня довжина магнітної силової лінії (одиниця виміру см);
- *GAP* – ширина повітряного зазору (одиниця виміру см);
- *MS* – намагніченість насичення;
- *A* – параметр форми безгистерезисної кривої намагнічення;
- *C* – стала упругого зміщення доменних меж;
- *K* – стала незворотної деформації доменних стінок.

Трансформатор (лінійний)



Цей компонент можна викликати на екран опцією «Компоненты / Analog Primitives / Passive Components / Transformer». Його атрибути задаються у вікні (рис. 31), яке з'являється при перенесенні компонента на робоче поле програми.

В цьому вікні можна задати такі атрибути:

- *PART* – ім'я магнітного осердя;
- *VALUE* – параметри трансформатора, а саме – первинна індуктивність, вторинна індуктивність, коефіцієнт магнітного зв'язку;
- *COST* – вартість;
- *POWER* – потужність розсіювання;
- *SAPEGROUP=Default*
- *PACRAGE* – тип корпусу.

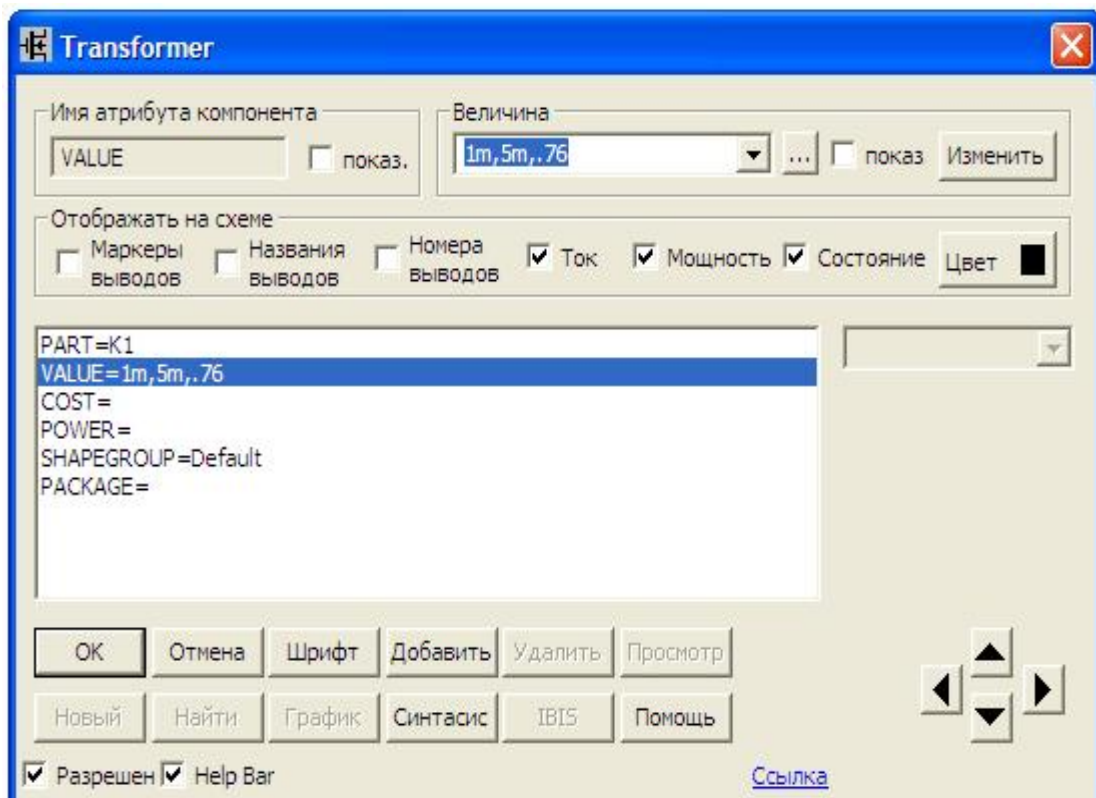
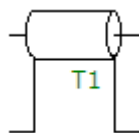


Рисунок 31 – Атрибути трансформатора

Довга лінія



Цей компонент можна викликати на екран опцією «Компоненты / Analog Primitives / Passive Components / TLine». Його атрибути задаються у вікні (рис. 32), яке з'являється при перенесенні компонента на робоче поле програми.

В цьому вікні можна задати такі атрибути:

- *PART* – ім'я довгої лінії;
- *VALUE* – параметри довгої лінії;
- *MODEL* – модель довгої лінії;
- *COST* – вартість;
- *POWER* – потужність розсіювання;
- *SAPEGROUP=Default*

- *PACRAGE* – тип корпусу.

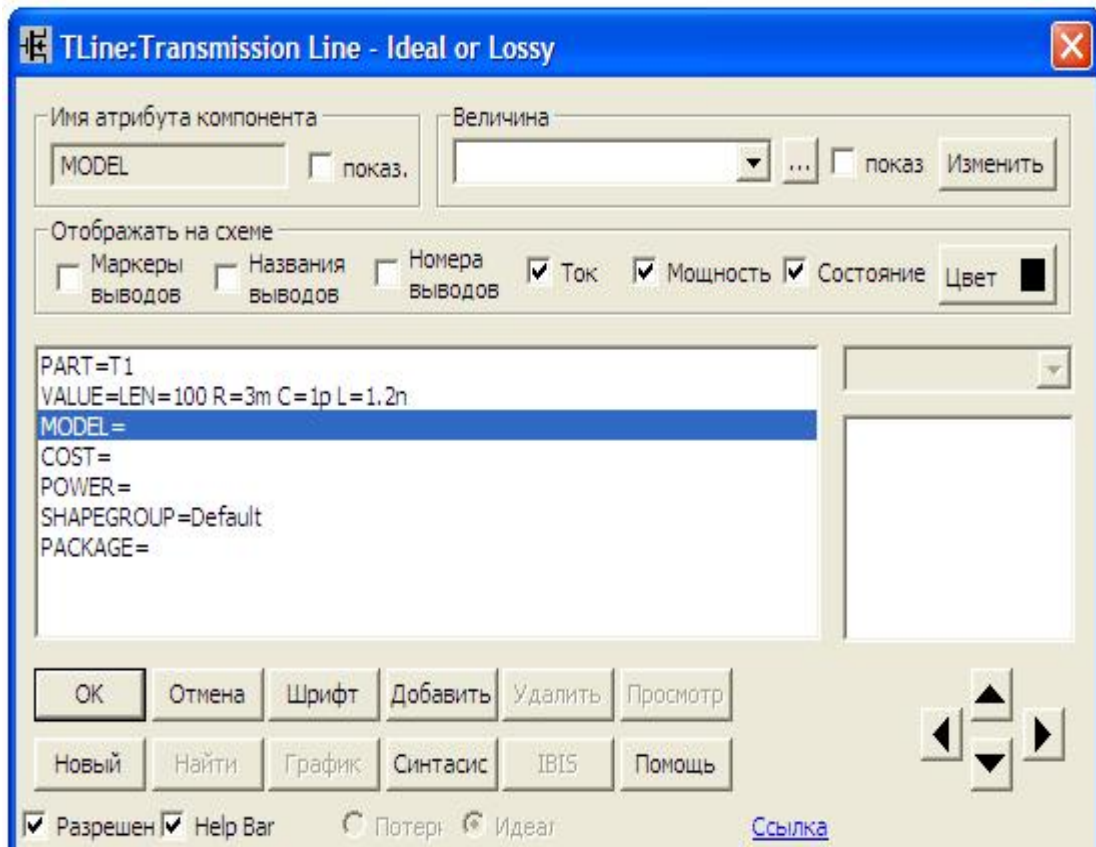


Рисунок 32 – Атрибути довгої лінії

Параметрами довгої лінії, які задаються атрибутом *VALUE* є:

а) для ідеальної довгої лінії без втрат:

- Z_0 – хвильовий опір лінії [Ом];
- F – частота [Гц];
- NL – електрична довжина лінії на частоті F , яка визначається як

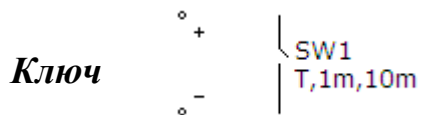
$$NL = \frac{L}{\lambda}, \text{ де } L \text{ – геометрична довжина лінії, } \lambda \text{ – довжина хвилі.}$$

б) для довгої лінії із втратами:

- R – питомий опір лінії [Ом/м];
- L – питома індуктивність лінії [Гн/м];
- G – питома провідність лінії [См/м];
- C – питома ємність лінії [Ф/м];
- LEN – геометрична довжина лінії.

Слід зазначити, що MicroCap підтримує лише такі типи довгих ліній:

RLC , RC , RG , LC . Інші ненульові комбінації цих параметрів викликають повідомлення про помилку.



Ключ використовують при розрахунку перехідних процесів.

Цей компонент можна викликати на екран опцією «Компоненты / Analog Primitives / Special Purpose / Switch». Його атрибути задаються у вікні (рис. 33), яке з'являється при перенесенні компонента на робоче поле програми.

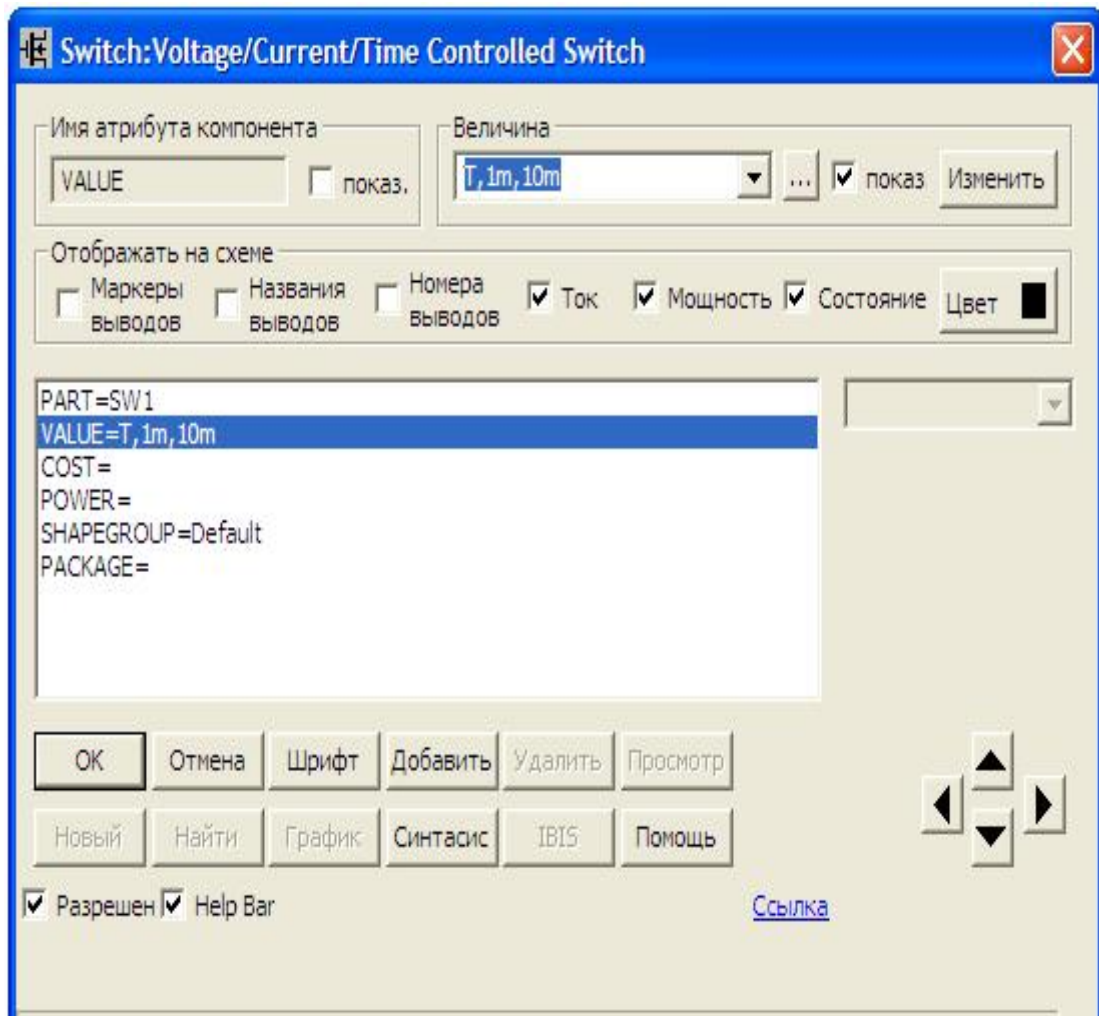


Рисунок 33 – Атрибути ключа

В середовищі MicroCap використовуються ключі трьох типів:

- V – ключ, керований напругою;
- I – ключ, керований струмом;
- T – ключ, керований часом.

В цьому вікні можна задати такі атрибути:

- $PART$ – ім'я ключа;

- *VALUE* – параметри ключа за форматом: тип ключа, параметр $n1$, параметр $n2$;

- *MODEL* – модель довгої лінії;
- *COST* – вартість;
- *POWER* – потужність розсіювання;
- *SAPEGROUP=Default*
- *PACRAGE* – тип корпусу.

Параметри $n1$ та $n2$ визначають умови вмикання ключа.

При $n1 < n2$ ключ увімкнений, якщо керуючий сигнал X відповідає умові $n1 < X < n2$, і вимкнений, якщо $X < n1 \vee X > n2$.

При $n1 > n2$ ключ вимкнений, якщо керуючий сигнал X відповідає умові $n1 > X > n2$, і увімкнений, якщо $X > n1 \vee X < n2$.

Для ключа типу V керуючий сигнал X це напруга між керуючими полюсами ключа.

Для ключа типу I керуючий сигнал X це напруга між керуючими полюсами ключа.

Для ключа типу T керуючий сигнал X це час, при цьому керуючі полюси ключа мають бути заземленими.

1.3. Основні види аналізу електричних та електронних схем

Програма MicroCap дає можливість виконати такі види аналізу електричних та електронних схем:

- аналіз перехідних процесів (Transient);
- частотний аналіз (AC);
- аналіз для постійного струму (DC);
- динамічний аналіз для постійного струму (Dynamic DC);
- динамічний частотний аналіз (Dynamic AC).

Розглянемо кожен з цих видів аналізу детальніше.

Аналіз перехідних процесів.

При виборі в меню цього виду аналізу на екрані з'являється вікно, в якому задаються параметри розрахунку перехідних процесів.

Це вікно зображене на рис. 34 і містить такі кнопки:

1. «Запустить» – запускає процес моделювання перехідного процесу.

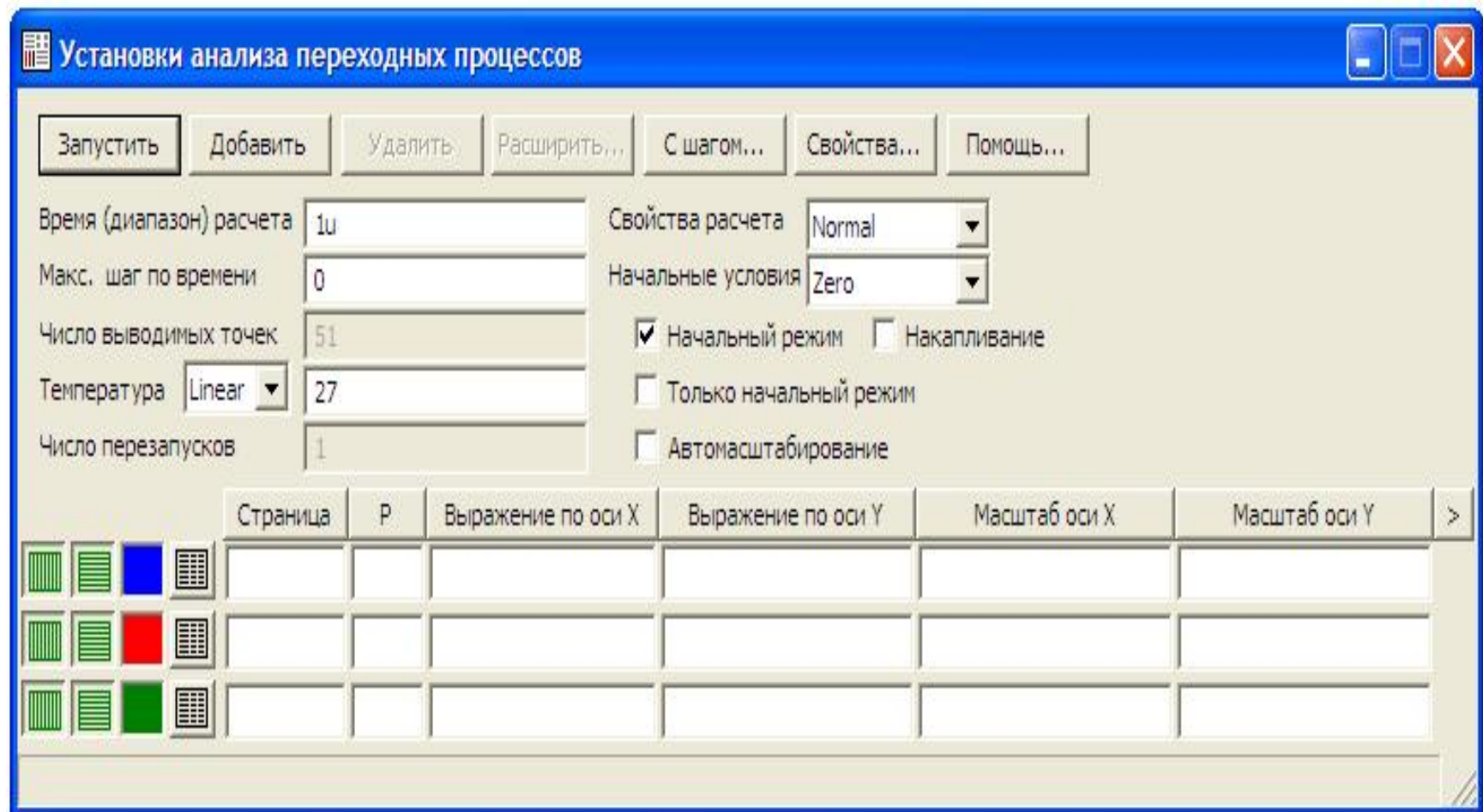


Рисунок 34 – Параметры розрахунку перехідних процесів

2. «Добавить» – додає ще один рядок в специфікації виводу результатів після рядка, який відмічений курсором.

3. «Удалить» – вилучає відмічений курсором рядок в специфікації виводу результатів.

4. «Расширить...» – відкриття додаткового вікна.

5. «С шагом...» – відкриття діалогового вікна (рис. 35) завдання варіації параметрів.

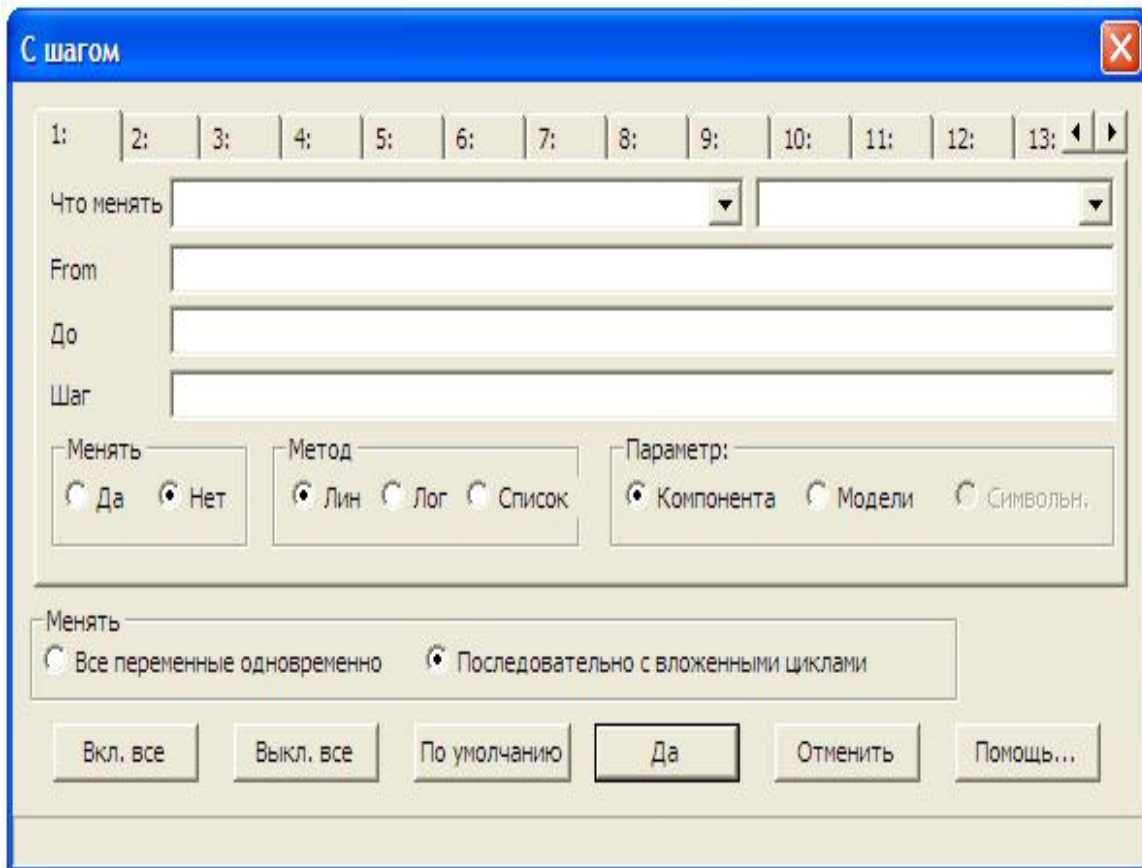


Рисунок 35 – Діалогове вікно завдання варіації параметрів

6. «Свойства...» – відкриття діалогового вікна, яке дозволяє керувати виводом графіків, вибирати масштаби осей координат, задавати параметри швидкого перетворення Фур'є для спектрального аналізу тощо.

Окрім кнопок вікно (рис. 34) містить віконця, в яких можна задавати такі дані:

1. «Время (диапазон) расчета» – діапазон моделювання перехідного процесу за форматом $T_{max}[, T_{min}]$. За умовчанням призначається $T_{min}=0$.

2. «Мак. шаг по времени» – максимальний крок розрахунку. Якщо він не заданий (або дорівнює 0), то приймається значення $\frac{T_{\max} - T_{\min}}{50}$.

3. «Число выводимых точек» – кількість значень, які виводяться в таблицю. За умовчанням призначається 51.

4. «Число перезапусков» – якщо кількість перезапусків моделювання більша за 1, то початковими умовами чергового запуску є значення, що отримані в кінці попереднього.

5. «Свойства расчета» – задаються можливі варіанти збереження результатів моделювання.

6. «Начальные условия» – задаються можливі варіанти завдання початкових умов.

В нижній частині вікна (рис. 34) містяться віконця таблиці, в якій задаються форми виведення графіків різних параметрів.

Частотний аналіз.

Цей вид аналізу визначає амплітудно-частотні та фазочастотні характеристики кіл.

При виборі в меню цього виду аналізу на екрані з'являється вікно (рис. 36), в якому задаються параметри виконання частотного аналізу.

Кнопки цього вікна такі ж самі, як і у вікні (рис. 34). Що ж стосується віконця для задання числової інформації, то вони дещо відрізняються.

У віконці «Диапазон частот» задається діапазон частот для аналізу за форматом $f_{\max}[, f_{\min}]$.

У віконці «Максимальное изменение %» – границя темпу змін розрахункових точок першої змінної першого графіку.

У віконці «Входной шум» – ім'я джерела сигналу, в якому визначається вхідний шум.

У віконці «Выходной шум» – вузли, між якими визначається вихідний шум за форматом $вузол1[,вузол2]$.

Решта віконця такі самі, як і в попередньому виді аналізу.

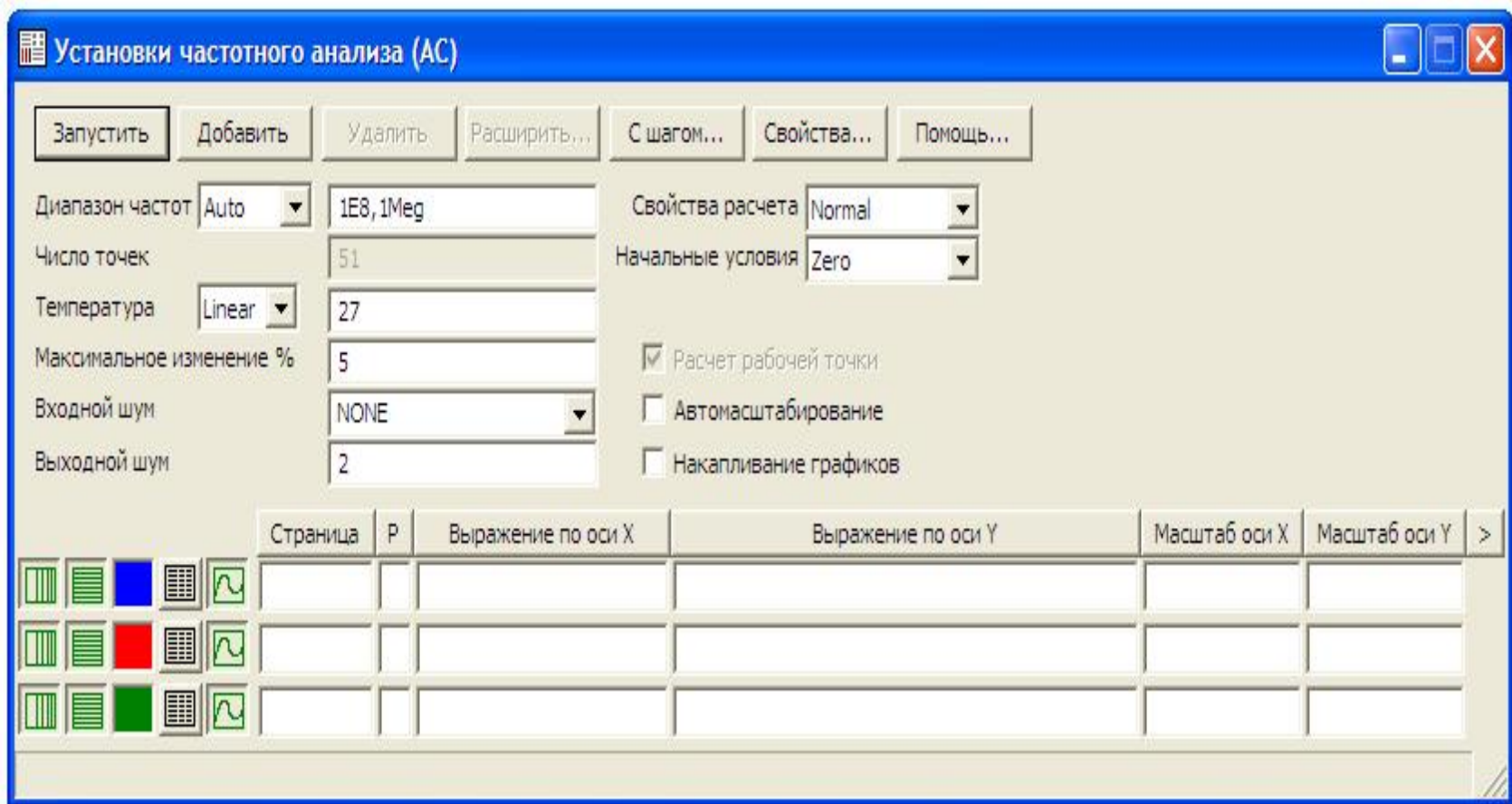


Рисунок 36 – Параметры частотного анализа

Аналіз для постійного струму.

Цей вид аналізу визначає передатні характеристики кіл на постійному струмі.

При виборі в меню цього виду аналізу на екрані з'являється вікно (рис. 37), в якому задаються параметри виконання аналізу для постійного струму.

Кнопки цього вікна такі ж самі, як і у вікні (рис. 34). Що ж стосується віконець для задання числової інформації, то вони дещо відрізняються.

У віконці «*Перемен. 1/ Метод*» задається метод обчислення наступної точки.

У віконці «*Перемен. 1/ Имя*» задається ім'я первинного джерела.

У віконці «*Перемен. 1/ Диапазон изменения*» задається зміна первинного джерела за форматом: *Кінцеве* [, *Початкове* [, *Максимальний шаг*]].

У віконці «*Перемен. 2/ Метод*» задається метод зміни вторинної змінної.

У віконці «*Перемен. 2/ Метод*» задається зміна вторинного джерела за форматом: *Кінцеве* [, *Початкове* [, *Максимальний шаг*]].

Динамічний аналіз для постійного струму.

Цей вид аналізу визначає режимні параметри кола на постійному струмі.

При виборі в меню цього виду аналізу на екрані з'являється вікно (рис. 38), в якому задаються параметри виконання аналізу для постійного струму.

В цьому вікні є можливість задати параметри, які будуть показані на схемі заданого кола постійного струму, а саме:

- номера вузлів;
- значення потенціалів у вузлах;
- значення струмів у вітках;
- значення потужностей на елементах.

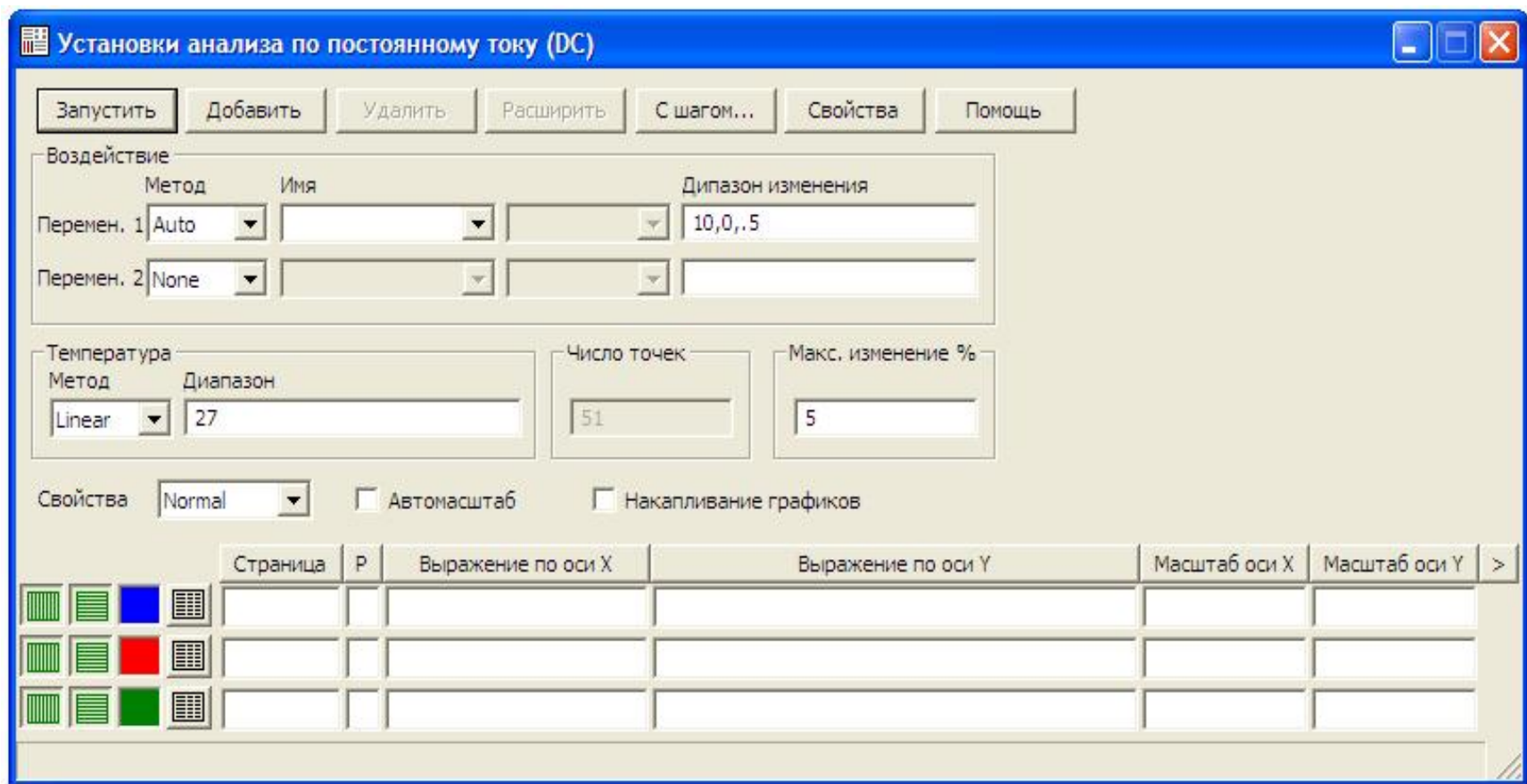


Рисунок 37 – Параметры анализа для постоянного струму

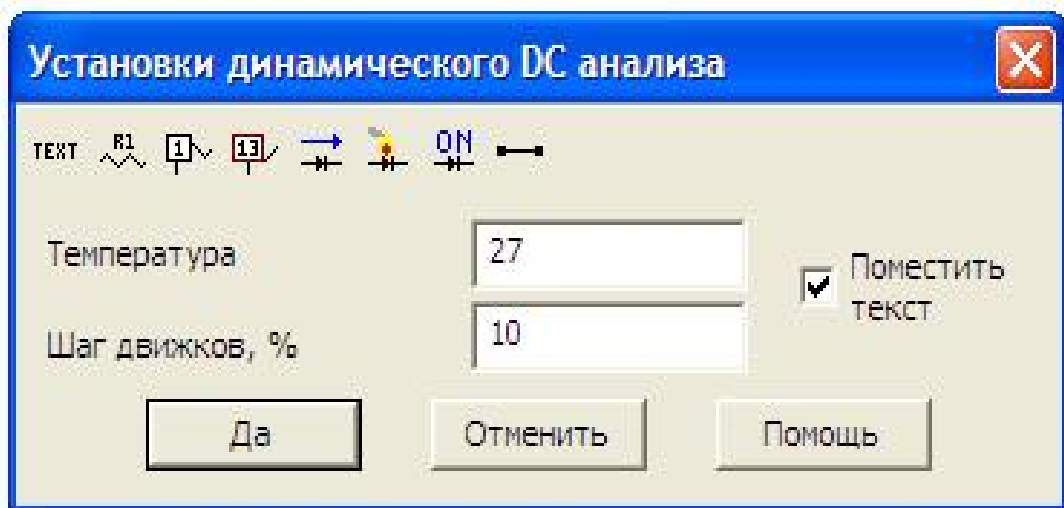


Рисунок 38 – Параметры динамического анализа для постоянного тока

Динамический частотный анализ.

Этот вид анализа определяет режимные параметры цепи на синусоидальном токе.

При выборе в меню этого вида анализа на экране появляется окно (рис. 39), в котором задаются параметры выполнения анализа для синусоидального тока.

В этом окне необходимо задать частоту, для которой будет проведен расчет. Кроме того, в нем есть возможность задать параметры, которые будут показаны на схеме заданной цепи синусоидального тока, а именно:

- номера узлов;
- комплексные значения потенциалов в узлах;
- комплексные значения токов в ветках;
- комплексные значения мощностей на элементах.

Все комплексные параметры могут быть выведены в одной из двух форм:

- показательной (амплитуда и начальная фаза);
- алгебраической (действительная и мнимая составляющие).

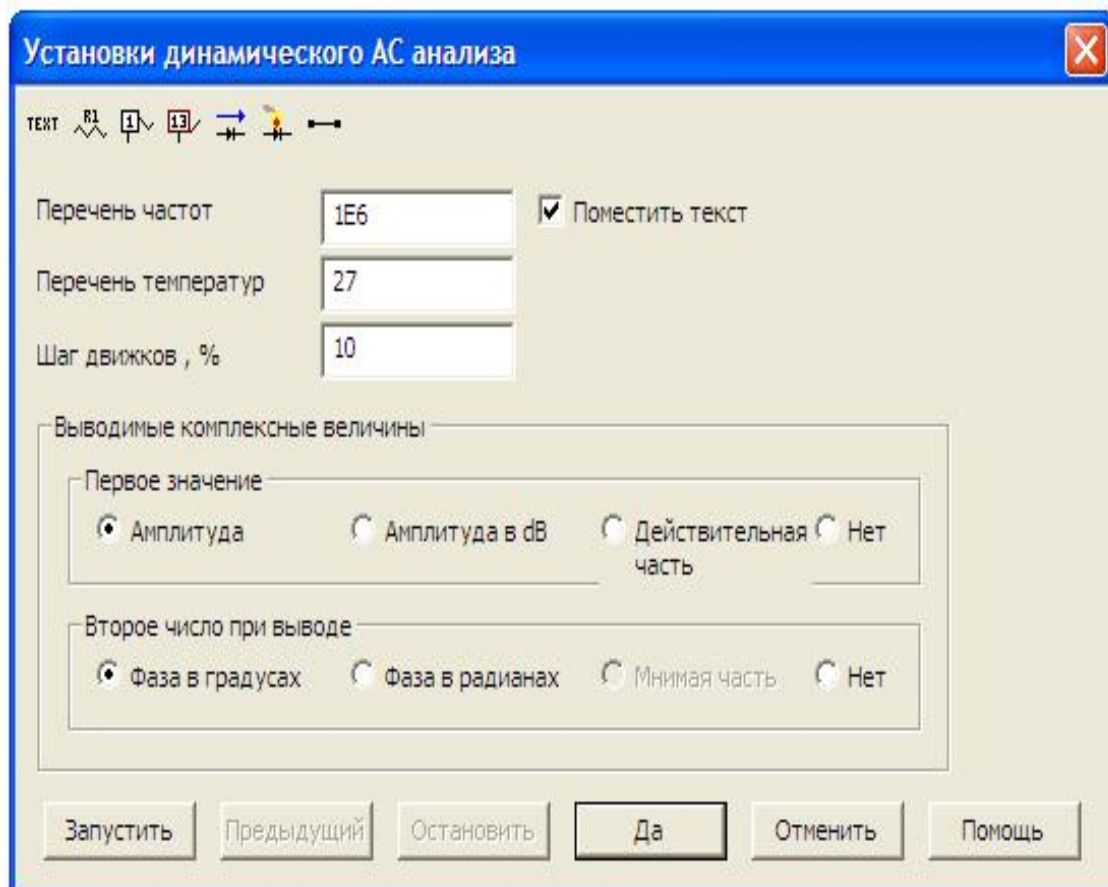


Рисунок 39 – Параметры динамического частотного анализа

Лабораторна робота № 1тс

Дослідження лінійних електричних кіл постійного струму з керованими джерелами живлення

Мета роботи: навчитись проводити аналіз кіл постійного струму з залежними (керованими) джерелами живлення.

Короткі теоретичні відомості

Залежними (керованими) джерелами живлення називають джерела, параметри яких лінійно або нелінійно залежать від струмів чи напруг у певних вітках електричного кола.

Розрізняють чотири типи залежних джерел:

а) джерела напруги, керовані напругою (ДНКН) (рис. 1.1, а). Напруга джерела пропорційна напрузі u_1

$$u_2 = ku_1; \quad (1.1)$$

б) джерела напруги, керовані струмом (ДНКС) (рис. 1.1, б)

$$u_2 = ri_1; \quad (1.2)$$

в) джерела струму, керовані напругою (ДСКН) (рис. 1.1, в)

$$i_2 = gu_1; \quad (1.3)$$

г) джерела струму, керовані струмом (ДСКС) (рис. 1.1, г)

$$i_2 = \beta i_1. \quad (1.4)$$

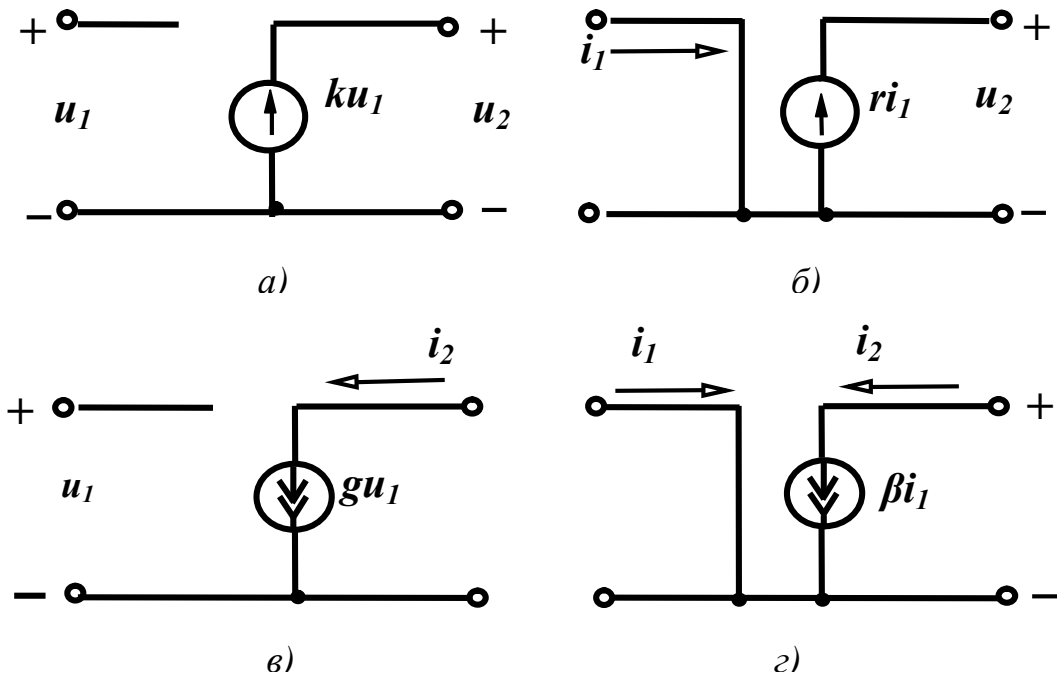


Рисунок 1.1 – Схеми керованих джерел

Аналіз кіл постійного струму з керованими джерелами виконується за допомогою розв’язання систем рівнянь за законами Кірхгофа.

Перший закон Кірхгофа виражає закон збереження заряду та принцип неперервності електричного струму: *алгебраїчна сума струмів віток, які сходяться у вузлі, в будь-який момент часу дорівнює нулю,*

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0, \quad (1.5)$$

де k – індекси віток, зв’язаних з цим вузлом.

Знак струму, який входить у рівняння, визначається вибором додатного напрямку струмів. Струми, які виходять з вузла, записуються зі знаком плюс; струми, які входять у вузол, – зі знаком мінус.

Другий закон Кірхгофа виражає закон збереження енергії: *алгебраїчна сума напруг віток контуру дорівнює нулю в будь-який момент часу,*

$$\sum_{k=1}^n u_k = 0, \quad (1.6)$$

де k – індекси всіх віток, що входять у контур.

Приклад аналізу кола постійного струму з керованими джерелами наведено нижче.

Нехай в колі (рис. 1.2) з параметрами:

$$r_1 = 5 \text{ Ом}, r_2 = 8 \text{ Ом}, r_3 = 10 \text{ Ом}, r_4 = 5 \text{ Ом}, r_5 = 3 \text{ Ом}, r_6 = 10 \text{ Ом};$$

діють:

- незалежне джерело напруги $E_1 = 40 \text{ В}$;
- кероване джерело напруги $E_3 = k_1 I_3 \text{ В}$;
- кероване джерело струму $I_5 = k_2 I_4 \text{ А}$.

Прийmemo $k_1 = 3, k_2 = 0.4$.

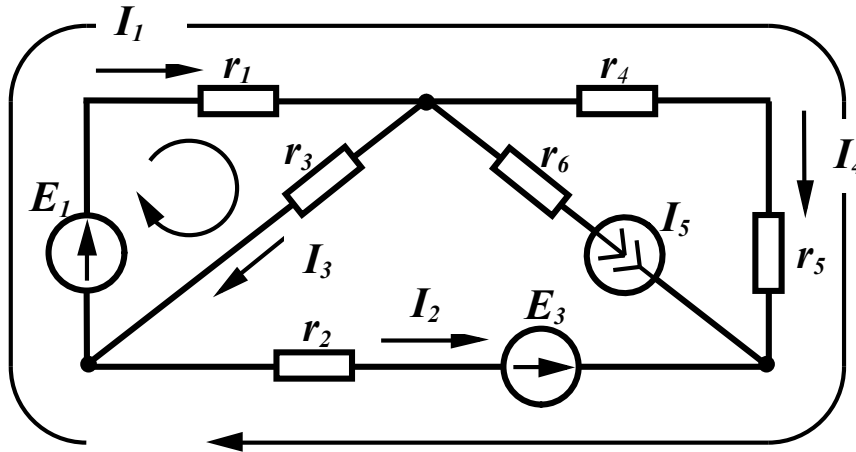


Рисунок 1.2

Складемо систему рівнянь за законами Кірхгофа.

$$\begin{aligned} I_1 - I_3 - I_5 - I_4 &= 0, \\ -I_1 + I_3 - I_2 &= 0, \\ I_1 r_1 + I_3 r_3 &= E_1, \\ I_1 r_1 + I_4 (r_4 + r_5) - I_2 r_2 &= E_1 - E_3. \end{aligned} \quad (1.7)$$

Враховуючи, що

$$E_3 = k_1 I_3, \quad I_5 = k_2 I_4,$$

система (2.7) прийме остаточний вигляд

$$\begin{aligned}
I_1 - I_3 - (1 + k_2)I_4 &= 0, \\
-I_1 + I_3 - I_2 &= 0, \\
I_1 r_1 + I_3 r_3 &= E_1, \\
I_1 r_1 + I_4(r_4 + r_5) - I_2 r_2 + k_1 I_3 &= E_1.
\end{aligned}
\tag{1.8}$$

Розв'яжемо цю систему рівнянь в середовищі MathCAD за допомогою процедури «*lsolve*».

$$E1 := 40 \quad k1 := 3 \quad k2 := 0.4$$

$$r1 := 5 \quad r2 := 8 \quad r3 := 10 \quad r4 := 5 \quad r5 := 3 \quad r6 := 10$$

$$A := \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & -1 - k2 \\ -1 & -1 & 1 & 0 \\ r1 & 0 & r3 & 0 \\ r1 & -r2 & k1 & r4 + r5 \end{pmatrix} \quad B := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ E1 \\ E1 \end{pmatrix}$$

$$I := \text{lsolve}(A, B) \quad I = \begin{pmatrix} 3.442 \\ -1.163 \\ 2.279 \\ 0.831 \end{pmatrix}$$

Порядок виконання роботи

1. Зібрати коло згідно рис. 1.3.

Це коло містить:

- незалежне джерело напруги $V1$;
- кероване джерело напруги $H1$, яке залежить від струму у вітці з резистором $R5$;
- кероване джерело струму $F1$, яке залежить від струму у вітці з резистором $R2$;
- п'ять резисторів $R1 - R5$.

Параметри джерел та резисторів вибираються з табл. 1.1.

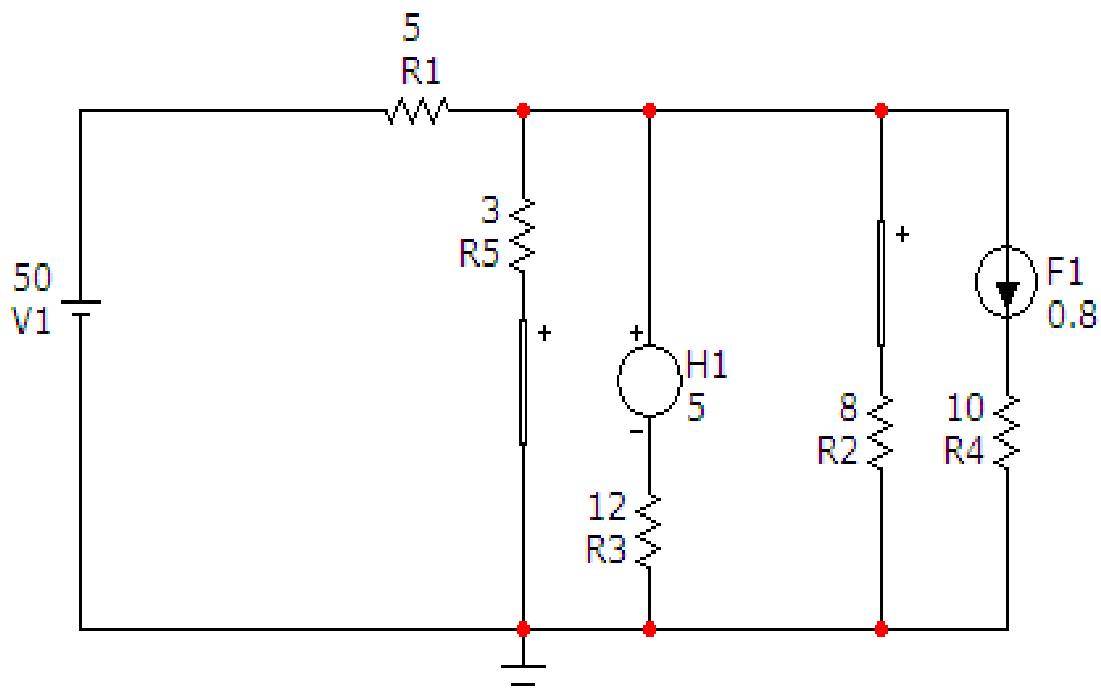


Рисунок 1.3

Таблиця 1.1

<i>Вар.</i>	<i>V1</i>	<i>H1</i>	<i>F1</i>	<i>R1</i>	<i>R2</i>	<i>R3</i>	<i>R4</i>	<i>R5</i>
1	60	4	0.3	10	9	15	12	5
2	45	6	0.4	8	7	12	10	4
3	40	5	0.5	6	5	10	6	3
4	30	7	0.6	5	4	6	3	2

Відзначимо, що для керованого джерела напруги *H1* задається коефіцієнт пропорційності е.р.с. джерела струму у вітці з резистором *R5*, а для керованого джерела струму *F1* задається коефіцієнт пропорційності струму джерела струму у вітці з резистором *R2*.

2. На верхній панелі головного вікна відкриваємо опцію «Анализ» і вибираємо в ній рядок «Динамический анализ по постоянному току (Dynamic DC)». Після цього на екрані з'являється вікно (рис. 1.4), в якому можна задати параметри, які ми бажаємо вивести на екран (в нашому випадку це потенціали вузлів та струми у вітках).

В результаті схема прийме вигляд, зображений на рис. 1.5.

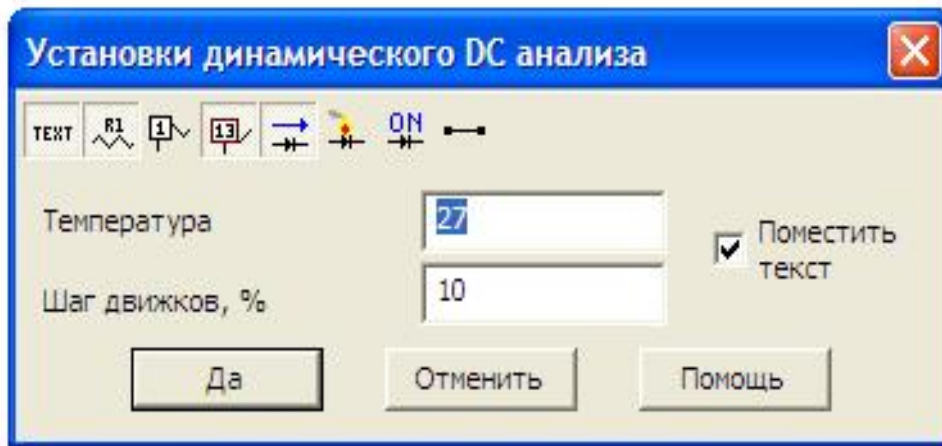


Рисунок 1.4

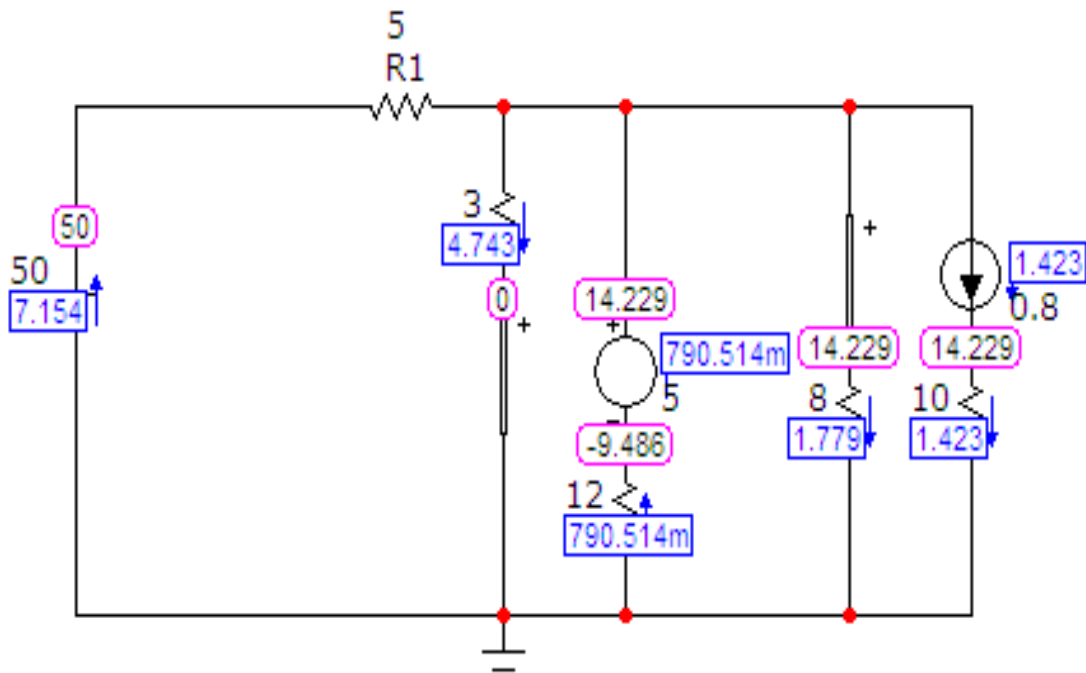


Рисунок 1.5

Цю схему необхідно роздрукувати.

Обработка результатов исследования

1. Для схемы (рис. 1.3) составить систему уравнений за законами Кирхгофа.
2. Разв'язати цю систему в середовищі MathCAD, як це показано у вищенаведеному прикладі.

3. Порівняти розраховані у MathCAD та змодельовані у MicroCap струми у вітках.

Контрольні питання

1. Як залежить напруга від струму на лінійному резисторі?
2. Чим відрізняються незалежні джерела енергії від залежних?
3. Сформулюйте перший закон Кірхгофа для кола постійного струму.
4. Сформулюйте другий закон Кірхгофа для кола постійного струму.
5. Яким чином задаються напрямки струмів у вітках?
6. Яким чином задаються напрямки обходу контурів?
7. Дайте означення поняттю «вітка».
8. Дайте означення поняттю «вузол».
9. Дайте означення поняттю «контур».

Лабораторна робота № 2мс

Дослідження нелінійних електричних кіл постійного струму

Мета роботи: навчитись проводити аналіз нелінійних кіл постійного струму.

Короткі теоретичні відомості

Електричне коло вважається нелінійним, якщо воно має хоча б один нелінійний елемент (НЕ), тобто такий елемент, струм та напруга на якому зв'язані нелінійно. Залежність між напругою та струмом НЕ називається вольт-амперною характеристикою (ВАХ).

Суттєва особливість нелінійних електричних кіл – неможливість застосування методу накладання. Процеси в нелінійних електричних колах описуються нелінійними алгебраїчними або диференціальними рівняннями.

При розрахунку нелінійних кіл вводять поняття статичного та диференціального опорів НЕ. На рис.2.1 представлена ВАХ НЕ в масштабі струму m_i і напруги m_u . Точка **a** є робочою точкою.

Відношення напруги, якій відповідає відрізок Oa , до струму (відрізок ca), визначає в масштабі $m_r = \frac{m_u}{m_i}$ величину, яка називається *статичним опором* в точці **a**. З рис. 2.1 видно, що значення цього опору пропорційне тангенсу кута β між прямою, що з'єднує точку **a** з початком координат і віссю струмів, тобто

$$r_{act} = \frac{U_a}{I_a} = \frac{m_u}{m_i} \frac{Oc}{ca} = m_r \operatorname{tg} \beta \quad (2.1)$$

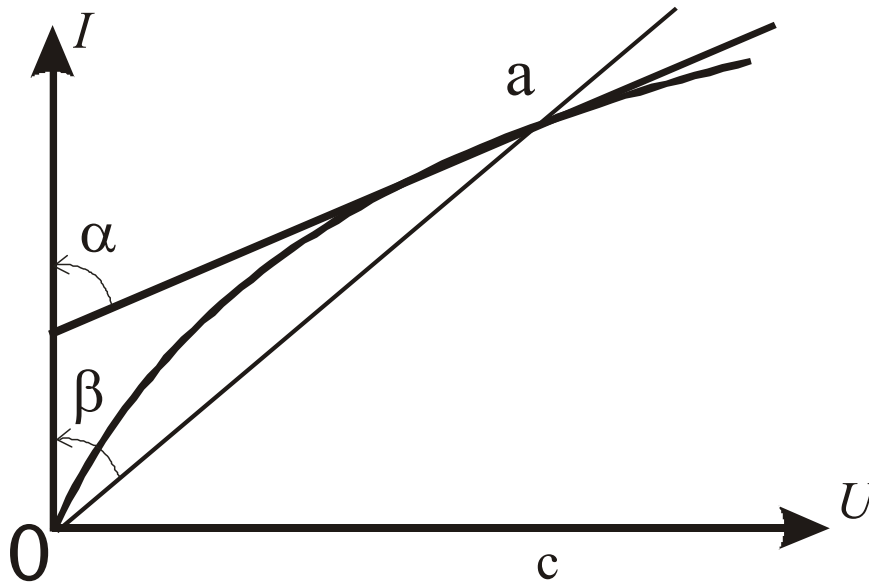


Рисунок 2.1

Відношення приросту напруги до приросту струму або похідна від напруги по струмові в тому ж масштабі m_r визначає *динамічний* опір $r_{a\partial}$. Значення цього опору пропорційне тангенсу кута α між дотичною до ВАХ в точці a і віссю струмів, тобто

$$r_{a\partial} = \left. \frac{dU}{dI} \right|_a = \frac{m_u}{m_i} \operatorname{tg} \alpha \quad (2.2)$$

Для НЕ з падаючою ВАХ значення диференціального опору від'ємне, тому що додатний приріст струму супроводжується від'ємним приростом напруги.

Нелінійні електричні кола простої конфігурації зручно розраховувати графоаналітичним методом. Розрахунок нелінійного кола зводиться до знаходження струмів та напруг на ділянках кола за допомогою ВАХ.

При послідовному з'єднанні НЕ загальна ВАХ усього кола (рис. 2.2.) може бути отримана підсумовуванням абсцис ВАХ окремих елементів для одних і тих же значень струму. При паралельному з'єднанні НЕ загальна ВАХ усього кола (рис. 2.3.) може бути отримана підсумовуванням ординат ВАХ окремих елементів при одних і тих же значеннях напруги.

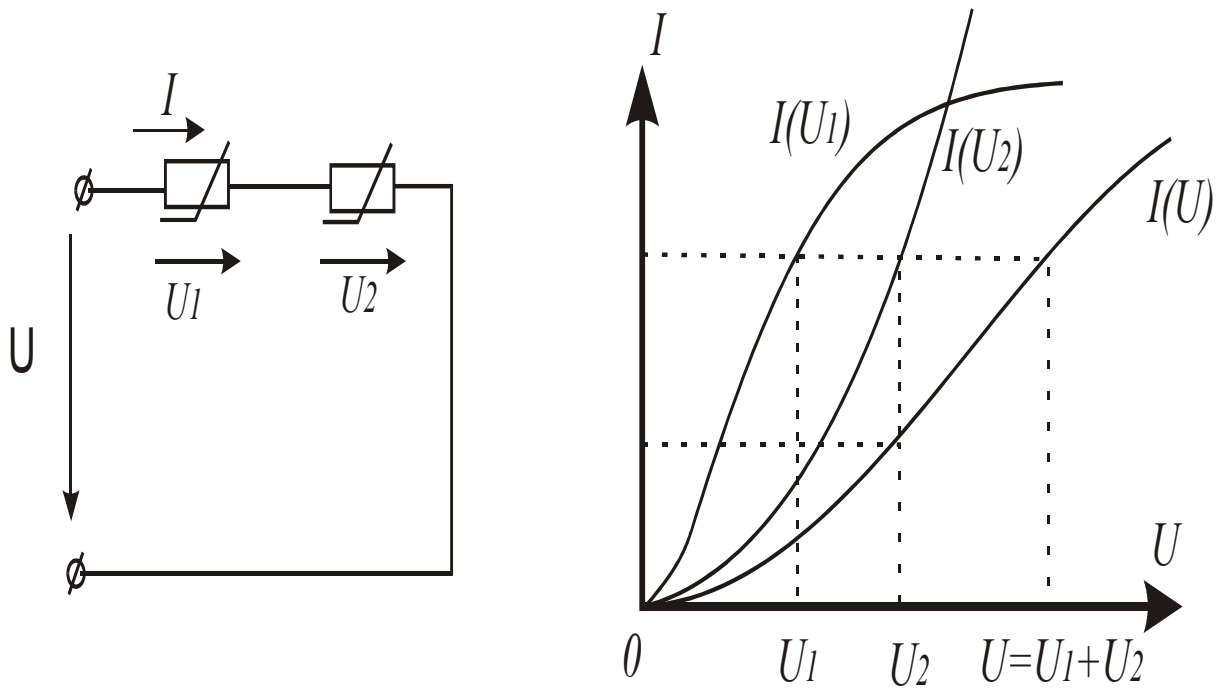


Рисунок 2.2

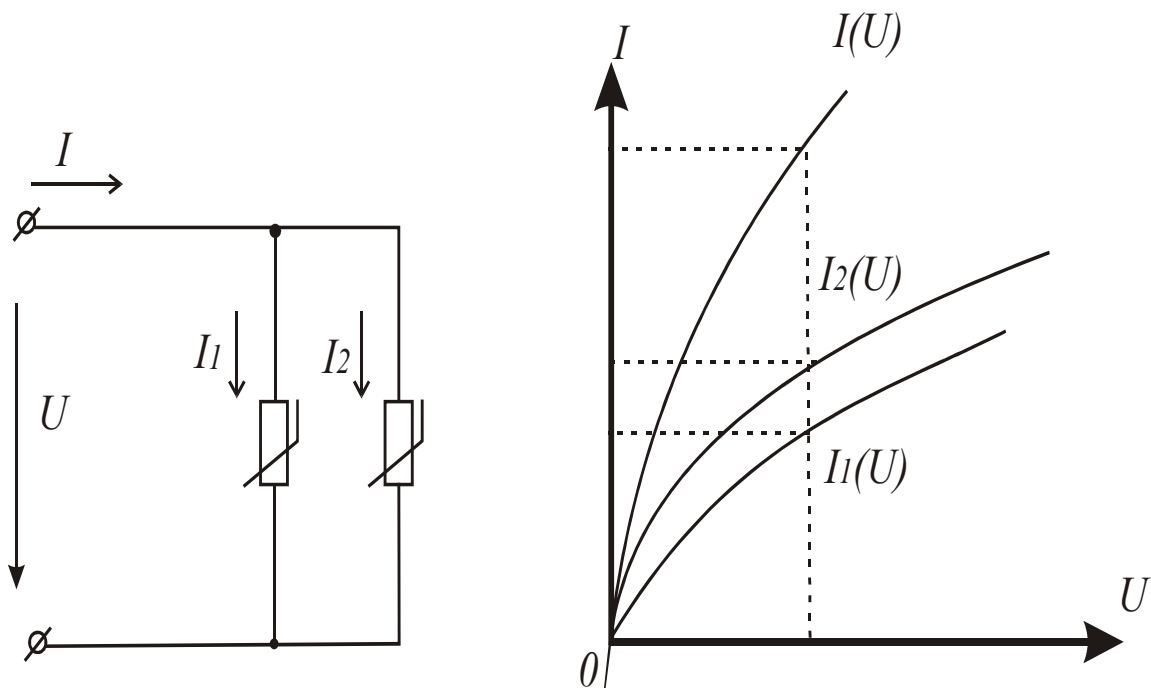


Рисунок 2.3

На рис.2.4. зображений випадок змішаного з'єднання НЕ.

Після заміни двох паралельно з'єднаних елементів одним еквівалентним схема із змішаним з'єднанням приводиться до розглянутої схеми послідовного з'єднання двох НЕ .

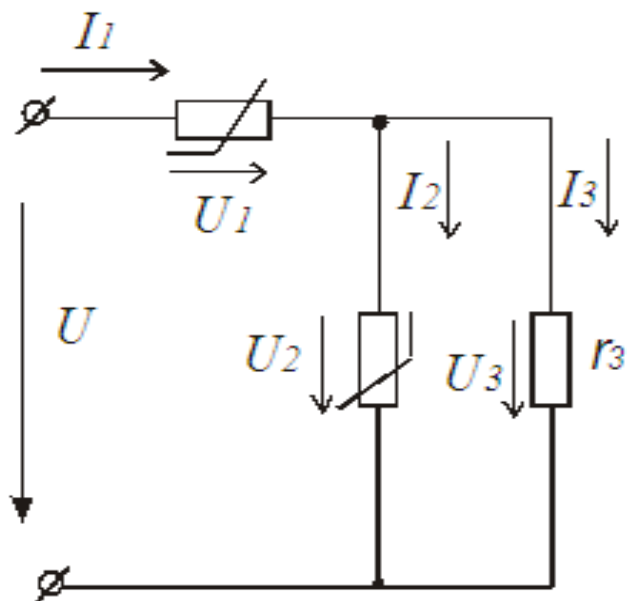


Рисунок. 2.4

Порядок виконання роботи

1. Зібрати коло зі змішаним з'єднанням НЕ згідно рис. 2.5.

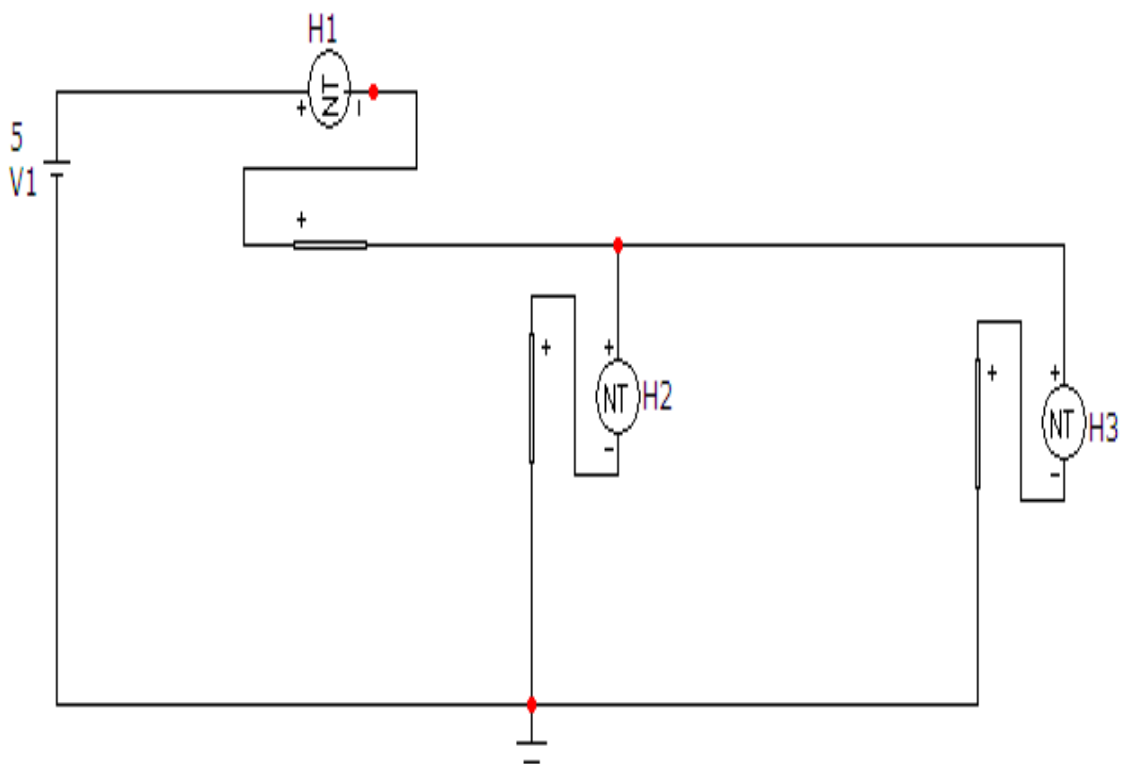


Рисунок. 2.5

Це коло містить джерело постійної напруги та три нелінійних резистора. Оскільки в середовищі MicroCap відсутня можливість задання нелі-

нійних резисторів з довільною ВАХ, то, згідно з теоремою компенсації, замість них ми будемо використовувати джерела постійної напруги керовані струмом з табличною формою задання.

Кожне з таких джерел можна викликати на екран опцією «Компоненти / Analog Primitives / Function Sources /NTVofI». Атрибути такого джерела задаються у вікні (рис. 2.6), яке з'являється при перенесенні джерела на робоче поле програми.

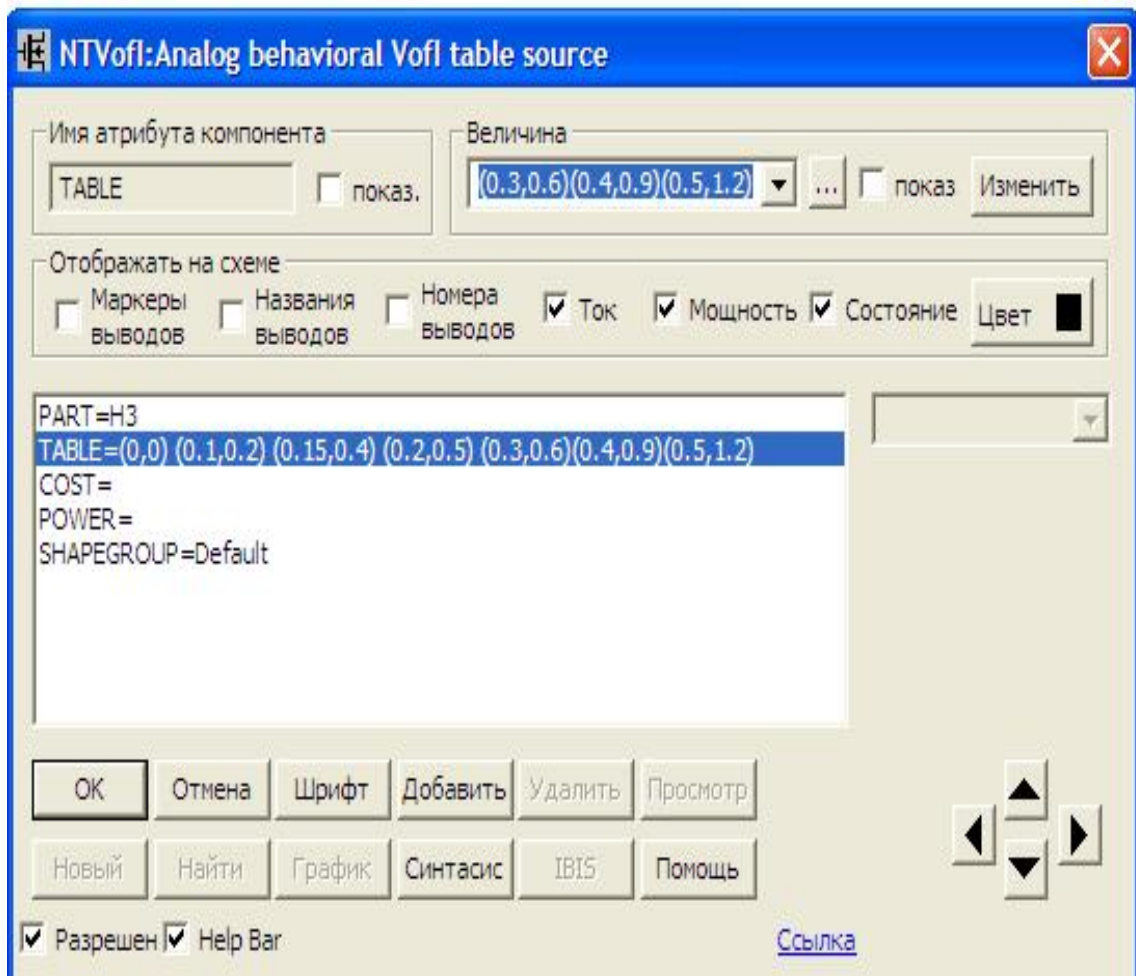


Рисунок. 2.6

Таблична залежність напруги джерела від струму (в нашому випадку це буде ВАХ нелінійного резистора) задається у вигляді масиву пар чисел, перше з яких є струмом, а друге – напругою.

Ці масиви для кожного з нелінійних резисторів схеми $H1$, $H2$, $H3$ наведені в табл. 2.1.

2. На верхній панелі головного вікна відкриваємо опцію «Анализ» і вибираємо в ній рядок «Динамический анализ по постоянному току (Du-

namis DC». Після цього на екрані з'являється вікно (рис. 2.7), в якому можна задати параметри, які ми бажаємо вивести на екран (в нашому випадку це потенціали вузлів та струми у вітках).

Таблиця 2.1

Вар.	H1	H2	H3
1	(0,0) (0.1,0.1) (0.15,0.18) (0.2,0.21) (0.3,0.25) (0.4,0.3) (0.5,0.35) (0.6,0.4) (0.8,0.5) (1,0.55) (1.5,0.75) (2,0.8) (2.5,0.9) (3,1) (4,1.2) (5,1.4) (6,1.5) (7,1.7) (8,1.8) (9,1.9) (10,2) (11,2.4) (12,2.6) (14,2.8)	(0,0) (0.05,0.1) (0.1,0.2) (0.15,0.36) (0.2,0.5) (0.3,0.75) (0.4,1.2) (0.5,1.5) (0.6,1.8) (0.8,2.5) (1,3.5) (2,8) (2.5,10) (3,14) (4,18) (5,24) (6,27) (7,28) (8,30) (9,31) (10,32) (11,34) (12,36) (14,38)	(0,0) (0.05,0.15) (0.1,0.3) (0.15,0.5) (0.2,0.65) (0.3,0.95) (0.4,1.4) (0.5,1.8) (0.6,1.95) (0.7,2.4) (1,3.6) (2,8) (2.5,9) (3,10) (4,14) (5,15) (6,13) (7,14) (8,15) (9,16) (10,17) (11,19) (12,20) (14,21)
2	(0,0) (0.1,0.1) (0.15,0.15) (0.2,0.22) (0.3,0.28) (0.4,0.35) (0.5,0.39) (0.6,0.4) (0.8,0.45) (1,0.5) (1.5,0.7) (2,0.75) (2.5,0.8) (3,0.9) (4,1) (5,1.1) (6,1.2) (7,1.4) (8,1.5) (9,1.6) (10,1.7) (11,1.9) (12,2.0) (14,2.2)	(0,0) (0.07,0.12) (0.1,0.2) (0.15,0.3) (0.2,0.36) (0.3,0.55) (0.4,0.8) (0.5,1.1) (0.6,1.7) (0.8,1.9) (1,2.3) (2,5) (2.5,6) (3,7) (4,8) (5,9) (6,10) (7,12) (8,13) (9,14) (10,15) (11,15) (12,15) (14,14)	(0,0) (0.05,0.15) (0.1,0.3) (0.15,0.5) (0.2,0.65) (0.3,0.95) (0.4,1.4) (0.5,1.8) (0.6,1.95) (0.7,2.4) (1,3.6) (2,8) (2.5,9) (3,10) (4,14) (5,15) (6,13) (7,14) (8,15) (9,16) (10,17) (11,19) (12,20) (14,21)
3	(0,0) (0.1,0.1) (0.15,0.18) (0.2,0.21) (0.3,0.25) (0.4,0.3) (0.5,0.35) (0.6,0.4) (0.8,0.5) (1,0.55) (1.5,0.75) (2,0.8) (2.5,0.9) (3,1) (4,1.2) (5,1.4) (6,1.5) (7,1.7) (8,1.8) (9,1.9) (10,2) (11,2.4) (12,2.6) (14,2.8)	(0,0) (0.05,0.1) (0.1,0.2) (0.15,0.36) (0.2,0.5) (0.3,0.75) (0.4,1.2) (0.5,1.5) (0.6,1.8) (0.8,2.5) (1,3.5) (2,8) (2.5,10) (3,14) (4,18) (5,24) (6,27) (7,28) (8,30) (9,31) (10,32) (11,34) (12,36) (14,38)	(0,0) (0.07,0.12) (0.1,0.2) (0.15,0.3) (0.2,0.36) (0.3,0.55) (0.4,0.8) (0.5,1.1) (0.6,1.7) (0.8,1.9) (1,2.3) (2,5) (2.5,6) (3,7) (4,8) (5,9) (6,10) (7,12) (8,13) (9,14) (10,15) (11,15) (12,15) (14,14)

4	(0,0) (0.1,0.1) (0.15,0.15) (0.2,0.2) (0.3,0.25) (0.4,0.3) (0.5,0.4) (0.6,0.5) (0.8,0.6) (1,0.7) (1.5,0.8) (2,0.9) (2.5,1) (3,1.2) (4,1.6) (5,1.8) (6,2) (7,2.2) (8,2.5) (9,2.9) (10,3.2) (11,3.4) (12,4) (14,5)	(0,0) (0.05,0.1) (0.1,0.2) (0.15,0.32) (0.2,0.45) (0.3,0.65) (0.4,0.9) (0.5,1.25) (0.6,1.5) (0.8,2.1) (1,3.3) (2,5) (2.5,7) (3,12) (4,16) (5,18) (6,24) (7,28) (8,30) (9,32) (10,32) (11,30) (12,28) (14,24)	(0,0) (0.07,0.12) (0.1,0.2) (0.15,0.3) (0.2,0.36) (0.3,0.55) (0.4,0.8) (0.5,1.1) (0.6,1.7) (0.8,1.9) (1,2.3) (2,5) (2.5,6) (3,7) (4,8) (5,9) (6,10) (7,12) (8,13) (9,14) (10,15) (11,15) (12,15) (14,14)
---	---	---	---

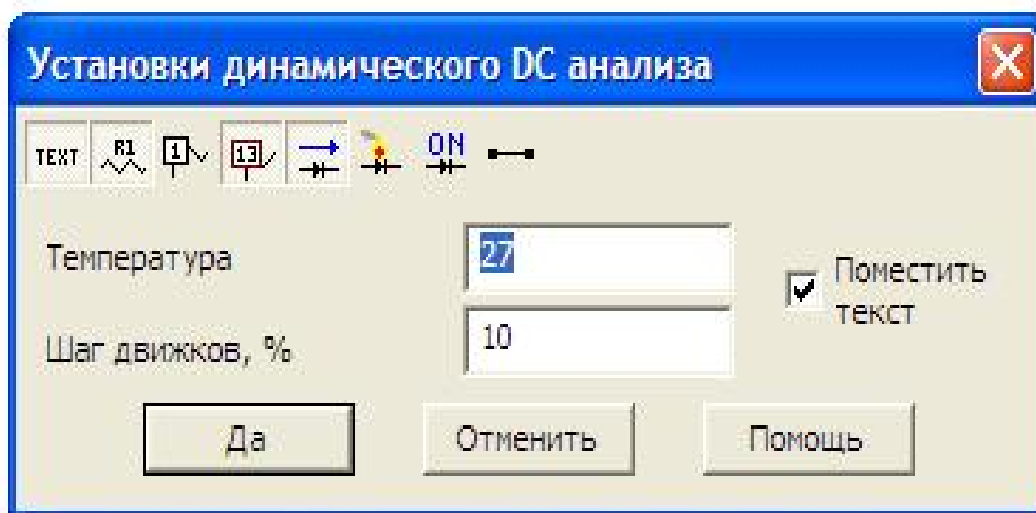


Рисунок 2.7

В результаті схема прийме вигляд, зображений на рис. 2.8.

3. Змінюючи напругу джерела $V1$ (діапазон зміни та її крок задається викладачем), внесемо в таблицю 2.2 значення напруги і струму джерела. У випадку, зображеному на рис. 2.8, $U=0.5$ В, $I=0.312$ А.

Таблиця 2.2

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
U												
I												

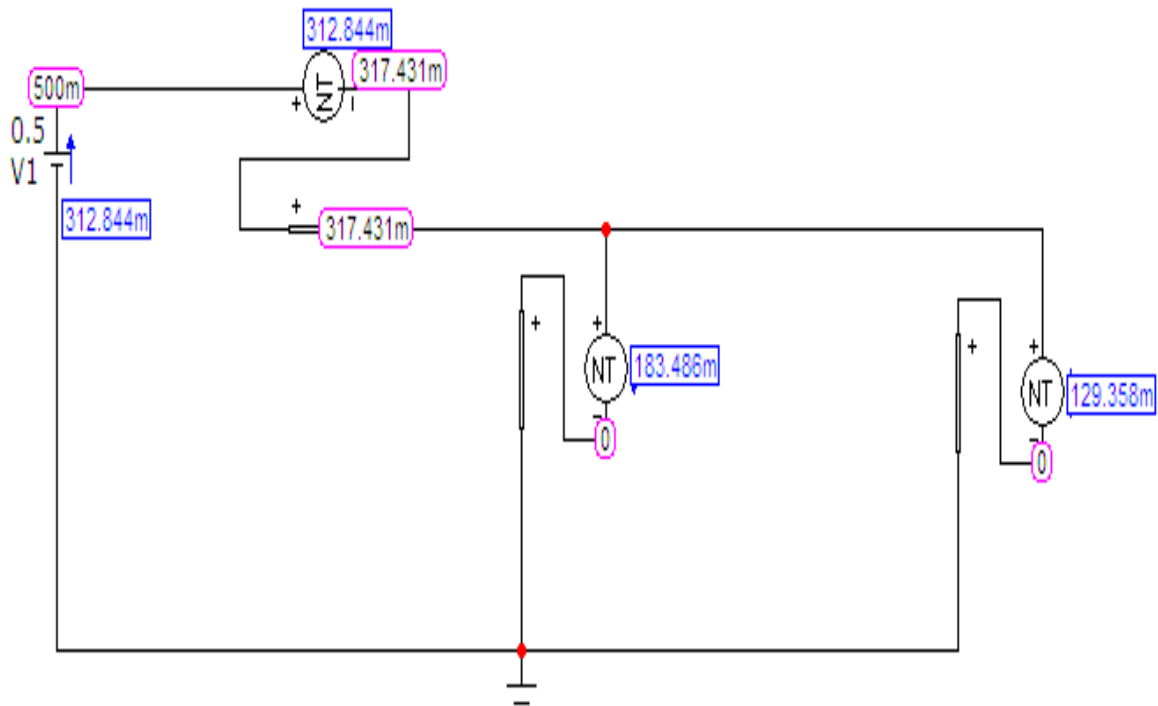


Рисунок 2.8

Обробка результатів дослідження

1. За даними таблиці 2.1 побудувати ВАХ кожного нелінійного резистора $H1$, $H2$, $H3$ в одних вісях координат.
2. Побудувати еквівалентну ВАХ для кола, зображеного на рис. 2.5, в тих же вісях координат.
3. За даними таблиці 2.1 побудувати експериментальну еквівалентну ВАХ кола.
4. Порівняти еквівалентні ВАХ, отримані в п.2 та п.3.

Контрольні питання

1. Чи можна застосувати до аналізу та розрахунку процесів в нелінійному колі метод накладення?
2. Як визначити статичний та диференціальний опори НЕ?
3. Як будують сумарну ВАХ при послідовному з'єднанні нелінійних елементів?
4. Як будують сумарну ВАХ при паралельному з'єднанні нелінійних елементів?
5. Як будують сумарну ВАХ при змішаному з'єднанні нелінійних елементів?

Лабораторна робота № 3тс

Дослідження лінійних електричних кіл зі взаємною індуктивністю

Мета роботи: дослідним шляхом визначити параметри двох індуктивно зв'язаних котушок при різних з'єднаннях.

Короткі теоретичні відомості

Відомо, що в електричних колах енергія може передаватися від джерел до споживачів двома способами: за допомогою проводів (*гальванічний зв'язок*) та через магнітне поле (*магнітний зв'язок*). Другий спосіб передавання енергії можливий, якщо в колах містяться дві або більше індуктивно зв'язані котушки. При достатньо близькому розташуванні котушок магнітний потік, який створений струмом однієї котушки, може пронизувати витки іншої котушки. Такі котушки називають *індуктивно зв'язаними*.

Розглянемо дві індуктивно зв'язані ідеальні котушки (рис. 3.1) з кількістю витків w_1 та w_2 і індуктивностями L_1 і L_2 .

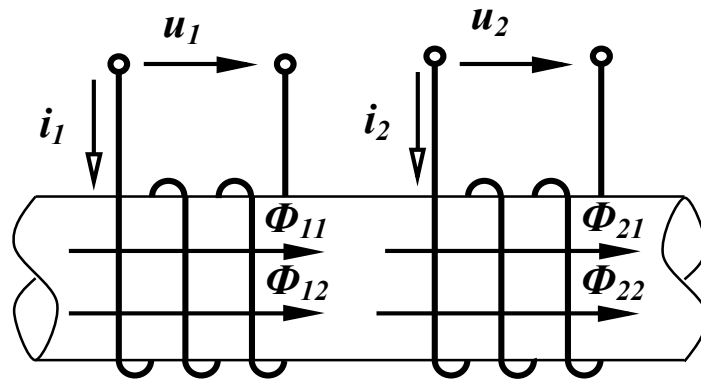


Рисунок 3.1

Якщо змінний струм i_1 протікає лише в першій котушці ($i_2 = 0$), то під дією цього струму виникає магнітний потік Φ_{11} , який називають *власним* магнітним потоком. Напрямок магнітного потоку визначається за відомим правилом *правого гвинта*.

Оскільки котушка має w_1 витків, то власне потокозчеплення цієї котушки пропорційне струму i_1 і магнітному потоку Φ_{11}

$$\Psi_{11} = w_1 \Phi_{11}, \quad \Psi_{11} = L_1 i_1. \quad (3.1)$$

Частина магнітного потоку перетинає витки другої котушки, в результаті чого у другій котушці з'являється *взаємний* магнітний потік Φ_{21} , при цьому

$$\Phi_{21} \leq \Phi_{11}. \quad (3.2)$$

Взаємне потокозчеплення Ψ_{21} пропорційне потоку Φ_{21} і струму i_1

$$\Psi_{21} = w_2 \Phi_{21}, \quad \Psi_{21} = M_{21} i_1. \quad (3.3)$$

Якщо подати на другу котушку змінну напругу u_2 , під дією якої по котушці потече струм i_2 , то за допомогою аналогічних міркувань можна стверджувати, що в цьому випадку в другій котушці виникає власний магнітний потік Φ_{22} , який частково перетинає витки першої котушки і створює в них взаємний магнітний потік Φ_{12} , при цьому

$$\Phi_{12} \leq \Phi_{22}. \quad (3.4)$$

Власне і взаємне потокозчеплення можна виразити аналогічно (3.1) та (3.3)

$$\begin{aligned} \Psi_{22} &= w_2 \Phi_{22}, \quad \Psi_{12} = w_1 \Phi_{12}, \\ \Psi_{22} &= L_2 i_2, \quad \Psi_{12} = M_{12} i_2. \end{aligned} \quad (3.5)$$

В третій частині курсу ТОЕ доводиться, що $M_{12} = M_{21} = M$.

Цей параметр називається *взаємною індуктивністю* і вимірюється в генрі. Її величина залежить від конфігурації котушок та їх взаємного розташування. Часто ступінь індуктивного зв'язку між двома котушками характеризують *коефіцієнтом магнітного зв'язку* k

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}. \quad (3.6)$$

Оцінімо його максимальне значення, для чого розглянемо величину

$$k^2 = \frac{M^2}{L_1 L_2} = \frac{M_{12} M_{21}}{L_1 L_2}.$$

Виразимо величини, що входять в цей вираз, з (3.1), (3.3) та (3.5) через магнітні потоки і струми

$$k^2 = \frac{w_1 \Phi_{12} w_2 \Phi_{21} i_1 i_2}{i_1 i_2 w_1 \Phi_{11} w_2 \Phi_{22}} = \frac{\Phi_{21} \Phi_{12}}{\Phi_{11} \Phi_{22}}.$$

Враховуючи (3.2) і (3.4), одержимо $k \leq 1$. Граничне значення $k = 1$ має місце при ідеальному індуктивному зв'язку.

Якщо в котушках (рис.3.1) протікають струми одночасно, то загальне потокозчеплення кожної котушки визначається відповідно до напрямку магнітних потоків:

$$\begin{aligned}\Psi_1 &= \Psi_{11} + \Psi_{12} = L_1 i_1 + M i_2, \\ \Psi_2 &= \Psi_{22} + \Psi_{21} = L_2 i_2 + M i_1.\end{aligned}\quad (3.7)$$

Якщо напрям струму i_2 буде протилежним, то протилежним буде і напрям магнітних потоків Φ_{22} та Φ_{12} (рис. 3.2) і тоді

$$\begin{aligned}\Psi_1 &= \Psi_{11} - \Psi_{12}, \\ \Psi_2 &= \Psi_{22} - \Psi_{21}.\end{aligned}\quad (3.8)$$

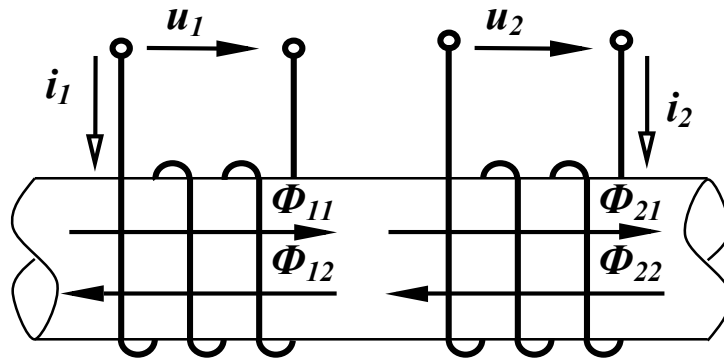


Рисунок 3.2

В зв'язку з тим, що власне та взаємне потокозчеплення котушок може додаватися або відніматися, розрізняють два види увімкнення котушок – *узгоджене* і *зустрічне*.

Якщо власний і взаємний потоки в котушках напрямлені однаково, то увімкнення котушок називається *узгодженим*, якщо в протилежні сторони, котушки увімкнуті *зустрічно*.

Якщо індуктивно зв'язані котушки показані на схемі, то визначити напрям потоків в котушках неможливо. Для визначення виду увімкнення котушок в таких випадках користуються поняттям однойменних затискачів, які на схемах позначають особливими значками, наприклад, крапками або зірками (рис. 3.3).

Якщо струми, які проходять по котушках, напрямлені однаково відносно однойменних затискачів, то має місце узгоджене увімкнення (рис. 3.3, а). В іншому випадку увімкнення котушок зустрічне (рис. 3.3, б).

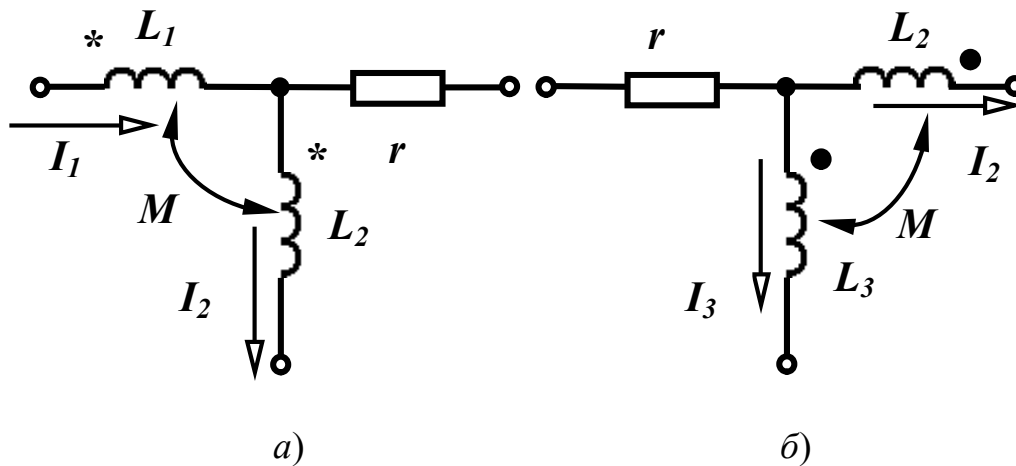


Рисунок 3.3

Слід відзначити, якщо вид з'єднання індуктивно зв'язаних котушок заздалегідь відомий, то напрямок струму в одній з них можна змінювати лише одночасно із зміною позначення початку обмотки.

Напряга котушок визначається згідно з виразами

$$u_1 = \frac{d\Psi_1}{dt}, \quad u_2 = \frac{d\Psi_2}{dt}$$

або

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{d\Psi_{11}}{dt} \pm \frac{d\Psi_{12}}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M \frac{di_2}{dt}, \\ u_2 &= \frac{d\Psi_{22}}{dt} \pm \frac{d\Psi_{21}}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt} \pm M \frac{di_1}{dt}, \end{aligned} \quad (3.9)$$

де перша складова – напруга самоіндукції (u_{11}), а друга – напруга взаємної індукції (u_{12}).

Для синусоїдно змінних величин в комплексній формі

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= j\omega L_1 \underline{I}_1 \pm j\omega M \underline{I}_2, \\ \underline{U}_2 &= j\omega L_2 \underline{I}_2 \pm j\omega M \underline{I}_1. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Величину $\omega M = x_M$ називають *опором взаємної індукції*. Знак біля другої складової напруги залежить від виду увімкнення котушок.

При послідовному з'єднанні двох індуктивно зв'язаних реальних котушок (рис. 4.4) можна записати для миттєвих значень:

$$u = u_1 + u_2,$$

де u_1, u_2 – напруги відповідно першої та другої котушок.

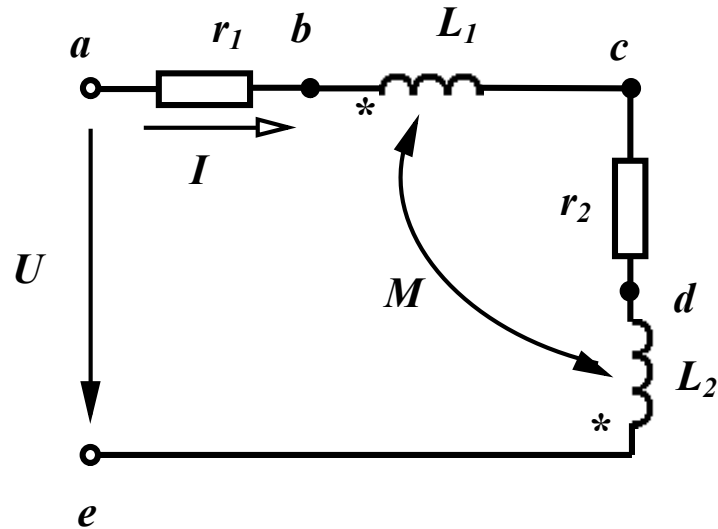


Рисунок 3.4

Напруга кожної реальної котушки складається із трьох складових – напруги на активному опорі котушки, напруги самоіндукції та напруги взаємної індукції, тобто

$$u = r_1 i + L_1 \frac{di}{dt} \pm M \frac{di}{dt} + r_2 i + L_2 \frac{di}{dt} \pm M \frac{di}{dt}.$$

Для синусоїдно змінних величин в комплексній формі

$$\begin{aligned} \underline{U} &= r_1 \underline{I} + j\omega L_1 \underline{I} \pm j\omega M \underline{I} + r_2 \underline{I} + j\omega L_2 \underline{I} \pm j\omega M \underline{I} = \\ &= [(r_1 + r_2) + j\omega(L_1 + L_2 \pm 2M)] \underline{I}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Останній вираз показує, що наявність індуктивного зв'язку між котушками змінює загальну індуктивність всього кола:

$$L_{\text{заг}} = L_1 + L_2 \pm 2M. \quad (3.12)$$

Залежно від виду увімкнення (зустрічне або узгоджене) загальна індуктивність кола зменшується або збільшується на $2M$.

Побудуємо топографічну векторну діаграму для схеми, показаної на рис. 3.4 при зустрічному ввімкненні. Приймаємо $L_1 > M$, $L_2 < M$.

Побудова починається зі струму I . На ділянці ab напруга збігається із струмом. На ділянці bc напруга складається із двох складових – напруги самоіндукції $\omega L_1 I$, яка випереджує струм власної котушки на 90° , і напруги взаємної індукції, яка відстає від струму другої котушки на 90° , оскільки вмикання зустрічне. На ділянці cd напруга (рис. 3.5) збігається із струмом. На ділянці de також дві напруги, причому $\omega L_2 I < \omega M I$.

Вектор прикладеної напруги розміщується між точками a і e .

Як видно із діаграми, напруга другої котушки відстає від струму в ній, що зазвичай має місце при активно-ємнісному навантаженні. Цей ефект (ефект *хибної ємності*) виникає від того, що взаємний зустрічний потік у другій котушці є більшим за власний.

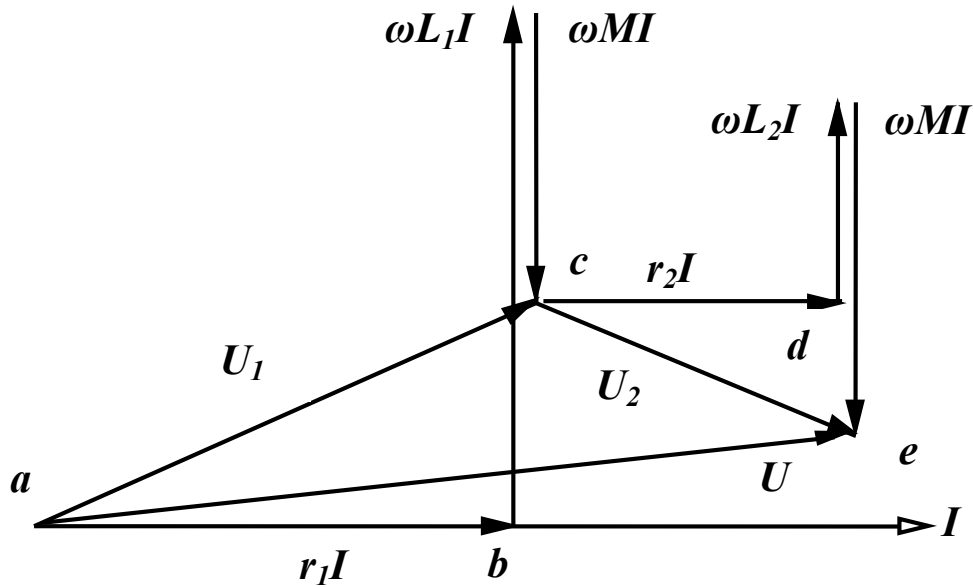


Рисунок 3.5

Паралельне з'єднання двох індуктивно зв'язаних котушок розглянемо в наступному прикладі (рис. 3.6).

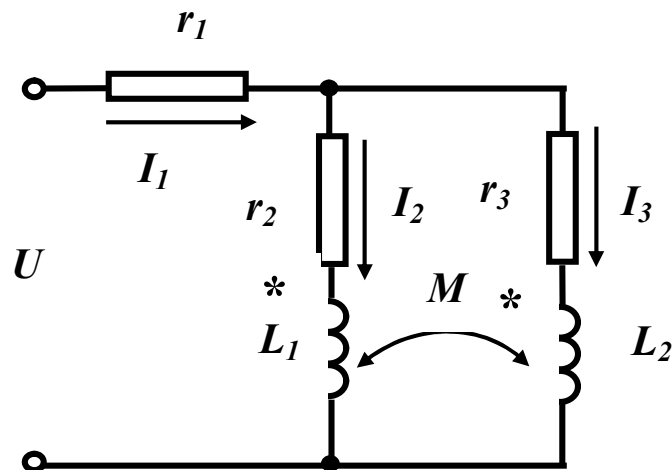


Рисунок 3.6

Параметри схеми: $u(t) = 100 \sin \omega t$ В, $f = 50$ Гц, $r_1 = 10$ Ом,
 $r_2 = 5$ Ом, $r_3 = 5$ Ом, $L_1 = 40$ мГн, $L_2 = 60$ мГн.
 Коефіцієнт магнітного зв'язку $k = 0.8$.

Визначимо спочатку взаємну індуктивність котушок L_1, L_2

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}. \quad (3.13)$$

Реактивні опори власних та взаємних індуктивностей

$$x_{L_1} = \omega L_1, \quad x_{L_2} = \omega L_2, \quad x_M = \omega M.$$

Для розв'язання задачі запишемо систему рівнянь за законами Кірхгофа (в схемі рис. 4.6 котушки увімкнені узгоджено).

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 - \underline{I}_2 - \underline{I}_3 &= 0, \\ \underline{I}_1 r_1 + \underline{I}_2 (r_2 + jx_{L_1}) + \underline{I}_3 jx_M &= \underline{U}, \\ \underline{I}_1 r_1 + \underline{I}_3 (r_3 + jx_{L_2}) + \underline{I}_2 jx_M &= \underline{U}. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Розв'яжемо цю систему рівнянь в середовищі MathCAD за допомогою процедури «*lsolve*».

Відзначимо, що результатом розрахунків є комплексні *амплітудні* значення струмів у вітках, для можливості порівняння з результатами моделювання в середовищі MicroCap.

$$U_m := 100 \quad r_1 := 10 \quad r_2 := 5 \quad r_3 := 5 \quad f := 50$$

$$L_1 := 0.04 \quad L_2 := 0.06 \quad k := 0.8$$

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot f \quad M := k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

$$x_{L_1} := \omega \cdot L_1 \quad x_{L_2} := \omega \cdot L_2 \quad x_M := \omega \cdot M$$

$$A := \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ r_1 + i \cdot x_{L_1} + r_2 & & i \cdot x_M \\ r_1 & i \cdot x_M & i \cdot x_{L_2} + r_3 \end{pmatrix} \quad B := \begin{pmatrix} 0 \\ U_m \\ U_m \end{pmatrix}$$

$$I := \text{lsolve}(A, B) \quad I = \begin{pmatrix} 3.688 - 3.793i \\ 3.198 - 1.658i \\ 0.49 - 2.136i \end{pmatrix}$$

Якщо поміняти увімкнення котушок на зустрічне, то система рівнянь за законами Кірхгофа набуде вигляду:

$$\begin{aligned}
 \underline{I}_1 - \underline{I}_2 - \underline{I}_3 &= 0, \\
 \underline{I}_1 r_1 + \underline{I}_2 (r_2 + jx_{L_1}) - \underline{I}_3 jx_M &= \underline{U}, \\
 \underline{I}_1 r_1 + \underline{I}_3 (r_3 + jx_{L_2}) - \underline{I}_2 jx_M &= \underline{U}.
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

Її розв'язок наведено нижче.

$$U_m := 100 \quad r_1 := 10 \quad r_2 := 5 \quad r_3 := 5 \quad f := 50$$

$$L_1 := 0.04 \quad L_2 := 0.06 \quad k := 0.8$$

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot f \quad M := k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

$$x_{L1} := \omega \cdot L_1 \quad x_{L2} := \omega \cdot L_2 \quad x_M := \omega \cdot M$$

$$A := \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ r_1 & i \cdot x_{L1} + r_2 & -i \cdot x_M \\ r_1 & -i \cdot x_M & i \cdot x_{L2} + r_3 \end{pmatrix} \quad B := \begin{pmatrix} 0 \\ U_m \\ U_m \end{pmatrix}$$

$$I := \text{Isolve}(A, B) \quad I = \begin{pmatrix} 7.864 - 0.958i \\ 4.368 - 0.455i \\ 3.495 - 0.503i \end{pmatrix}$$

Порядок виконання роботи

1. Зібрати коло згідно рис. 3.7.

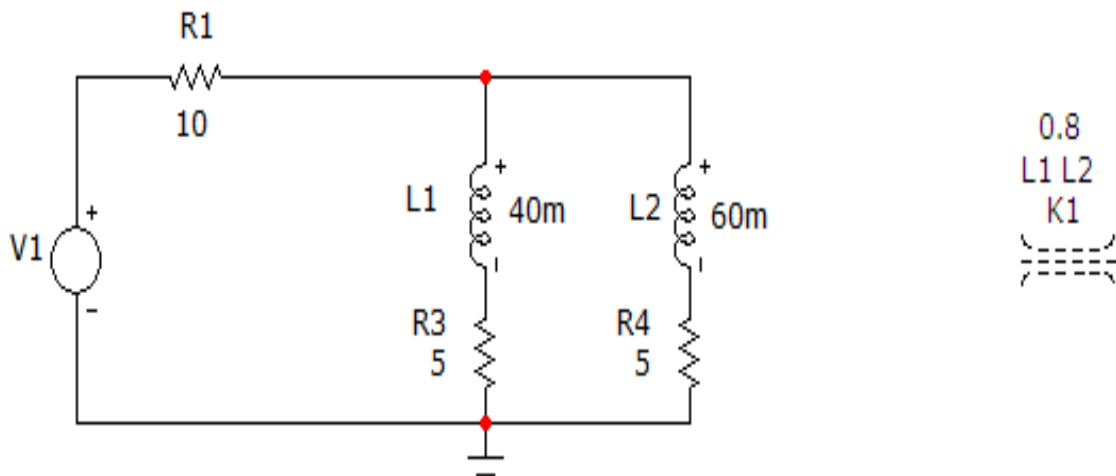


Рисунок. 3.7

Це коло відповідає схемі, як зображена на рис. 3.6. Зазначимо, що увімкнення котушок індуктивності тут узгоджене. Для задання магнітного зв'язку між котушками індуктивності L_1 , L_2 додатково вводиться магнітне осердя $K1$, яке можна викликати на екран опцією «Компоненты / Analog Primitives / Passive Components /K». Його атрибути задаються у вікні (рис. 3.8), яке з'являється при перенесенні компонента на робоче поле програми.

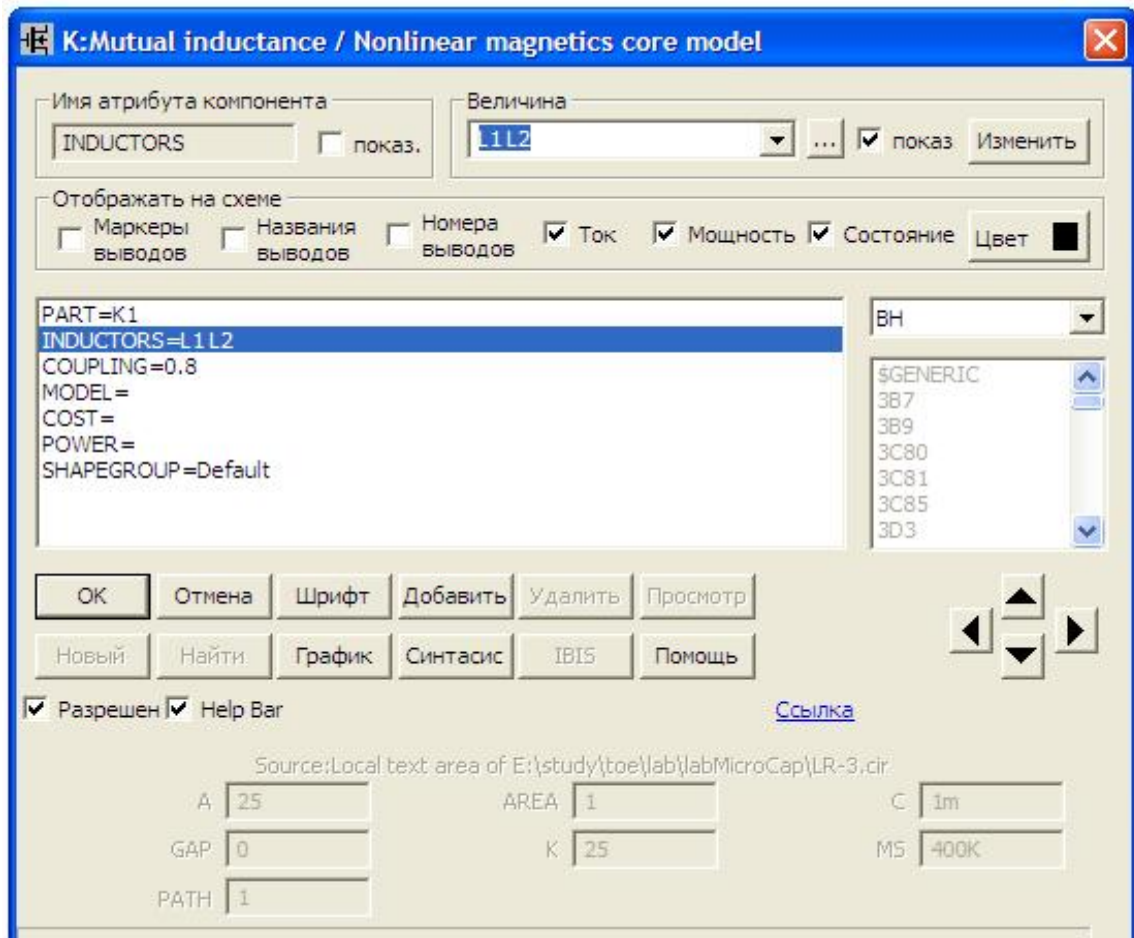


Рисунок. 3.8

В цьому вікні необхідно задати імена котушок індуктивності (в нашому випадку це $L1$, $L2$) і коефіцієнт магнітного зв'язку (в нашому випадку він дорівнює 0.8).

Параметри джерела синусоїдної напруги задаються у вікні (рис. 3.9), яке з'являється при перенесенні компонента на робоче поле програми.

В цьому вікні слід вибрати вкладинку *Sin* і задати частоту, амплітуду та початкову фазу (в нашому випадку це 50 Гц, 100 В та 0°).

Параметри кола вибираються згідно таблиці 3.1.

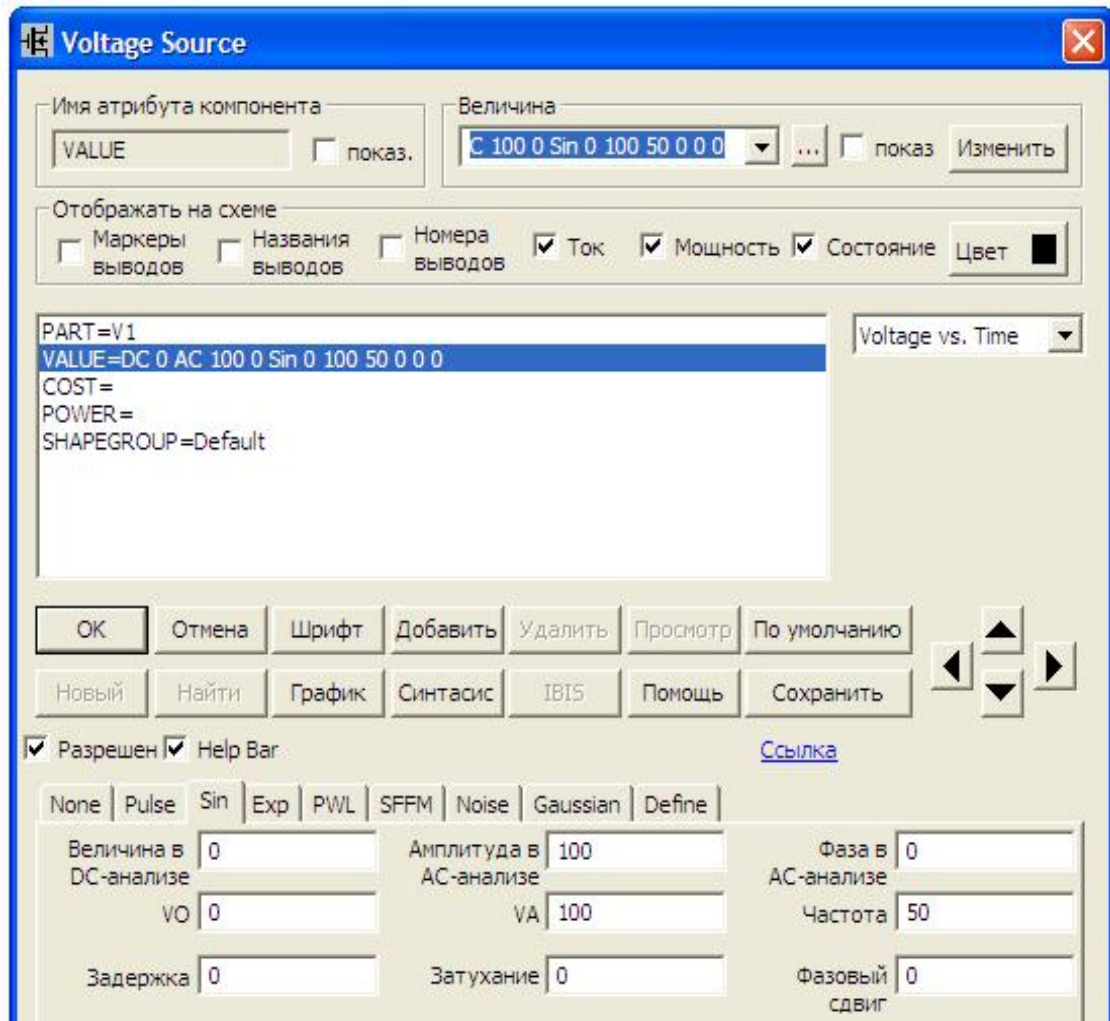


Рисунок. 3.9

Таблица 3.1

Вар.	U_m, B	$f, Гц$	$r_1, Ом$	$r_2, Ом$	$r_3, Ом$	$L_1, мГн$	$L_2, мГн$	k
1	120	60	20	10	12	100	60	0.85
2	80	50	15	8	6	90	80	0.9
3	60	40	25	4	3	75	90	0.75
4	75	30	10	5	4	50	120	0.8

2. На верхній панелі головного вікна відкриваємо опцію «Анализ» і вибираємо в ній рядок «Динамический частотный анализ (Dynamic AC)». Після цього на екрані з'являється вікно (рис. 3.10), в якому слід задати такі параметри:

- частоту, для якої проводиться розрахунок (в нашому випадку 50 Гц);
- параметри, які ми бажаємо вивести на екран (в нашому випадку це струми у вітках);

- форму виведення параметрів (в нашому випадку це дійсна та уявна частини *комплексної амплітуди*).

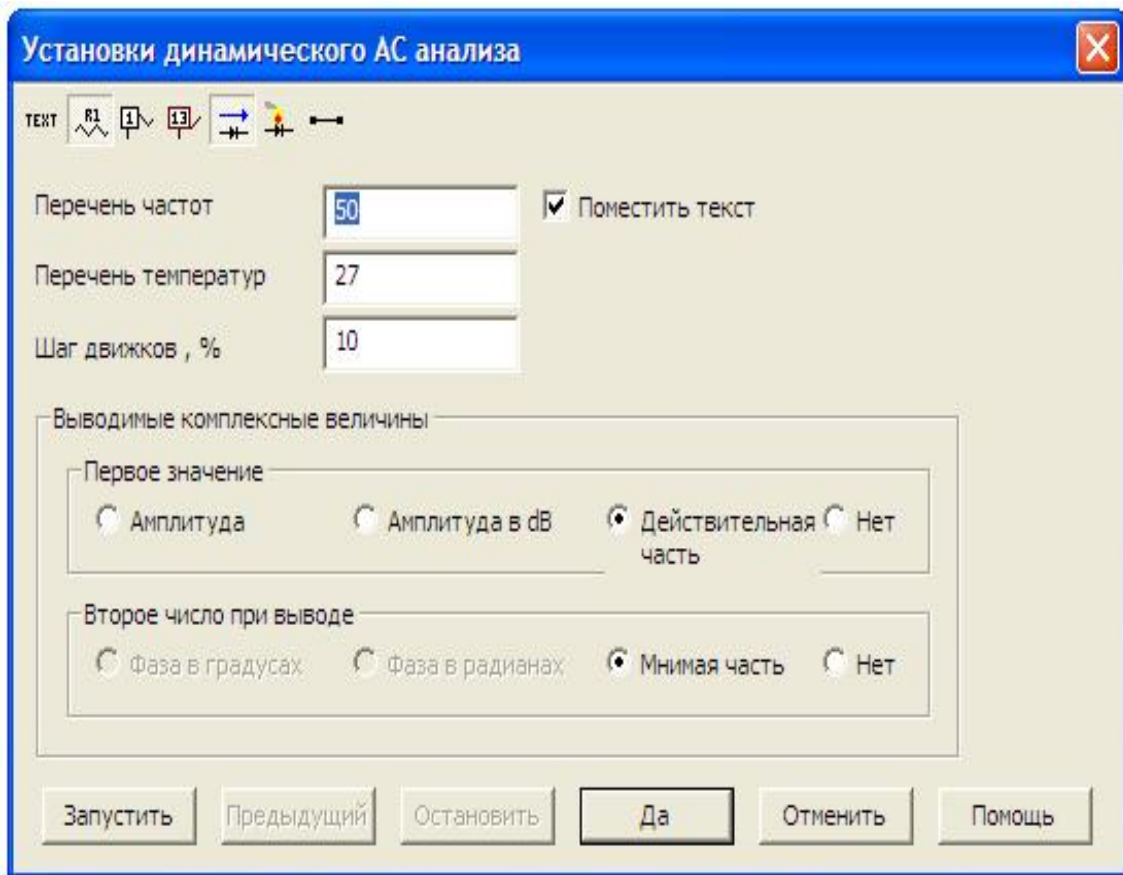


Рисунок. 3.10

В результаті схема прийме вигляд, зображений на рис. 3.11.

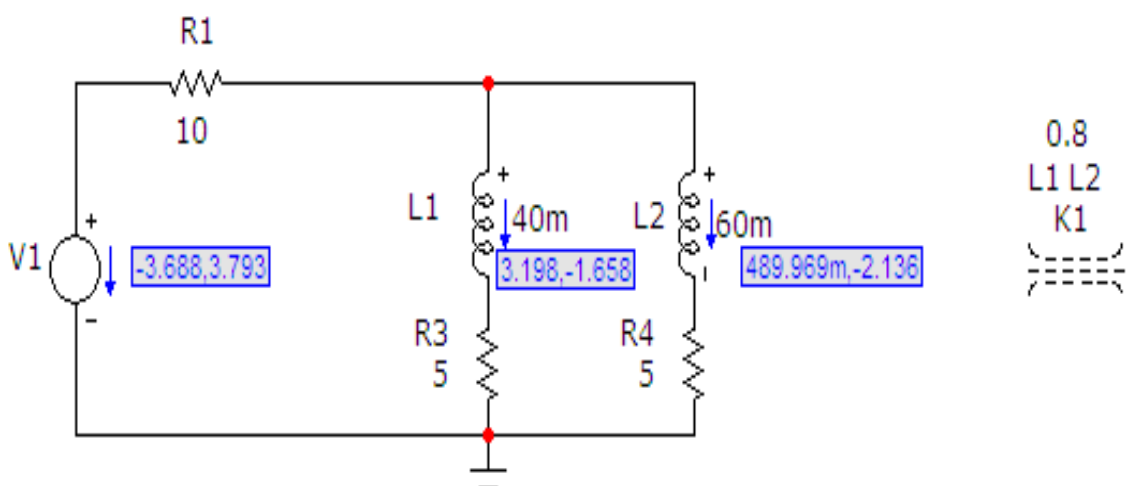


Рисунок. 3.11

Цю схему необхідно роздрукувати.

3. Змінимо увімкнення котушок індуктивності на зустрічне (рис. 3.12).

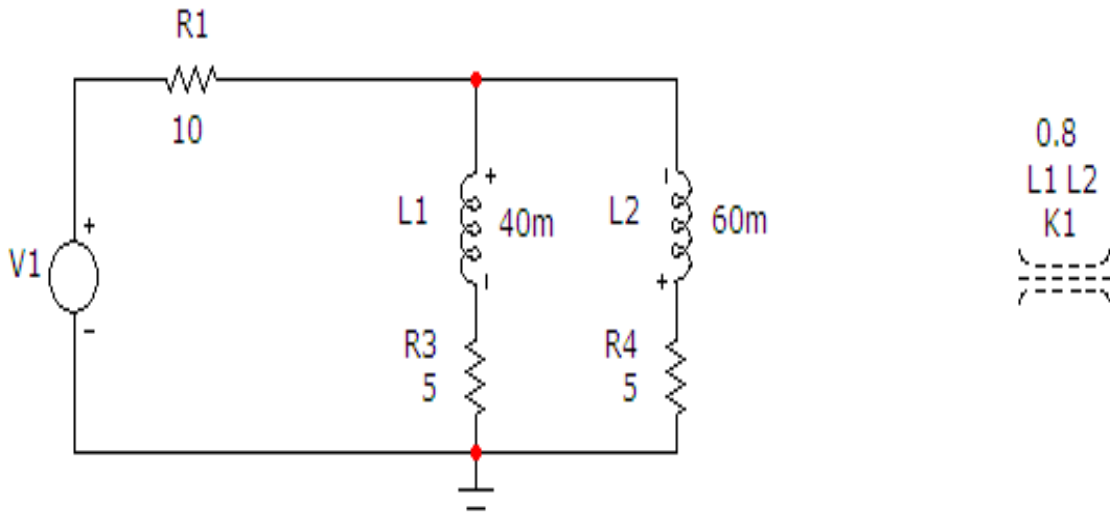


Рисунок. 3.12

Результати моделювання зміняться теж (рис. 3.13).

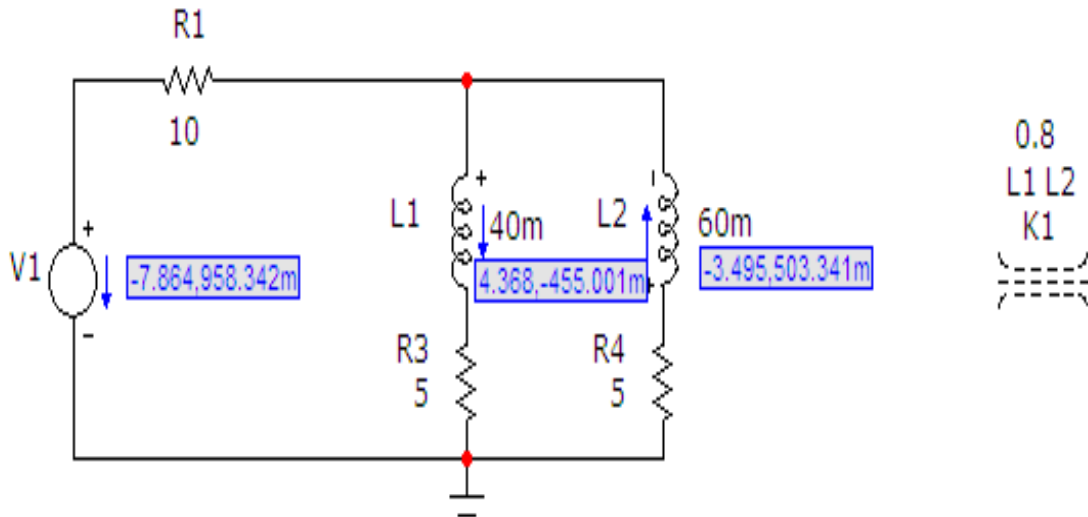


Рисунок 3.13

Цю схему теж необхідно роздрукувати.

Легко помітити, що результати моделювання з урахуванням напрямків струмів збігаються з результатами розрахунку в середовищі MathCAD прикладу, який наведений в попередньому підрозділі.

Обробка результатів дослідження

1. Для схем, зображених на рис. 3.7 та рис. 3.12, скласти системи рівнянь за законами Кірхгофа.

2. Розв'язати ці системи рівнянь в середовищі MathCAD.
3. Порівняти результати розрахунків з результатами моделювання.

Контрольні питання

1. Яке вмикання котушок є узгодженим?
2. Яке вмикання котушок є зустрічним?
3. Як дослідним шляхом визначити початки обмоток котушок?
4. Що називають коефіцієнтом магнітного зв'язку?
5. Що таке ефект хибної ємності?
6. Чи може коефіцієнт магнітного зв'язку бути більшим за 1?

Лабораторна робота № 4тс

Дослідження трифазного кола синусоїдного струму при з'єднанні приймачів енергії зіркою

Мета роботи: дослідити режими роботи приймачів енергії, з'єднаних зіркою, які живляться від симетричної трифазної системи напруг.

Короткі теоретичні відомості

Для генерування та передавання електромагнітної енергії великої потужності широкого застосування набули трифазні електричні кола. *Трифазне електричне коло* є сукупністю трьох електричних кіл, що називають *фазами*, в яких діють три е.р.с. однакової частоти, що зсунуті одна відносно одної за фазою та створені одним спільним джерелом енергії. Таким джерелом, звичайно, буває трифазний електромашинний генератор з трьома однаковими обмотками, зміщеними в просторі одна відносно одної на 120° .

Принцип дії найпростішого трифазного генератора можна пояснити за допомогою рис. 4.1, на якому показаний постійний магніт і три однакові жорстко пов'язані між собою рамки на осі.

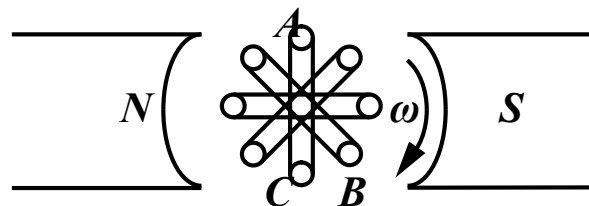


Рисунок 4.1

При обертанні цих рамок з кутовою швидкістю ω в постійному магнітному полі в кожній з них наводяться синусоїдні е.р.с. однакової амплітуди, але зсунуті одна відносно одної за фазою на 120° .

Щоб розрізнити е.р.с. окремих рамок (фаз генератора), їм надають індекси А, В, С. Таким чином, миттєві значення е.р.с. кожної фази

$$e_A = E_m \sin \omega t, \quad e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ), \quad e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ). \quad (4.1)$$

В комплексній формі:

$$\underline{E}_A = E, \quad \underline{E}_B = E e^{-j120^\circ}, \quad \underline{E}_C = E e^{-j240^\circ}. \quad (4.2)$$

Система е.р.с., коли їх амплітуди однакові і вони зміщені одна відносно одної за фазою на один і той же кут називається *симетричною системою е.р.с.*

Хвильова та векторна діаграми цієї системи е.р.с. показані відповідно на рис. 4.2, 4.3.

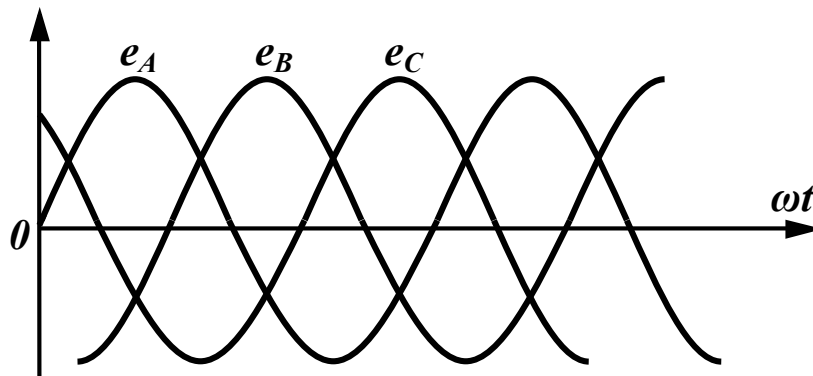


Рисунок 4.2

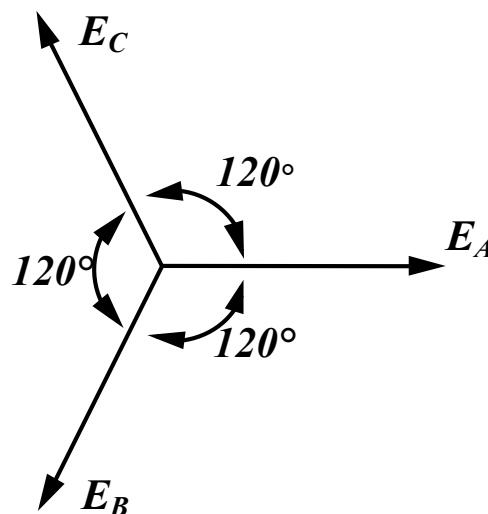


Рисунок 4.3

Порядок чергування фаз приймають таким, як показано на рис. 4.3 (за годинниковою стрілкою) і називають його *прямим*.

На рис. 4.4 зображене трифазне коло, фази якого не зв'язані між собою. В цій схемі – \underline{Z}_l – опір проводів, – $\underline{Z}_{наa}$, $\underline{Z}_{наb}$, $\underline{Z}_{наc}$ – опори навантажень відповідних фаз.

Струми в цьому колі визначаються для кожної фази окремо за виразами

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{E}_A}{\underline{Z}_l + \underline{Z}_{наa}}, \quad \underline{I}_b = \frac{\underline{E}_B}{\underline{Z}_l + \underline{Z}_{наb}}, \quad \underline{I}_c = \frac{\underline{E}_C}{\underline{Z}_l + \underline{Z}_{наc}}. \quad (4.3)$$

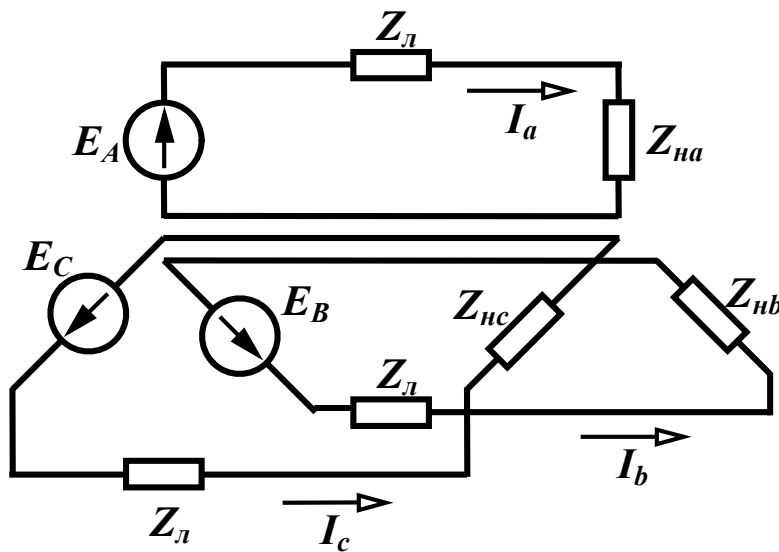


Рисунок 4.4

Якщо об'єднати три зворотні проводи в один, який називають *нульовим* або *нейтральним*, то одержимо зв'язане трифазне коло (рис. 4.5). Точки O та O_1 називаються *нульовими* або *нейтральними* точками відповідно генератора і навантаження. Проводи, що з'єднують точки А, В, С генератора з навантаженням називаються *лінійними*.

Струм в нейтральному проводі за першим законом Кірхгофа дорівнює сумі струмів в фазах

$$\underline{I}_N = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c. \quad (4.4)$$

Якщо в трифазному колі система е.р.с. генератора симетрична і комплексні опори всіх фаз однакові, то таке трифазне коло називається *симетричним*. Трифазне коло є *несиметричним*, якщо не виконується хоча б одна з цих умов.

В симетричному трифазному колі $Z_{на} = Z_{nb} = Z_{nc}$, тому струми у фазах, що знайдені за (4.3), будуть однаковими за амплітудою і зсунуті один відносно одного за фазою на 120° , отож, система струмів є симетричною системою, струм в нейтральному проводі дорівнює нулю, а потенціали точок O та O_1 однакові. Оскільки $I_N = 0$, то нейтральний провід можна вилучити і замінити чотирипровідне коло трипровідним (рис. 4.6). Це є однією з головних переваг передавання енергії трифазним колом – передавання однієї і тієї ж потужності трьома проводами замість шести при передаванні цієї ж потужності трьома однофазними колами.

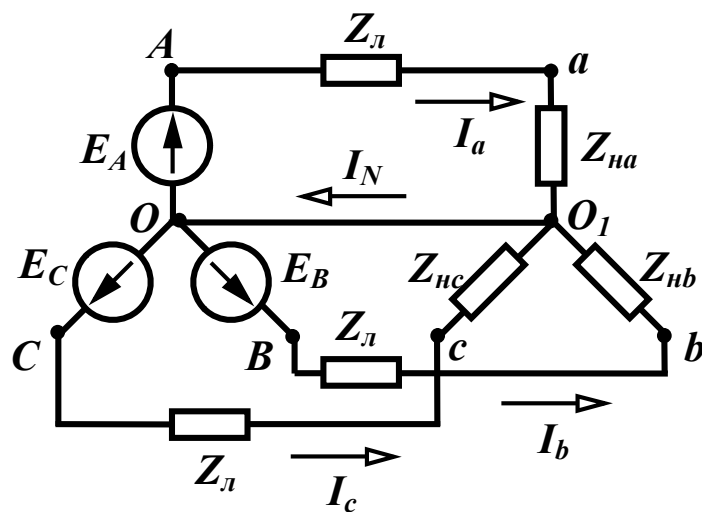


Рисунок 4.5

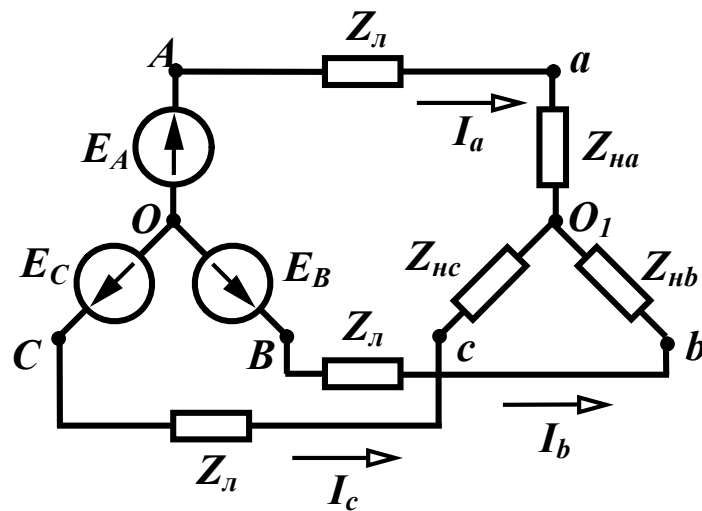


Рисунок 4.6

На рис 4.6 фази генератора і навантаження з'єднані зіркою. Зрозуміло, що їх можна з'єднати і трикутником. Можливі п'ять варіантів з'єднання генератора і навантаження:

- фази генератора і навантаження з'єднані зіркою з нейтральним проводом;
- фази генератора і навантаження з'єднані зіркою без нейтрального проводу;
- фази генератора з'єднані зіркою, а навантаження трикутником;
- фази генератора з'єднані трикутником, а навантаження зіркою;
- фази генератора і навантаження з'єднані трикутником.

В трифазних колах розрізняють *лінійні* і *фазні* струми і напруги.

Струми, що протікають по лінійних проводах, називаються *лінійними* струмами (струми $\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c$ на рис. 4.7).

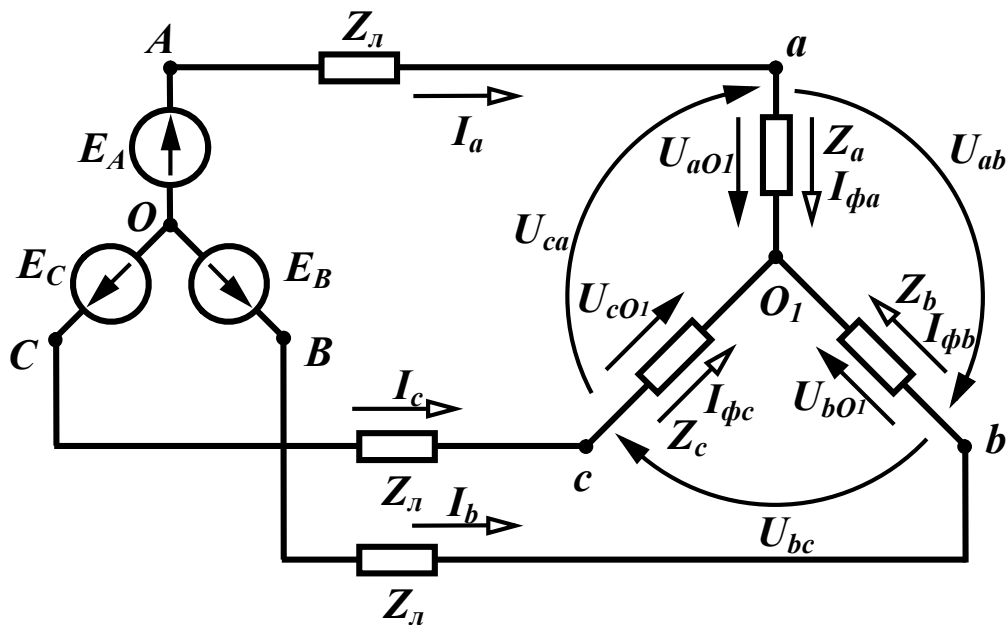


Рисунок 4.7

Прийнято направляти лінійні струми від генератора до навантаження.

Струми, які протікають по навантаженнях фаз, називаються *фазними* (струми $\underline{I}_{\phi a}, \underline{I}_{\phi b}, \underline{I}_{\phi c}$ на рис. 4.7).

При навантаженні, з'єданому *зіркою*, лінійні та фазні струми відповідних фаз рівні між собою $\underline{I}_{\text{ла}} = \underline{I}_{\phi a}$.

Напрямок фазних струмів в цьому випадку відповідає прямому чергуванню фаз.

Для симетричного трифазного кола ці вирази суттєво спрощуються, оскільки і лінійні і фазні струми складають симетричну систему, тому

$$\underline{I}_{bc} = \underline{I}_{ab} e^{-j120^\circ}, \quad \underline{I}_{ca} = \underline{I}_{ab} e^{-j240^\circ}. \quad (4.5)$$

Звідси

$$\underline{I}_a = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ab} e^{-j240^\circ} = \sqrt{3} \underline{I}_{ab} e^{-j30^\circ}. \quad (4.6)$$

Таким чином, в симетричному трифазному колі при з'єднанні навантаження трикутником модуль лінійного струму в $\sqrt{3}$ разів більший за фазний $I_l = \sqrt{3} I_\phi$.

Напруги між лінійними проводами $\underline{U}_{ab}, \underline{U}_{bc}, \underline{U}_{ca}$ (рис. 4.7) називаються *лінійними напругами*. Їх напрямки збігаються з прямим порядком чергування фаз.

Фазними напругами називаються напруги на навантаженнях фаз. При з'єднанні навантаження зіркою (рис. 4.7) це напруги $\underline{U}_{aO_1}, \underline{U}_{bO_1}, \underline{U}_{cO_1}$.

Лінійні напруги при з'єднанні навантаження зіркою можна виразити через фазні, застосовуючи другий закон Кірхгофа, пропускаючи в їх позначеннях спільний індекс O_1

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_a - \underline{U}_b, \quad \underline{U}_{bc} = \underline{U}_b - \underline{U}_c, \quad \underline{U}_{ca} = \underline{U}_c - \underline{U}_a. \quad (4.7)$$

Таким чином, *лінійні напруги дорівнюють різниці відповідних фазних*.

Якщо трифазне коло симетричне, то система фазних та лінійних напруг теж симетрична

$$\begin{aligned} \underline{U}_b &= \underline{U}_a e^{-j120^\circ}, \quad \underline{U}_c = \underline{U}_a e^{-j240^\circ} \\ \underline{U}_{bc} &= \underline{U}_{ab} e^{-j120^\circ}, \quad \underline{U}_{ca} = \underline{U}_{ab} e^{-j240^\circ} \end{aligned} \quad (4.8)$$

тому

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_a - \underline{U}_a e^{-j120^\circ} = \sqrt{3} \underline{U}_a e^{j30^\circ}. \quad (4.9)$$

Модуль лінійної напруги в симетричному трифазному колі при з'єднанні навантаження зіркою в $\sqrt{3}$ разів більший за фазний $U_l = \sqrt{3} U_\phi$.

Усі поняття та співвідношення, які отримані для навантаження, однаково відносяться до генератора. Часто у величин, які відносяться до навантаження, літери індексів приймаються малими, а для величин, які відносяться до генератора, великими.

В багатьох випадках споживачу не відомий вид увімкнення обмоток генератора – зіркою чи трикутником, тому будемо вважати, що е.р.с. генератора з'єднані в зірку. Розглянемо за цієї умови визначення лінійних струмів, коли навантаження також з'єднані зіркою.

В симетричному трифазному колі, як відмічалось вище, лінійні струми утворюють симетричну систему, тому достатньо знайти струм лише в одній фазі (наприклад, фазі А), а решта струмів знаходяться за виразами:

$$\underline{I}_b = \underline{I}_a e^{-j120^\circ}, \quad \underline{I}_c = \underline{I}_a e^{-j240^\circ}. \quad (4.10)$$

Оскільки потенціали точок O та O_1 однакові, незалежно від наявності чи відсутності нейтрального проводу, то струм у фазі А знаходиться за виразом $\underline{I}_a = \frac{\underline{E}_A}{\underline{Z}_A}$, де \underline{Z}_A – опір всієї фази, який містить опір лінії $\underline{Z}_л$, навантаження $\underline{Z}_н$ і можливо внутрішній опір е.р.с.

Фазна напруга навантаження $\underline{U}_a = \underline{I}_a \underline{Z}_н$, а лінійна напруга \underline{U}_{ab} знаходиться за формулою (4.9).

Розглянемо приклад розрахунку несиметричного трифазного кола.

В несиметричному трифазному колі (рис. 5.8) знайти фазні і лінійні струми та напруги.

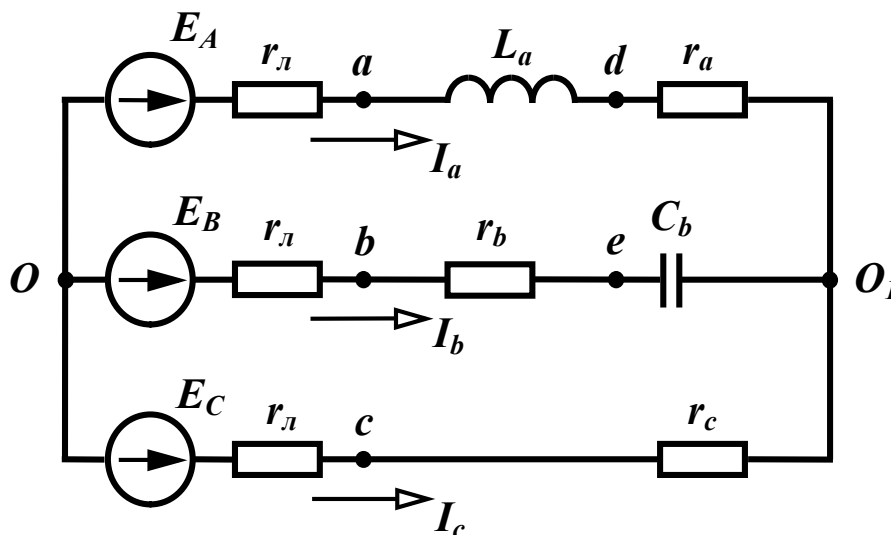


Рисунок 4.8

Параметри кола

$$E_A = 220 \text{ В}, \quad f = 50 \text{ Гц}, \quad r_л = 5 \text{ Ом}, \quad r_a = 5 \text{ Ом},$$

$$L_a = 30 \text{ мГн}, \quad r_b = 5 \text{ Ом}, \quad C_b = 200 \text{ мкФ}, \quad r_c = 10 \text{ Ом}.$$

Якщо задане лише значення е.р.с. однієї фази, то вважається, що система е.р.с. генератора симетрична і, приймаючи початкову фазу E_A за нуль, маємо $\underline{E}_B = \underline{E}_A e^{-j120^\circ}$, $\underline{E}_C = \underline{E}_A e^{-j240^\circ}$.

Оскільки коло несиметричне і нейтральний провід відсутній, то для знаходження зміщення нейтралі \underline{U}_{O_1O} використаємо формулу

$$\underline{U}_{O_1O} = \frac{\underline{E}_A \underline{Y}_A + \underline{E}_B \underline{Y}_B + \underline{E}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}, \quad (4.11)$$

попередньо визначивши провідності фаз:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_A &= r_l + r_a + j\omega L_a, \quad \underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_A}, \\ \underline{Z}_B &= r_l + r_b - j\frac{1}{\omega C_b}, \quad \underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_B}, \\ \underline{Z}_C &= r_l + r_c, \quad \underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C}. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Струми у фазах визначають за виразами

$$\begin{aligned} \underline{I}_a &= (\underline{E}_A - \underline{U}_{O_1O}) \underline{Y}_A, \\ \underline{I}_b &= (\underline{E}_B - \underline{U}_{O_1O}) \underline{Y}_B, \\ \underline{I}_c &= (\underline{E}_C - \underline{U}_{O_1O}) \underline{Y}_C. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Фазні напруги навантаження

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{I}_a \underline{Z}_a, \\ \underline{U}_b &= \underline{I}_b \underline{Z}_b, \\ \underline{U}_c &= \underline{I}_c \underline{Z}_c. \end{aligned} \quad (4.14)$$

Лінійні напруги навантаження

$$\begin{aligned} \underline{U}_{ab} &= \underline{U}_a - \underline{U}_b, \\ \underline{U}_{bc} &= \underline{U}_b - \underline{U}_c, \\ \underline{U}_{ca} &= \underline{U}_c - \underline{U}_a. \end{aligned} \quad (4.15)$$

Виконаємо ці розрахунки в середовищі MathCAD.

$$\begin{aligned}
EA &:= 220 & f &:= 50 & r &:= 5 & r_a &:= 5 & r_b &:= 5 & r_c &:= 10 \\
La &:= 30 \cdot 10^{-3} & C_b &:= 200 \cdot 10^{-6} & x_{La} &:= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot La & x_{Cb} &:= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_b} \\
EB &:= EA \cdot e^{-i \cdot 120 \text{deg}} & EC &:= EA \cdot e^{-i \cdot 240 \text{deg}} \\
Z_A &:= r + r_a + i \cdot x_{La} & Z_B &:= r + r_b - i \cdot x_{Cb} & Z_C &:= r + r_c \\
Y_A &:= \frac{1}{Z_A} & Y_B &:= \frac{1}{Z_B} & Y_C &:= \frac{1}{Z_C} \\
U_{O1O} &:= \frac{EA \cdot Y_A + EB \cdot Y_B + EC \cdot Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} & I_a &:= (EA - U_{O1O}) \cdot Y_A \\
I_b &:= (EB - U_{O1O}) \cdot Y_B & I_c &:= (EC - U_{O1O}) \cdot Y_C \\
U_a &:= I_a \cdot (r_a + i \cdot x_{La}) & U_b &:= I_b \cdot (r_b - i \cdot x_{Cb}) & U_c &:= I_c \cdot r_c \\
U_{ab} &:= U_a - U_b & U_{bc} &:= U_b - U_c & U_{ca} &:= U_c - U_a \\
U_{O1O} &= 68.003 - 56.082i & I_a &= 10.849 - 4.617i \\
I_b &= 1.018 - 11.824i & I_c &= -11.867 + 16.44i \\
U_a &= 97.753 + 79.164i & U_b &= -183.094 - 75.324i \\
U_c &= -118.669 + 164.405i & U_{ab} &= 280.847 + 154.488i \\
U_{bc} &= -64.425 - 239.729i & U_{ca} &= -216.422 + 85.241i
\end{aligned}$$

Розглянемо тепер неповнофазний режим цього кола (обрив фази А).

Очевидно, що в цьому випадку $\underline{Z}_A = \infty$ і $\underline{Y}_A = 0$.

Реалізуємо це в MathCAD.

$$\begin{aligned}
EA &:= 220 & f &:= 50 & r &:= 5 & r_a &:= 5 & r_b &:= 5 & r_c &:= 10 \\
La &:= 30 \cdot 10^{-3} & C_b &:= 200 \cdot 10^{-6} & x_{La} &:= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot La & x_{Cb} &:= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_b} \\
EB &:= EA \cdot e^{-i \cdot 120 \text{deg}} & EC &:= EA \cdot e^{-i \cdot 240 \text{deg}} \\
Z_A &:= r + r_a + i \cdot x_{La} & Z_B &:= r + r_b - i \cdot x_{Cb} & Z_C &:= r + r_c \\
Y_A &:= 0 & Y_B &:= \frac{1}{Z_B} & Y_C &:= \frac{1}{Z_C}
\end{aligned}$$

$$U_{O1O} := \frac{E_A \cdot Y_A + E_B \cdot Y_B + E_C \cdot Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} \quad I_a := (E_A - U_{O1O}) \cdot Y_A$$

$$I_b := (E_B - U_{O1O}) \cdot Y_B \quad I_c := (E_C - U_{O1O}) \cdot Y_C$$

$$U_a := I_a \cdot (r_a + i \cdot x_{La}) \quad U_b := I_b \cdot (r_b - i \cdot x_{Cb}) \quad U_c := I_c \cdot r_c$$

$$U_{ab} := U_a - U_b \quad U_{bc} := U_b - U_c \quad U_{ca} := U_c - U_a$$

$$U_{O1O} = -6.426 + 27.832i \quad I_a = 0 \quad U_a = 0$$

$$I_b = 6.905 - 10.846i \quad I_c = -6.905 + 10.846i$$

$$U_b = -138.099 - 164.126i \quad U_c = -69.049 + 108.462i$$

$$U_{ab} = 138.099 + 164.126i \quad U_{bc} = -69.049 - 272.589i$$

$$U_{ca} = -69.049 + 108.462i$$

Порядок виконання роботи

1. Зібрати коло згідно рис. 4.9 (в нашому випадку воно відповідає схемі, зображеній на рис. 4.8).

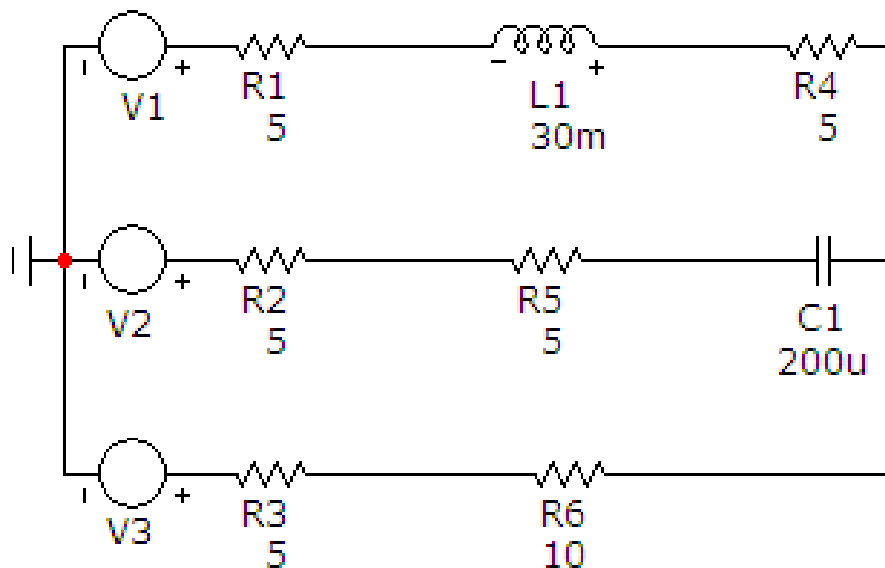


Рисунок. 4.9

Параметри джерела синусоїдної напруги задаються у вікні (рис. 4.10), яке з'являється при перенесенні компонента на робоче поле програми.

В цьому вікні слід вибрати вкладинку *Sin* і задати такі параметри:

- частоту (в нашому випадку це 50 Гц);
- амплітуду (в нашому випадку це 220 В);

- початкову фазу (в нашому випадку початкова фаза кожного джерела напруги має відповідати симетричній системі фаз, тобто для $V1 - 0^\circ$, для $V2 - 240^\circ$, для $V3 - 120^\circ$).

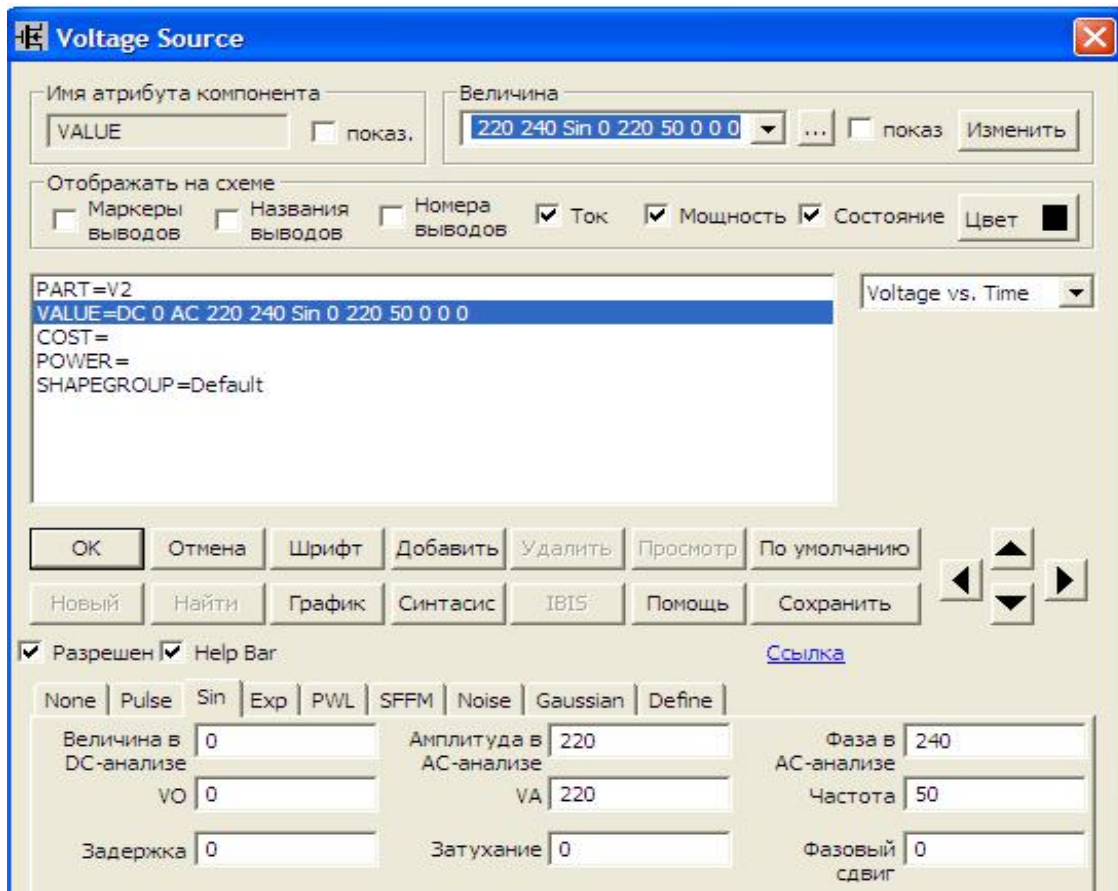


Рисунок. 4.10

Параметри кола вибираються згідно таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

<i>Var.</i>	E_A, B	$f, Гц$	$r_a, Ом$	$r_w, Ом$	$r_b, Ом$	$r_c, Ом$	$L_w, мГн$	$C_b, мкФ$
1	220	60	10	10	12	100	60	85
2	180	50	5	8	6	90	80	90
3	160	40	4	4	3	75	90	75
4	240	80	12	5	4	50	120	80

2. На верхній панелі головного вікна відкриваємо опцію «Анализ» і вибираємо в ній рядок «Динамический частотный анализ (Dynamic AC)». Після цього на екрані з'являється вікно (рис. 4.11), в якому слід задати такі параметри:

- частоту, для якої проводиться розрахунок (згідно табл. 4.1);

- параметри, які ми бажаємо вивести на екран (струми у вітках та потенціали вузлів);
- форму виведення параметрів (дійсна та уявна частини *комплексної амплітуди*).

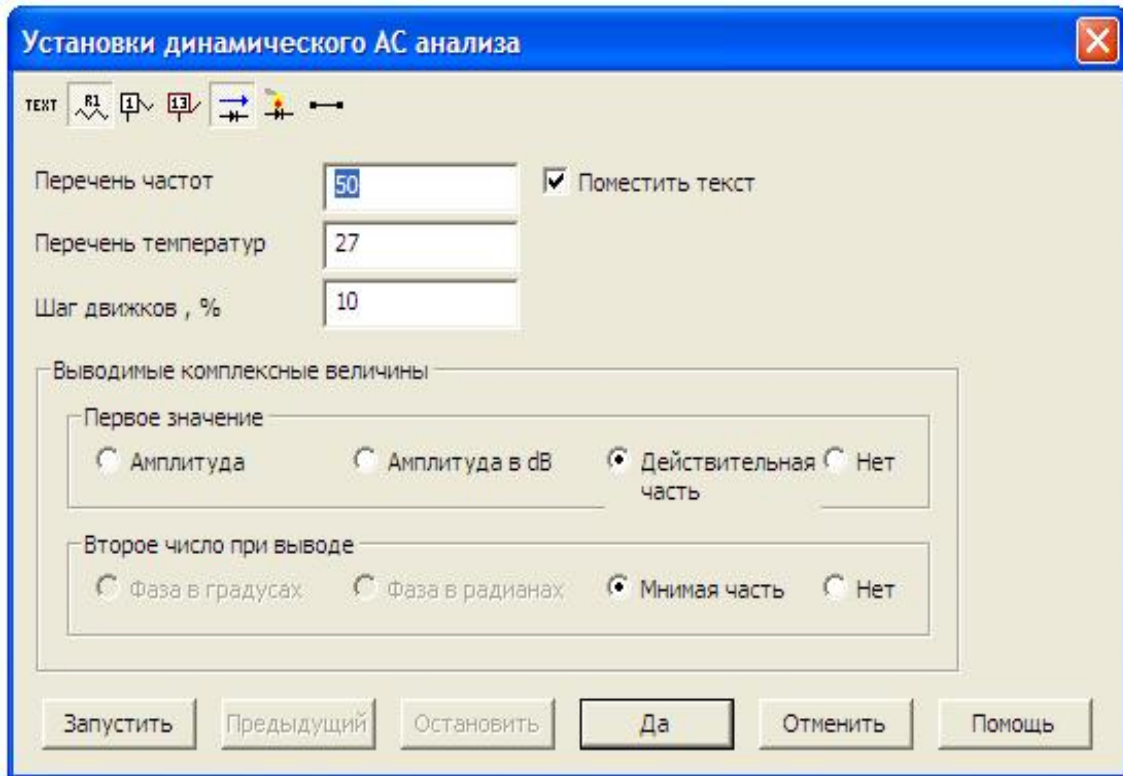


Рисунок. 4.11

В результаті схема прийме вигляд, зображений на рис. 4.12.

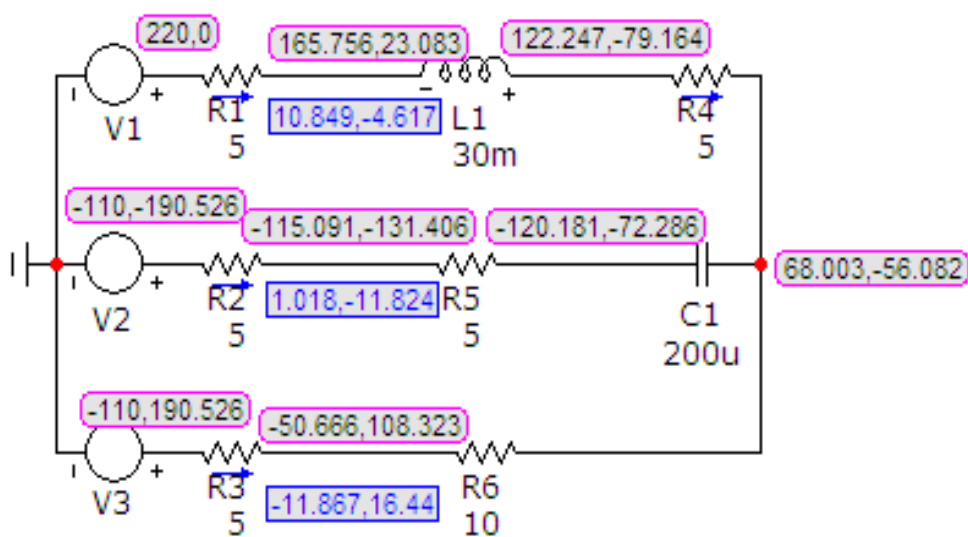


Рисунок. 4.12

З урахуванням того, що фазні напруги навантаження визначаються як різниця потенціалів між вузлами після лінії та зміщенням нейтралі, легко помітити, що результати моделювання збігаються з результатами розрахунку в середовищі MathCAD.

Цю схему необхідно роздрукувати.

3. Змодельуйте в колі аварійну ситуацію (в нашому випадку це обрив лінійного провода в фазі А, рис. 5.13). Тип аварійної ситуації задає викладач (це може бути обрив провода чи коротке замикання).

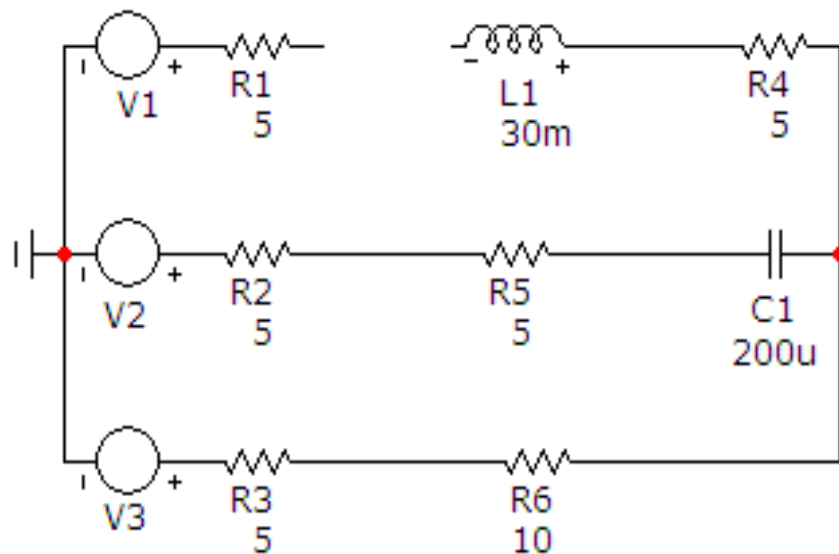


Рисунок. 4.13

Результати моделювання зміняться теж (рис. 4.14).

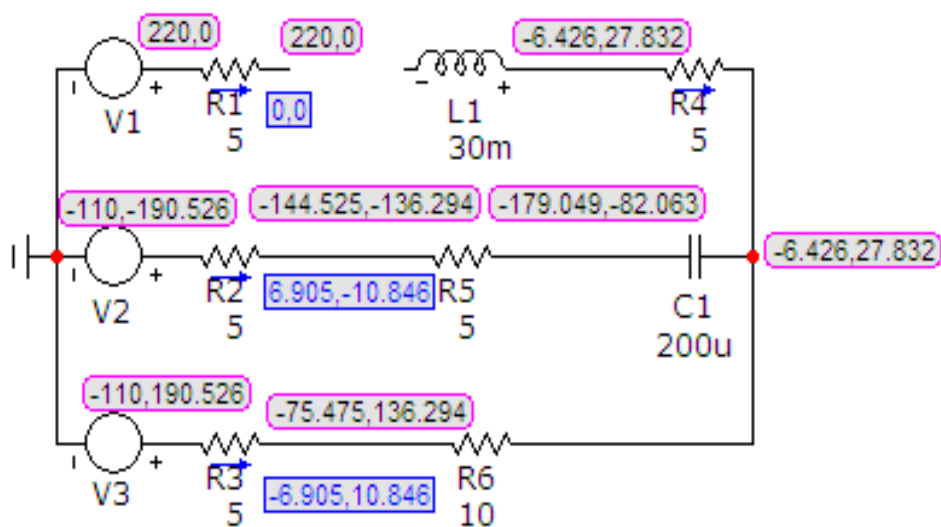


Рисунок 4.14

Цю схему теж необхідно роздрукувати.

Зазначимо, результати моделювання збігаються з результатами розрахунку в середовищі MathCAD.

Обробка результатів дослідження

1. Для робочого та аварійного режимів провести розрахунок лінійних і фазних струмів та напруг в середовищі MathCAD.
2. Порівняти результати розрахунків з результатами моделювання.
3. Використовуючи одержані при моделюванні комплексні потенціали всіх вузлів, для обох режимів побудувати топографічні діаграми потенціалів.

Контрольні питання

1. Що називається симетричним трифазним колом? Несиметричним?
2. Співвідношення між лінійною і фазною напругами в симетричному трифазному колі при з'єднанні приймача зіркою.
3. Як розрахувати напругу зміщення нейтралі?
4. Яку роль відіграє нульовий провідник в трифазному колі?
5. Що називають неповнофазним режимом трифазного кола?
6. Яка мінімальна кількість фаз необхідна для створення обертового магнітного поля.

Лабораторна робота № 5тс

Дослідження трифазного кола синусоїдного струму при з'єднанні приймачів енергії трикутником

Мета роботи: дослідити режими роботи приймачів енергії, з'єднаних трикутником, які живляться від симетричної трифазної системи напруг.

Короткі теоретичні відомості

На рис. 5.1 зображений випадок, коли навантаження з'єднані *трикутником*.

Фазними струмами в цьому випадку будуть струми \underline{I}_{ab} , \underline{I}_{bc} , \underline{I}_{ca} .

Лінійні струми можна знайти знаючи фазні, за першим законом Кірхгофа

$$\underline{I}_a = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}, \underline{I}_b = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}, \underline{I}_c = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}. \quad (5.1)$$

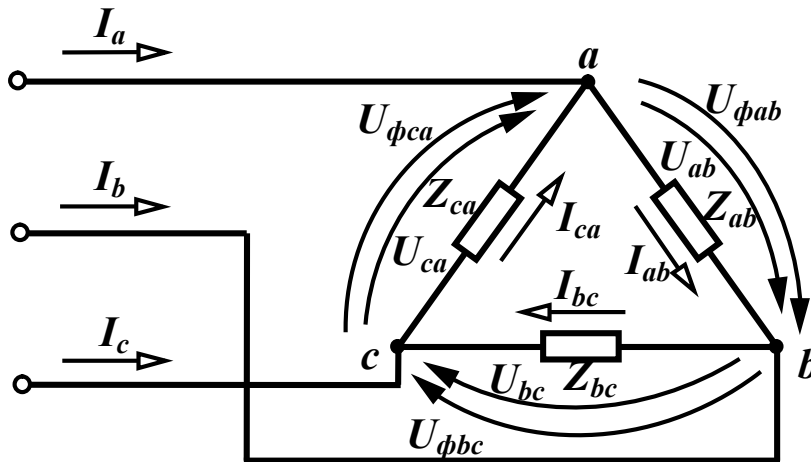


Рисунок 5.1

Напрямок фазних струмів в цьому випадку відповідає прямому чергуванню фаз.

Для симетричного трифазного кола ці вирази суттєво спрощуються, оскільки і лінійні і фазні струми складають симетричну систему, тому

$$\underline{I}_{bc} = \underline{I}_{ab} e^{-j120^\circ}, \underline{I}_{ca} = \underline{I}_{ab} e^{-j240^\circ}. \quad (5.2)$$

Звідси

$$\underline{I}_a = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ab} e^{-j240^\circ} = \sqrt{3} \underline{I}_{ab} e^{-j30^\circ}. \quad (5.3)$$

Таким чином, в симетричному трифазному колі при з'єднанні навантаження трикутником модуль лінійного струму в $\sqrt{3}$ разів більший за фазний $I_l = \sqrt{3} I_\phi$.

Напруги між лінійними проводами $\underline{U}_{ab}, \underline{U}_{bc}, \underline{U}_{ca}$ (рис. 5.7) називаються *лінійними напругами*. Їх напрямки збігаються з прямим порядком чергування фаз.

Фазними напругами називаються напруги на навантаженнях фаз. При з'єднанні навантаження трикутником (рис. 5.8) – $\underline{U}_{\phi ab}, \underline{U}_{\phi bc}, \underline{U}_{\phi ca}$.

В трифазному колі, де навантаження з'єднане трикутником, лінійна напруга завжди дорівнює відповідній фазній $\underline{U}_{lab} = \underline{U}_{\phi ab}$.

Розглянемо приклад визначення фазних та лінійних величин несиметричного трифазного при з'єднанні навантаження трикутником.

Розрахувати фазні і лінійні струми та напруги в колі (рис. 5.2).

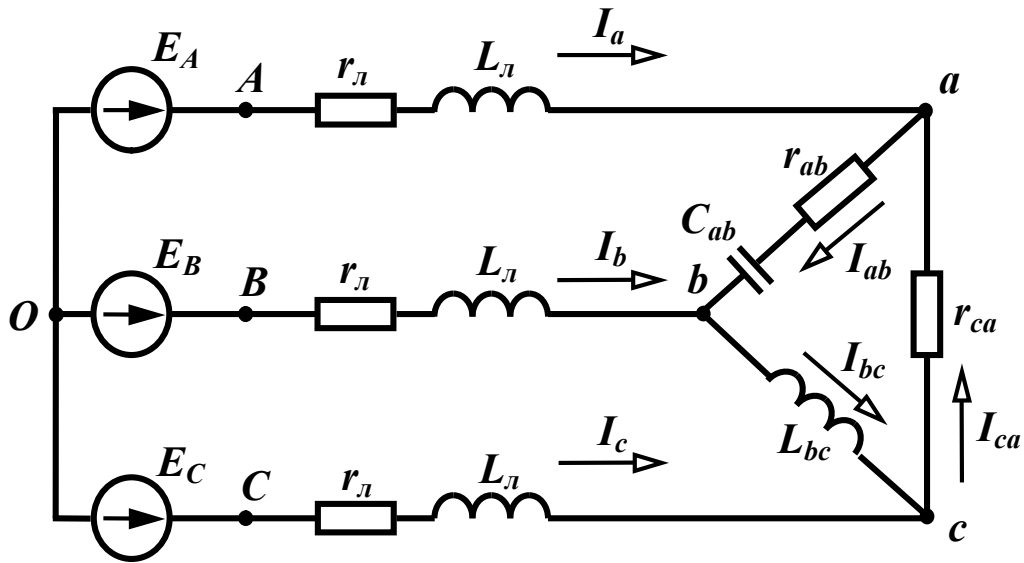


Рисунок 5.2

Параметри кола: $E_A = 220$ В, $f = 50$ Гц, $r_l = 2$ Ом, $L_l = 5$ мГн, $r_{ab} = 10$ Ом, $C_{ab} = 100$ мкФ, $L_{bc} = 40$ мГн, $r_{ca} = 10$ Ом.

Вважаючи систему напруг генератора симетричною, запишемо:

$$\underline{E}_B = \underline{E}_A e^{-j120^\circ}, \quad \underline{E}_C = \underline{E}_A e^{-j240^\circ}.$$

Комплексні опори навантаження та лінії знайдемо за формулами:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{ab} &= r_{ab} - j \frac{1}{\omega C_{ab}}, \\ \underline{Z}_{bc} &= j\omega L_{bc}, \\ \underline{Z}_{ca} &= r_{ca}, \\ \underline{Z}_l &= r_l + j\omega L_l. \end{aligned} \tag{5.4}$$

Для того, щоб ми могли використати методи розрахунку попереднього прикладу, перетворимо трикутник навантажень в еквівалентну зірку та знайдемо її опори

$$\begin{aligned} \underline{Z}_a &= \frac{\underline{Z}_{ab} \underline{Z}_{ca}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}, \\ \underline{Z}_b &= \frac{\underline{Z}_{ab} \underline{Z}_{bc}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}, \\ \underline{Z}_c &= \frac{\underline{Z}_{bc} \underline{Z}_{ca}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}. \end{aligned} \tag{5.5}$$

Напруга між нейтральною точкою отриманої зірки навантаження та нейтральною точкою генератора

$$\underline{U}_{O_1O} = \frac{\underline{E}_A \underline{Y}_A + \underline{E}_B \underline{Y}_B + \underline{E}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}.$$

В цьому виразі провідності

$$\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_l + \underline{Z}_a}, \quad \underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_l + \underline{Z}_b}, \quad \underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_l + \underline{Z}_c},$$

тобто величини, які обернені опорам відповідно фаз А, В, С, враховуючі опори навантаження та лінії.

Лінійні струми знаходяться за формулами

$$\underline{I}_a = (\underline{E}_A - \underline{U}_{O_1O}) \underline{Y}_A, \quad \underline{I}_b = (\underline{E}_B - \underline{U}_{O_1O}) \underline{Y}_B, \quad \underline{I}_c = (\underline{E}_C - \underline{U}_{O_1O}) \underline{Y}_C.$$

Лінійні напруги навантаження

$$\begin{aligned} \underline{U}_{ab} &= \underline{I}_a \underline{Z}_a - \underline{I}_b \underline{Z}_b, \\ \underline{U}_{bc} &= \underline{I}_b \underline{Z}_b - \underline{I}_c \underline{Z}_c, \\ \underline{U}_{ca} &= \underline{I}_c \underline{Z}_c - \underline{I}_a \underline{Z}_a. \end{aligned} \tag{5.6}$$

Фазні струми навантаження

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}, \quad \underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}, \quad \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}}. \tag{5.7}$$

Виконаємо ці розрахунки в середовищі MathCAD.

$$\begin{aligned} EA &:= 220 & f &:= 50 & r &:= 2 & rab &:= 10 & rca &:= 10 \\ L &:= 5 \cdot 10^{-3} & Lbc &:= 40 \cdot 10^{-3} & Cab &:= 100 \cdot 10^{-6} \\ xL &:= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L & xLbc &:= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot Lbc & xCab &:= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot Cab} \\ Zab &:= rab - i \cdot xCab & Zbc &:= i \cdot xLbc & Zca &:= rca & Z &:= r + i \cdot xL \\ Za &:= \frac{Zab \cdot Zca}{Zab + Zbc + Zca} & Zb &:= \frac{Zab \cdot Zbc}{Zab + Zbc + Zca} & Zc &:= \frac{Zbc \cdot Zca}{Zab + Zbc + Zca} \\ YA &:= \frac{1}{Z + Za} & YB &:= \frac{1}{Z + Zb} & YC &:= \frac{1}{Z + Zc} & EB &:= EA \cdot e^{-i \cdot 120 \text{deg}} \end{aligned}$$

$$E_C := EA \cdot e^{-i \cdot 240 \text{deg}} \quad U_{O1O} := \frac{EA \cdot Y_A + EB \cdot Y_B + EC \cdot Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}$$

$$I_a := (EA - U_{O1O}) \cdot Y_A \quad I_b := (EB - U_{O1O}) \cdot Y_B \quad I_c := (EC - U_{O1O}) \cdot Y_C$$

$$U_{ab} := I_a \cdot Z_a - I_b \cdot Z_b \quad U_{bc} := I_b \cdot Z_b - I_c \cdot Z_c \quad U_{ca} := I_c \cdot Z_c - I_a \cdot Z_a$$

$$I_{ab} := \frac{U_{ab}}{Z_{ab}} \quad I_{bc} := \frac{U_{bc}}{Z_{bc}} \quad I_{ca} := \frac{U_{ca}}{Z_{ca}}$$

$$I_a = 22.74 - 9.411i \quad I_b = -22.171 - 8.138i \quad I_c = -0.569 + 17.549i$$

$$U_{ab} = 238.181 + 122.526i \quad U_{bc} = 2.854 - 295.745i$$

$$U_{ca} = -241.035 + 173.219i \quad I_{ab} = -1.364 + 7.911i$$

$$I_{bc} = -23.535 - 0.227i \quad I_{ca} = -24.103 + 17.322i$$

Розглянемо тепер неповнофазний режим цього кола (обрив фази С).

Струми в цьому колі можна знайти за формулами:

$$\underline{Z}_{\text{ex}} = 2\underline{Z}_a + \frac{\underline{Z}_{ab}(\underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca})}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}, \quad \underline{I}_a = \underline{I}_b = \frac{E_A - E_B}{\underline{Z}_{\text{ex}}}, \quad (5.8)$$

$$\underline{I}_{ab} = \underline{I}_a \frac{(\underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca})}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}, \quad \underline{I}_{bc} = \underline{I}_{ca} = \underline{I}_a \frac{\underline{Z}_{ab}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}. \quad (5.9)$$

Лінійні напруги навантаження

$$\underline{U}_{ab} = \underline{I}_{ab} \underline{Z}_{ab}, \quad \underline{U}_{bc} = \underline{I}_{bc} \underline{Z}_{bc}, \quad \underline{U}_{ca} = \underline{I}_{ca} \underline{Z}_{ca}. \quad (5.10)$$

Реалізуємо ці формули в середовищі MathCAD.

$$EA := 220 \quad f := 50 \quad r := 2 \quad rab := 10 \quad rca := 10$$

$$L := 5 \cdot 10^{-3} \quad Lbc := 40 \cdot 10^{-3} \quad Cab := 100 \cdot 10^{-6}$$

$$xL := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad xLbc := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot Lbc \quad xCab := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot Cab}$$

$$Zab := rab - i \cdot xCab \quad Zbc := i \cdot xLbc \quad Zca := rca \quad Z := r + i \cdot xL$$

$$EB := EA \cdot e^{-i \cdot 120 \text{deg}} \quad EC := EA \cdot e^{-i \cdot 240 \text{deg}}$$

$$Z_{bx} := 2 \cdot Z + \frac{Z_{ab} \cdot (Z_{bc} + Z_{ca})}{Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}} \quad I_a := \frac{(E_A - E_B)}{Z_{bx}} \quad I_b := I_a \quad I_c := 0$$

$$I_{ab} := I_a \cdot \frac{(Z_{bc} + Z_{ca})}{Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}} \quad I_{bc} := I_a \cdot \frac{Z_{ab}}{Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}} \quad I_{ca} := I_{bc}$$

$$U_{ab} := I_{ab} \cdot Z_{ab} \quad U_{bc} := I_{bc} \cdot Z_{bc} \quad U_{ca} := I_{ca} \cdot Z_{ca}$$

$$I_a = 15.683 + 1.089i \quad I_b = 15.683 + 1.089i \quad I_c = 0$$

$$I_{ab} = -1.483 + 8.97i \quad I_{bc} = 17.166 - 7.881i \quad I_{ca} = 17.166 - 7.881i$$

$$U_{ab} = 270.69 + 136.901i \quad U_{bc} = 99.034 + 215.71i \quad U_{ca} = 171.656 - 78.809i$$

Порядок виконання роботи

1. Зібрати коло згідно рис. 5.3 (в нашому випадку воно відповідає схемі, зображеній на рис. 5.2).

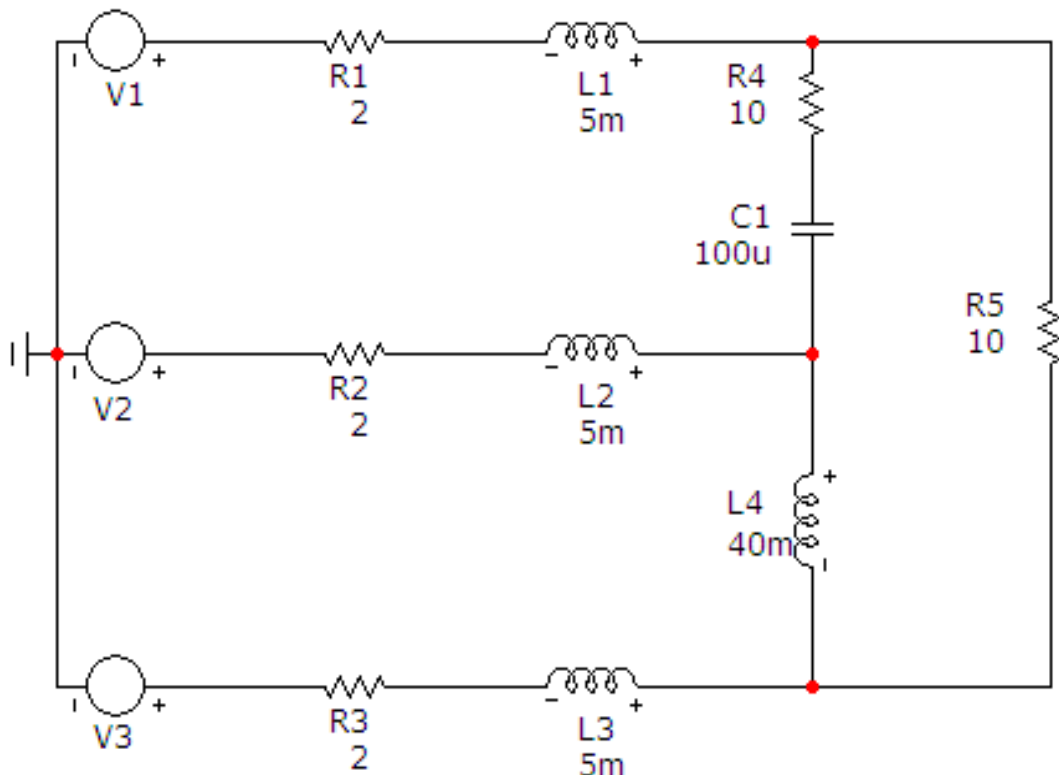


Рисунок. 5.3

Параметри джерела синусоїдної напруги задаються у вікні (рис. 5.4), яке з'являється при перенесенні компонента на робоче поле програми.

В цьому вікні слід вибрати вкладинку *Sin* і задати такі параметри:

- частоту (в нашому випадку це 50 Гц);
- амплітуду (в нашому випадку це 220 В).
- початкову фазу (в нашому випадку початкова фаза кожного джерела напруги має відповідати симетричній системі фаз, тобто для $V1 = 0^\circ$, для $V2 = 240^\circ$, для $V3 = 120^\circ$).

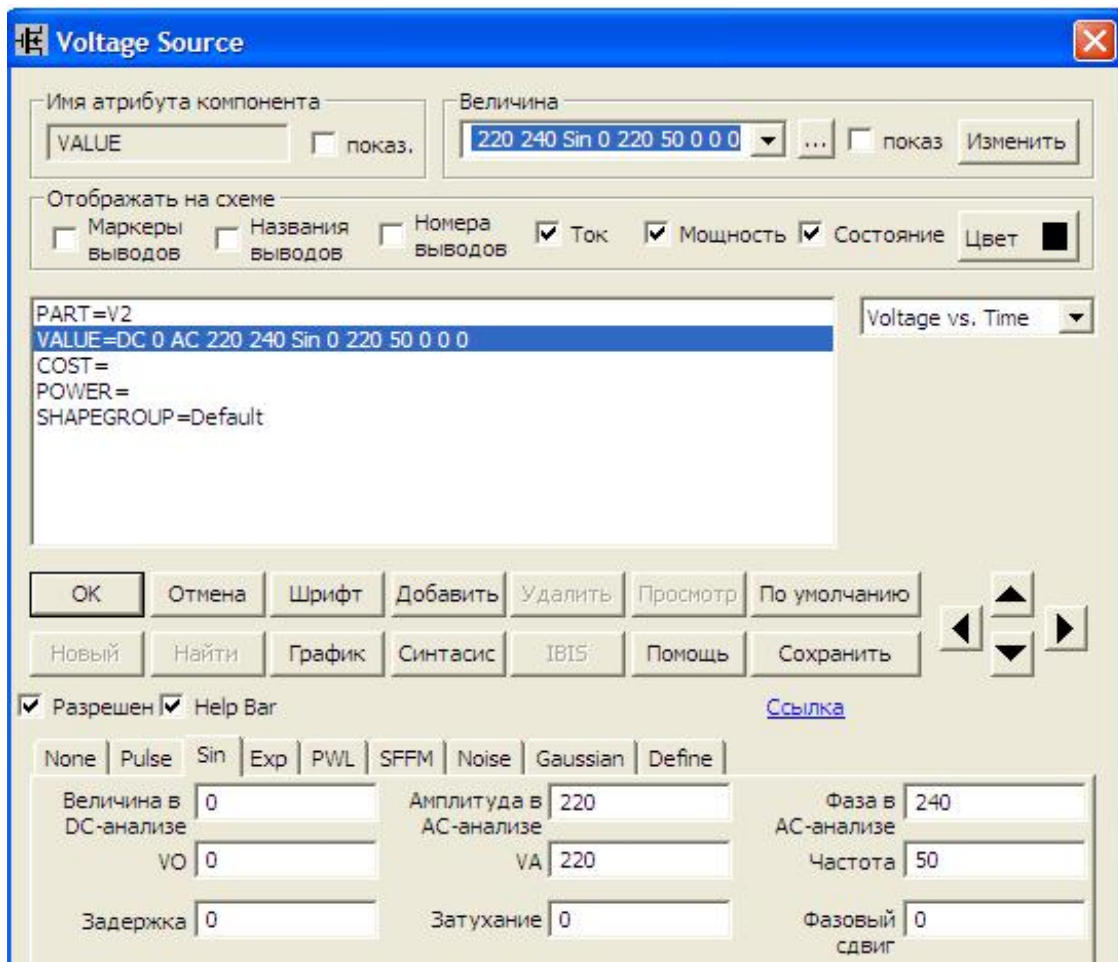


Рисунок. 5.4

Параметри кола вибираються згідно таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Вар.	E_A, В	f, Гц	$r_{лв}$, Ом	$L_{лв}$, мГн	r_{ab}, Ом	r_{bc}, Ом	r_{ca}, Ом	L_{bc}, мГн	C_{ab}, мкФ
1	220	60	6	5	10	12	100	60	85
2	180	50	5	3	8	6	90	80	90
3	160	40	4	2	4	3	75	90	75
4	240	80	8	4	5	4	50	120	80

2. На верхній панелі головного вікна відкриваємо опцію «Анализ» і вибираємо в ній рядок «Динамический частотный анализ (Dynamic AC)». Після цього на екрані з'являється вікно (рис. 5.5), в якому слід задати такі параметри:

- частоту, для якої проводиться розрахунок (згідно табл. 5.1);
- параметри, які ми бажаємо вивести на екран (струми у вітках та потенціали вузлів);
- форму виведення параметрів (дійсна та уявна частини комплексної амплітуди).

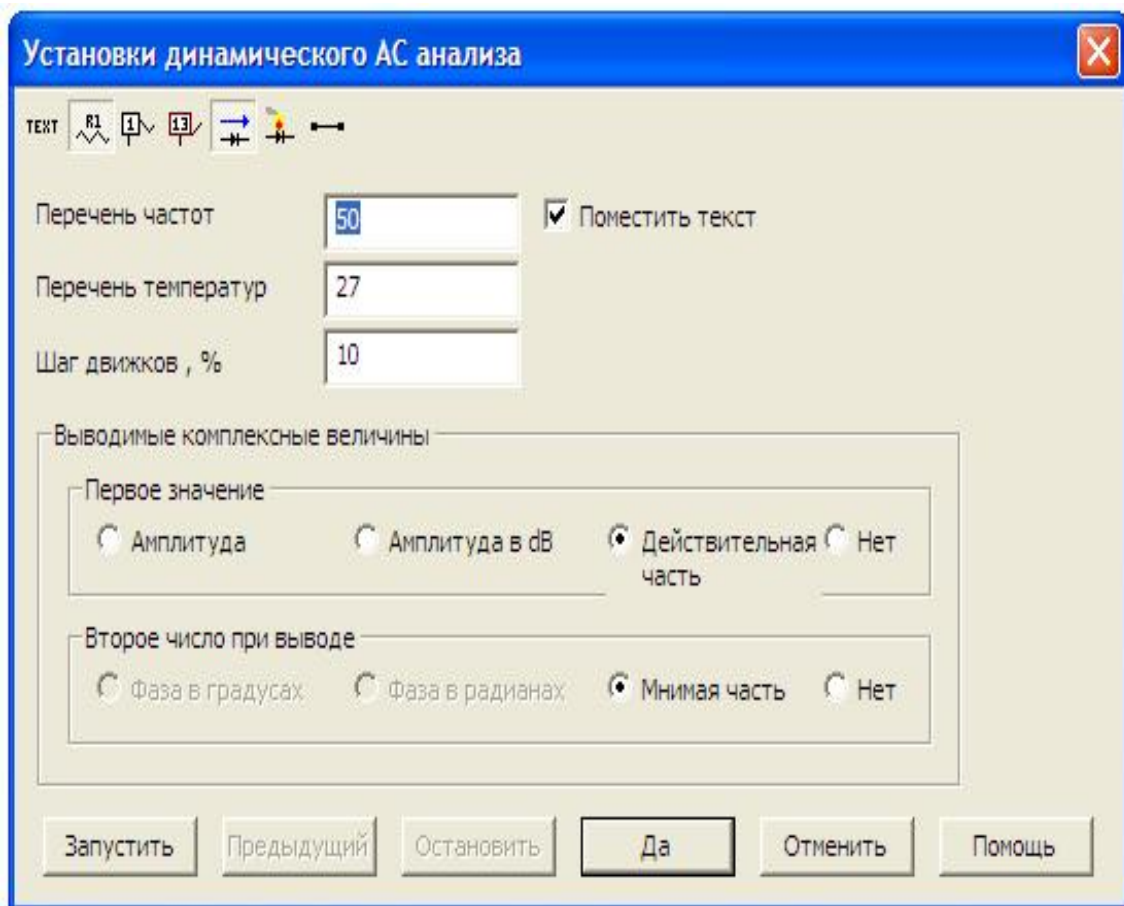


Рисунок. 5.5

В результаті схема прийме вигляд, зображений на рис. 5.6.

З урахуванням напрямків струмів, а також того, що лінійні напруги навантаження визначаються як різниця потенціалів між вузлами після лінії, легко помітити, що результати моделювання збігаються з результатами розрахунку в середовищі MathCAD.

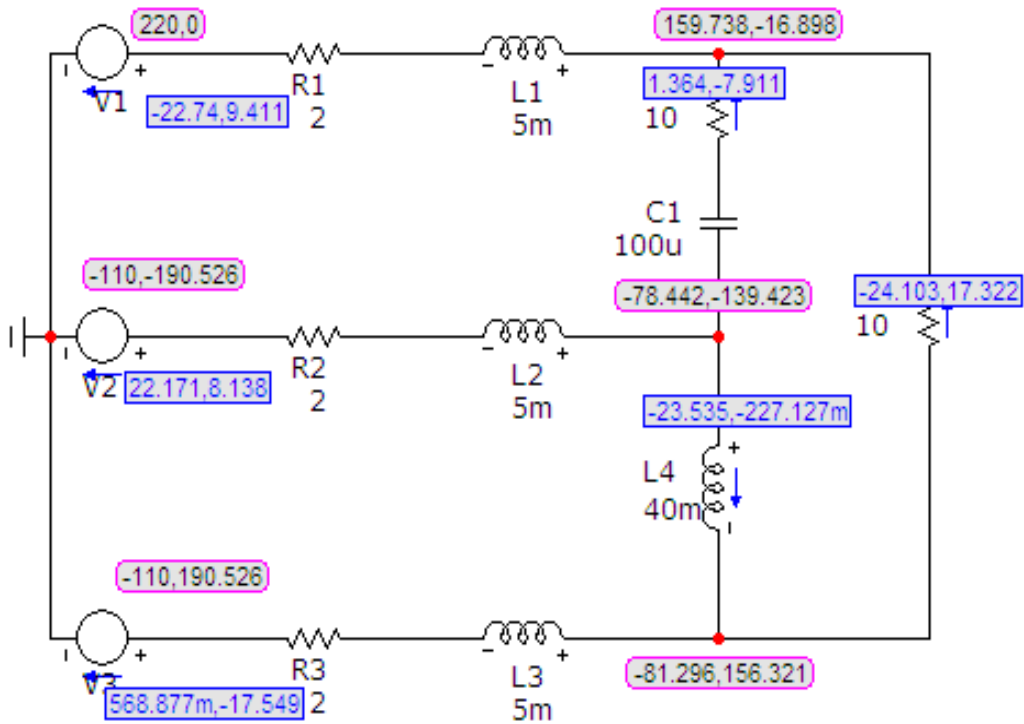


Рисунок. 5.6

Цю схему необхідно роздрукувати.

3. Змоделуйте в колі аварійну ситуацію (в нашому випадку це обрив лінійного провода в фазі C, рис. 5.7). Тип аварійної ситуації задає викладач (це може бути обрив провода чи коротке замикання).

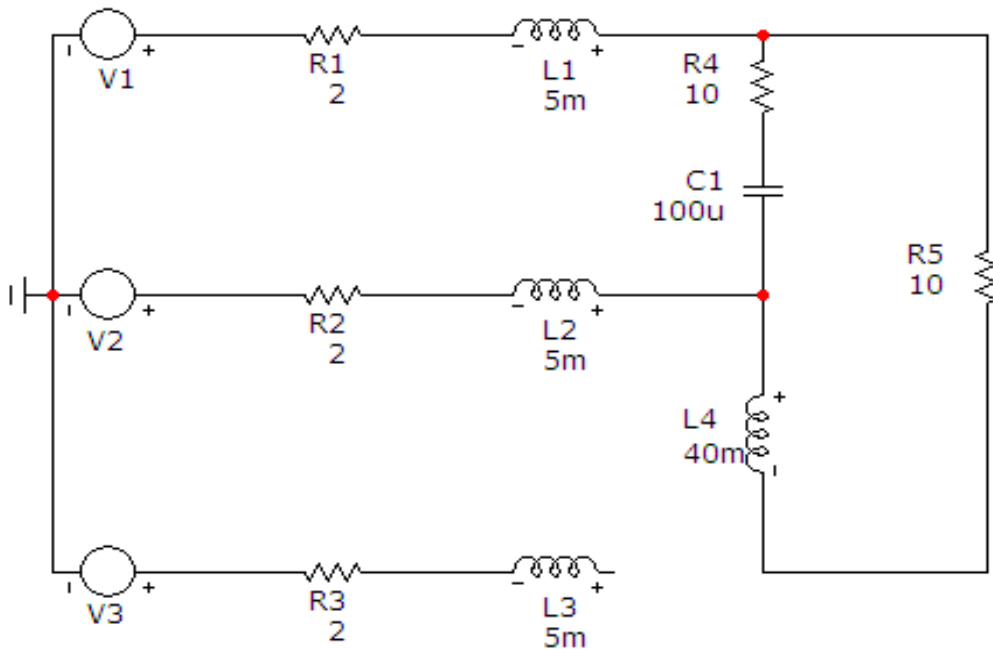


Рисунок. 5.7

Результати моделювання зміняться теж (рис. 5.8).

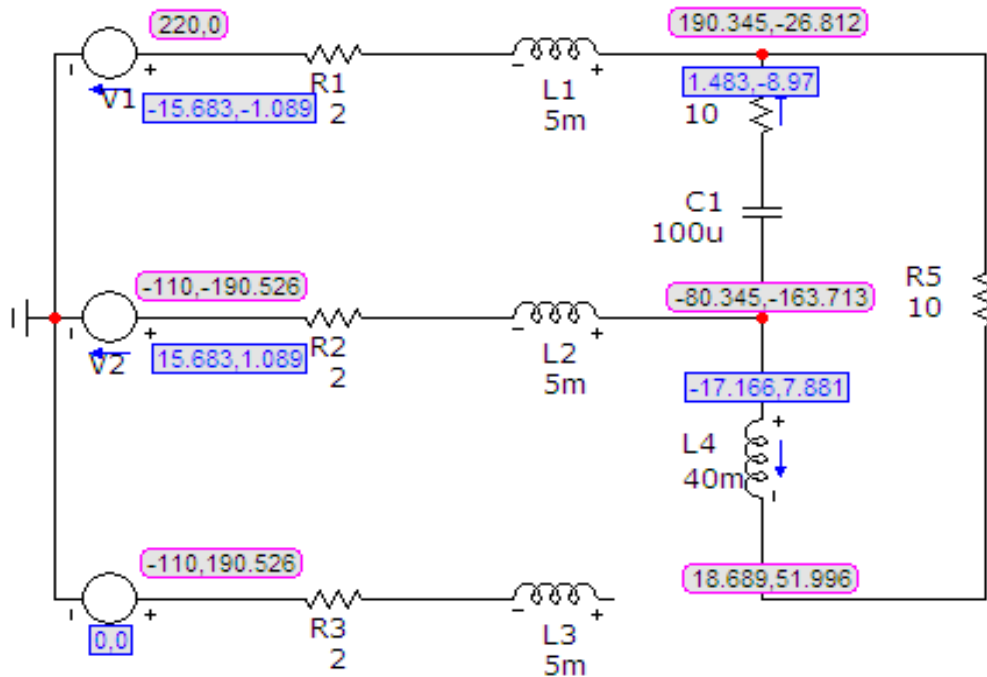


Рисунок 5.8

Цю схему теж необхідно роздрукувати.

Зазначимо, результати моделювання збігаються з результатами розрахунку в середовищі MathCAD.

Обробка результатів дослідження

1. Для робочого та аварійного режимів провести розрахунок лінійних і фазних струмів та напруг в середовищі MathCAD.
2. Порівняти результати розрахунків з результатами моделювання.
3. Використовуючи одержані при моделюванні комплексні потенціали всіх вузлів, для обох режимів побудувати топографічні діаграми потенціалів.

Контрольні питання

1. Що називається симетричним трифазним колом? Несиметричним?
2. Співвідношення між лінійною і фазною напругами в симетричному трифазному колі при з'єднанні приймача трикутником.
3. Що називають неповнофазним режимом трифазного кола?
4. Яка мінімальна кількість фаз необхідна для створення обертового магнітного поля.

Лабораторна робота № 6тс

Дослідження трифазного кола несинусоїдного струму при з'єднанні приймачів енергії зіркою

Мета роботи: дослідити режим роботи симетричного трифазного кола при з'єднанні споживачів зіркою під дією несинусоїдної напруги.

Короткі теоретичні відомості

Розглянемо симетричні трифазні кола, е.р.с. генератора в яких несинусоїдні, але мають однакову форму і зсунуті одна відносно одної на третину періоду основної (першої) гармонічної складової. Це означає, що період k -ї гармоніки в k разів менше періоду основної, тому зсув е.р.с. фази В на кут, що дорівнює $\frac{2\pi}{3}$ по основній гармоніці відносно фази А, означає

зсув k -ї гармоніки цієї фази на кут $k\frac{2\pi}{3}$ відносно е.р.с. k -ї гармоніки фази А.

Запишемо миттєві значення симетричної системи несинусоїдних е.р.с.

$$e_A = E_{m_1} \sin \omega t + E_{m_2} \sin 2\omega t + E_{m_3} \sin 3\omega t + \\ + E_{m_4} \sin 4\omega t + E_{m_5} \sin 5\omega t + \dots$$

$$e_B = E_{m_1} \sin(\omega t - 120^\circ) + E_{m_2} \sin(2\omega t - 240^\circ) + E_{m_3} \sin(3\omega t - 360^\circ) + \\ + E_{m_4} \sin(4\omega t - 480^\circ) + E_{m_5} \sin(5\omega t - 600^\circ) + \dots$$

$$e_C = E_{m_1} \sin(\omega t - 240^\circ) + E_{m_2} \sin(2\omega t - 480^\circ) + E_{m_3} \sin(3\omega t - 720^\circ) + \\ + E_{m_4} \sin(4\omega t - 960^\circ) + E_{m_5} \sin(5\omega t - 1200^\circ) + \dots$$

Після упорядкування початкових фаз вищих гармонік отримаємо:

$$e_A = E_{m_1} \sin \omega t + E_{m_2} \sin 2\omega t + E_{m_3} \sin 3\omega t + \\ + E_{m_4} \sin 4\omega t + E_{m_5} \sin 5\omega t + \dots$$

$$e_B = E_{m_1} \sin(\omega t - 120^\circ) + E_{m_2} \sin(2\omega t - 240^\circ) + E_{m_3} \sin 3\omega t + \\ + E_{m_4} \sin(4\omega t - 120^\circ) + E_{m_5} \sin(5\omega t - 240^\circ) + \dots$$

$$e_C = E_{m_1} \sin(\omega t - 240^\circ) + E_{m_2} \sin(2\omega t - 120^\circ) + E_{m_3} \sin 3\omega t + \\ + E_{m_4} \sin(4\omega t - 240^\circ) + E_{m_5} \sin(5\omega t - 120^\circ) + \dots$$

З отриманих виразів видно, що е.р.с. гармонік з номерами 1, 4, 7, 10 ... є системами е.р.с. прямої послідовності, з номерами 2, 5, 8, 11 ... – системами е.р.с. зворотної послідовності, з номерами 3, 6, 9, 12 ... (з номерами, які кратні трьом) – системами е.р.с. нульової послідовності.

Наявність в е.р.с. генератора гармонік нульової послідовності вносить деякі особливості в роботу трифазного кола. Розглянемо ці особливості для трьох способів з'єднання навантаження.

1. Генератор і навантаження з'єднані зіркою з нейтральним проводом.

В цьому випадку струми у фазах містять усі гармоніки, при цьому гармоніки, що кратні трьом, збігаються за фазою. Діюче значення струму в будь-якій фазі

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} \quad (6.1)$$

В нейтральному проводі струми гармонік прямої і зворотної послідовностей відсутні, а протікають потроєні значення струмів гармонік, які кратні трьом. Діюче значення цього струму

$$I_N = 3\sqrt{I_3^2 + I_6^2 + I_9^2 + \dots} \quad (6.2)$$

Фазні напруги генератора і навантаження містять всі гармоніки. Діюче значення фазної напруги

$$U_\phi = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots} \quad (6.3)$$

Лінійні напруги дорівнюють різниці відповідних фазних ($\underline{U}_{ab} = \underline{U}_a - \underline{U}_b$). Оскільки фазні напруги гармонік, які кратні трьом, збігаються за фазою, то їх різниця дорівнює нулю, тому в лінійних напругах гармоніки, які кратні трьом, відсутні. Діюче значення лінійної напруги

$$U_l = \sqrt{U_{l_1}^2 + U_{l_2}^2 + U_{l_4}^2 + \dots} \quad (6.4)$$

В симетричному трифазному колі для кожної гармоніки виконується співвідношення $U_l = \sqrt{3}U_\phi$, тому

$$U_l = \sqrt{3}\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_4^2 + U_5^2 + \dots} \quad (6.5)$$

Звідси випливає, що в трифазних колах з нейтральним проводом при несинусоїдних напругах $\frac{U_l}{U_\phi} < \sqrt{3}$.

2. Генератор і навантаження з'єднані зіркою без нейтрального про-
воду.

При такому способі з'єднання в лінійних струмах відсутні гармоніки,
які кратні трьом, оскільки в нейтральній точці за першим законом Кірхго-
фа $3I_{3k} = 0$ ($k = 1, 2, 3...$). Діюче значення струму

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots} \quad (6.6)$$

Фазні та лінійні напруги також не містять гармонік, що кратні трьом.

Між нейтральними точками навантаження і генератора існує напруга,
яка складається з гармонік, що кратні трьом, діюче значення якої

$$U_N = \sqrt{U_3^2 + U_6^2 + U_9^2 + \dots} \quad (6.7)$$

Проведемо аналіз режиму кола, яке зображене на рис. 6.1.

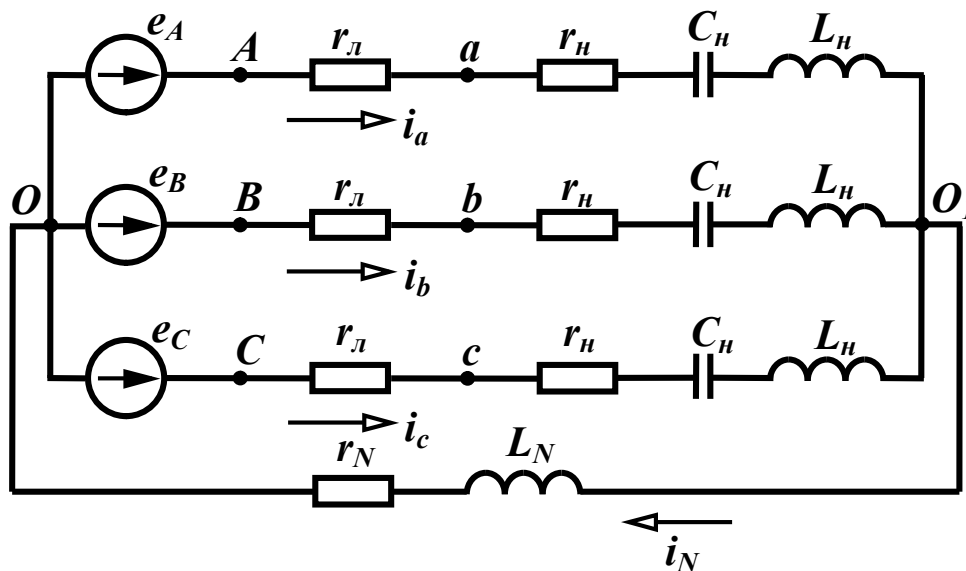


Рисунок 6.1

Коло живиться від трифазної симетричної системи е.р.с., кожна з яких
є періодичним прямокутним імпульсним сигналом.

Графік цього сигналу (для фази А) показаний на рис. 6.2.

Параметри:

$$T = 0.02 \text{ с}, E_{Am} = 220 \text{ В}, r_l = 2 \text{ Ом}, r_n = 10 \text{ Ом}, r_N = 5 \text{ Ом},$$

$$L_n = 30 \text{ мГн}, C_n = 200 \text{ мкФ}, L_N = 5 \text{ мГн}.$$

Як і у випадку однофазних кіл, розрахунок проводимо для кожної га-
рмоніки окремо.

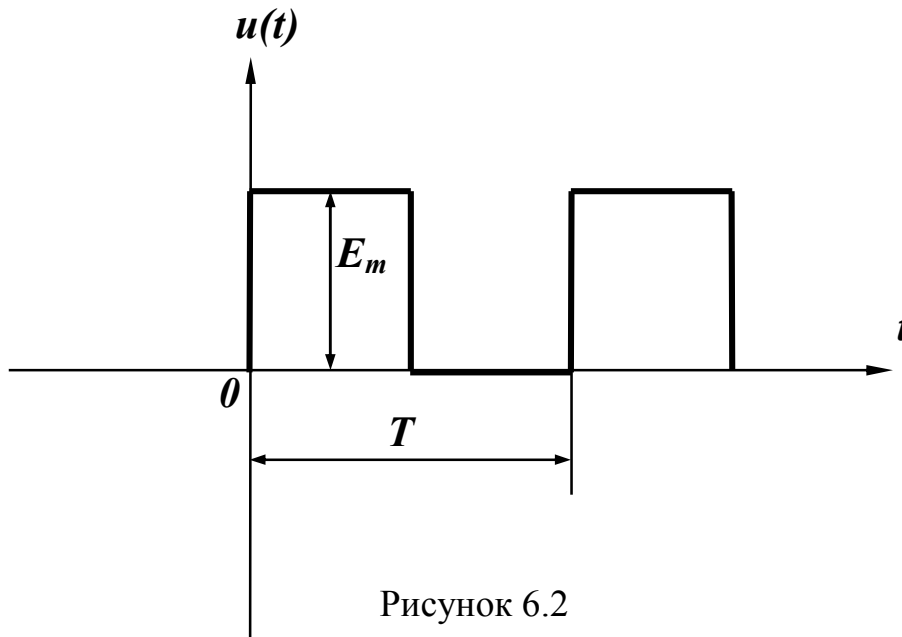


Рисунок 6.2

Нульова гармоніка

Враховуючи наявність в кожній вітці ємності, струми нульової гармоніки в колі відсутні.

Перша гармоніка

Комплексна е.р.с.

$$\underline{E}_{Am1}^{(1)} = \frac{4\underline{E}_{Am}}{\pi}. \quad (6.8)$$

Комплексний опір навантаження

$$\underline{Z}_n^{(1)} = r_n + j\omega L_n - j\frac{1}{\omega C_n}. \quad (6.9)$$

Комплексний опір всієї фази А

$$\underline{Z}_a^{(1)} = r_n + \underline{Z}_n^{(1)}. \quad (6.10)$$

Струм фази А

$$\underline{I}_a^{(1)} = \frac{\underline{E}_{Am1}^{(1)}}{\underline{Z}_a^{(1)}}. \quad (6.11)$$

Струм в нейтральному проводі $\underline{I}_N^{(1)} = 0$.

Третя гармоніка

Комплексна е.р.с.

$$\underline{E}_{Am1}^{(3)} = \frac{4\underline{E}_{Am}}{3\pi}. \quad (6.12)$$

Комплексний опір

$$\underline{Z}_H^{(3)} = r_H + j3\omega L_H - j\frac{1}{3\omega C_H}, \quad (6.13)$$

$$\underline{Z}_a^{(3)} = r_L + \underline{Z}_H^{(3)}. \quad (6.14)$$

Опір нейтрального проводу

$$\underline{Z}_N^{(3)} = r_N + j3\omega L_N. \quad (6.15)$$

При розрахунку фазного струму третьої гармоніки (струм нульової послідовності) окрім опору фази треба додатково врахувати потроєне значення опору нейтрального проводу

$$\underline{I}_a^{(3)} = \frac{\underline{E}_{Am1}^{(3)}}{\underline{Z}_a^{(3)} + 3\underline{Z}_N^{(3)}}. \quad (6.16)$$

Струм в нейтральному проводі

$$\underline{I}_N^{(3)} = 3\underline{I}_a^{(3)}. \quad (6.17)$$

П'ята гармоніка

Комплексна е.р.с.

$$\underline{E}_{Am1}^{(5)} = \frac{4\underline{E}_{Am}}{5\pi}. \quad (6.18)$$

Комплексний опір

$$\underline{Z}_H^{(5)} = r_H + j5\omega L_H - j\frac{1}{5\omega C_H}, \quad (6.19)$$

$$\underline{Z}_a^{(5)} = r_L + \underline{Z}_H^{(5)}. \quad (6.20)$$

Фазний струм

$$\underline{I}_a^{(5)} = \frac{\underline{E}_{Am1}^{(5)}}{\underline{Z}_a^{(5)}}. \quad (6.21)$$

Струм в нейтральному проводі $\underline{I}_N^{(5)} = 0$.

Введемо формули (6.8 – 6.21) в MathCAD.

$$e_{Am} := 220 \quad f := 50 \quad r_{line} := 2 \quad r_N := 5 \quad r := 10$$

$$L_N := 5 \cdot 10^{-3} \quad L := 30 \cdot 10^{-3} \quad C := 200 \cdot 10^{-6} \quad \omega := 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$\begin{aligned}
E_{Am1} &:= \frac{e_{Am} \cdot 4}{\pi} & E_{Am3} &:= \frac{e_{Am} \cdot 4}{\pi \cdot 3} & E_{Am5} &:= \frac{e_{Am} \cdot 4}{\pi \cdot 5} \\
Z_1 &:= r + i \cdot \omega \cdot L - i \cdot \frac{1}{\omega \cdot C} & Z_{1a} &:= r_{line} + Z_1 & I_{1a} &:= \frac{E_{Am1}}{Z_{1a}} \\
Z_3 &:= r + i \cdot \omega \cdot L \cdot 3 - i \cdot \frac{1}{\omega \cdot C \cdot 3} & Z_{3a} &:= r_{line} + Z_3 \\
Z_{3N} &:= r_N + i \cdot \omega \cdot L_N \cdot 3 & I_{3a} &:= \frac{E_{Am3}}{Z_{3a} + 3 \cdot Z_{3N}} & I_{3N} &:= 3 \cdot I_{3a} \\
Z_5 &:= r + i \cdot \omega \cdot L \cdot 5 - i \cdot \frac{1}{\omega \cdot C \cdot 5} & Z_{5a} &:= r_{line} + Z_5 & I_{5a} &:= \frac{E_{Am5}}{Z_{5a}}
\end{aligned}$$

Побудуємо графіки кривих струмів у всіх фазах та в нейтральному проводі, для чого запишемо їх рівняння:

$$\begin{aligned}
i_{a1}(t) &:= |I_{1a}| \cdot \sin(\omega \cdot t + \arg(I_{1a})) & i_{a3}(t) &:= |I_{3a}| \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t + \arg(I_{3a})) \\
i_{a5}(t) &:= |I_{5a}| \cdot \sin(5 \cdot \omega \cdot t + \arg(I_{5a})) & i_a(t) &:= i_{a1}(t) + i_{a3}(t) + i_{a5}(t) \\
i_{b1}(t) &:= |I_{1a}| \cdot \sin(\omega \cdot t + \arg(I_{1a}) - 120\text{deg}) \\
i_{b3}(t) &:= |I_{3a}| \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t + \arg(I_{3a})) \\
i_{b5}(t) &:= |I_{5a}| \cdot \sin(5 \cdot \omega \cdot t + \arg(I_{5a}) - 240\text{deg}) \\
i_b(t) &:= i_{b1}(t) + i_{b3}(t) + i_{b5}(t) \\
i_{c1}(t) &:= |I_{1a}| \cdot \sin(\omega \cdot t + \arg(I_{1a}) - 240\text{deg}) \\
i_{c3}(t) &:= |I_{3a}| \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t + \arg(I_{3a})) \\
i_{c5}(t) &:= |I_{5a}| \cdot \sin(5 \cdot \omega \cdot t + \arg(I_{5a}) - 120\text{deg}) \\
i_c(t) &:= i_{c1}(t) + i_{c3}(t) + i_{c5}(t) \\
i_N(t) &:= |I_{3N}| \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t + \arg(I_{3N}))
\end{aligned}$$

Графіки зображені на рис 6.3.

З цих графіків видно, що струми у фазах А, В, С мають однакову форму, але зсунуті між собою на кут 120° .

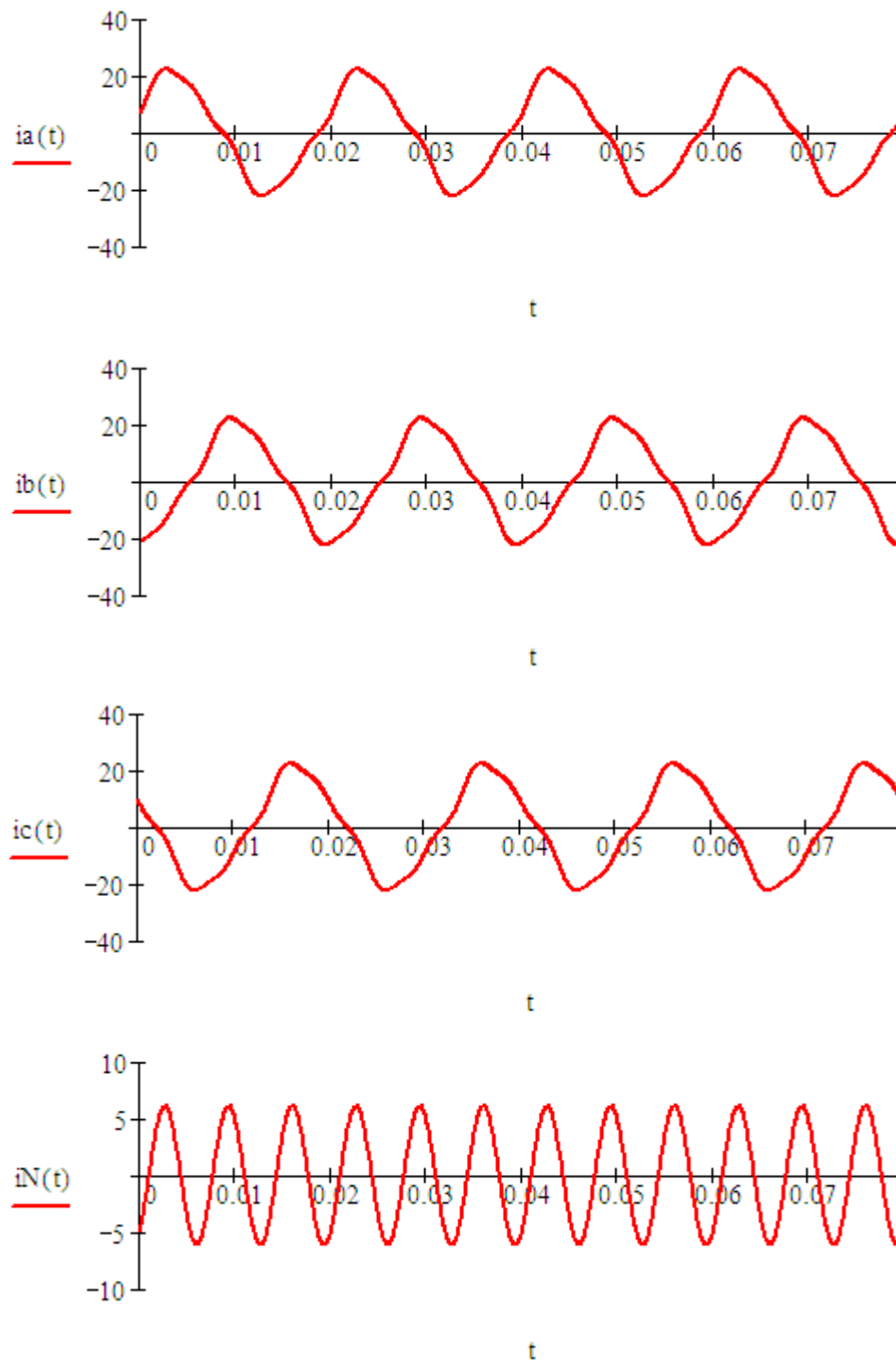


Рисунок 6.3

Порядок виконання роботи

1. Зібрати коло згідно рис. 6.4 (в нашому випадку воно відповідає схемі, зображеній на рис. 6.1).

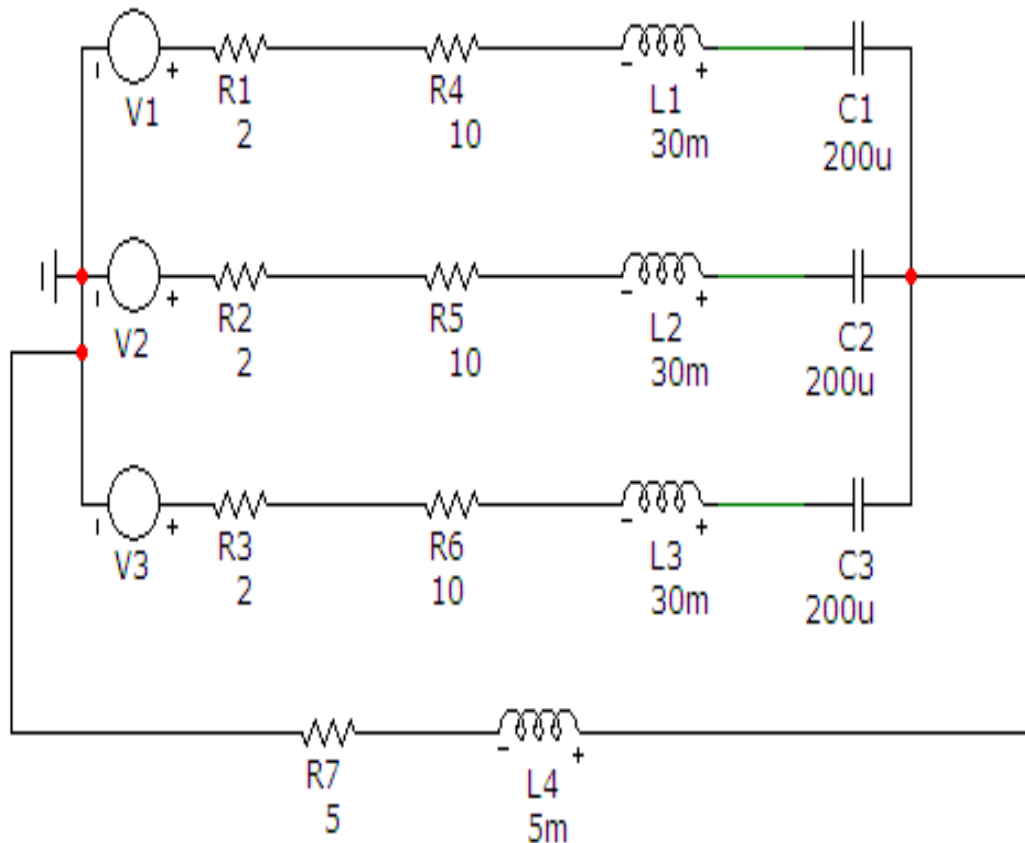


Рисунок. 6.4

Параметри кола вибираються згідно таблиці 6.1.

Таблиця 6.1

<i>Вар.</i>	E_A, B	T, c	$r_{л}, Ом$	$r_N, Ом$	$r_{ш}, Ом$	$L_N, мГн$	$L_{ш}, мГн$	$C_{ш}, мкФ$
1	220	0.02	3	1	12	10	60	85
2	180	0.03	2	3	9	8	80	90
3	160	0.04	1	4	8	6	90	75
4	240	0.01	4	2	10	5	120	80

Параметри джерел імпульсної напруги $V1$, $V2$, $V3$ задаються у вікні (рис. 6.5), яке з'являється при перенесенні компонента на робоче поле програми.

В цьому вікні слід вибрати вкладинку *Pulse* і задати параметри в таких віконцях:

- «Период» – період коливання (в нашому випадку це 20m);
- «Амплітуда в АС-аналізі» – амплітуду (в нашому випадку це 220 В).

- «Длительность вершины» – величину, що дорівнює половині періоду (в нашому випадку це 10m);
- «Время до начала фронта» – початкову фазу (в нашому випадку початкова фаза кожного джерела напруги відповідає симетричній системі фаз при $T = 20m$, тобто для $V1 - 0$, для $V2 - 13.3333m$, для $V3 - 6.6666m$).

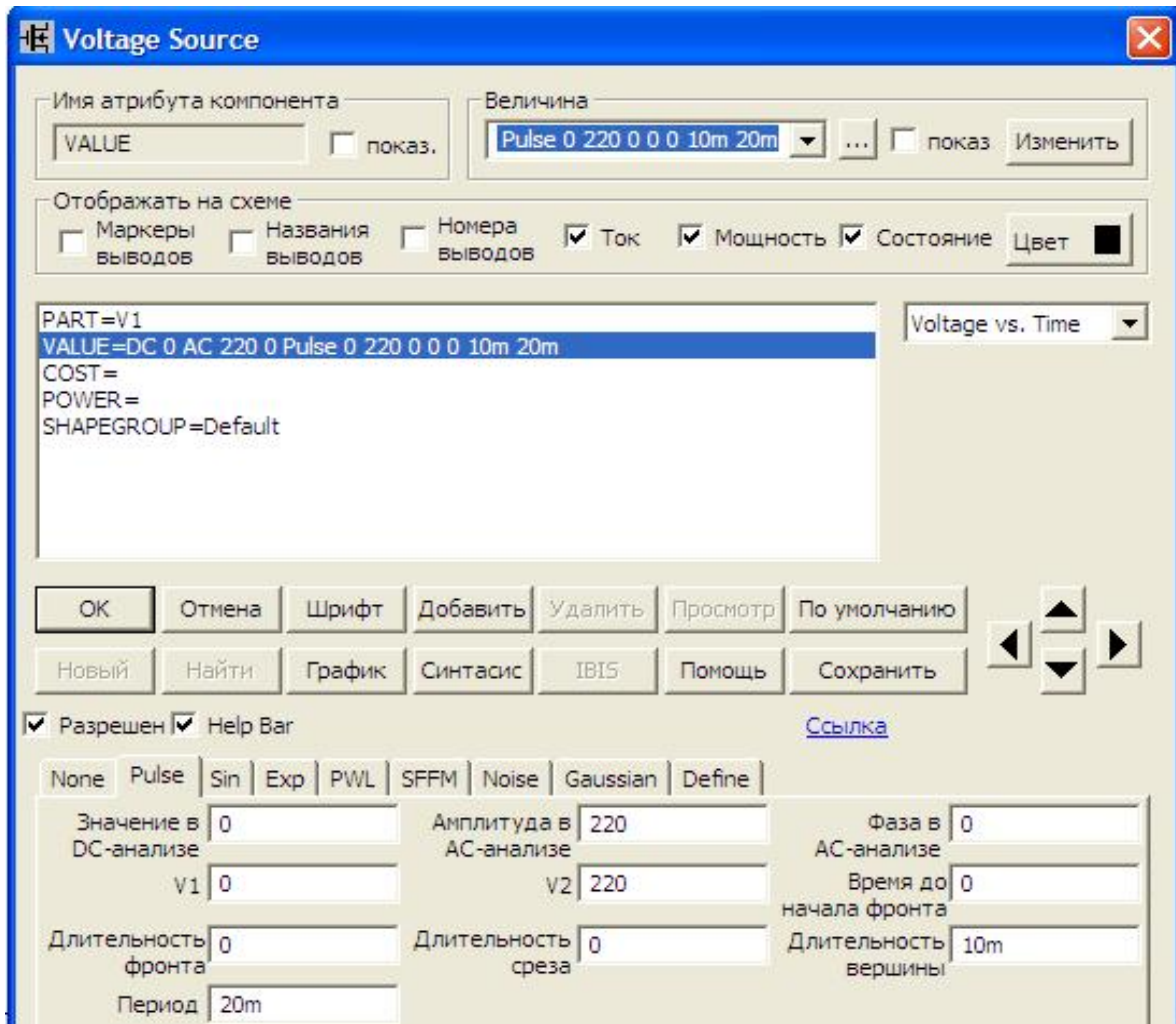


Рисунок. 6.5

2. На верхній панелі головного вікна відкриваємо опцію «Анализ» і вибираємо в ній рядок «Анализ переходных процессов (Transient)». Після цього на екрані з'являється вікно (рис. 6.6), в якому слід задати: діапазон розрахунку – $4T = 80m$, крок розрахунку – 0.5u і діапазони виведення графіків струмів в кожній фазі та в нейтральному проводі. Далі натискається кнопка «Запустить».

Графіки зображені на рис. 6.7. Їх слід роздрукувати.

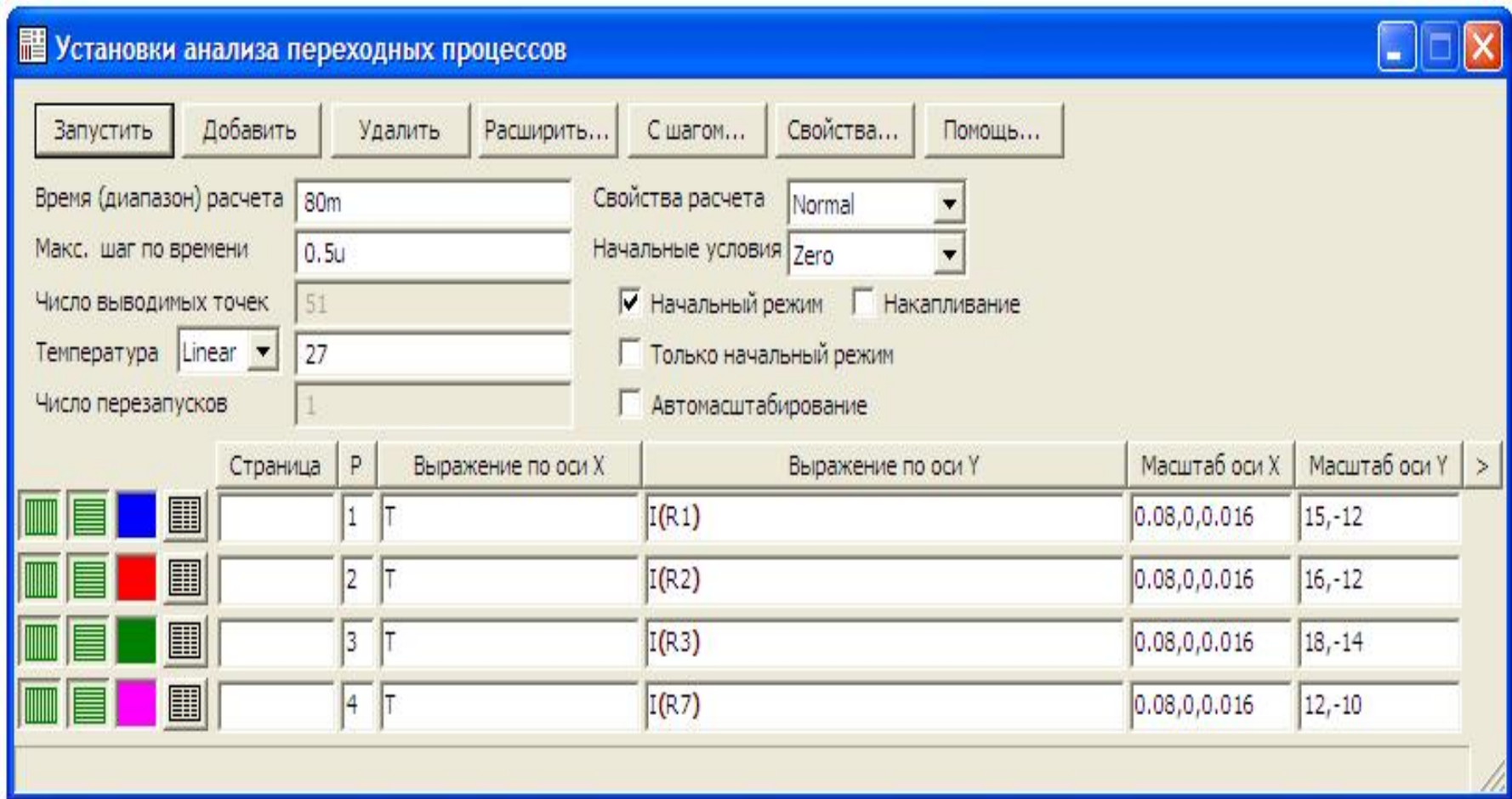


Рисунок. 6.6

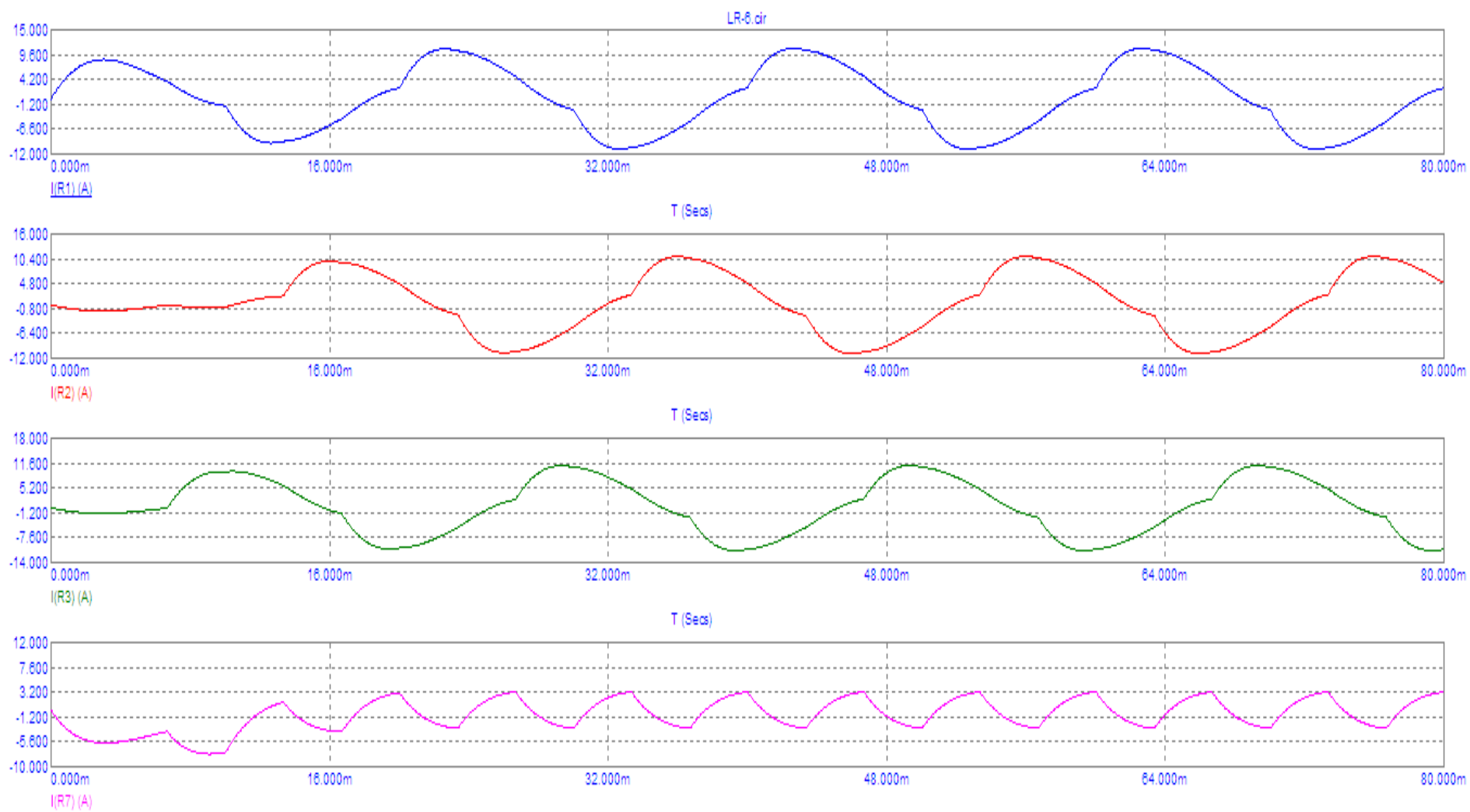


Рисунок. 6.7

Обробка результатів дослідження

1. Провести розрахунок струмів в кожній фазі та в нейтральному проводі в середовищі MathCAD.
2. Побудувати в MathCAD графіки струмів в кожній фазі та в нейтральному проводі.
3. Порівняти розраховані та змодельовані графіки.

Контрольні питання

1. Які гармоніки в трифазній системі е.р.с. відносяться до прямої послідовності?
2. Які гармоніки в трифазній системі е.р.с. відносяться до зворотної послідовності?
3. Які гармоніки в трифазній системі е.р.с. відносяться до нульової послідовності?
4. Для яких гармонік в трифазному симетричному колі струм в нейтральному проводі дорівнює нулю?
5. Для яких гармонік в трифазному симетричному колі струм в нейтральному проводі не дорівнює нулю?

Лабораторна робота № 7тс

Дослідження перехідного процесу в лінійному колі постійного струму першого порядку

Мета роботи: дослідити перехідний процес в лінійному електричному колі постійного струму першого порядку за ненульових початкових умов.

Короткі теоретичні відомості

Процес переходу електричного кола від одного сталого режиму до другого, який характеризується новим енергетичним станом, називається перехідним.

Зміну режиму роботи кола, що веде до зміни її енергетичного стану, називають комутацією. До комутації відносяться: вмикання, вимикання, замикання на ділянках кола і т.п. Прийнято вважати, що комутація проходить миттєво. В загальному випадку процеси переходу від одного енерге-

тичного стану кола до другого не можуть проходити миттєво, тому що неможливі миттєві зміни енергії, що є в реактивних елементах кола.

При розгляді перехідних процесів, відрахунок часу ($t = 0$) ведеться з моменту комутації.

Енергія магнітного поля катушки з індуктивністю L та електричного поля конденсатора з ємністю C визначається співвідношеннями:

$$W_L = \frac{Li_L^2}{2}, \quad W_C = \frac{Cu_C^2}{2} \quad (7.1)$$

Оскільки миттєві зміни енергії в індуктивності та ємності неможливі, неможливі також стрибки струму в індуктивності і напруги на ємності.

Це положення визначає закони комутації, які записуються так:

$$i_L(0-) = i_L(0+), \quad u_C(0-) = u_C(0+) \quad (7.2)$$

Аналітичні залежності струмів та напруг на різних ділянках кола під час перехідних процесів можна отримати, якщо розв'язати складені за законами Кірхгофа диференціальні рівняння для часу $t \geq 0$.

Розглянемо аналітично перехідний процес, який відбувається при увімкненні кола rC на постійну напругу (рис. 7.1).

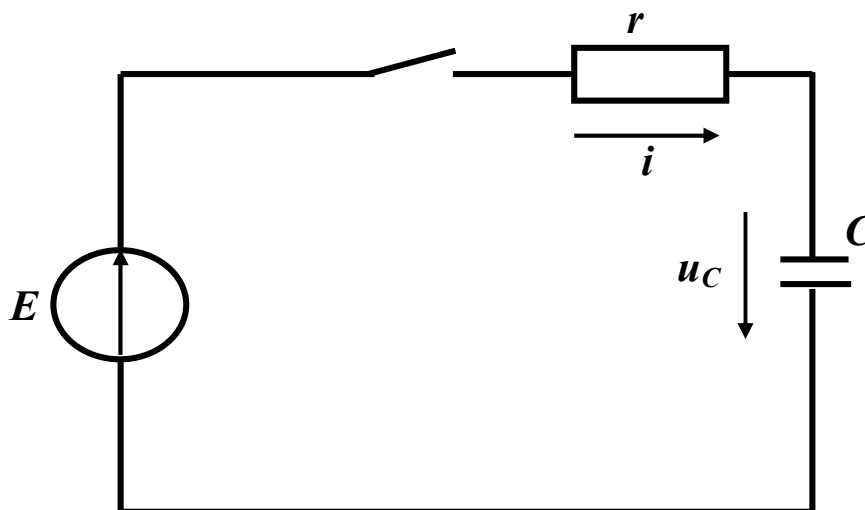


Рисунок. 7.1

Запишемо для цього рівняння за другим законом Кірхгофа для $t \geq 0$:

$$ir + u_C = E \quad (7.3)$$

Враховуючи, що $i = C \frac{du_C}{dt}$, отримаємо:

$$rC \frac{du_C}{dt} + u_C = E \quad (7.4)$$

Розв'язок цього диференціального рівняння першого порядку складається з двох частин:

$$u_C = u_{Cnp} + u_{Cв}, \quad (7.5)$$

де u_{Cnp} – примусова складова напруги; $u_{Cв}$ – вільна складова.

Примусова складова визначається як напруга на ємності після закінчення перехідного процесу. В даному випадку ємність буде заряджатись до тих пір, поки напруга на ній не стане рівною E , тобто

$$u_{Cnp} = E \quad (7.6)$$

Вільна складова знаходиться за формулою:

$$u_{Cв} = Ae^{pt} \quad (7.7)$$

де p – корінь характеристичного рівняння $rCp + 1 = 0$, звідки $p = -\frac{1}{rC}$,

A – стала інтегрування, яка визначається з початкових умов.

Таким чином можна записати:

$$u_C = E + Ae^{pt} \quad (7.8)$$

Вважаючи, що ємність в момент комутації не була заряджена, тобто $u_C(0-) = 0$, за другим законом комутації отримаємо $u_C(0+) = 0 = E + A$, звідки $A = -E$.

Остаточно напруга на ємності як функція часу має вигляд:

$$u_C(t) = E - Ee^{\frac{t}{rC}} = E(1 - e^{\frac{t}{rC}}) \quad (7.9)$$

Розглянемо тепер перехідний процес в розгалуженому колі з ненульовими початковими умовами.

Знайти перехідний струм i_2 та напругу на індуктивності u_L в колі, яке зображене на рис. 7.2. Побудувати графіки цих величин в часі. Параметри кола: $U = 100$ В, $L = 50$ мГн, $r_1 = 5$ Ом, $r_2 = 10$ Ом, $r_3 = 8$ Ом.

Виконаємо цей розрахунок операторним методом.

Спочатку визначимо незалежні початкові умови, а саме струм через індуктивність до комутації. В другій вітці присутня лише одна індуктивність (опір r_2 закочорено ключем), опір якої при постійному струмі дорівнює нулю, тому через опір r_3 струм протікати не буде (паралельно опору r_3 підключена вітка з індуктивністю, опір якої при постійному струмі дорівнює нулю). Таким чином, струм протікає тільки через опір r_1 і індуктивність L , звідси, $i_2(0-) = \frac{U}{r_1} = i_2(0+)$.

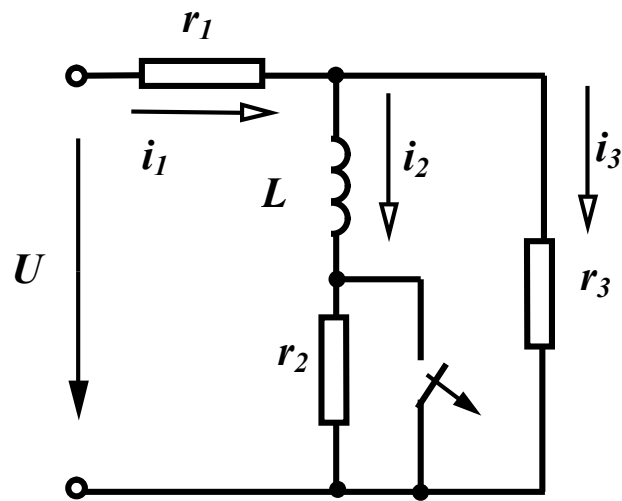


Рисунок. 7.2

На основі цієї схеми побудуємо операторну схему заміщення (рис. 7.3).

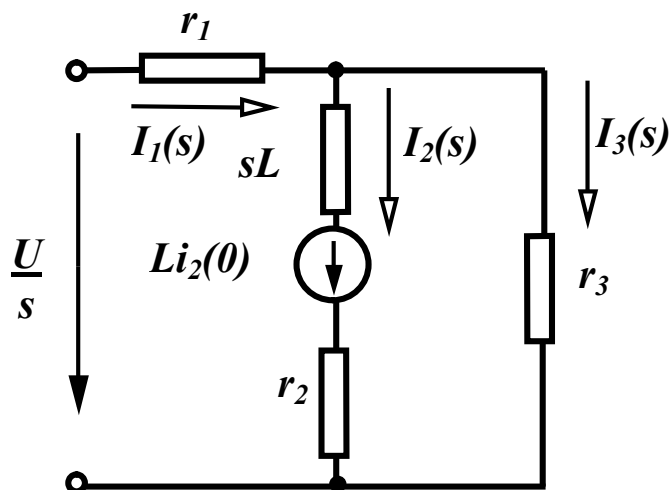


Рисунок. 7.3

Складемо систему рівнянь за законами Кірхгофа в операторному вигляді (вважатимемо напрямом обходу контурів за годинниковою стрілкою):

$$\begin{aligned} I_1(s) - I_2(s) - I_3(s) &= 0, \\ I_1(s)r_1 + I_3(s)r_3 &= \frac{U}{s}, \end{aligned} \quad (7.10)$$

$$I_1(s)r_1 + I_2(s)(r_2 + sL) = \frac{U}{s} + Li_2(0).$$

Після розв'язання цієї системи, операторне зображення напруги на індуктивності знайдемо за формулою: $u_L(s) = I_2(s)sL - Li_2(0)$.

Всі процедури виконаємо в MathCAD.

$$U := 100 \quad r_1 := 5 \quad r_2 := 10 \quad r_3 := 8$$

$$L := 50 \cdot 10^{-3} \quad i_{20} := \frac{U}{r_1}$$

Given

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0 \quad I_1 \cdot r_1 + I_3 \cdot r_3 = \frac{U}{s} \quad I_1 \cdot r_1 + I_2 \cdot (r_2 + s \cdot L) = \frac{U}{s} + L \cdot i_{20}$$

$$\text{Find}(I_1, I_2, I_3) \rightarrow \begin{bmatrix} 20 \cdot \frac{(1800 + 13 \cdot s)}{s \cdot (3400 + 13 \cdot s)} \\ 20 \cdot \frac{(800 + 13 \cdot s)}{s \cdot (3400 + 13 \cdot s)} \\ \frac{20000}{s \cdot (3400 + 13 \cdot s)} \end{bmatrix}$$

$$I_2(s) := 20 \cdot \frac{(800 + 13 \cdot s)}{s \cdot (3400 + 13 \cdot s)} \quad UL(s) := I_2(s) \cdot s \cdot L - L \cdot i_{20}$$

$$I_2(s) \text{ invlaplace, } s \rightarrow \frac{80}{17} + \frac{260}{17} \cdot \exp\left(\frac{-3400}{13} \cdot t\right)$$

$$UL(s) \text{ invlaplace, } s \rightarrow -200 \cdot \exp\left(\frac{-3400}{13} \cdot t\right)$$

$$i_2(t) := \frac{80}{17} + \frac{260}{17} \cdot \exp\left(\frac{-3400}{13} \cdot t\right)$$

$$u_L(t) := -200 \cdot \exp\left(\frac{-3400}{13} \cdot t\right)$$

$$I_2(t) := \begin{cases} i_2(t) & \text{if } t < 0 \\ i_2(t) & \text{if } t \geq 0 \end{cases} \quad U_L(t) := \begin{cases} 0 & \text{if } t < 0 \\ u_L(t) & \text{if } t \geq 0 \end{cases}$$

Графіки зображені на рис. 7.4.

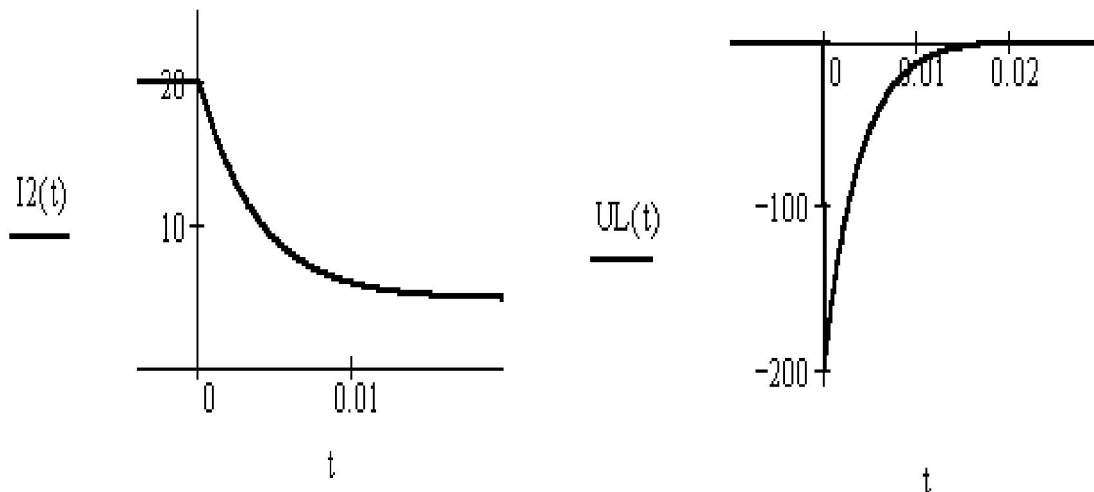


Рисунок 7.4

Порядок виконання роботи

Програма MicroCap має серед своїх компонентів ключ, тому дає можливість досліджувати перехідні процеси в колах з ненульовими початковими умовами.

1. Зібрати за вказівкою викладача одне з двох кіл:

- з індуктивністю – рис. 7.5 (воно відповідає схемі, зображеній на рис. 7.2);
- з ємністю – рис. 7.6.

Викладач також задає характер дії ключа (вмикання або вимкнення).

Параметри кіл вибираються з табл. 7.1 (для кола, зображеного на рис. 7.5) або табл. 7.2 (для кола, зображеного на рис. 7.6).

Таблиця 7.1

<i>Вар.</i>	<i>U, В</i>	<i>R₁, Ом</i>	<i>R₂, Ом</i>	<i>R₃, Ом</i>	<i>L, мГн</i>
<i>1</i>	120	4	2	10	40
<i>2</i>	80	2	5	8	80
<i>3</i>	60	6	7	6	60
<i>4</i>	90	3	4	7	100

Таблиця 7.2

<i>Вар.</i>	<i>U, В</i>	<i>R₁, Ом</i>	<i>R₂, Ом</i>	<i>C, мкФ</i>
<i>1</i>	120	6	6	40
<i>2</i>	80	5	7	80
<i>3</i>	60	4	8	60
<i>4</i>	90	8	4	100

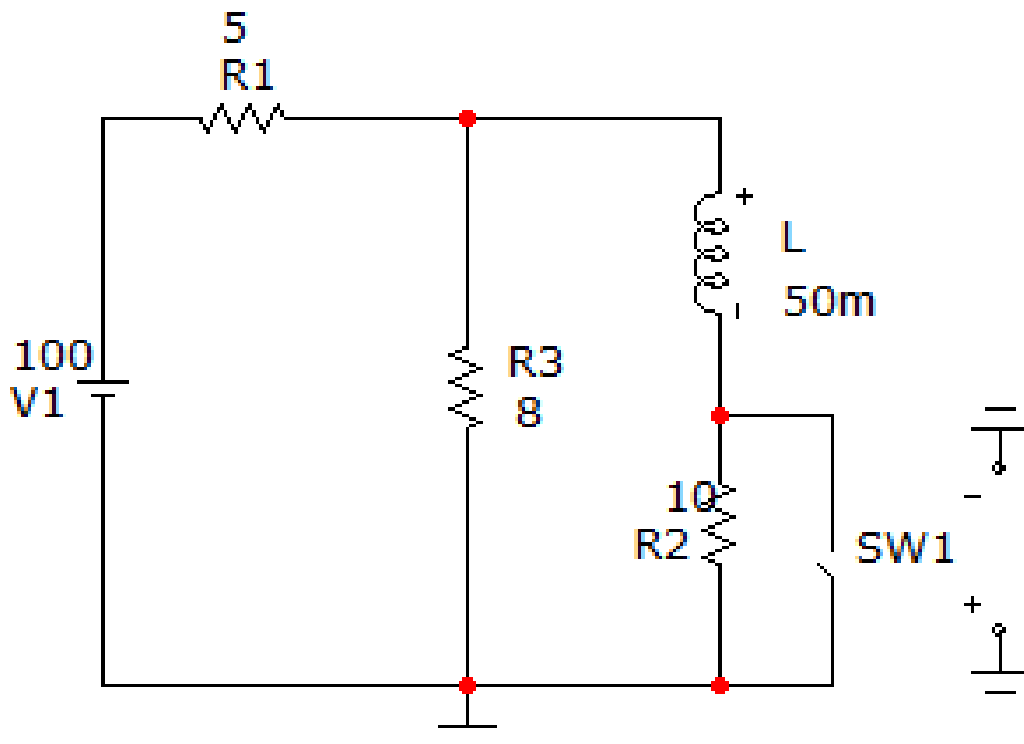


Рисунок. 7.5

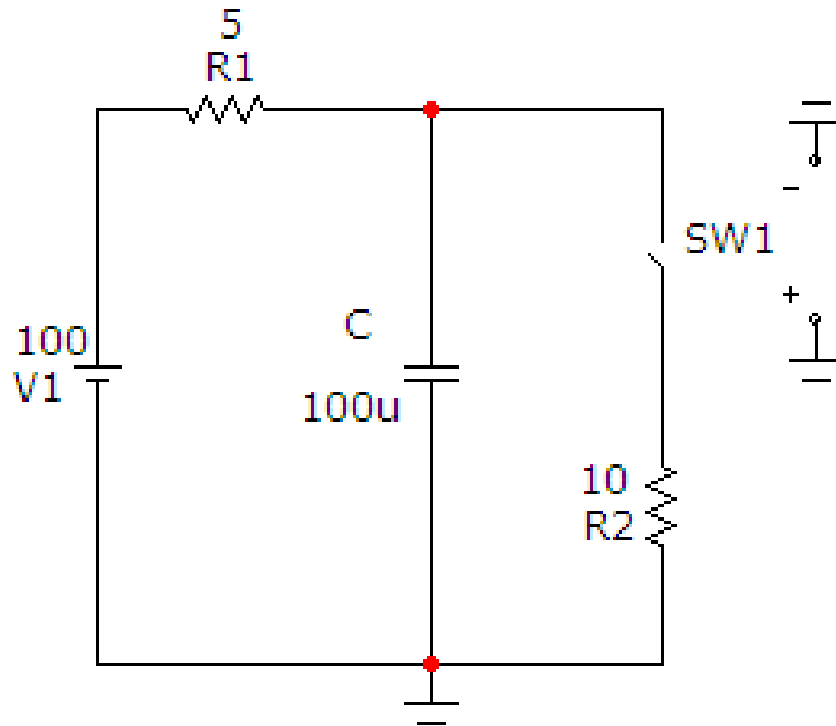


Рисунок. 7.6

Ключ можна викликати на екран опцією «Компоненты / Analog Primitives / Special Purpose /Switch». Його атрибути задаються у вікні (рис. 7.7), яке з'являється при перенесенні компонента на робоче поле програми.

В атрибуті «VALUE» треба задати параметри, що визначають умови вмикання та розмикання ключа.

Формат цих параметрів: « $T, n1, n2$ ».

Параметри $n1$ та $n2$ визначають умови вмикання ключа.

При $n1 < n2$ ключ увімкнений, якщо керуючий сигнал X відповідає умові $n1 < X < n2$, і вимкнений, якщо $X < n1 \vee X > n2$.

При $n1 > n2$ ключ вимкнений, якщо керуючий сигнал X відповідає умові $n1 > X > n2$, і увімкнений, якщо $X > n1 \vee X < n2$.

Якщо в схемі ключ розмикається, то число $n1$ має бути більшим за повну тривалість перехідного процесу ($n1 > 5\tau$), а $n2$ слід приймати меншим, ніж стала часу перехідного процесу ($n2 < \tau$).

Для схеми (рис. 7.5), яка відповідає прикладу (рис. 7.2), стала часу приблизно дорівнює 3-м мілісекундам, тому прийнято: $n1 = 20m$, $n2 = 1m$.

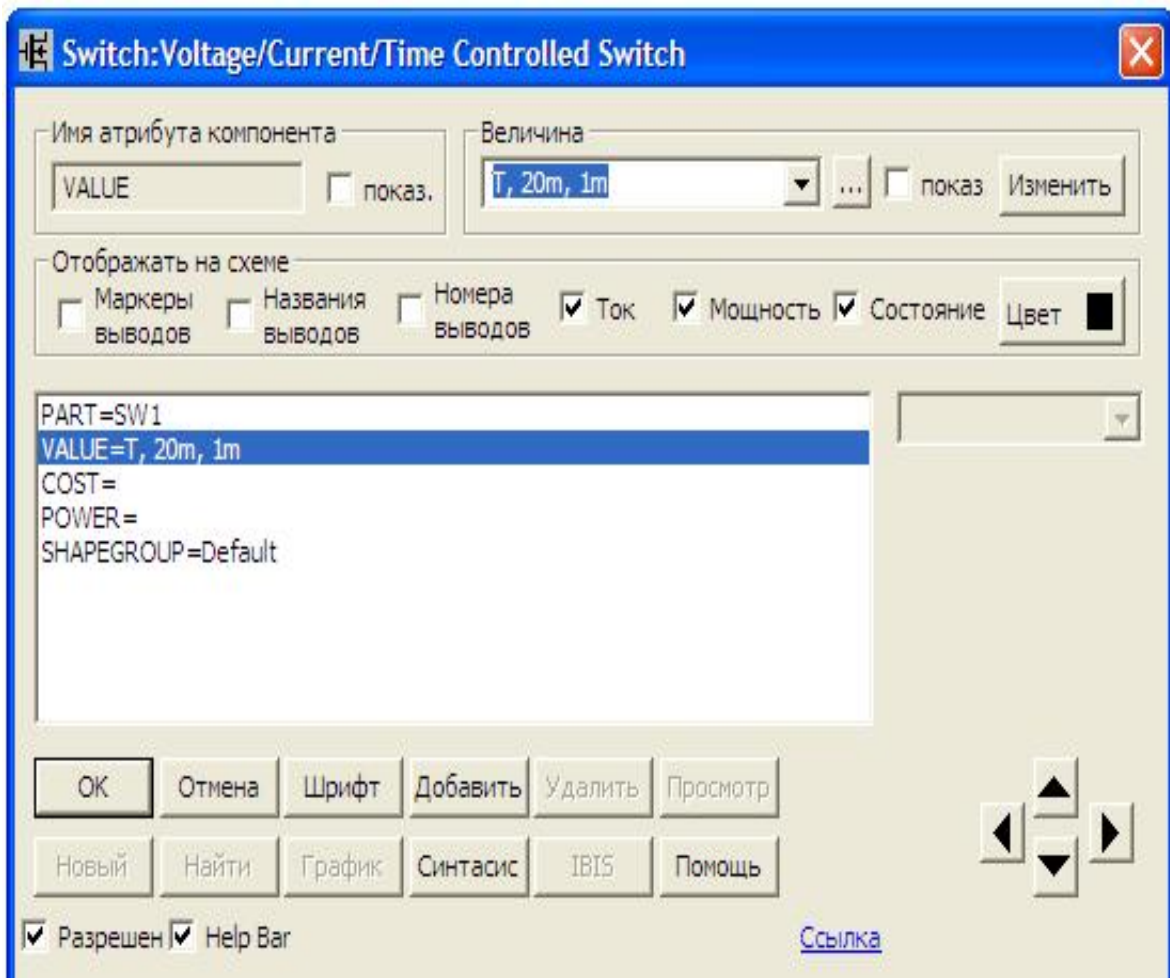


Рисунок. 7.7

2. На верхній панелі головного вікна відкриваємо опцію «Анализ» і вибираємо в ній рядок «Анализ переходных процессов (Transient)». Після цього на екрані з'являється вікно (рис. 7.8), в якому слід задати:

- діапазон розрахунку, який доцільно вибирати приблизно рівним 5τ (для схеми, зображеної на рис. 7.5 – $18m$);
- крок розрахунку – $0.5u$;
- початкові умови – режим «Retrace», при якому MicroCap спочатку проводить розрахунок режиму до комутації;
- діапазони виведення графіків струму та напруги в котушці індуктивності (для рис. 7.5) або в конденсаторі (для рис. 7.6).

Далі натискається кнопка «Запустить».

Графіки зображені на рис. 7.9. Їх слід роздрукувати.

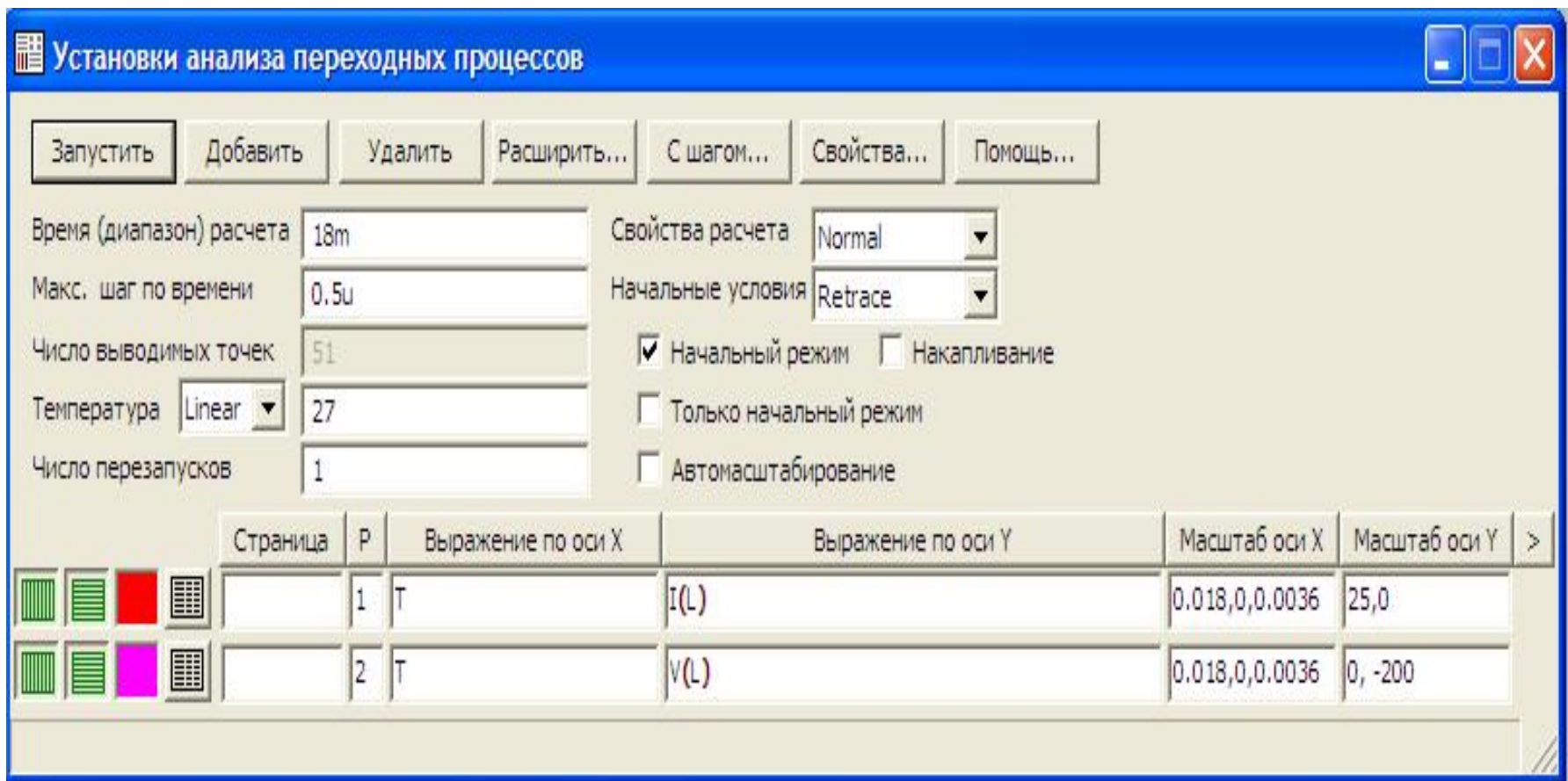


Рисунок. 7.8

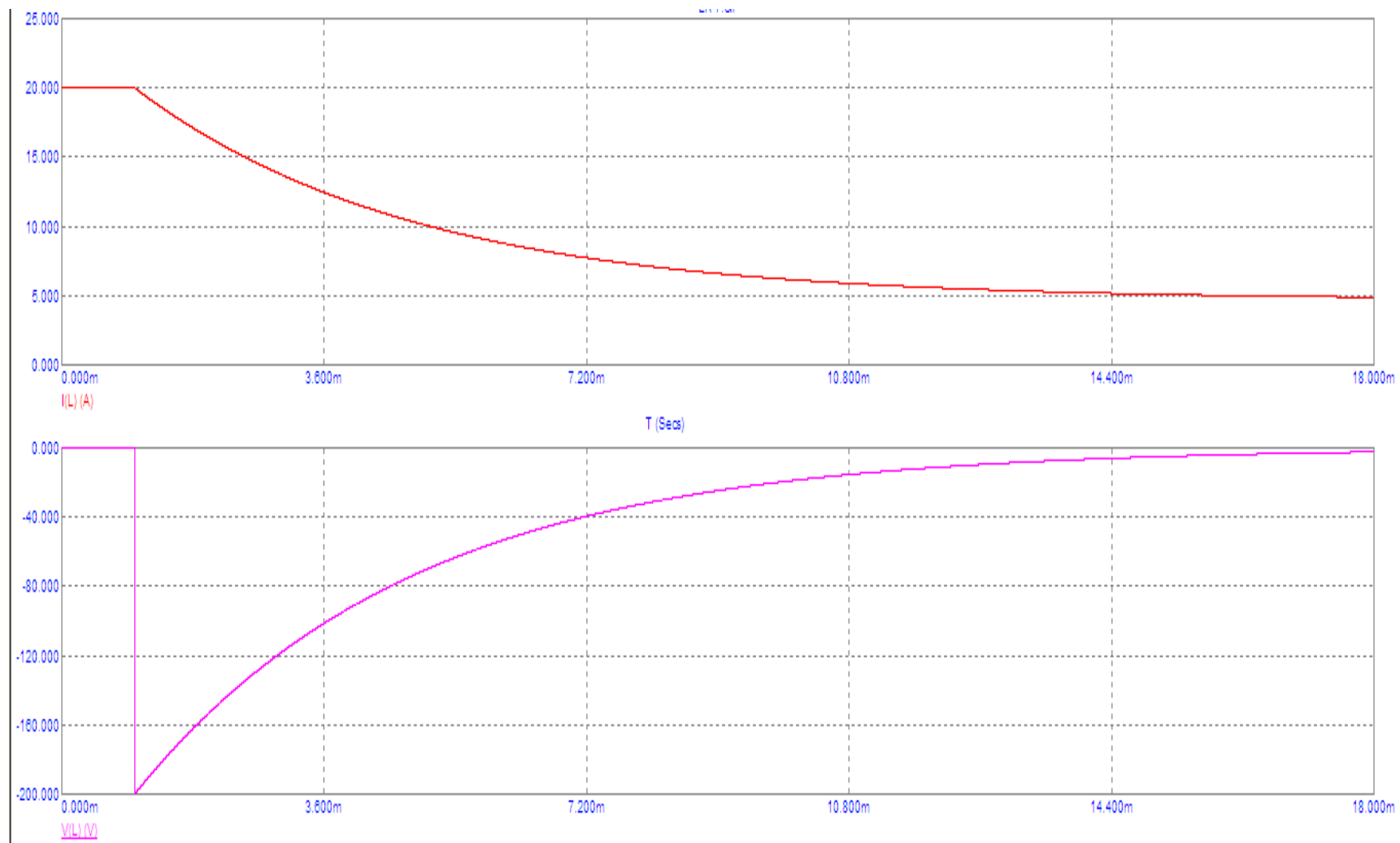


Рисунок. 7.9

Обробка результатів дослідження

1. Провести розрахунок перехідного струму та напруги в індуктивності або в ємності в середовищі MathCAD і побудувати графіки.
2. Порівняти розраховані та змодельовані графіки.

Контрольні питання

1. Які причини виникнення перехідних процесів?
2. Закони комутації.
3. Що таке стала часу перехідного процесу?
4. Як визначаються незалежні початкові умови?
5. Як визначаються залежні початкові умови?

Лабораторна робота № 8тс

Дослідження перехідного процесу в лінійному колі постійного струму другого порядку

Мета роботи: дослідити перехідний процес в лінійному електричному колі постійного струму другого порядку за ненульових початкових умов.

Короткі теоретичні відомості

Проведемо аналіз перехідного процесу в колі з двома реактивними елементами rLC , яке зображене на рис. 8.1.

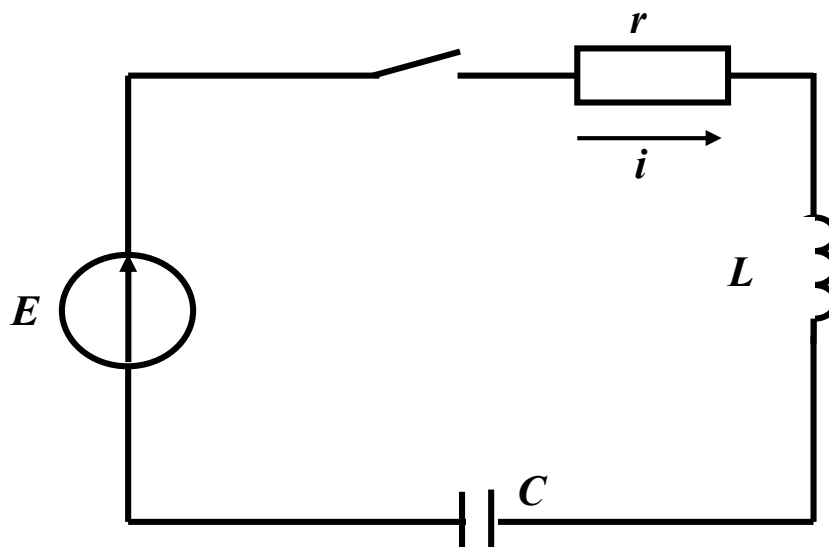


Рисунок 8.1

У відповідності з другим законом Кірхгофа для кола можна скласти систему рівнянь

$$\begin{aligned} ir + L \frac{di}{dt} + u_C &= E \\ i &= C \frac{du_C}{dt} \end{aligned} \quad (8.1)$$

Після перетворень отримаємо рівняння другого порядку:

$$rC \frac{du_C}{dt} + LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + u_C = E. \quad (8.2)$$

Характеристичне рівняння

$$rCp + LCp^2 + 1 = 0 \quad (8.3)$$

має корені

$$p_{1,2} = -\frac{r}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{r}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}. \quad (8.4)$$

В залежності від співвідношення складових під знаком радикала будемо мати три види коренів

- $\left(\frac{r}{2L}\right)^2 > \frac{1}{LC}$ – корені дійсні різні;
- $\left(\frac{r}{2L}\right)^2 < \frac{1}{LC}$ – корені комплексні;
- $\left(\frac{r}{2L}\right)^2 = \frac{1}{LC}$ – корені дійсні рівні.

В першому випадку процес в колі **rLC** буде аперіодичним (неколивальним). Вираз для напруги на ємності має вигляд

$$u_C = u_{Cnp} + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} \quad (8.5)$$

В другому випадку корені характеристичного рівняння

$$p_1 = -\delta + j\omega_0, \quad p_2 = -\delta - j\omega_0,$$

де $\delta = \frac{r}{2L}$, $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{r}{2L}\right)^2}$.

Процес в колі є періодичним (коливальним).

Вираз для напруги на ємності має вигляд

$$u_C = u_{Cnp} + e^{-\delta t} (A_1 \sin \omega_0 t + A_2 \cos \omega_0 t) \quad (8.6)$$

Якщо корені однакові, тобто $\left(\frac{r}{2L}\right)^2 = \frac{1}{LC}$, то перехідний процес є критичним. Він перехідний між аперіодичним та коливальним процесами.

В цьому випадку $p_1 = p_2 = -\frac{r}{2L}$ і напруга на ємності записується як

$$u_C = u_{Cnp} + (A_1 + A_2 t) e^{pt} \quad (8.7)$$

Розглянемо приклад розгалуженого кола другого порядку з ненульовими початковими умовами.

Для кола, яке зображене на рис. 8.2, знайти перехідні струми i_2, i_3 і напруги на ємності u_C та на індуктивності u_L . Побудувати графіки цих величин в часі. Параметри кола: $U = 200$ В, $L = 100$ мГн, $C = 50$ мкФ, $r_1 = 200$ Ом, $r_2 = 50$ Ом.

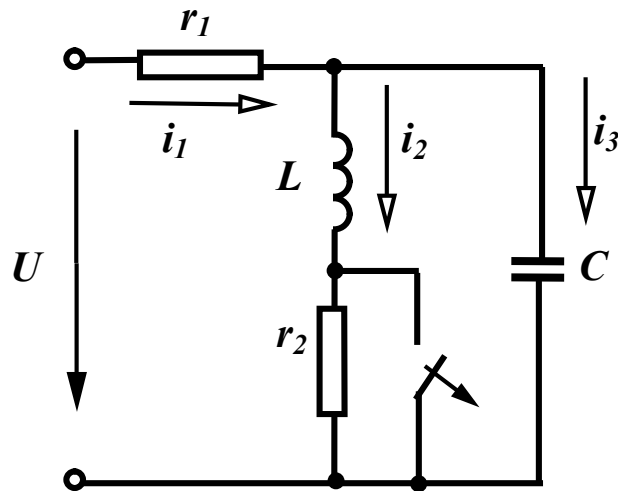


Рисунок 8.2

Проведемо розрахунок операторним методом.

Спочатку визначимо незалежні початкові умови.

Значення $i_2(0+)$ і $u_C(0+)$ можна знайти, якщо розрахувати коло до комутації. Оскільки прикладена до кола напруга постійна, то в колі до комутації (при замкненому ключі) текли постійні струми. Струм у вітці з ємністю не протікав. Також не протікав струм і через опір R_2 , оскільки він замкнений ключем, тому $i_2(0+) = i_2(0-) = \frac{U}{r_1}$.

Напруга на ємності при замкненому ключі дорівнює напрузі на індуктивності (паралельно з'єднані вітки). Оскільки опір індуктивності при постійному струмі дорівнює нулю, то і напруга на індуктивності дорівнює нулю, і, відповідно, $u_C(0+) = u_C(0-) = 0$.

Операторна схема зображена на рис. 8.3.

Відмітимо, що оскільки $u_C(0+) = u_C(0-) = 0$, то додаткова е.р.с. $\frac{u_C(0)}{s}$ в конденсаторній вітці відсутня.

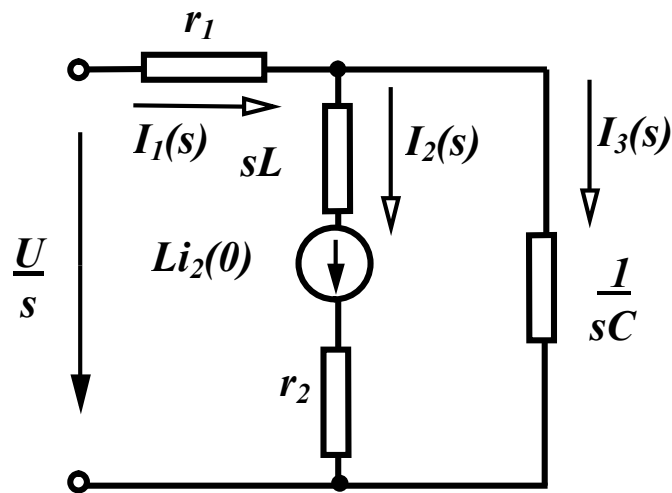


Рисунок 8.3

Складемо систему рівнянь за законами Кірхгофа в операторному вигляді (вважатимемо напрямок обходу контурів за годинниковою стрілкою):

$$\begin{aligned} I_1(s) - I_2(s) - I_3(s) &= 0, \\ I_1(s)r_1 + I_3(s)\frac{1}{sC} &= \frac{U}{s}, \\ I_1(s)r_1 + I_2(s)(r_2 + sL) &= \frac{U}{s} + Li_2(0). \end{aligned} \quad (8.8)$$

Розв'язав цю систему рівнянь можна тримати операторні зображення струмів $I_2(s)$, $I_3(s)$. Операторні зображення напруг на індуктивності та ємності знайдемо за формулами:

$$u_L(s) = I_2(s)sL - Li_2(0), \quad u_C(s) = u_L(s) + I_2(s)r_2. \quad (8.9)$$

Всі процедури виконаємо в середовищі MathCAD.

$$U := 200 \quad L := 0.1 \quad C := 50 \cdot 10^{-6}$$

$$r2 := 50 \quad r1 := 200 \quad i20 := \frac{U}{r1}$$

Given

$$I1 - I2 - I3 = 0$$

$$I1 \cdot r1 + I3 \cdot \frac{1}{s \cdot C} = \frac{U}{s}$$

$$I1 \cdot r1 + I2 \cdot (r2 + s \cdot L) = \frac{U}{s} + L \cdot i20$$

$$\text{Find}(I1, I2, I3) \rightarrow \begin{bmatrix} \frac{(600 \cdot s + s^2 + 200000.)}{s \cdot (250000. + 600 \cdot s + s^2)} \\ \frac{(s^2 + 100 \cdot s + 200000.)}{s \cdot (250000. + 600 \cdot s + s^2)} \\ \frac{500.}{(250000. + 600 \cdot s + s^2)} \end{bmatrix}$$

$$I2(s) := \frac{(s^2 + 100 \cdot s + 200000.)}{s \cdot (250000. + 600 \cdot s + s^2)}$$

$$I3(s) := \frac{500.}{(250000. + 600 \cdot s + s^2)}$$

$$UL(s) := I2(s) \cdot s \cdot L - L \cdot i20 \quad UC(s) := UL(s) + I2(s) \cdot r2$$

$$i2(t) := I2(s) \text{ invlaplace, } s \text{ float, } 3 \rightarrow .800 +$$

$$+ .200 \cdot \exp(-300 \cdot t) \cdot \cos(400 \cdot t) - 1.10 \cdot \exp(-300 \cdot t) \cdot \sin(400 \cdot t)$$

$$i3(t) := I3(s) \text{ invlaplace, } s \text{ float, } 3 \rightarrow 1.25 \cdot \exp(-300 \cdot t) \cdot \sin(400 \cdot t)$$

$$uL(t) := UL(s) \text{ invlaplace, } s \rightarrow$$

$$-50 \cdot \exp(-300 \cdot t) \cdot \cos(400 \cdot t) + 25 \cdot \exp(-300 \cdot t) \cdot \sin(400 \cdot t)$$

$$u_C(t) := UC(s) \text{ invlaplace, } s \rightarrow$$

$$-40 \cdot \exp(-300 \cdot t) \cdot \cos(400 \cdot t) - 30 \cdot \exp(-300 \cdot t) \cdot \sin(400 \cdot t) + 40.$$

Графіки зображені на рис. 8.4.

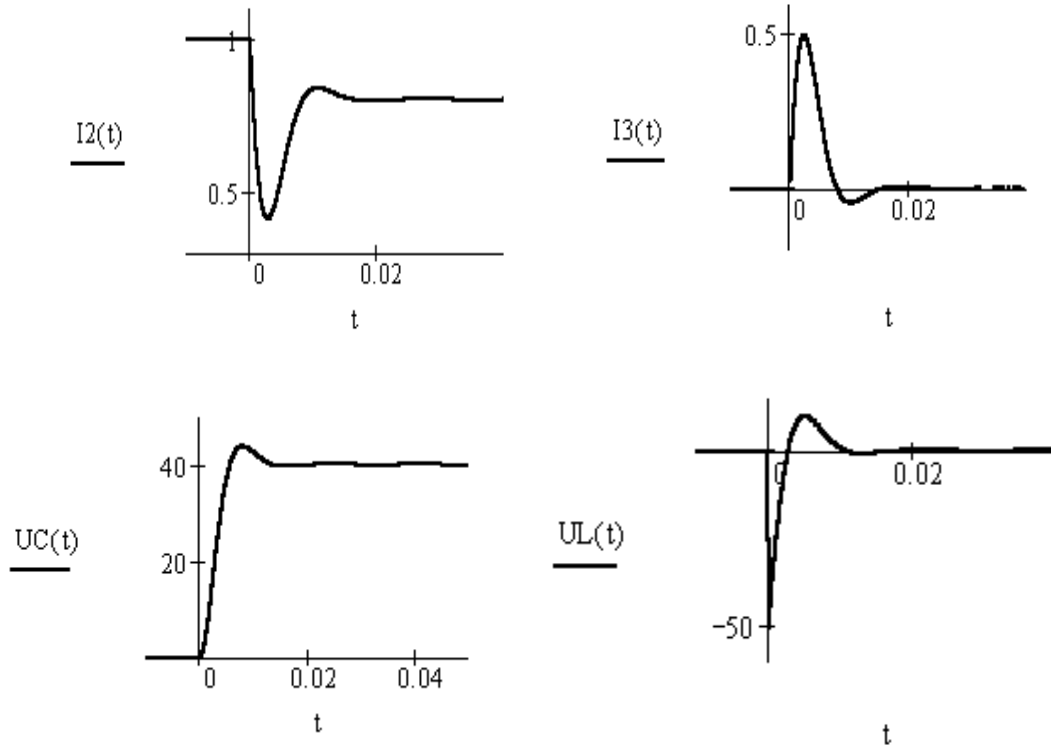


Рисунок 8.4

Порядок виконання роботи

Програма MicroCap має серед своїх компонентів ключ, тому дає можливість досліджувати перехідні процеси в колах з ненульовими початковими умовами.

1. Зібрати коло згідно рис. 8.5 (в нашому випадку воно відповідає схемі, зображеній на рис. 8.2). Параметри вибираються за таблицею 8.1.

Викладач задає характер дії ключа (вмикання або вимкнення).

Таблиця 8.1

<i>Вар.</i>	<i>U, В</i>	<i>R₁, Ом</i>	<i>R₂, Ом</i>	<i>C, мкФ</i>	<i>L, мГн</i>
<i>1</i>	120	30	12	100	40
<i>2</i>	80	20	15	80	80
<i>3</i>	60	16	10	60	60
<i>4</i>	90	18	16	75	100

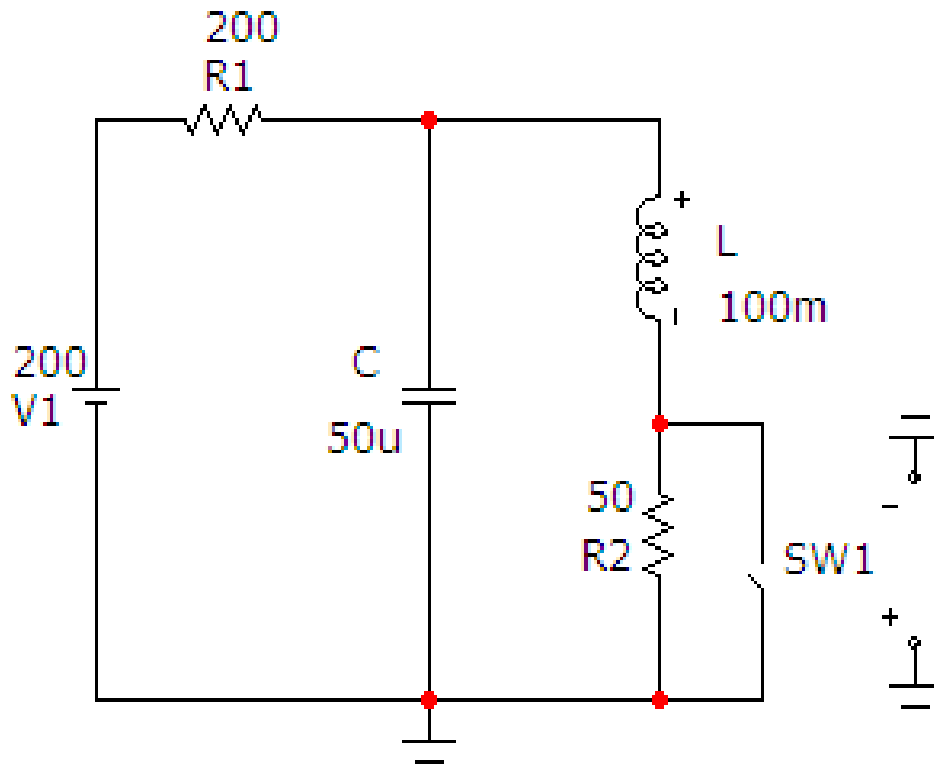


Рисунок. 8.5

Ключ можна викликати на екран опцією «Компоненты / Analog Primitives / Special Purpose /Switch». Його атрибути задаються у вікні (рис. 8.6), яке з'являється при перенесенні компонента на робоче поле програми.

В атрибуті «*VALUE*» треба задати параметри, що визначають умови вмикання та розмикання ключа.

Формат цих параметрів: «*T, n1, n2*».

Параметри *n1* та *n2* визначають умови вмикання ключа.

При $n1 < n2$ ключ увімкнений, якщо керуючий сигнал *X* відповідає умові $n1 < X < n2$, і вимкнений, якщо $X < n1 \vee X > n2$.

При $n1 > n2$ ключ вимкнений, якщо керуючий сигнал *X* відповідає умові $n1 > X > n2$, і увімкнений, якщо $X > n1 \vee X < n2$.

Якщо в схемі ключ розмикається, то число *n1* має бути більшим за повну тривалість перехідного процесу ($n1 > 5\tau$), а *n2* слід приймати меншим, ніж стала часу перехідного процесу ($n2 < \tau$).

В нашому прикладі (рис. 8.2) прийнято: $n1 = 100m$, $n2 = 1m$.

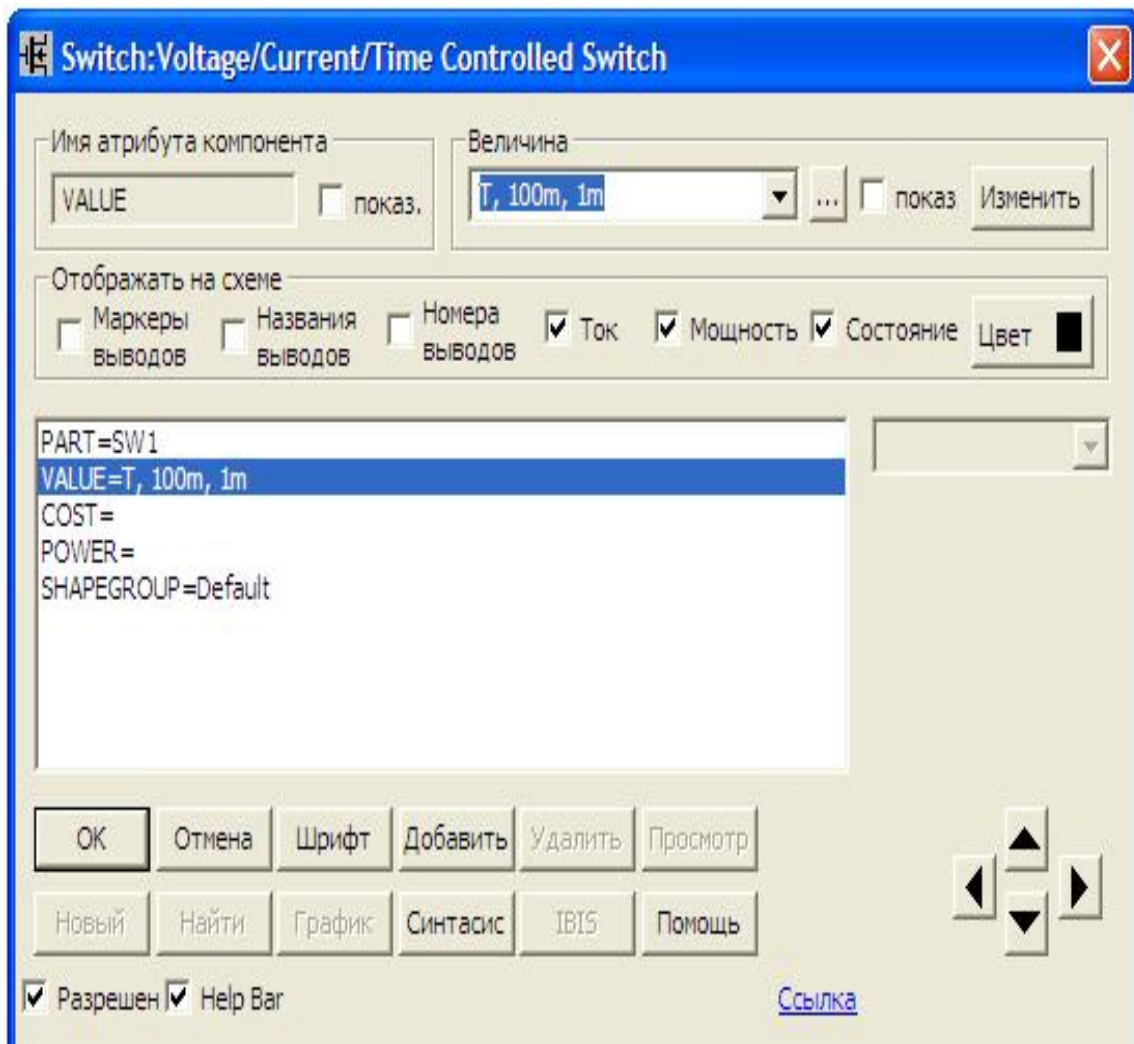


Рисунок. 8.6

2. На верхній панелі головного вікна відкриваємо опцію «Анализ» і вибираємо в ній рядок «Анализ переходных процессов (Transient)». Після цього на екрані з'являється вікно (рис. 8.7), в якому слід задати:

- діапазон розрахунку, який доцільно вибрати приблизно рівним 5τ (в нашому випадку 20m);
- крок розрахунку – 0.5u;
- початкові умови – режим «Retrace», при якому MicroCap спочатку проводить розрахунок режиму до комутації;
- діапазони виведення графіків струму і напруги в індуктивності та ємності.

Далі натискається кнопка «Запустить».

Графіки зображені на рис. 8.8. Їх слід роздрукувати.

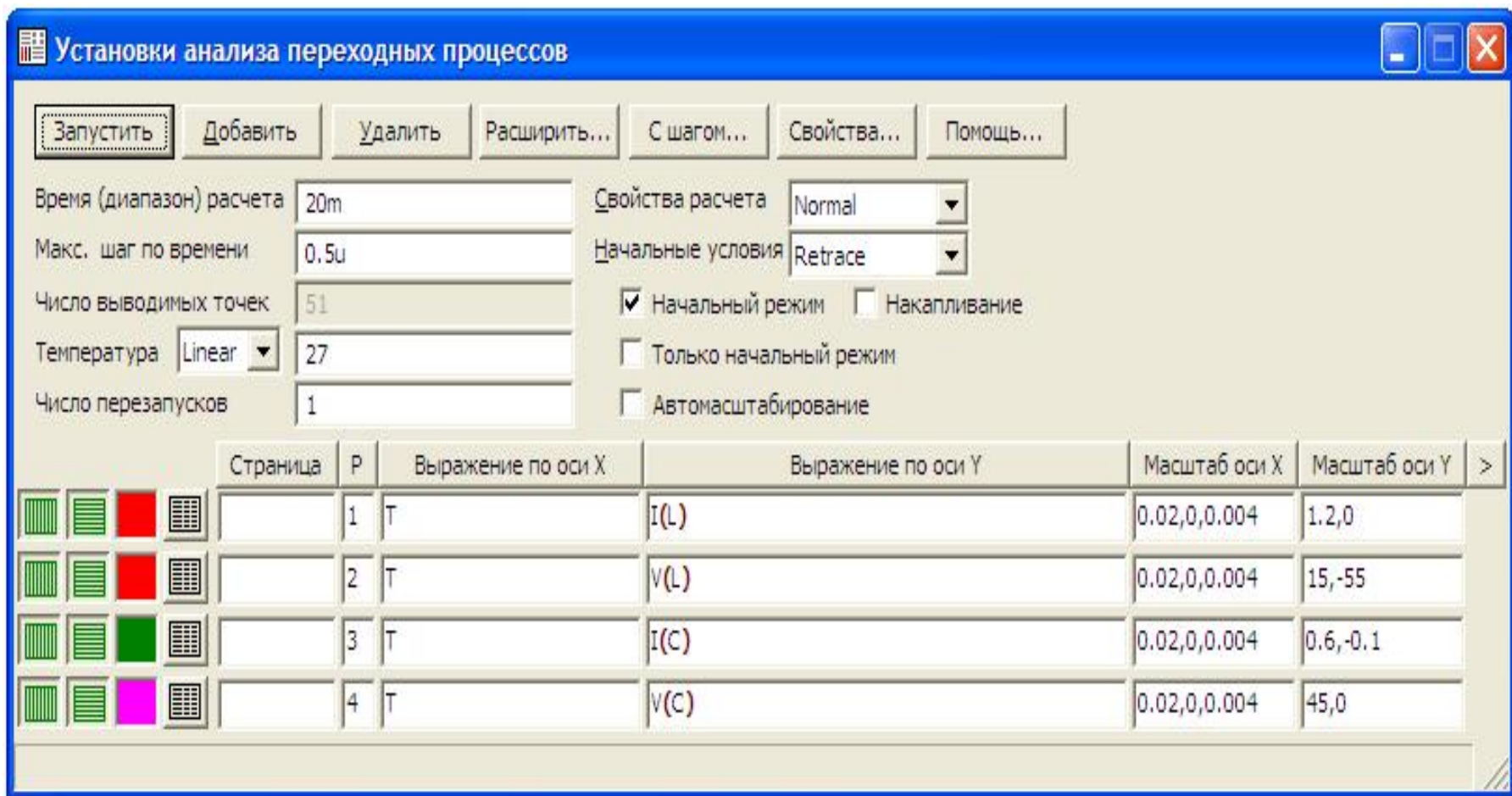


Рисунок. 8.7

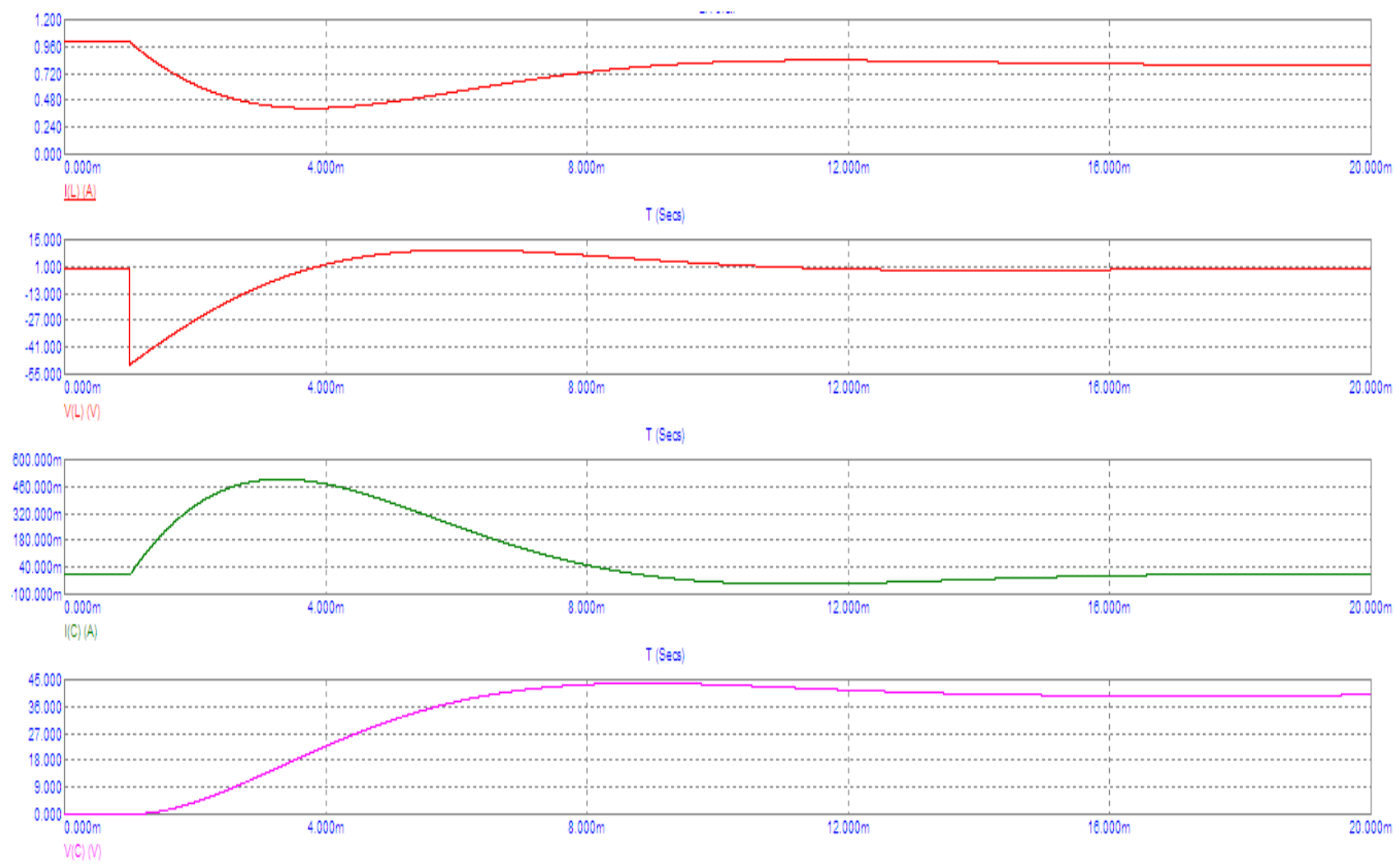


Рисунок. 8.8

Обробка результатів дослідження

1. Провести розрахунок перехідного струму та напруги в індуктивності та в ємності в середовищі MathCAD і побудувати графіки.
2. Порівняти розраховані та змодельовані графіки.

Контрольні питання

1. Які причини виникнення перехідних процесів?
2. Закони комутації.
3. Що таке стала часу перехідного процесу?
4. Як визначаються незалежні початкові умови?
5. Як визначаються залежні початкові умови?

Лабораторна робота № 9тс

Дослідження перехідного процесу в лінійному колі синусоїдного струму другого порядку

Мета роботи: дослідити ефект «биття» при перехідному процесі в лінійному електричному колі синусоїдного струму.

Короткі теоретичні відомості

Розглянемо приклад перехідного процесу при вмиканні кола другого порядку на *синусоїдну* напругу.

Знайти перехідний струм в колі синусоїдного струму, яке зображене на рис. 9.1, *а*. Побудувати його графік в часі.

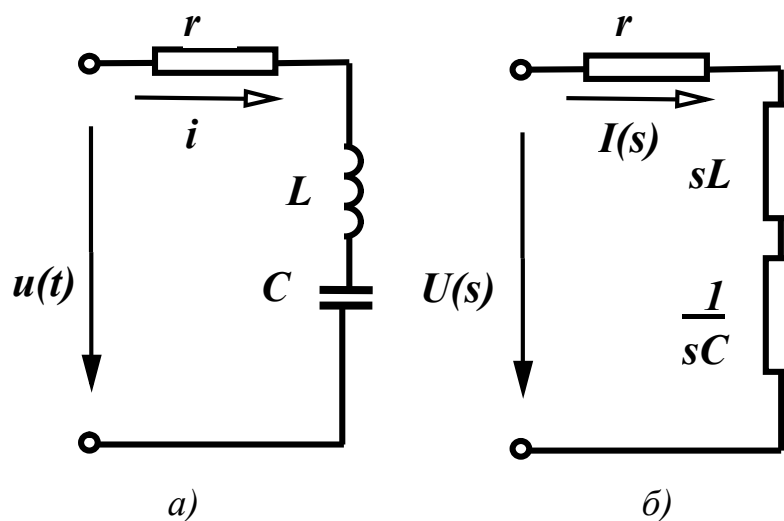


Рисунок 9.1

Параметри кола:

$$u(t) = 100 \sin 305t \text{ В, } L = 320 \text{ мГн, } C = 40 \text{ мкФ, } r = 2,5 \text{ Ом.}$$

Операторна схема заміщення цього кола зображена на рис. 9.1, б. Операторне рівняння за другим законом Кірхгофа має вигляд:

$$I(s) \left(r + sL + \frac{1}{sC} \right) = U(s). \quad (9.1)$$

Розв'яжемо це операторне рівняння в MathCAD.

$$L := 0.32 \quad C := 40 \cdot 10^{-6} \quad r := 2.5 \quad \omega := 305 \quad u(t) := 100 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$u(s) := u(t) \text{ laplace, } t \rightarrow \frac{30500}{(s^2 + 93025)} \quad I(s) := \frac{u(s)}{\left(r + s \cdot L + \frac{1}{s \cdot C} \right)}$$

$$i(t) := I(s) \text{ invlaplace, } s \text{ float, } 3 \rightarrow -6.24 \cdot \cos(305 \cdot t) + .997 \cdot \sin(305 \cdot t) + \\ + 6.24 \cdot \exp(-3.91 \cdot t) \cdot \cos(279 \cdot t) - 1.00 \cdot \exp(-3.91 \cdot t) \cdot \sin(279 \cdot t)$$

Цей перехідний струм в загальному вигляді може бути поданий виразом

$$i = I_m \sin(\omega t + \alpha) - I_m e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \alpha). \quad (9.2)$$

Якщо кутова частота прикладеної напруги ($\omega = 305$) близька до кутової частоти вільних коливань ($\omega_0 = 279.48$), а величиною δ можна знехтувати, то отриманий вираз можна подати у вигляді

$$i = -2I_m \cos\left(\frac{\omega - \omega_0}{2} t\right) \cdot \cos\left(\frac{\omega + \omega_0}{2} t + \alpha\right). \quad (9.3)$$

З цього виразу видно, що струм протягом перехідного процесу змінюється за синусоїдним законом з кутовою частотою $\frac{\omega + \omega_0}{2} \approx \omega$, амплітуда якого теж змінюється за синусоїдним законом зі значно меншою кутовою частотою $\frac{\omega - \omega_0}{2} = \Delta\omega_0$. Оскільки в нашому випадку $\delta = 3.9$, то коливання амплітуди поступово згасають і перехідний процес змінюється усталеним режимом. Такі коливання називають *биттям*.

Графік перехідного струму зображений на рис. 9.2.

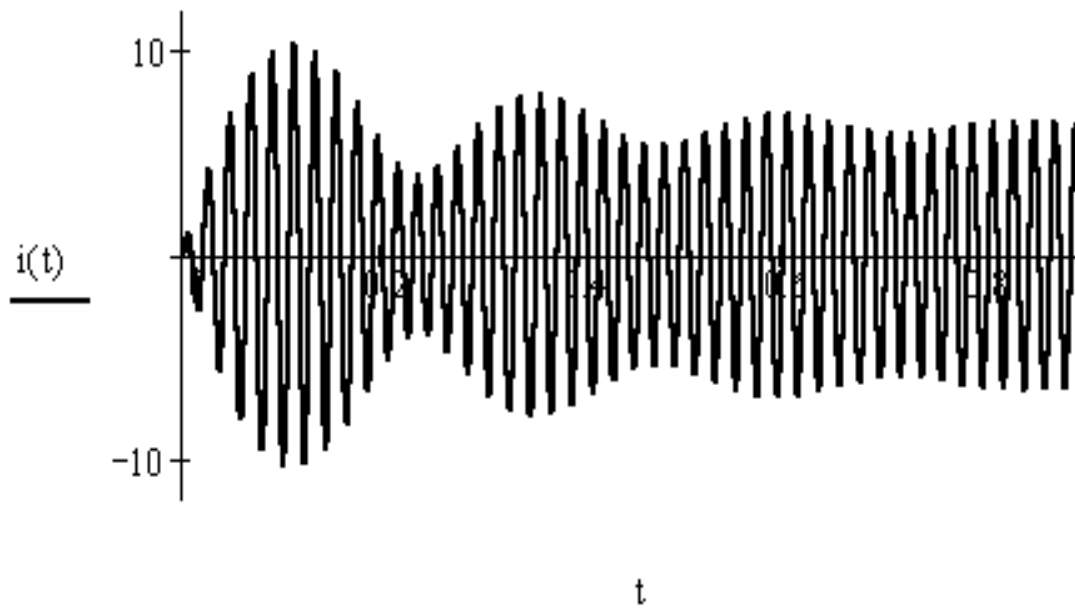


Рисунок 9.2

Порядок виконання роботи

1. Зібрати коло згідно рис. 9.3.

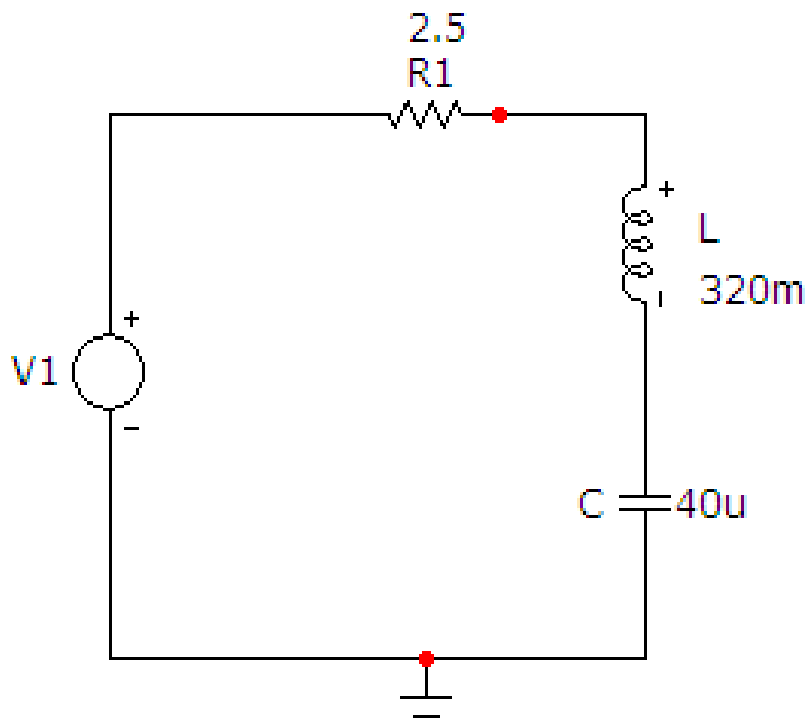


Рисунок 9.3

2. Для параметрів L і C , вибраних з табл. 9.1, визначити опір резистора R , при якому корні характеристичного рівняння будуть комплексними, виходячи з умови $\left(\frac{r}{2L}\right)^2 < \frac{1}{LC}$.

Таблиця 9.1

<i>Вар.</i>	$U_m, В$	$C, мкФ$	$L, мГн$
1	120	100	40
2	80	80	80
3	60	60	60
4	90	75	100

3. За формулою $f_0 = \frac{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{r}{2L}\right)^2}}{2\pi}$ визначити частоту вільних коли-

вань, після чого вибрати частоту прикладеної напруги f , яка має бути трохи більша за f_0 .

4. На верхній панелі головного вікна відкриваємо опцію «Анализ» і вибираємо в ній рядок «Анализ переходных процессов (Transient)». Після цього на екрані з'являється вікно (рис. 9.4), в якому слід задати:

- діапазон розрахунку, який доцільно вибирати приблизно рівним $\frac{5}{f - f_0}$ (для параметрів, що наведені у вищезазначеному прикладі, прийнято 900m);

- крок розрахунку – 1ц;
- початкові умови – режим «Retrace», при якому MicroCap спочатку проводить розрахунок режиму до комутації;

- діапазони виведення графіку струму в індуктивності.

Далі натискається кнопка «Запустить».

Графіки зображені на рис. 8.8. Їх слід роздрукувати.

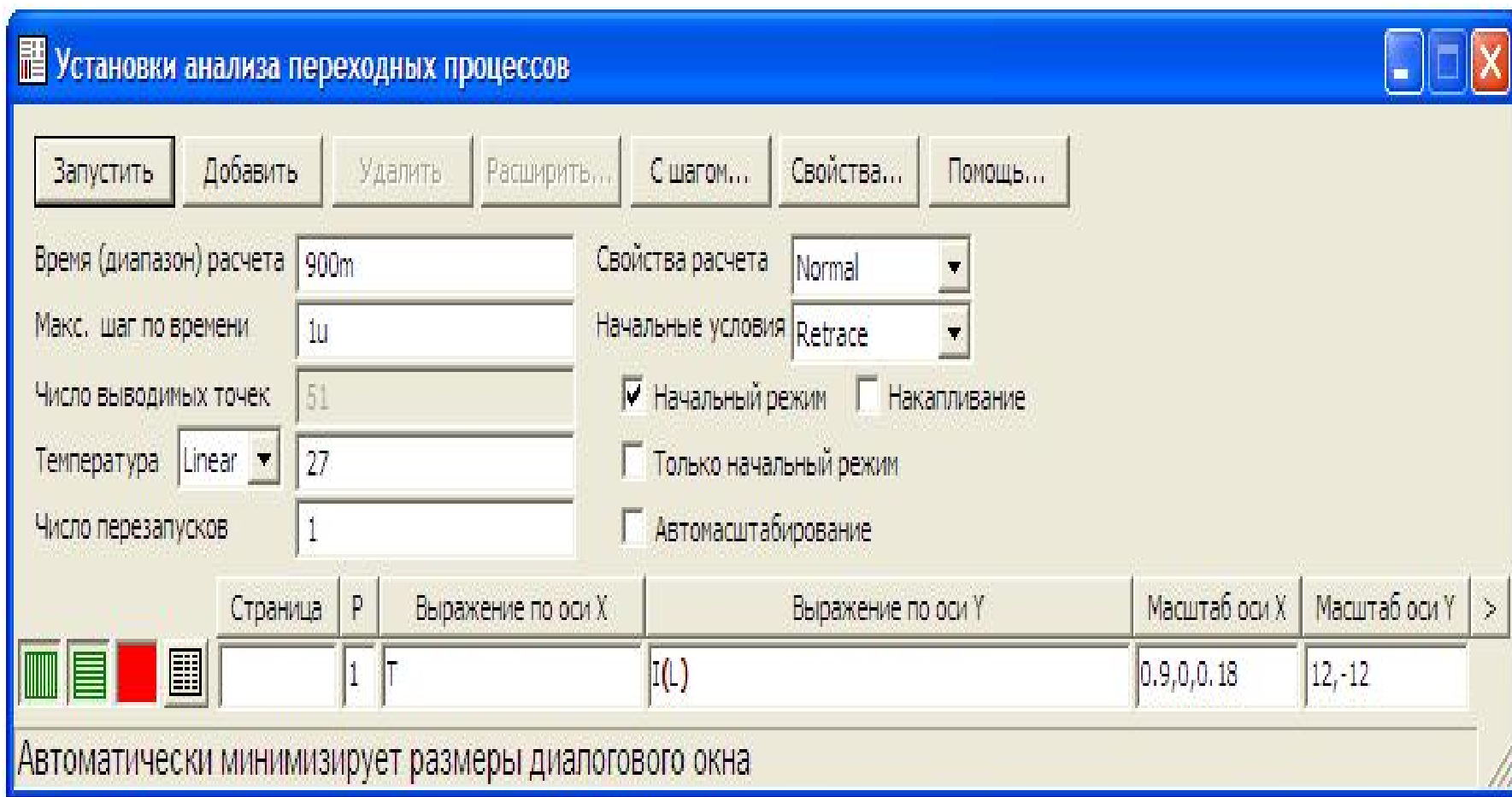


Рисунок. 9.4

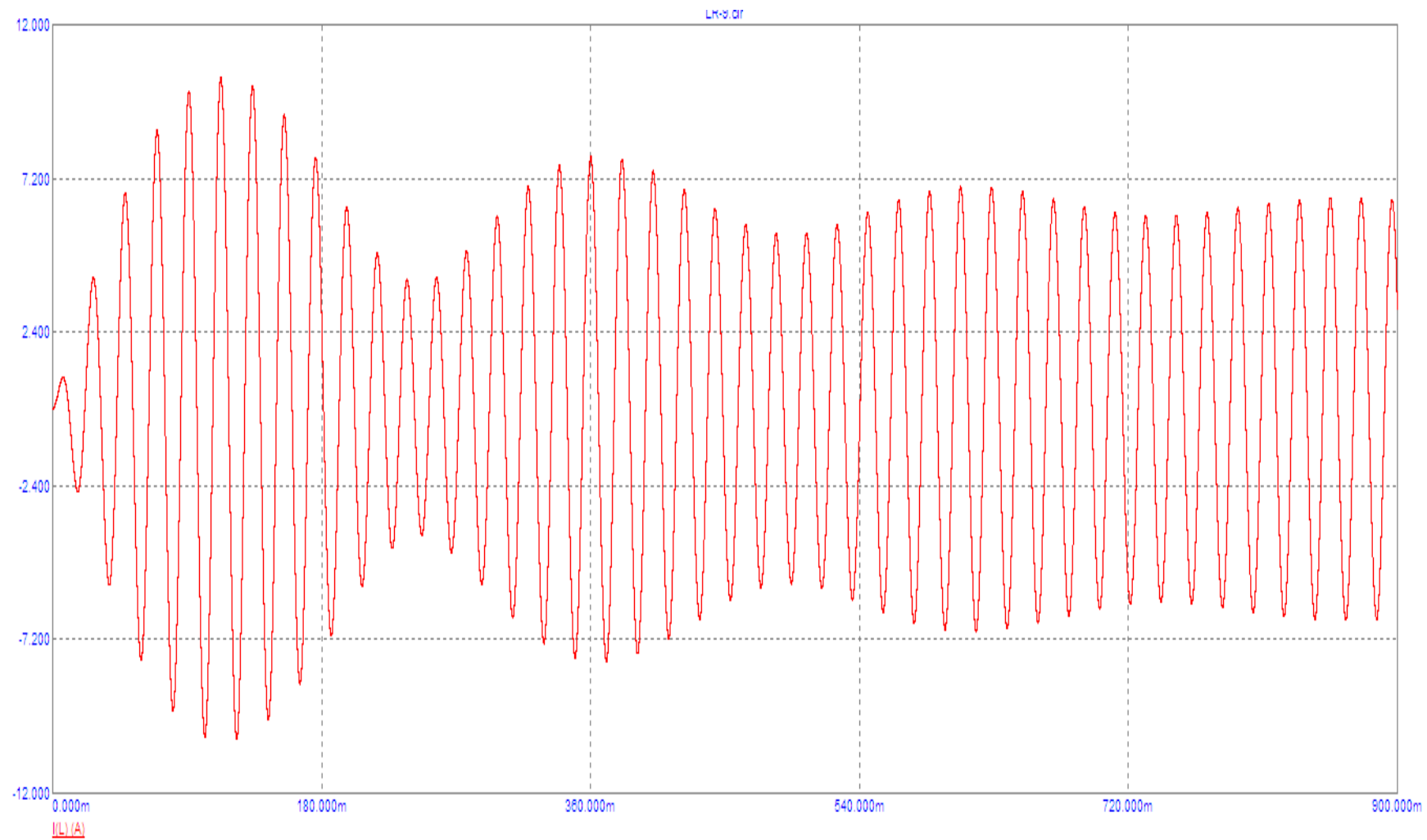


Рисунок. 9.5

Обробка результатів дослідження

1. Провести розрахунок перехідного струму та напруги в індуктивності та в ємності в середовищі MathCAD і побудувати графіки.
2. Порівняти розраховані та змодельовані графіки.

Контрольні питання

1. Які причини виникнення перехідних процесів?
2. Закони комутації.
3. Які особливості перехідного процесу при вмикання кола на синусоїдну напругу?
4. Як визначаються незалежні початкові умови?
5. Як визначаються залежні початкові умови?
6. За яких умов виникає ефект «биття»?

Лабораторна робота № 10мс

Дослідження складних резонансів в розгалужених колах синусоїдного струму

Мета роботи: побудувати частотну характеристику вхідного струму в розгалуженому колі синусоїдного струму та за її допомогою визначити кількість та характер резонансів.

Короткі теоретичні відомості

В електричному колі на різних його ділянках реактивні опори можуть бути додатними та від'ємними і в окремих випадках можуть взаємно компенсуватися. При повній компенсації реактивних опорів в колі його вхідний опір має активний характер, вхідна напруга та струм будуть збігатися за фазою, а електричне коло не буде ні споживати, ні генерувати реактивної потужності.

Режим роботи електричного кола, якщо при наявності реактивних опорів в ньому його вхідний опір є активним, називається резонансним.

Умовою резонансного режиму є рівність нулю вхідного реактивного опору або реактивної провідності

$$x_{\text{вх}} = 0, b_{\text{вх}} = 0. \quad (10.1)$$

Частоти, при яких в колі має місце резонанс, називають *резонансними*.

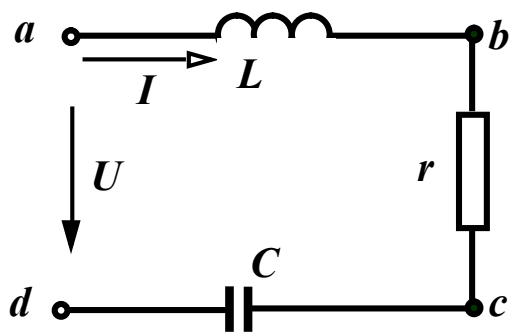


Рисунок 10.1

Розглянемо контур (рис. 10.1), що складається з послідовно з'єднаних елементів r, L, C і запишемо комплексний вхідний опір кола

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right).$$

Відповідно до умови (10.1) резонанс в цьому контурі можливий, якщо

$$x_{\text{вх}} = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0, \quad (10.2)$$

тобто коли ємнісний опір дорівнює індуктивному опору.

Із (10.2) видно, що резонансного режиму можна досягнути, змінюючи або величину ємності, або індуктивність чи частоту. При сталих параметрах L та C резонансна частота

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (10.3)$$

Діюче значення струму в контурі

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (10.4)$$

Якщо амплітуда прикладеної напруги постійна, то струм в колі в момент резонансу приймає максимальне значення

$$I_0 = \frac{U}{r} \quad (10.5)$$

і, як відзначалось раніше, збігається за фазою з прикладеною напругою.

На рис. 10.2 показані векторні діаграми для трьох різних значень частот.

Напруги на реактивних елементах при $\omega = \omega_0$ рівні між собою

$$U_{0L} = I_0 \omega_0 L = U \frac{\omega_0 L}{r},$$

$$U_{0C} = I_0 \frac{1}{\omega_0 C} = U \frac{1}{\omega_0 C r}.$$

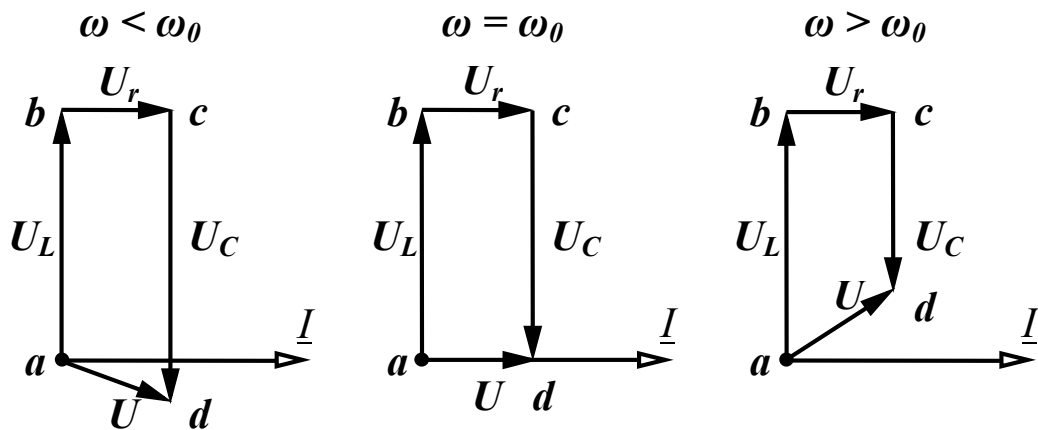


Рисунок 10.2

Якщо $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \gg r$, то напруги на реактивних елементах значно перевищують вхідну напругу, тому резонанс в послідовному контурі називають *резонансом напруг*.

Величину реактивного опору в момент резонансу

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho \quad (10.6)$$

називають *хвильовим* або *характеристичним опором* контуру.

Важливий параметр резонансного контуру – його добротність Q , яка є відношенням одного з реактивних опорів при резонансі до активного опору контуру

$$Q = \frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{\omega_0 C r} = \frac{\rho}{r} = \frac{U_{0L}}{U} = \frac{U_{0C}}{U}. \quad (10.7)$$

Добротність показує, у скільки разів напруга на кожному з реактивних елементів в резонансному режимі перевищує прикладену вхідну напругу.

Добротність контурів, які використовують в радіотехніці, зазвичай, складає 50 – 300.

Залежності різних величин в контурі (струму, напруги на окремих ділянках, кута зсуву фаз між прикладеною напругою і струмом тощо) від частоти називаються *частотними характеристиками*. Розглянемо побудову цих характеристик при постійних амплітуді прикладеної напруги та параметрах контуру (r, L, C).

Діюче значення струму в колі виражається формулою (10.4).

Будемо змінювати частоту від нуля до нескінченності. При $\omega = 0$, опір індуктивності дорівнює нулю, а опір ємності дорівнює нескінченності, тому вхідний опір кола Z дорівнює нескінченності і струм дорівнює нулю. При $\omega \rightarrow \infty$, опір індуктивності є нескінченним, а ємності дорівнює нулю, тому струм знову дорівнює нулю. При $\omega = \omega_0$, як відмічалось раніше, струм приймає максимальне значення $I_0 = \frac{U}{r}$. Ця залежність, як і решта, показана на рис. 10.3.

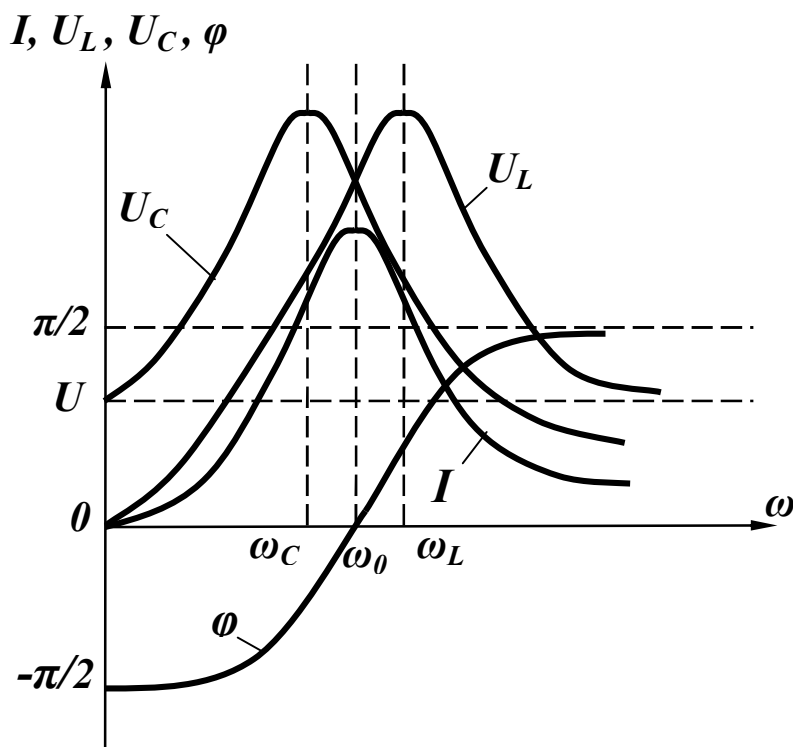


Рисунок 10.3

Напруга на ємності

$$U_C = \frac{U}{\omega C \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (10.8)$$

При $\omega = 0$ опір ємності є нескінченним, струм в колі відсутній і напруга на ємності дорівнює прикладеній напрузі. При $\omega \rightarrow \infty$ опір ємності дорівнює нулю і струму в колі немає, тому напруга на ємності також дорівнює нулю. В момент резонансу $\omega = \omega_0$, напруги на ємності та індуктивності однакові $U_{C_0} = U_{L_0}$, але вони не є максимальними.

Перетворимо (10.8)

$$U_C = \frac{U}{\sqrt{\omega^2 C^2 r^2 + (\omega^2 LC - 1)^2}}.$$

Визначимо, при якій частоті ω_C вираз, що знаходиться під знаком кореня, приймає мінімальне значення, взявши похідну за ω і прирівнявши її до нуля

$$2\omega_C C^2 r^2 + 2(\omega_C^2 LC - 1) \cdot 2\omega_C LC = 0.$$

Звідси

$$\omega_C = \sqrt{\frac{2L - r^2 C}{2L^2 C}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{r^2 C}{2L}}.$$

Враховуючи, що $\frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0$, $\frac{L}{r^2 C} = Q^2$, отримаємо

$$\omega_C = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}. \quad (10.9)$$

Якщо $Q > \frac{1}{\sqrt{2}}$, то напруга на ємності має максимум при частоті $\omega_C < \omega_0$, оскільки $\sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}} < 1$ (рис. 10.3). При цьому $U_{Cmax} = \frac{2Q^2 U}{\sqrt{4Q^2 - 1}}$.

Аналогічні міркування дають можливість показати, що при $\omega = 0$ $U_L = 0$, при $\omega \rightarrow \infty$ $U_L = U$, при $\omega = \omega_0$ $U_{L_0} = U_{C_0} = \frac{U}{r} \omega_0 L = UQ$.

Частота, на якій напруга на індуктивності є максимальною, більша за резонансну

$$\omega_L = \omega_0 \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{1}{2Q^2}}}, \quad (10.10)$$

а максимальне значення напруги на індуктивності дорівнює

$$U_{Lmax} = \frac{2Q^2 U}{\sqrt{4Q^2 - 1}} = U_{Cmax}.$$

Залежність кута зсуву фаз від частоти визначається з виразу

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r}, \quad (10.11)$$

який показує, що при $\omega = 0$ $\varphi = -\frac{\pi}{2}$, при $\omega = \omega_0$ $\varphi = 0$, при $\omega = \infty$ $\varphi = \frac{\pi}{2}$ (рис. 10.3).

Розглянемо тепер паралельний ідеальний контур (рис. 10.4).

Це коло дуальне послідовному контуру (рис. 10.1), тому всі результати попередніх підрозділів, які відносяться до напруг (U_L, U_C) та струму I в послідовному контурі, правильні для струмів (I_L, I_C) і напруги U в паралельному контурі.

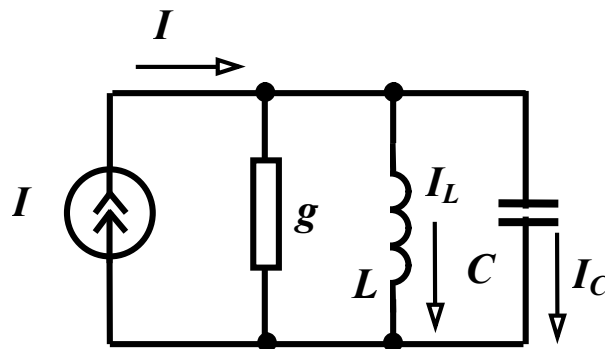


Рисунок 10.4

Частотні характеристики паралельного контуру при постійній амплітуді струму джерела струму показані на рис. 10.5.

Комплексна вхідна провідність кола $Y_{вх} = g - j\left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)$, звідси резонансна частота $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Якщо контур живиться від джерела напруги, то в режимі резонансу вхідний струм приймає мінімальне значення $I_0 = Ug$, а струми у вітках з реактивними елементами можуть в багато разів перевищувати вхідний струм, тому такий резонанс називається *резонансом струмів*.

Добротність паралельного контуру визначається як відношення струму в будь-якому реактивному елементі в резонансному режимі до струму всього кола

$$Q = \frac{I_{L0}}{I_0} = \frac{U}{\omega_0 L U g} = \frac{1}{\omega_0 L g} = \frac{\sqrt{C}}{g}.$$

Величина $\sqrt{\frac{C}{L}}$ має розмірність провідності і називається *хвильовою*

або *характеристичною провідністю* γ , тому $Q = \frac{\gamma}{g}$.

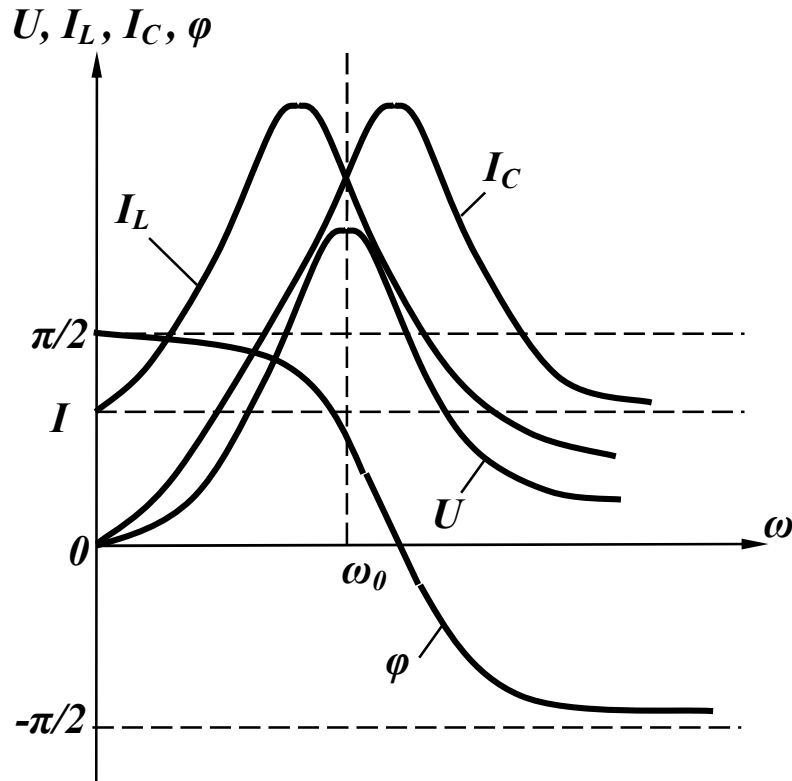
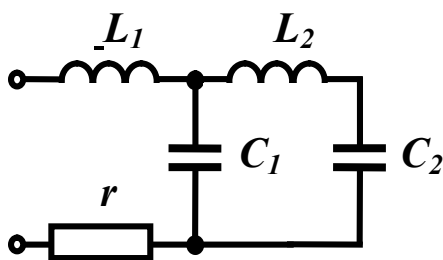


Рисунок 10.5

Розглянемо тепер розгалужене коло з декількома індуктивностями та ємностями, яке зображене на рис. 10.6.



Знайти резонансні частоти та побудувати частотні характеристики, якщо:
 $U = 100$ В, $L_1 = 30$ мГн, $L_2 = 60$ мГн,
 $r = 10$ Ом, $C_1 = 50$ мкФ, $C_2 = 80$ мкФ.

Рисунок 10.6

Запишемо вираз для вхідного опору кола і проведемо деякі перетворення:

$$Z_{\text{ex}} = r + j\omega L_1 + \frac{\left(-j\frac{1}{\omega C_1}\right)\left(j\omega L_2 - j\frac{1}{\omega C_2}\right)}{j\omega L_2 - j\frac{1}{\omega C_1} - j\frac{1}{\omega C_2}} =$$

$$= r + j \frac{\omega L_1 \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_1} - \frac{1}{\omega C_2}\right) - \frac{1}{\omega C_1} \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)}{\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_1} - \frac{1}{\omega C_2}}.$$

Знайдемо значення кутової резонансної частоти з виразів:

- для резонансу напруг

$$\omega L_1 \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_1} - \frac{1}{\omega C_2}\right) - \frac{1}{\omega C_1} \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right) = 0; \quad (10.12)$$

- для резонансу струмів

$$\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_1} - \frac{1}{\omega C_2} = 0. \quad (10.13)$$

Розрахунки проведемо в середовищі MathCAD.

$$r := 10 \quad L1 := 30 \cdot 10^{-3} \quad L2 := 60 \cdot 10^{-3}$$

$$C1 := 50 \cdot 10^{-6} \quad C2 := 80 \cdot 10^{-6} \quad U := 100$$

$$\omega \cdot L1 \cdot \left(\omega \cdot L2 + \frac{-1}{\omega \cdot C1} + \frac{-1}{\omega \cdot C2}\right) + \frac{-1 \cdot \left(\omega \cdot L2 + \frac{-1}{\omega \cdot C2}\right)}{\omega \cdot C1} \text{ solve, } \omega \rightarrow \begin{bmatrix} \frac{250}{3} \cdot (87 + 3 \cdot \sqrt{521})^{\frac{1}{2}} \\ -\frac{250}{3} \cdot (87 + 3 \cdot \sqrt{521})^{\frac{1}{2}} \\ \frac{250}{3} \cdot (87 - 3 \cdot \sqrt{521})^{\frac{1}{2}} \\ -\frac{250}{3} \cdot (87 - 3 \cdot \sqrt{521})^{\frac{1}{2}} \end{bmatrix}$$

Очевидно, що з наведеного вектора шуканих кутових частот додатними є перший та третій його елементи, тому

$$\omega_{01} := \frac{250}{3} \cdot (87 + 3 \cdot \sqrt{521})^{\frac{1}{2}} \quad \omega_{02} := \frac{250}{3} \cdot (87 - 3 \cdot \sqrt{521})^{\frac{1}{2}} \quad \omega_{01} = 1.039 \times 10^3$$

$$f_{01} := \frac{\omega_{01}}{2 \cdot \pi} \quad f_{01} = 165.375 \quad \omega_{02} = 358.66 \quad f_{02} := \frac{\omega_{02}}{2 \cdot \pi} \quad f_{02} = 57.083$$

$$\omega \cdot L_2 + \frac{-1}{\omega \cdot C_1} + \frac{-1}{\omega \cdot C_2} \text{ solve, } \omega \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{250}{3} \cdot \sqrt{78} \\ -\frac{250}{3} \cdot \sqrt{78} \end{pmatrix}$$

Для цього випадку додатним є перший елемент вектора кутових частот, отже

$$\omega_{03} := \frac{250}{3} \cdot \sqrt{78} \quad \omega_{03} = 735.98 \quad f_{03} := \frac{\omega_{03}}{2 \cdot \pi} \quad f_{03} = 117.135$$

Розрахунки показують, що в цьому колі мають місце три резонансні частоти: $f_{01} = 165,375$ Гц – резонанс напруг; $f_{03} = 117,135$ Гц – резонанс струмів; $f_{02} = 57,083$ Гц – резонанс напруг.

Частотна характеристика вхідного струму зображена на рис. 10.7.

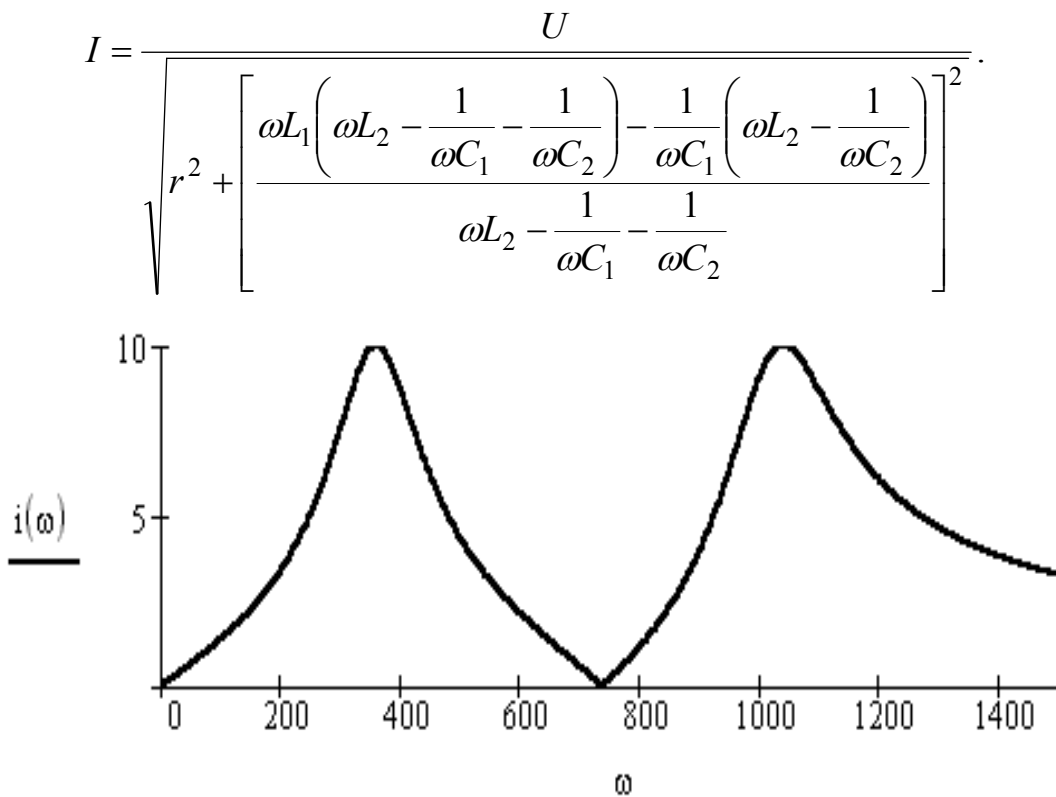


Рисунок 10.7

Порядок виконання роботи

1. Зібрати коло згідно рис. 10.8 (в нашому випадку воно відповідає схемі, зображеній на рис. 10.6). Параметри вибираються за таблицею 10.1.

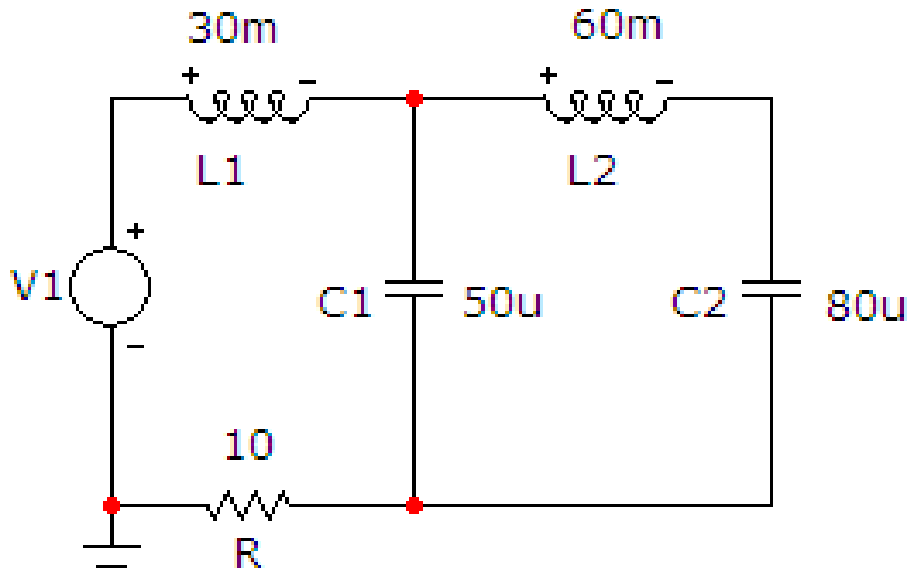


Рисунок 10.8

Таблиця 10.1

Вар.	U_m, B	$R, Ом$	$C_1, мкФ$	$L_1, мГн$	$C_2, мкФ$	$L_2, мГн$
1	120	30	120	50	100	40
2	80	20	150	75	80	80
3	60	16	100	80	60	60
4	90	18	160	45	75	100

2. На верхній панелі головного вікна відкриваємо опцію «Анализ» і вибираємо в ній рядок «Частотный анализ (АС)». Після цього на екрані з'являється вікно (рис. 10.9), в якому слід задати:

- діапазон частот (для параметрів, що наведені у вищезазначеному прикладі, прийнято 500, 5);
- границя темпу змін розрахункових точок (віконце «Максимальное изменение %») – 1%;
- діапазони виведення графіку вхідного струму.

Далі натискається кнопка «Запустить». Графік зображений на рис. 10.10. Його слід роздрукувати.

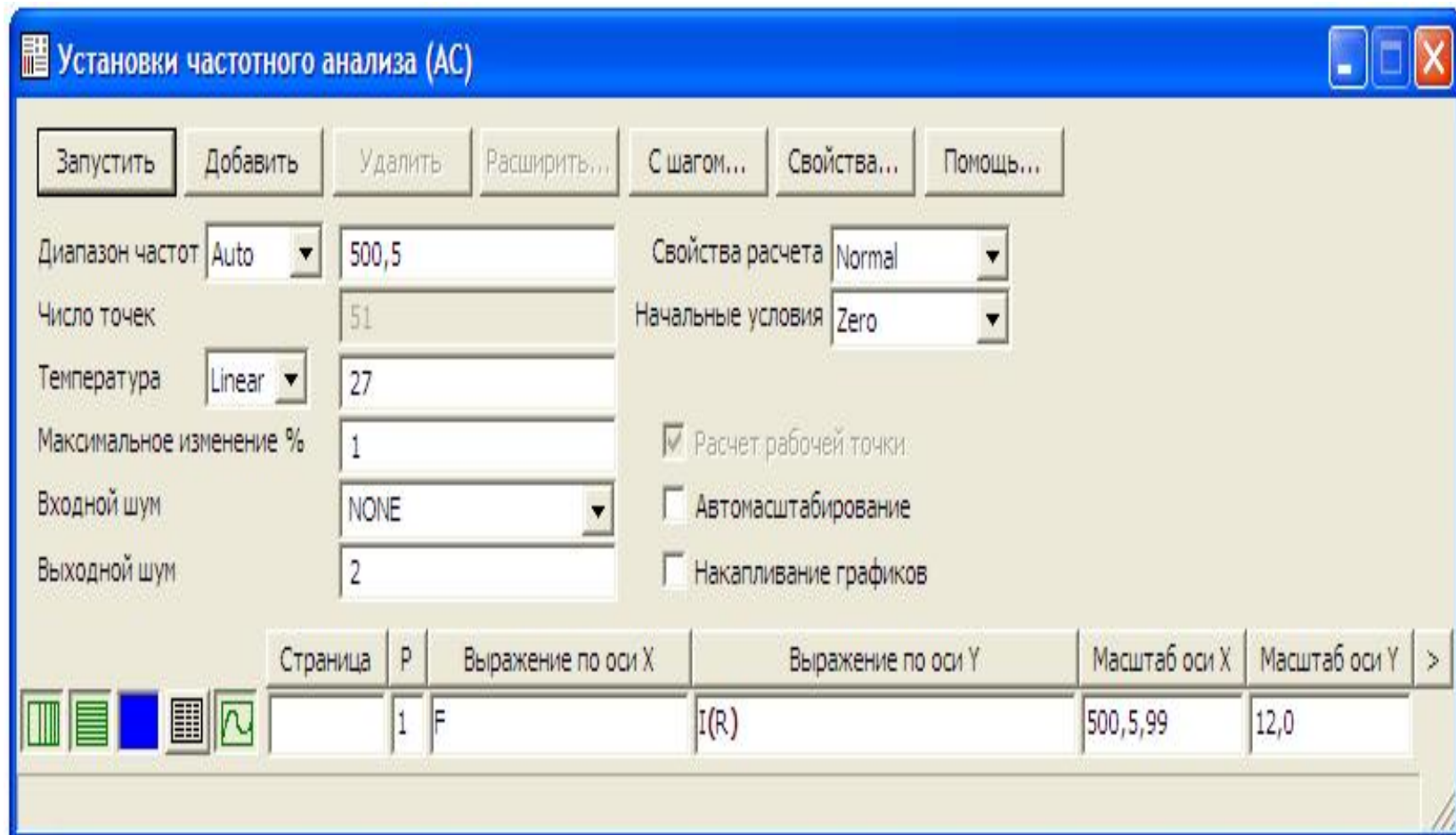


Рисунок. 10.9

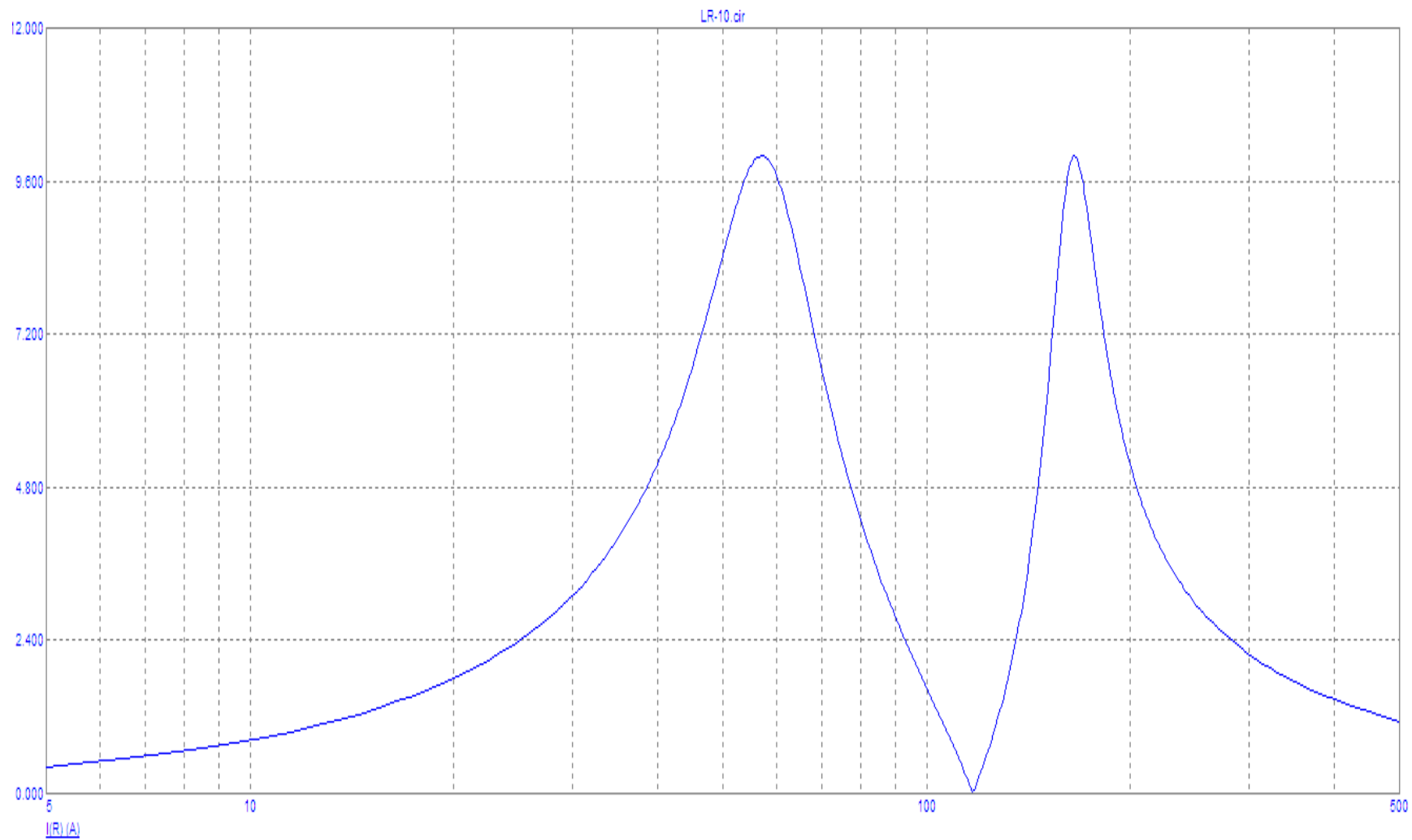


Рисунок. 10.10

За допомогою графіку можна визначити всі резонансні частоти, для чого курсор підводиться до кожної екстремальної точки. При цьому на екрані з'являються пари координат, перша з яких і є резонансною частотою. Точки локального максимуму відповідають резонансу напруг, точки локального мінімуму відповідають – резонансу струмів.

Обробка результатів дослідження

1. Провести розрахунок резонансних частот та частотної характеристики вхідного струму в середовищі MathCAD. Побудувати графік.
2. Порівняти розраховані та змодельовані графіки, а також резонансні частоти.

Контрольні питання

1. Який режим роботи кола називають резонансним?
2. Як дослідним шляхом досягти резонансу в колі C послідовно з'єднаними котушкою індуктивності і конденсатором?
3. Від чого залежить добротність контуру?
4. Від чого залежить резонансна частота контуру?
5. Чим відрізняється резонанс струмів від резонансу напруг?

Лабораторна робота № 11тс

Дослідження лінії з розподіленими параметрами

Мета роботи: дослідити режими роботи лінії з розподіленими параметрами на синусоїдному струмі при активно-індуктивному та активно-ємнісному навантаженні.

Короткі теоретичні відомості

Під час проходження електричного струму вздовж всього кола виникають електричне і магнітне поля та незворотні перетворення електромагнітної енергії в тепло. Розподіл інтенсивності прояву цих явищ вздовж електричного кола є переважно *нерівномірним*.

Так, на одних ділянках електричного кола, наприклад, в конденсаторах, домінують фізичні явища, що пов'язані зі зміною в часі електричного поля і накопиченої в ньому енергії, в індуктивних котушках, переважає магнітне поле, а в резистивних елементах на перший план виходять процеси незворотного перетворення енергії електричного струму.

В реальних електричних колах проводять ідеалізацію конкретних його ділянок, тобто нехтують тими фізичними процесами, що є несуттєвими та маловпливовими, наприклад:

- ділянки, де в основному зосереджене електричне поле, на схемах задають виключно електричними ємностями C ;

- ділянки, де переважає магнітне поле, подають індуктивними елементами L ;

- ділянки, на яких суттєвого значення набуває перетворення електромагнітної енергії в інші види : теплову, механічну, хімічну тощо, зображають активними опорами r чи провідностями g .

Такі ідеалізовані кола називають електричними *колами із зосередженими параметрами*.

Подібної ідеалізації здебільшого цілком достатньо для проведення доволі точних електротехнічних розрахунків і аналізу тих процесів, що спостерігаються в реальних електричних колах. Більш того, задля кращого розуміння цих процесів і спрощення їх аналізу ця ідеалізація є вкрай необхідною.

Однак на практиці часто постають задачі розрахунку електричних кіл, де чітко виділити і зосередити окремі ділянки локалізації електричного й магнітного полів чи ділянки незворотного розсіювання електромагнітної енергії або взагалі немає можливості, або такі дії призводять до значного спотворення картини прояву існуючих електромагнітних явищ, оскільки ті є неперервно розподіленими вздовж всього електричного кола, їх прояв є відчутним та впливовим скрізь і тому нехтувати жодними з них не можна.

Такі електричні кола називають *колами із розподіленими параметрами*.

До них, відносяться лінії телеграфного й телефонного зв'язку, антени та фідери радіо- і телепередавачів та приймачів, лінії електропередач тощо.

Вивчення електромагнітних процесів в колах з розподіленими параметрами проведемо на прикладі *двопровідної лінії*.

Такій лінії притаманні неперервно розподілені вздовж неї активний опір самих проводів, їх індуктивність, електрична ємність та провідність середовища між ними.

Для спрощення аналізу вважатимемо, що неперервний розподіл параметрів вздовж лінії є *рівномірним*. Таку лінію, в якій її електричні параметри розподілені рівномірно, називають *однорідною*.

Характеризують однорідну лінію за допомогою *первинних* або *погонних параметрів*, тобто параметрів, віднесених до одиниці довжини двопровідної лінії.

До первинних параметрів належать:

- активний опір r_0 [Ом/м] двох проводів лінії;
- індуктивність L_0 [Гн/м] обох проводів;
- результуюча ємність C_0 [Ф/м] між проводами;
- активна провідність g_0 [См/м] між ними.

Розподілений характер параметрів призводить до того, що миттєві напруги між проводами і струми в них зазнають змін вздовж всієї лінії і є неперервними функціями не тільки часової координати t , але водночас і просторової координати x – відстані від одного з кінців лінії:

$$u = u(x, t), \quad i = i(x, t).$$

Тому дослідження процесів в лінії розпочнемо із визначення значень миттєвих напруги та струму в будь-якій точці лінії x в будь-який момент часу t .

На рис. 11.1 схематично показано однорідну двопровідну лінію довжиною l .

Затискачі джерела живлення 1 - 1' назвемо початком довгої лінії, а затискачі навантаження 2 - 2' – її кінцем.

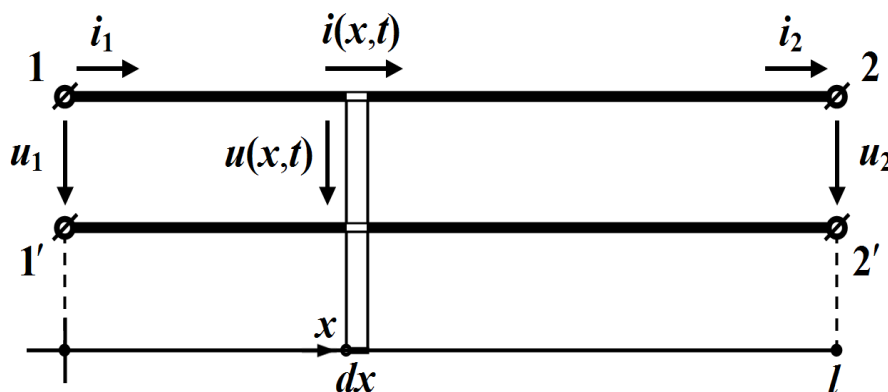


Рисунок 11.1

Отже, наразі виділимо на деякій відстані x від початку лінії елементарну нескінченно малу ділянку двопровідної лінії довжиною dx (рис. 11.1).

Подамо цю елементарну ділянку як частину електричного кола, що має *зосереджені* параметри, тобто:

- активний опір $r_0 dx$;
- індуктивність $L_0 dx$;
- активну провідність $g_0 dx$;
- ємність $C_0 dx$,

як це і показано на рис. 11.2.

Враховуючи те, що струм і напруга, як вже зазначалося, є функціями як часу t , так і відстані x , то швидкості зміни струму вздовж лінії $\frac{\partial i}{\partial x}$ і напруги $\frac{\partial u}{\partial x}$ визначаються через частинні похідні. Якщо позначити струм і напругу на вході елементарної ділянки лінії через i та u , то на її виході зі зміною відстані на dx струм і напруга отримають прирости – відповідно $\frac{\partial i}{\partial x} dx$ та $\frac{\partial u}{\partial x} dx$ (рис. 11.2).

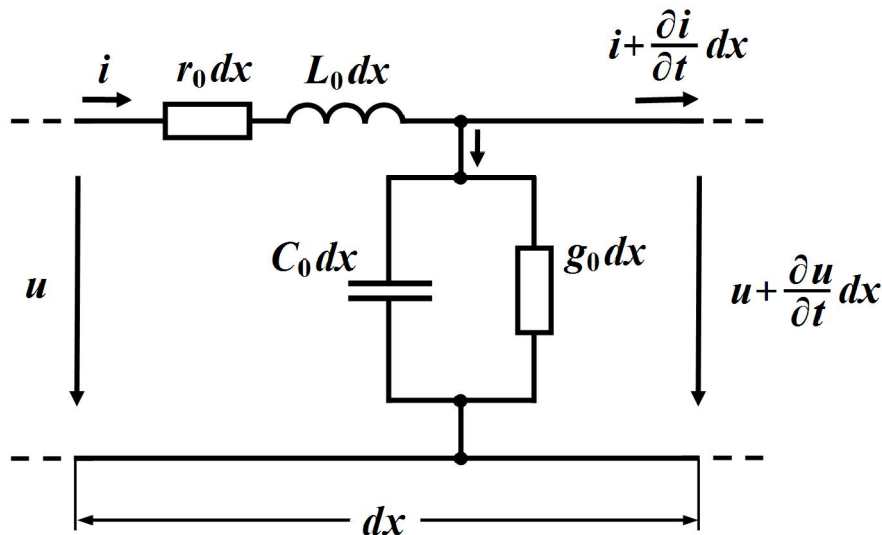


Рисунок 11.2

Зв'язок між вхідною та вихідною напругами визначимо з другого закону Кірхгофа

$$u - \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) = r_0 dx i + L_0 dx \frac{\partial i}{\partial t},$$

а за першим законом Кірхгофа одержимо співвідношення між вхідним і вихідним струмами

$$i - \left(i + \frac{\partial i}{\partial t} dx \right) = g_0 dx \left(u + \frac{\partial u}{\partial t} dx \right) + C_0 dx \frac{\partial \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right)}{\partial t}.$$

В другому рівнянні знехтуємо складовими другого порядку малості, тобто такими, що містять величини $(dx)^2$. Обидва ж рівняння скоротимо на dx .

Внаслідок перетворень отримаємо систему з двох диференціальних рівнянь в частинних похідних, які описують електричні процеси, що відбуваються в однорідній двопровідній лінії

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= r_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= g_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (11.1)$$

Ці рівняння називають *телеграфними рівняннями*.

Спільне розв'язування отриманих диференціальних рівнянь за заданих початкових та граничних умов дозволяє в кожному конкретному випадку визначити розподіл струму $i = i(x, t)$ і напруги $u = u(x, t)$ в однорідній лінії як в усталеному, так і в перехідному режимах.

Під час живлення кола з розподіленими параметрами від джерела синусоїдної напруги, струм та напруга в усталеному режимі в довільній точці лінії також змінюються за синусоїдним законом, що дозволяє застосовувати символічний метод. Як відомо, при цьому миттєвим синусоїдним значенням струмів та напруг у відповідність ставляться їх комплексні величини,

$$\begin{aligned} i &= I_m \sin(\omega t + \psi_i) \Leftrightarrow \underline{I} = I e^{j\psi_i}, \\ u &= U_m \sin(\omega t + \psi_u) \Leftrightarrow \underline{U} = U e^{j\psi_u}, \end{aligned}$$

де $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$, $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$, а операціям диференціювання синусоїдальних функцій – операції множення комплексного числа на $j\omega$.

Застосовуючи символічний метод, рівняння (11.1) можна записати у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{d\underline{U}}{dx} &= r_0 \underline{I} + j\omega L_0 \underline{I} \\ -\frac{d\underline{I}}{dx} &= g_0 \underline{U} + j\omega C_0 \underline{U} \end{aligned} \right\} \quad (11.2)$$

або

$$\left. \begin{aligned} -\frac{d\underline{U}}{dx} &= \underline{Z}_0 \underline{I} \\ -\frac{d\underline{I}}{dx} &= \underline{Y}_0 \underline{U} \end{aligned} \right\}, \quad (11.3)$$

де $\underline{Z}_0 = r_0 + j\omega L_0$ називають *повздожнім комплексним опором лінії на одиницю її довжини*, а $\underline{Y}_0 = g_0 + j\omega C_0$ - *поперечною комплексною провідністю лінії на одиницю довжини*.

В цих диференціальних рівняннях комплексні значення \underline{U} та \underline{I} не є функціями часу t , тому частинні похідні замінюються на звичайні.

Систему (11.3) з двох рівнянь із двома невідомими зведемо до одного рівняння. Для цього ще раз продиференціюємо перше рівняння цієї системи

$$-\frac{d^2 \underline{U}}{dx^2} = \underline{Z}_0 \frac{d \underline{I}}{dx}$$

і в отриманий вираз з другого рівняння системи (11.2) підставимо похідну $\frac{d \underline{I}}{dx}$. Тоді

$$\frac{d^2 \underline{U}}{dx^2} = \underline{Z}_0 \underline{Y}_0 \underline{U} \quad \text{або} \quad \frac{d^2 \underline{U}}{dx^2} - \gamma^2 \underline{U} = 0, \quad (11.4)$$

де

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Y}_0} = \sqrt{(r_0 + j\omega L_0)(g_0 + j\omega C_0)} = \alpha + j\beta. \quad (11.5)$$

Рівняння (11.3) являє собою лінійне однорідне диференціальне рівняння другого порядку, загальне рішення якого записують як

$$\underline{U} = \underline{A}_1 e^{-\underline{\gamma}x} + \underline{A}_2 e^{\underline{\gamma}x}, \quad (11.6)$$

де \underline{U} – комплексне діюче значення напруги в лінії на відстані x від її по-

чатку; $-\underline{\gamma}$ та $\underline{\gamma}$ – корені характеристичного рівняння $p^2 - \underline{\gamma}^2 = 0$; \underline{A}_1 і \underline{A}_2 – сталі інтегрування.

Комплексне значення струму в лінії на відстані x від її початку можна визначити з першого рівняння системи (11.3), підставивши туди вираз (11.6)

$$\underline{I} = -\frac{1}{\underline{Z}_0} \frac{d\underline{U}}{dx} = -\frac{1}{\underline{Z}_0} \left(-\underline{\gamma} \underline{A}_1 e^{-\underline{\gamma}x} + \underline{\gamma} \underline{A}_2 e^{\underline{\gamma}x} \right),$$

а з врахуванням рівняння (11.4) маємо

$$\underline{I} = \frac{\underline{\gamma}}{\underline{Z}_0} \left(\underline{A}_1 e^{-\underline{\gamma}x} - \underline{A}_2 e^{\underline{\gamma}x} \right) = \sqrt{\frac{\underline{Y}_0}{\underline{Z}_0}} \left(\underline{A}_1 e^{-\underline{\gamma}x} - \underline{A}_2 e^{\underline{\gamma}x} \right).$$

Комплексний вираз $\sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}}$ має розмірність опору, тому введемо позначення

$$\underline{Z}_C = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}} = \sqrt{\frac{r_0 + j\omega L_0}{g_0 + j\omega C_0}}, \quad (11.7)$$

де \underline{Z}_C назвемо *хвильовим опором* лінії.

Перепишемо вираз для струму у вигляді

$$\underline{I} = \frac{\underline{A}_1}{\underline{Z}_C} e^{-\underline{\gamma}x} - \frac{\underline{A}_2}{\underline{Z}_C} e^{\underline{\gamma}x}. \quad (11.8)$$

Фізичний зміст \underline{Z}_C і коефіцієнта $\underline{\gamma}$ з'ясуємо дещо пізніше.

Сталі інтегрування \underline{A}_1 і \underline{A}_2 визначають з граничних умов і роблять це таким чином.

Якщо на початку лінії $x = 0$ відомими є напруга \underline{U}_1 і струм \underline{I}_1

$$\underline{U}(0) = \underline{U}_1, \quad \underline{I}(0) = \underline{I}_1,$$

то рівняння (11.6) й (11.8) набувають вигляду:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{A}_1 + \underline{A}_2 \\ \underline{I}_1 &= \frac{\underline{A}_1}{\underline{Z}_C} - \frac{\underline{A}_2}{\underline{Z}_C} \end{aligned} \right\}.$$

Звідки, розв'язавши цю систему відносно \underline{A}_1 та \underline{A}_2 , визначаємо сталі інтегрування

$$\underline{A}_1 = \frac{1}{2}(\underline{U}_1 + \underline{Z}_C \underline{I}_1), \quad \underline{A}_2 = \frac{1}{2}(\underline{U}_1 - \underline{Z}_C \underline{I}_1). \quad (11.9)$$

Таким чином, розв'язками системи (11.3) за заданих граничних умов будуть функції

$$\underline{U} = \frac{1}{2}(\underline{U}_1 + \underline{Z}_C \underline{I}_1) e^{-\gamma x} + \frac{1}{2}(\underline{U}_1 - \underline{Z}_C \underline{I}_1) e^{\gamma x}, \quad (11.10)$$

$$\underline{I} = \frac{1}{2\underline{Z}_C}(\underline{U}_1 + \underline{Z}_C \underline{I}_1) e^{-\gamma x} - \frac{1}{2\underline{Z}_C}(\underline{U}_1 - \underline{Z}_C \underline{I}_1) e^{\gamma x}. \quad (11.11)$$

Розглянемо приклад розрахунку однорідної довга лінія (рис. 11.3).

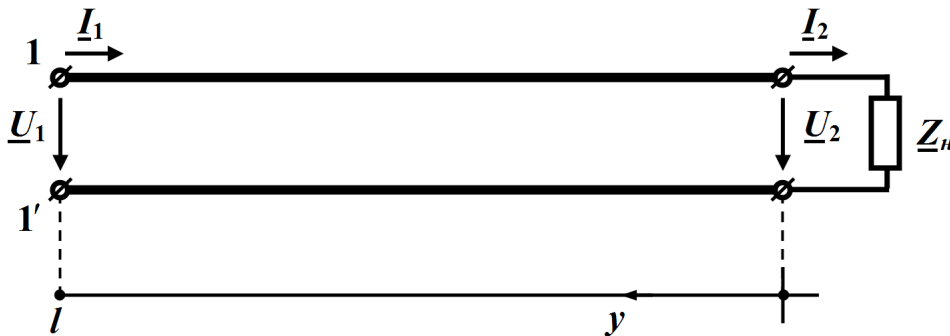


Рисунок 11.3

Первинні параметри лінії: $r_0 = 10 \frac{\text{Ом}}{\text{м}}$, $L_0 = 4.3 \frac{\text{мкГн}}{\text{м}}$, $C_0 = 2.9 \frac{\text{нФ}}{\text{м}}$ (враховуючи особливості MicroCap, приймаємо $g_0 = 0$). Довжина лінії $l = 200$ м, частота $f = 3$ МГц. Навантаження містить в собі резистор $r = 106.123$ Ом і індуктивність $L = 5.63$ мкГн. Напруга навантаження $U_2 = 43$ В. Необхідно визначити вхідну напругу \underline{U}_1 і вхідний струм \underline{I}_1 .

Знайдемо спочатку комплексний опір навантаження $Z_2 = r + j\omega L$, питомий комплексний повздовжний опір лінії $\underline{Z}_0 = r_0 + j\omega L_0$ та її питому комплексну поперечну провідність $\underline{Y}_0 = g_0 \underline{U} + j\omega C_0$.

Далі визначимо вторинні параметри та деякі інші хвильові параметри заданої лінії: хвильовий опір $\underline{Z}_C = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}}$; коефіцієнт поширення

$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Y}_0} = \alpha + j\beta$; коефіцієнт затухання α та фазовий коефіцієнт β ;

фазову швидкість $v = \frac{\omega}{\beta}$; довжину хвилі $\lambda = \frac{2\pi}{\beta}$.

На підставі закону Ома визначимо комплекс діючого значення струму \underline{I}_2 в навантаженні $\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_2}$, що дозволить провести за формулами $\underline{B}_1 = \frac{1}{2}(\underline{U}_2 + \underline{Z}_C \underline{I}_2)$, $\underline{B}_2 = \frac{1}{2}(\underline{U}_2 - \underline{Z}_C \underline{I}_2)$ розрахунок сталих інтегрування $\underline{B}_1 = B_1 e^{j\psi_1}$ (для прямої хвилі) та $\underline{B}_2 = B_2 e^{j\psi_2}$ (для зворотної хвилі) через вихідні напругу \underline{U}_2 та струм \underline{I}_2 на навантаженні.

Вхідну напругу \underline{U}_1 і вхідний струм \underline{I}_1 визначимо за формулами

$$\underline{U}_1 = \underline{B}_1 e^{\gamma l} + \underline{B}_2 e^{-\gamma l}, \quad \underline{I}_1 = \frac{\underline{B}_1}{\underline{Z}_c} e^{\gamma l} - \frac{\underline{B}_2}{\underline{Z}_c} e^{-\gamma l}.$$

Розрахунки проведемо в середовищі MathCAD.

$$L := 5.63 \cdot 10^{-6} \quad f := 3 \cdot 10^6 \quad \omega := 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$xL := \omega \cdot L \quad xL = 106.123 \quad r := xL$$

$$Z2 := r + i \cdot xL \quad Z2 = 106.123 + 106.123i$$

$$|Z2| = 150.081 \quad \arg(Z2) = 45 \text{ deg}$$

$$U2 := 43 \quad I := 200 \quad g0 := 0$$

$$r0 := 2.7 \quad L0 := 4.3 \cdot 10^{-6} \quad C0 := 2.9 \cdot 10^{-12}$$

$$Z0 := r0 + i \cdot \omega \cdot L0 \quad Y0 := g0 + i \cdot \omega \cdot C0$$

$$Z0 = 2.7 + 81.053i \quad Y0 = 5.466i \times 10^{-5}$$

$$Zc := \sqrt{\frac{Z0}{Y0}} \quad \gamma := \sqrt{Z0 \cdot Y0}$$

$$\alpha := \operatorname{Re}(\gamma) \quad \beta := \operatorname{Im}(\gamma) \quad v := \frac{\omega}{\beta} \quad \lambda := \frac{2 \cdot \pi}{\beta}$$

$$Zc = 1.218 \times 10^3 - 20.279i \quad \gamma = 1.109 \times 10^{-3} + 0.067i$$

$$\alpha = 1.109 \times 10^{-3} \quad \beta = 0.067 \quad v = 2.831 \times 10^8 \quad \lambda = 94.381$$

$$I2 := \frac{U2}{Z2} \quad |I2| = 0.287 \quad \arg(I2) = -45 \text{ deg}$$

$$B1 := \frac{U2 + Zc \cdot I2}{2} \quad |B1| = 190.066 \quad \arg(B1) = -41.29 \text{ deg}$$

$$B2 := \frac{U2 - Zc \cdot I2}{2} \quad |B2| = 160.289 \quad \arg(B2) = 128.513 \text{ deg}$$

$$U(y) := B1 \cdot e^{\gamma \cdot y} + B2 \cdot e^{-\gamma \cdot y} \quad I(y) := \frac{B1}{Zc} \cdot e^{\gamma \cdot y} - \frac{B2}{Zc} \cdot e^{-\gamma \cdot y}$$

$$U1 := U(l) \quad |U1| = 281.182 \quad \arg(U1) = 28.591 \text{ deg}$$

$$I1 := I(l) \quad |I1| = 0.212 \quad \arg(I1) = -27.167 \text{ deg}$$

Порядок виконання роботи

1. Зібрати за вказівкою викладача одне з двох кіл:

- з активно-індуктивним навантаженням (рис. 11.4), яке відповідає вищенаведеному прикладу (рис. 11.3);
- з активно-ємнісним навантаженням (рис. 11.5).

Параметри кіл вибираються з табл. 11.1 (для кола, зображеного на рис. 11.4) або табл. 11.2 (для кола, зображеного на рис. 11.5).

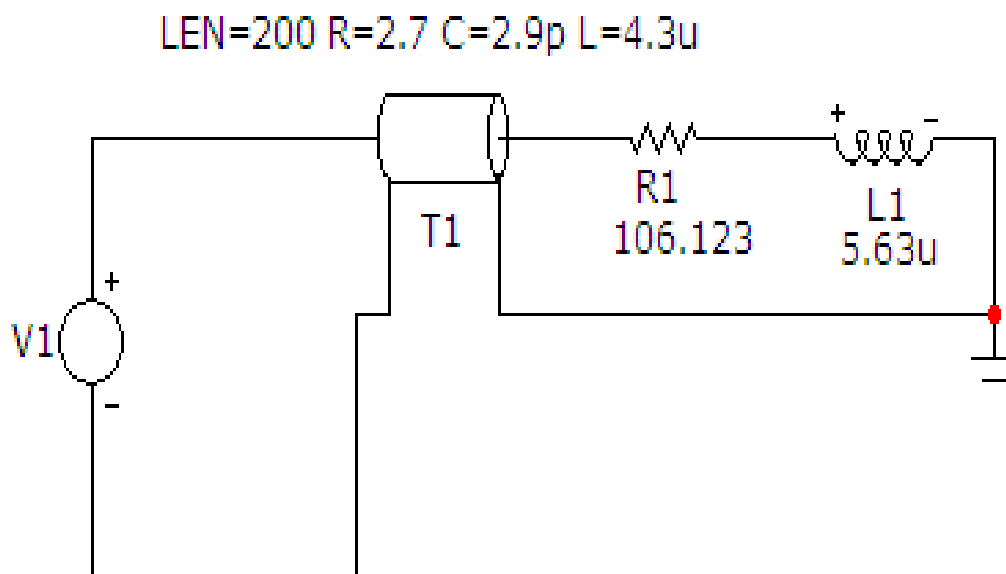


Рисунок. 11.4

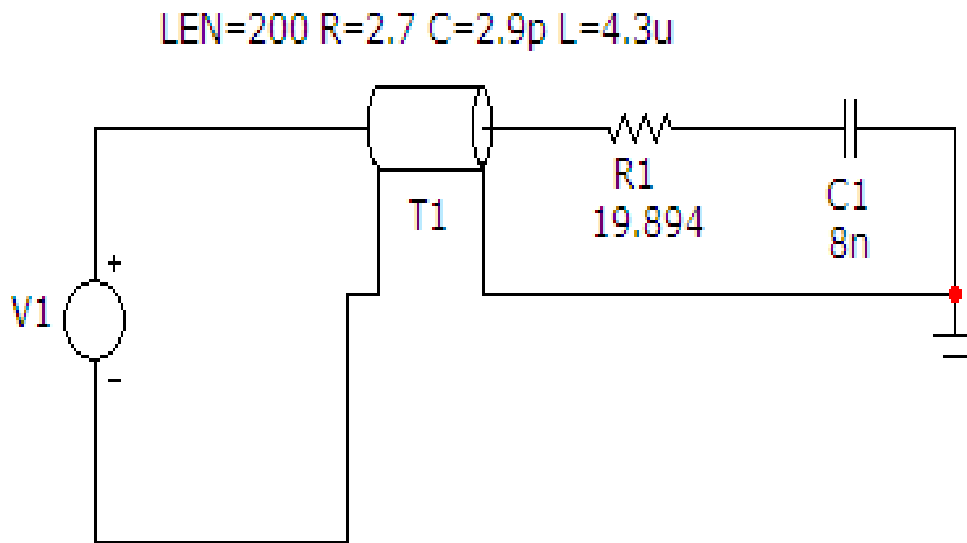


Рисунок. 11.5

Таблиця 11.1

<i>Вар.</i>	U_m , В	f , МГц	R_0 , Ом/м	L_0 , мкГн/м	C_0 , пФ/м	$R_{ш}$, Ом	$L_{ш}$, мкГн
1	220	2	3	4	2	50	5
2	240	1	2	3	4	80	8
3	180	1.5	2.5	2	3	60	6
4	260	2.5	1.5	2.5	3.5	40	7.5

Таблиця 11.2

<i>Вар.</i>	U_m , В	f , МГц	R_0 , Ом/м	L_0 , мкГн/м	C_0 , пФ/м	$R_{ш}$, Ом	$C_{ш}$, нФ
1	220	2	3	4	2	10	6
2	240	1	2	3	4	12	8
3	180	1.5	2.5	2	3	15	10
4	260	2.5	1.5	2.5	3.5	8	4

Компонент «Довга лінія» можна викликати на екран опцією «Компоненти / Analog Primitives / Passive Components / TLine». Його атрибути задаються у вікні (рис. 11.6), яке з'являється при перенесенні компонента на робоче поле програми.

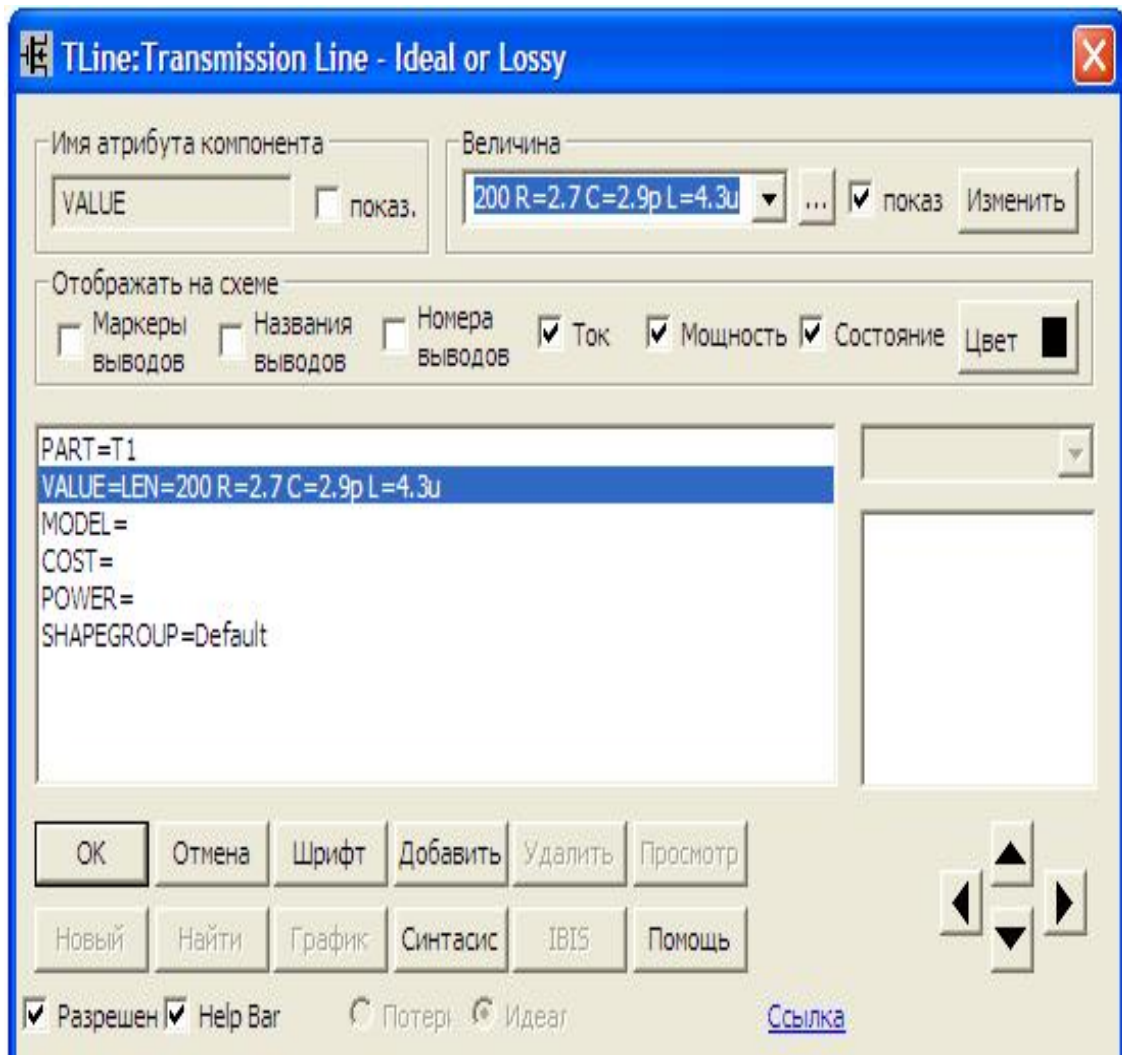


Рисунок. 11.6

В цьому вікні необхідно задати такі атрибути:

- *PART* – ім'я довгої лінії;
- *VALUE* – параметри довгої лінії у форматі: «LEN=200 R= R_0 C= C_0 L= L_0 » (R_0 , C_0 , L_0 береться з таблиць).

Параметри джерела синусоїдної напруги задаються у вікні (рис. 11.7), яке з'являється при перенесенні компонента на робоче поле програми.

В цьому вікні слід вибрати вкладинку *Sin* і задати такі параметри:

- частоту (в нашому випадку це 3 МГц);
- амплітуду (в нашому випадку це 281.182 В, тобто відповідає вхідній напрузі з вищенаведеного прикладу);
- початкову фазу (в нашому випадку це 28.59° , тобто відповідає початковій фазі з вищенаведеного прикладу).

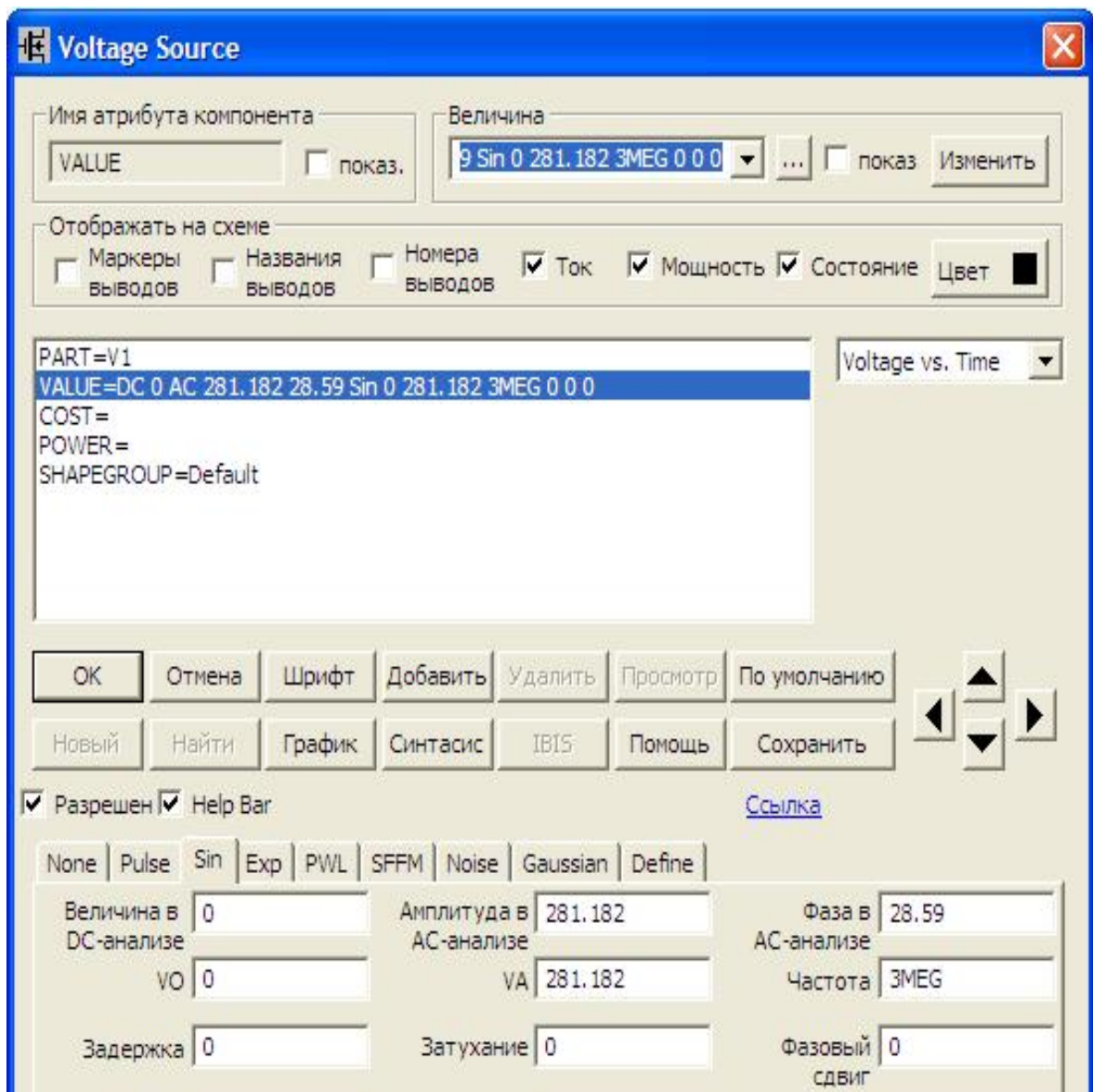


Рисунок. 11.7

2. На верхній панелі головного вікна відкриваємо опцію «Анализ» і вибираємо в ній рядок «Динамический частотный анализ (Dynamic AC)». Після цього на екрані з'являється вікно (рис. 11.8), в якому слід задати такі параметри:

- частоту, для якої проводиться розрахунок (згідно табл. 11.1 або 11.2);
- параметри, які ми бажаємо вивести на екран (струми у вітках та потенціали вузлів);
- форму виведення параметрів (амплітуда та початкова фаза).

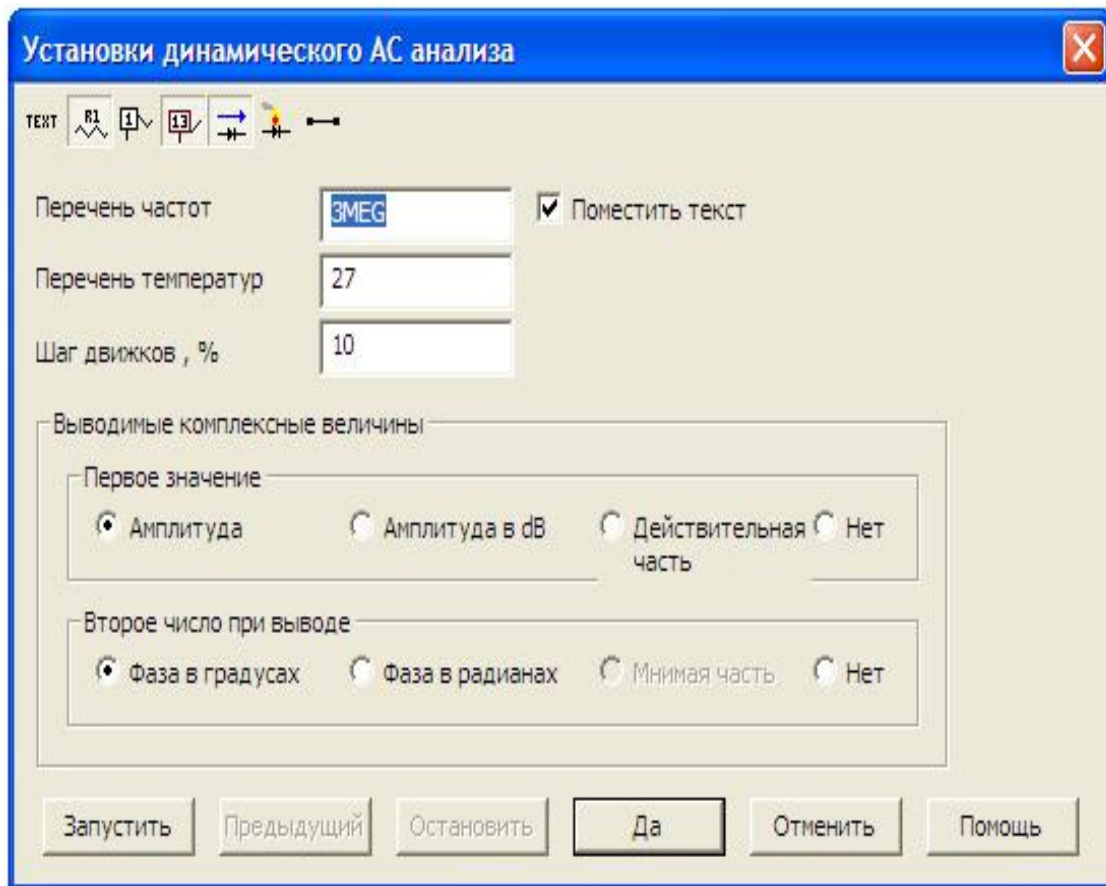


Рисунок. 11.8

В результате схема примет вид, изображений на рис. 11.9.

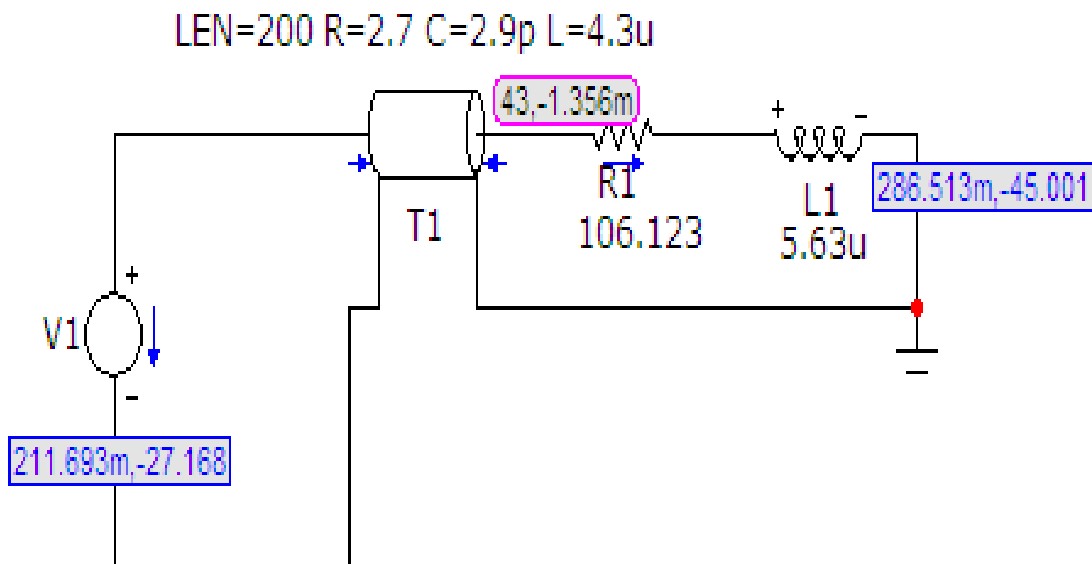


Рисунок. 11.9

Легко помітити, що результати моделювання збігаються з результатами розрахунку в середовищі MathCAD вищенаведеного прикладу.

Обробка результатів дослідження

1. Згідно з алгоритмом розрахунку, який наведений в прикладі, провести розрахунок \underline{U}_1 та \underline{I}_1 , підставивши в алгоритм значення \underline{U}_2 , отримане за результатами моделювання.

2. Порівняти результати розрахунків з результатами моделювання.

Контрольні питання

1. Які кола називаються колами з розподіленими параметрами?
2. Які величини відносяться до первинних параметрів довгих ліній? Який фізичний зміст цих параметрів?
3. Наведіть рівняння, що описують процеси в колах з розподіленими параметрами.
4. Які величини відносяться до вторинних параметрів довгих ліній? Який фізичний зміст цих параметрів?
5. Наведіть зв'язок між первинними та вторинними параметрами.
6. Що являють собою падаючі та відбиті хвилі напруги та струму?
7. В якому випадку в лінії відсутні відбиті хвилі?
6. Які лінії можна вважати лініями без втрат?

Лабораторна робота №12мс

Дослідження характеристик біполярних транзисторів

Мета роботи: засвоїти на практиці методику отримання статичних характеристик біполярного транзистора. Навчитись визначати його коефіцієнти передачі.

Короткі теоретичні відомості

Біполярним транзистором називають напівпровідниковий прилад з двома *p-n* переходами, який може використовуватись як підсилюючий, генеруючий або перемикаючий елемент електричного кола. Його структурна та принципова схеми зображені на рис.12.1. Кожен з його напівпровідникових прошарків має свою назву: емітер, база, колектор. Від кожного з них відводиться свій провідник з тією ж назвою.

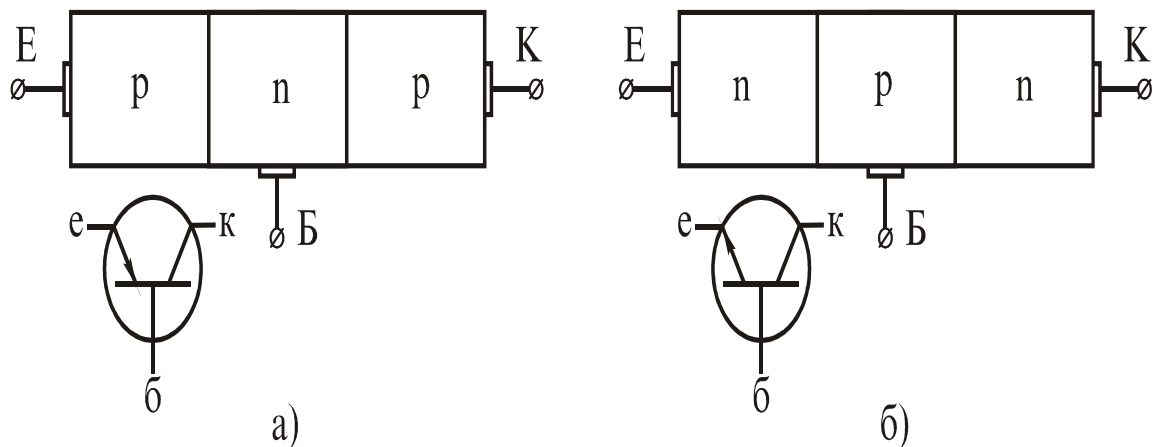


Рисунок 12.1

Наявність трьох прошарків створює два $p-n$ переходи, від стану яких залежить режим роботи транзистора. Таких режимів три — активний, насичення та відсічки. В режимі насичення обидва $p-n$ переходи зміщені в прямому напрямку. Опір транзистора найменший і в його колі протікає струм, який обмежений тільки опором навантаження. В режимі відсічки обидва $p-n$ переходи зміщені у зворотному напрямку, опір транзистора максимальний і через нього протікає тільки незначний струм утікання. Режимми насичення та відсічки характерні для транзистора тоді, коли його використовують як перемикач в електричному колі.

Найбільш поширеним є активний режим, в якому перехід між емітером та базою зміщений в прямому напрямку, а перехід між базою та колектором — в зворотному. В такому режимі транзистор можна використовувати як генератор або як підсилювач електричних коливань.

Кожний транзистор має коло керування та коло навантаження. В залежності від того, який з його трьох електродів є спільним для обох кіл, розрізняють три схеми вмикання транзистора: зі спільною базою, зі спільним емітером та зі спільним колектором. Останню схему іноді називають емітерним повторювачем.

Найбільш поширеною є схема зі спільним емітером. Її коефіцієнт підсилення за потужністю K_n є найвищим і дорівнює:

$$K_n = K_i \times K_u, \quad (12.1)$$

де K_i — коефіцієнт підсилення струму; K_u — коефіцієнт підсилення напруги.

В схемі зі спільним емітером обидва коефіцієнти значно більші за одиницю.

Транзистор слід розглядати як елемент з певним функціональним призначенням, в залежності від якого потрібно розраховувати його робочий режим, тобто границі рівня коливань вхідних та вихідних струмів та напруг. Таке завдання розв'язується за допомогою статичних характеристик, що являють собою вольт-амперні характеристики (ВАХ), зняті за певних умов. Особливістю транзистора є взаємозв'язок між вхідними та вихідними параметрами. Зміна кожного з них певною мірою впливає і на інші. Враховуючи цю особливість, потрібно знімати не одну, а декілька ВАХ, змінюючи для кожної з них додатковий параметр. Наприклад, для схеми зі спільним емітером вхідною є характеристика $I_b=f(U_{eб})$, вигляд якої залежить від рівня вихідної (колекторної) напруги E_k . Враховуючи цю обставину, кожна з характеристик повинна зніматись при різних фіксованих рівнях E_k . Знімаючи їх, отримують сімейство характеристик, які дають чітку картину залежності між усіма трьома параметрами. Довідникові криві знімаються для рівнів, що задаються ДЕСТом. В лабораторній роботі вони вказані в таблиці.

Аналогічно слід знімати і вихідні характеристики, тобто $I_k=f(U_{ек})$ при фіксованих рівнях I_b . Знімаючи кожну з залежностей окремо, слід весь час утримувати струм бази на потрібному рівні. Така методика пояснює статичність характеристик, до того ж вони знімаються на постійному струмі.

На рис. 12.2 зображено сімейство типових вхідних та вихідних характеристик транзистора, увімкненого за схемою зі спільним емітером.

Штриховою лінією зображені характеристики при підвищеній температурі. При нагріванні опір напівпровідникового матеріалу транзистора зменшується, а *p-n* переходи починають інтенсивніше генерувати пари електрон-дірка, в результаті чого струм зростає.

При збільшенні вихідної напруги, для малих значень напруги $U_{eб}$, струм бази на вхідних характеристиках (рис. 12.2а) стає від'ємним, що пояснюється дією джерела вихідної напруги транзистора. Під його впливом, через внутрішній опір вхідного джерела, по колу база-колектор починає протікати струм утікання, який є зворотним по відношенню до базового.

В режимі малого сигналу при аналізі електричних кіл з транзисторами останні розглядаються як активні лінійні чотиріполюсники для яких справедлива система рівнянь з так званими змішаними коефіцієнтами, або *h*-параметрами:

$$u_1 = h_{11} \times i_1 + h_{12} \times u_2, \quad i_2 = h_{21} \times i_1 + h_{22} \times u_2 \quad (12.2)$$

де u_1, i_1 – вхідні напруга та струм транзистора; u_2, i_2 – вихідні напруга та струм транзистора; $h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$ – коефіцієнти чотириполосника.

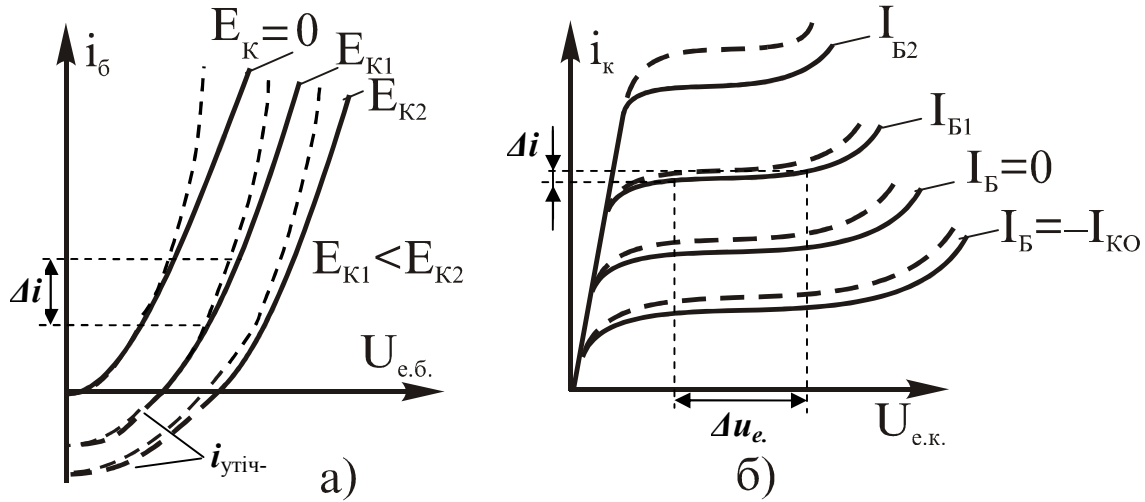


Рисунок 12.2

Слід зауважити, що наведена система рівнянь справедлива для змінного струму та напруги, тобто методика отримання h -параметрів нічим не відрізняється від загальноприйнятої в теоретичній електротехніці.

Деякі відмінності існують при їх визначенні графічним способом за допомогою статичних характеристик. Система (12.2) справедлива не тільки для миттєвих значень струмів та напруг, але й для їх прирощень, якщо останні не виходять за межі активної зони транзистора, тобто, коли вхідний сигнал відносно малий.

Тому,

$$\Delta u_1 = h_{11} \times \Delta i_1 + h_{12} \times \Delta u_2, \quad \Delta i_2 = h_{21} \times \Delta i_1 + h_{22} \times \Delta u_2 \quad (12.3)$$

Таким чином, для знаходження числових значень h -параметрів потрібно як мінімум дві характеристики з яких визначають відповідні прирощення Δi та Δu . Причому, характеристики, які зняті при нульових параметрах використовувати неможна.

З систем (12.2) та (12.3) неважко помітити, що перше рівняння відображає вхідну характеристику, а друге — вихідну. Тому доцільно змінити індексацію змінних в системі рівнянь (12.2) та (12.3) і в подальшому користуватись позначеннями струмів та напруг транзистора у відповідності із позначеннями електродів. Наприклад, незалежними змінними в системі (12.2) та (12.3) є вхідний струм $i_1 = i_б$ та вихідна напруга $u_2 = u_е.б.$, а залежни-

ми – вхідна напруга $u_1 = u_{ек}$, вихідний струм $i_2 = i_к$. З першого рівняння визначимо h_{11} , що є вхідним опором транзистора:

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta u_{еб}}{\Delta i_{б}} \right|_{\Delta u_{ек} = 0} \quad (12.4)$$

На рис. 12.3а зображений спосіб графічного визначення h_{11} у відповідності з виразом (12.4).

Слід взяти до уваги, що умова $\Delta u_{ек} = 0$ стосується змінного струму і реалізується тим, що прирости базового струму та напруги беруться по якійсь одній характеристиці. Частіше береться та, на якій розміщена робоча точка **P**.

Коефіцієнт зворотного зв'язку за напругою h_{12} визначається з виразу:

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta u_{еб}}{\Delta u_{ек}} \right|_{\Delta i_{б} = 0} \quad (12.5)$$

На рис. 12.3а зображений графічний спосіб визначення h_{12} . Тобто приріст $\Delta u_{еб}$ береться по горизонталі між двома найближчими характеристиками, на одній з яких зафіксована робоча точка. Приріст $\Delta u_{ек}$ обчислюється як різниця вихідних напруг $E_к$ для цих же характеристик.

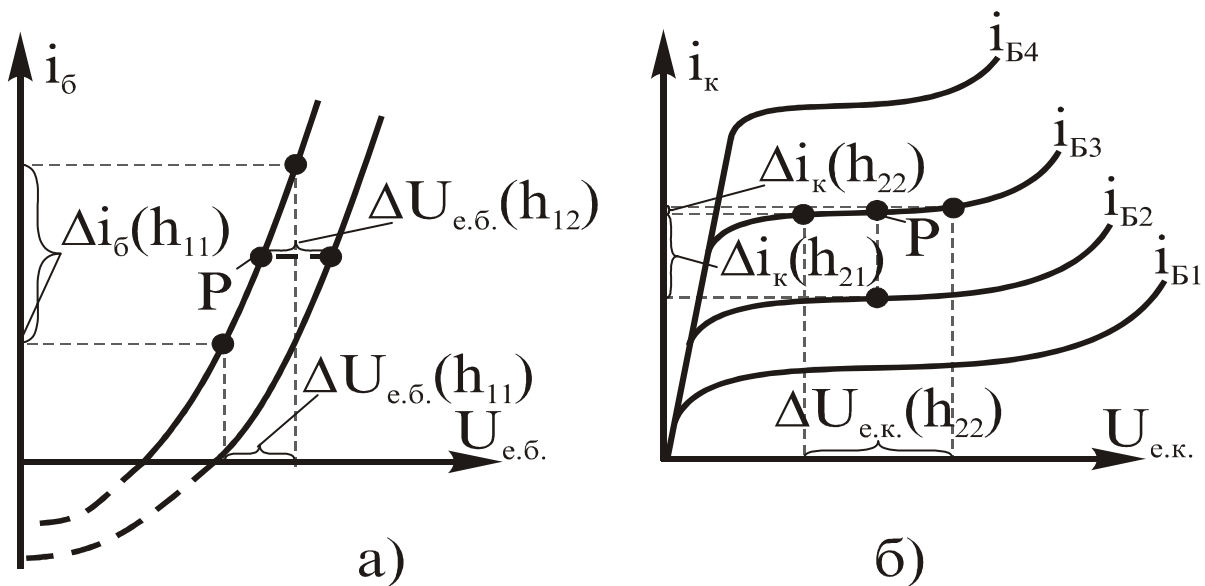


Рисунок 12.3

Коефіцієнт підсилення струму транзистора h_{21} визначається з другого рівняння системи (12.3):

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta i_к}{\Delta i_{б}} \right|_{\Delta u_{ек} = 0} \quad (12.6)$$

Його графічне визначення впливає з виразу (12.6) і зображено на рис. 12.3б. Приріст струму колектора Δi_k обчислюється за двома найближчими вихідними характеристиками, на одній з яких задається положення робочої точки. Різниця базових струмів цих характеристик дає Δi_b . Для нашого прикладу: $\Delta i_b = i_{b3} - i_{b2}$.

Вихідна провідність транзистора h_{22} знаходиться з виразу:

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta i_k}{\Delta u_{ек}} \right|_{\Delta i_b = 0} \quad (12.7)$$

Приклад графічного визначення h_{22} зображений на рис. 12.3б.

Таким чином, транзистор, який працював в електричних колах в режимі малого сигналу слід розглядати, як активний чотирьополіусник з певними передавальними коефіцієнтами, які можна визначати за допомогою попередньо знятих статичних характеристик.

Порядок виконання роботи

1. В середовищі MicroCap зібрати схему, яка зображена на рис. 12.4.

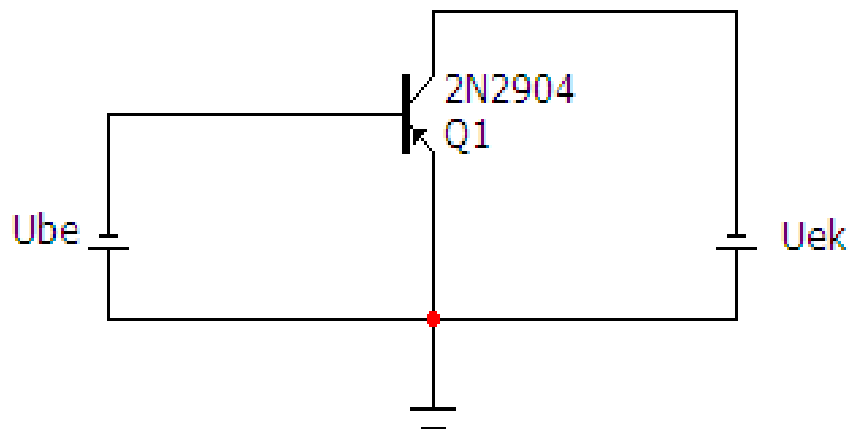


Рисунок 12.4

Модель біполярного транзистора за вказівкою викладача вибирається з наступного списку: 2N869A, 2N1132, 2N2800, 2N2894, 2N2904, 2N2905, 2N3244, 2N4125, 2N4403, 2N4405, BC177, BC177A, BC177B, BC212A, BC213A, BC307A, BC320A, BC327, BC450, BC556, KT363A, KT375A.

Вибраний тип моделі біполярного транзистора $Q1$ задається у вікні, фрагмент якого показаний на рис. 12.5. Викликати це вікно можна за допомогою опції «Компоненты/Analog Primitives/Active Devices/PNP».

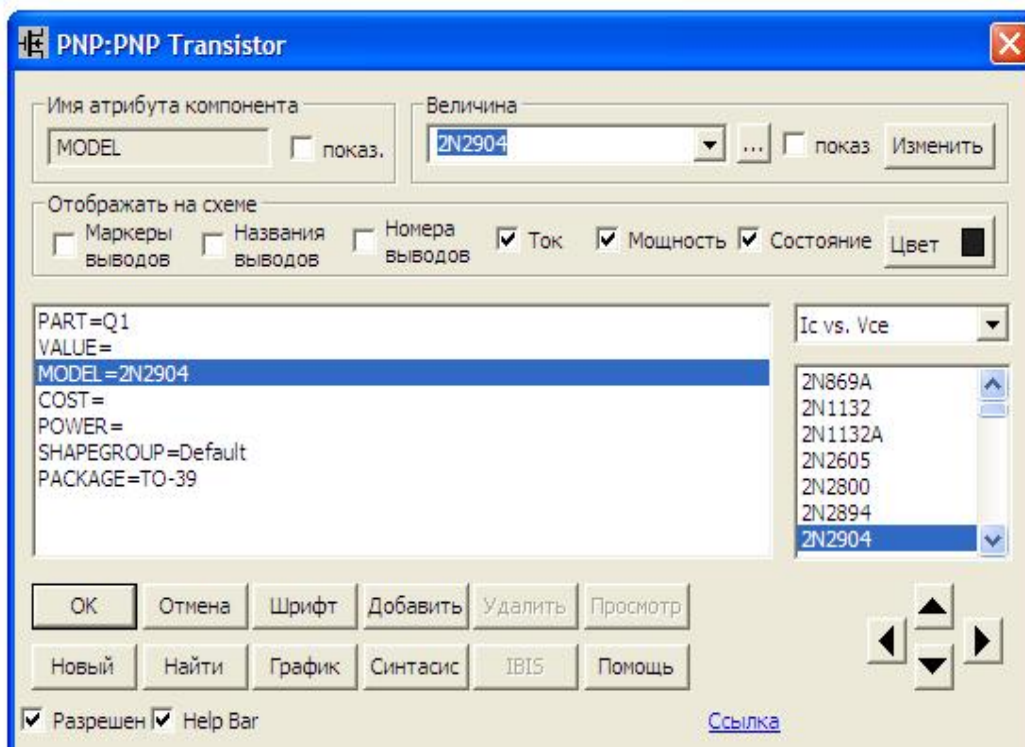


Рисунок 12.5

Параметри джерел постійної напруги U_{be} та U_{ek} можна задати, якщо двічі клацнути лівою кнопкою миші на зображенні джерела, після чого на екрані з'явиться вікно, фрагмент якого показаний на рис. 12.6.

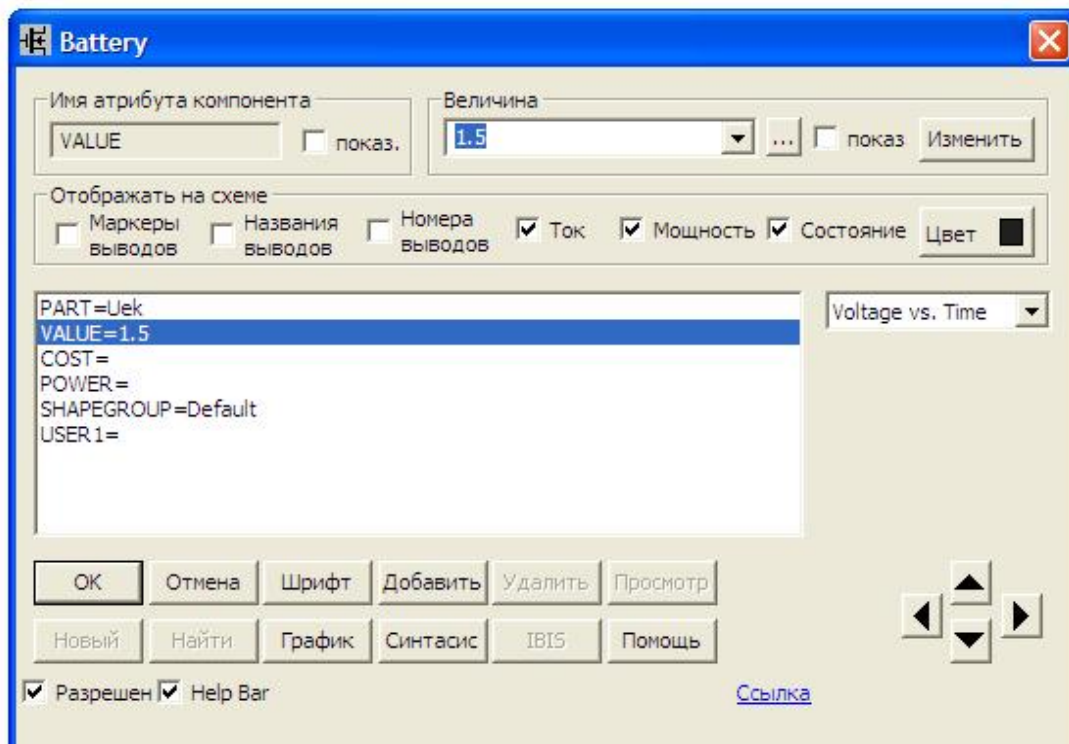


Рисунок 12.6

Далі. для кожного з трьох значень колекторної напруги ($U_{ek}=0\text{ В}$, $U_{ek}=1\text{ В}$, $U_{ek}=3\text{ В}$) виконуємо такі дії:

- У вікні (рис. 12.6) задаємо певне значення напруги U_{be} .
- На верхній панелі головного вікна відкриваємо опцію «Анализ» і вибираємо в ній рядок «Динамический анализ по постоянному току (Dynamic DC)». Після цього на екрані з'являється вікно (рис. 12.7), в якому можна задати параметри, які ми бажаємо вивести на екран (в нашому випадку це потенціали вузлів та струми у вітках).

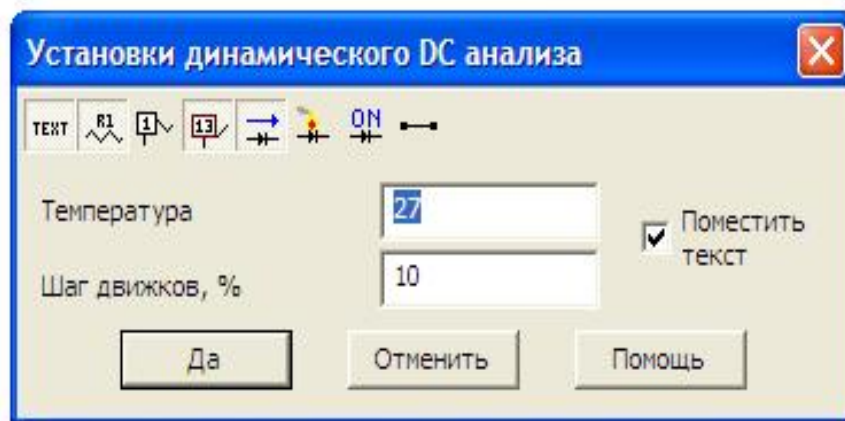


Рисунок 12.7

Після цього схема прийме вигляд, зображений на рис. 12.8.

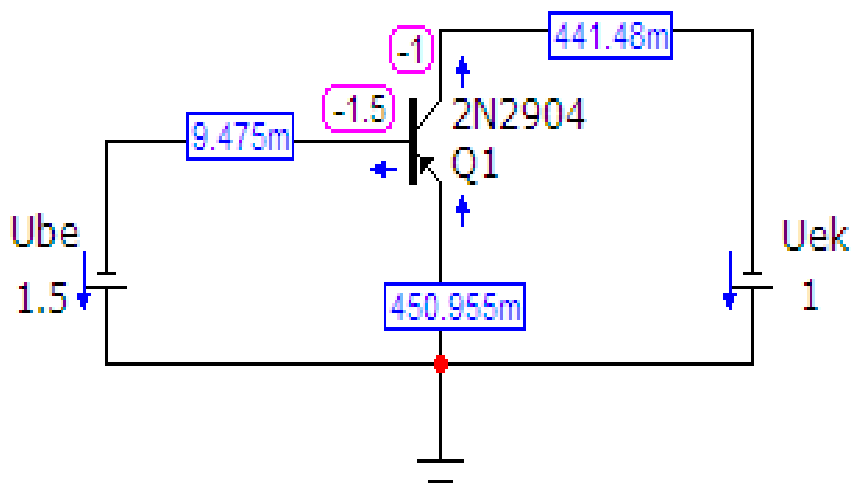


Рисунок 12.8

З рис. 12.8 видно, що при $U_{ek}=1\text{ В}$, значенню $U_{be}=1.5\text{ В}$ відповідає струм бази $I_b=9.475\text{ мА}$.

- Послідовно змінюючи U_{be} знімемо вхідну характеристику транзистора $I_b = f(U_{be})$ для значення колекторної напруги $U_{ek}=1\text{ В}$. Діапазон зміни струму I_b приймемо в межах $0 \dots 20\text{ мА}$.

- Повторимо цю процедуру для значень $U_{ek}=0\text{ В}$, $U_{ek}=3\text{ В}$.
- Результати внесемо в таблицю 12.1.

Таблиця 12.1. Вхідні характеристики транзистора $I_b = f(U_{be})$.

№ n/n	$U_{ek}=0\text{ В}$		$U_{ek}=1\text{ В}$		$U_{ek}=3\text{ В}$	
	$U_{be},\text{ В}$	$I_b, \text{ мА}$	$U_{be},\text{ В}$	$I_b, \text{ мА}$	$U_{be},\text{ В}$	$I_b, \text{ мА}$

2. Для побудови вихідних характеристики транзистора $I_k = f(U_{ke})$ для фіксованих значень струмів бази I_b в середовищі MicroCap слід зібрати схему, яка зображена на рис. 12.9.

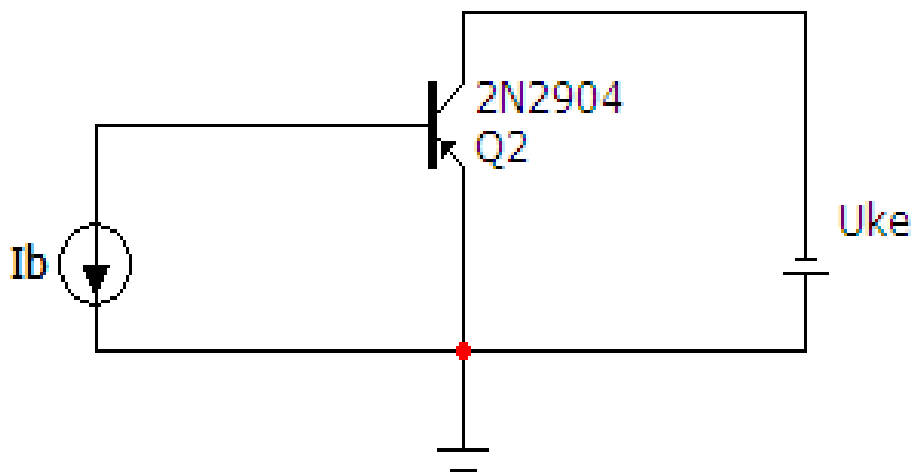


Рисунок 12.9

Фіксовані значення струму бази задаються у вікні, фрагмент якого зображений на рис. 12.10. Для виклику цього вікна слід двічі клацнути лівою кнопкою миші на зображенні джерела струму I_b .

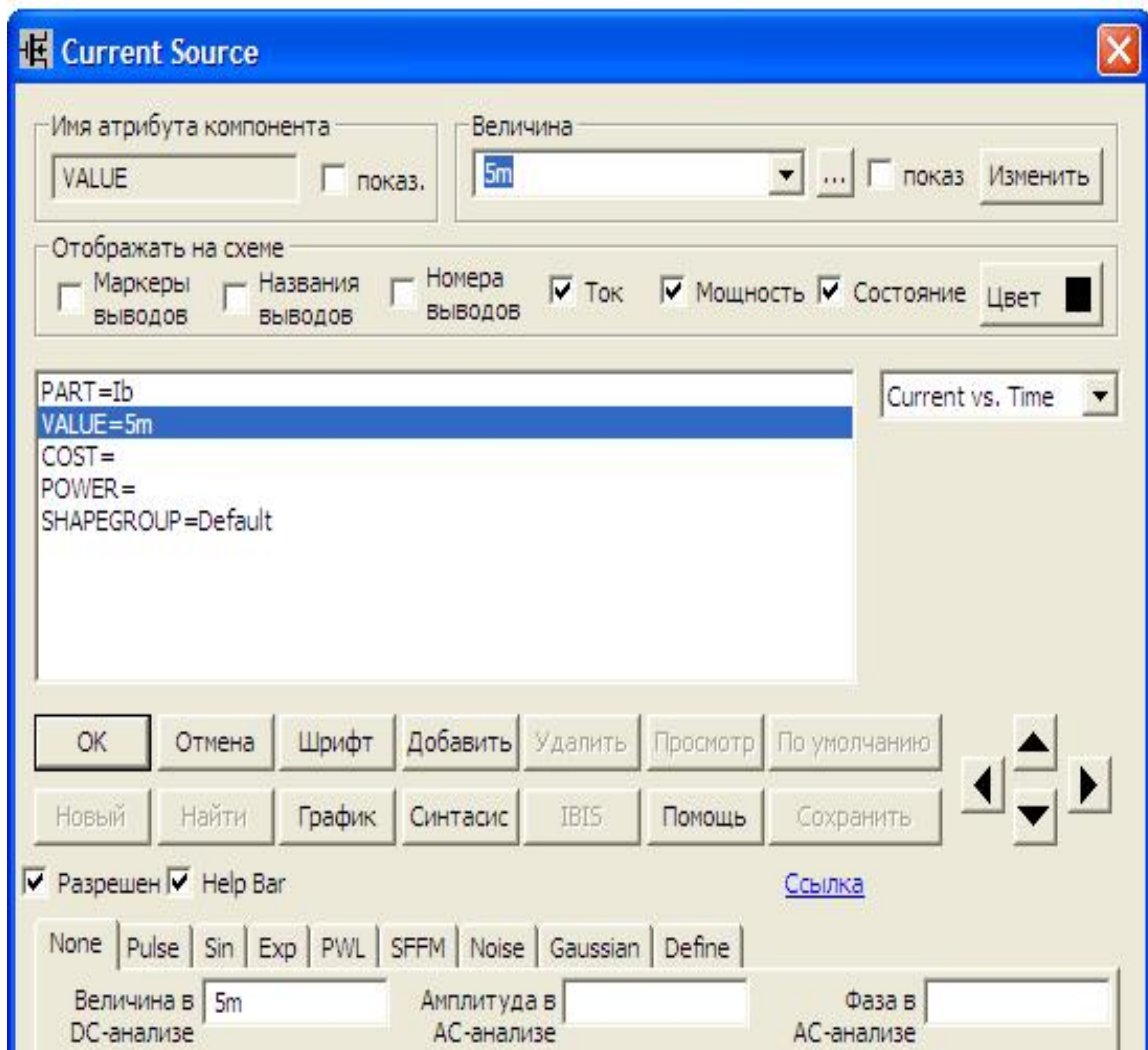


Рисунок 12.10

Далі, для кожного з трьох значень струму бази ($I_b = 0 \text{ мА}$, $I_b = 2.5 \text{ мА}$, $I_b = 5 \text{ мА}$) виконуємо такі дії:

- У вікні (рис. 12.6) задаємо певне значення напруги U_{ke} .
- На верхній панелі головного вікна відкриваємо опцію «Анализ» і вибираємо в ній рядок «Динамический анализ по постоянному току (Dynamic DC)». Після цього у вікні (рис. 12.7) задаємо параметри, які ми бажаємо вивести на екран (в нашому випадку це потенціали вузлів та струми у вітках).

Після цього схема прийме вигляд, зображений на рис. 12.11.

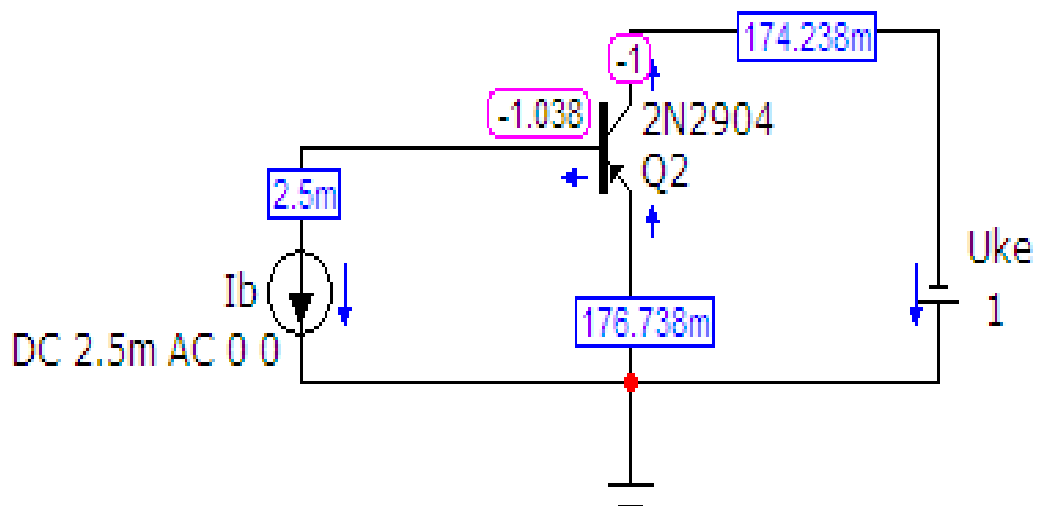


Рисунок 12.11

З рис. 12.11 видно, що при $I_b=2.5 \text{ мА}$, значенню $U_{ek}=1 \text{ В}$ відповідає колекторний струм $I_k=174.238 \text{ мА}$.

• Послідовно змінюючи U_{ek} знімемо вихідну характеристику транзистора $I_k = f(U_{ek})$ для значення струму бази $I_b=2.5 \text{ мА}$. Діапазон регулювання напруги U_{ek} приймемо в межах 0...2 В.

• Повторимо цю процедуру для значень $I_b = 0 \text{ А}$, $I_b=5 \text{ мА}$.

• Результати внесемо в таблицю 12.2.

Таблиця 12.2. Вихідні характеристики транзистора $I_k = f(U_{ek})$.

№ n/n	$I_b = 0 \text{ мА}$		$I_b = 2.5 \text{ мА}$		$I_b = 5 \text{ мА}$	
	$U_{ek}, \text{ В}$	$I_k, \text{ мА}$	$U_{ek}, \text{ В}$	$I_k, \text{ мА}$	$U_{ek}, \text{ В}$	$I_k, \text{ мА}$

Обробка результатів дослідження

1. Побудувати графіки статичних характеристик транзистора (однотипні залежності слід будувати в одних вісях координат).
2. Визначити за допомогою статичних характеристик транзистора його h -параметри: h_{11} , h_{12} , h_{21} , h_{22} , взявши відповідні припущення струмів та напруг на початкових лінійних ділянках отриманих ВАХ (див. рис. 12.3).

Контрольні питання

1. Структура і принцип роботи $p-n$ переходу.
2. Конструкція біполярного транзистора.
3. Вхідні характеристики біполярного транзистора.
4. Вихідні характеристики біполярного транзистора.
5. Режими роботи біполярного транзистора.

Лабораторна робота №13тс

Дослідження підсилювального каскаду на біполярному транзисторі

Мета роботи: дослідити електричні властивості підсилювального каскаду на біполярному транзисторі

Короткі теоретичні відомості

Електронним підсилювачем називається пристрій, основним функціональним призначенням якого є підвищення електричної потужності вихідного сигналу порівняно з вхідним до номінального значення за рахунок енергії зовнішнього джерела живлення.

На рис. 13.1 показано приклад одного з підсилювальних каскадів, який використовують для попереднього, проміжного або кінцевого підсилення електричних сигналів довільної форми. Основним елементом цієї схеми є біполярний транзистор, який наразі увімкнено за схемою «спільний емітер». Функціональне призначення інших елементів полягає в забезпеченні потрібного режиму роботи як власне підсилювального елемента в каскаді, так і самого каскаду в структурі багатокаскадного електронного підсилювача.

Для ознайомлення з роботою каскаду потрібно дати пояснення таким термінам, як точка покою та робоча точка.

Точкою покою називають таку точку на вхідних та вихідних вольт-амперних характеристиках транзистора, положення якої визначає його

електричний стан за умови відсутності сигналу, себто – при протіканні через транзистор тільки постійних струмів.

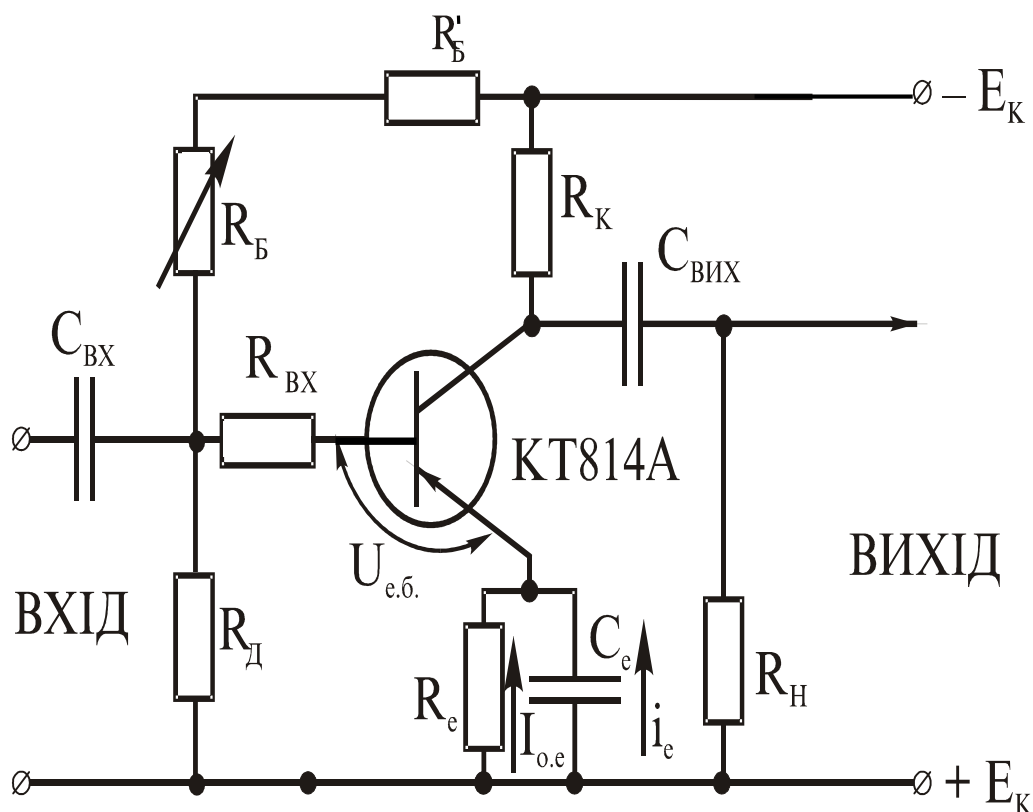


Рисунок 13.1

На рис. 13.2 точки покою позначені літерою **P**. Зокрема положення точки **P** на вихідних ВАХ відображає рівень постійного струму колектора (а отже, і падіння напруги на резисторі R_K) за певного значення постійного струму в базі. Точка **P** завжди знаходиться на *лінії навантаження* і її положення пов'язане з режимом роботи транзистора. Для біполярного транзистора існує три робочих режими – активний, режим насичення та режим відсічки струмів (див. рис. 13.2). В активному режимі транзистор є керованим елементом, тобто його опір змінюється під впливом вхідного сигналу. В режимі насичення та відсічки транзистор є некерованим і його опір практично не залежить від вхідного сигналу.

За наявності дії вхідного сигналу електричний стан транзистора зазнає зміни, що супроводжується зміною струмів і напруг на ньому. Зокрема це пояснюється причинно-наслідковою залежністю поміж струмами бази та колектора, яку в лінійному режимі роботи (режимі “малого сигналу”) можна відобразити співвідношенням

$$I_K = \beta \cdot I_B, \quad (13.1)$$

де β – коефіцієнт підсилення біполярного транзистора за струмом для схеми «спільний емітер».

Зміну стану біполярного транзистора в підсилювальному каскаді за наявності дії вхідного сигналу графічно описують за допомогою поняття «робоча точка». *Робочою точкою* називають таку точку на вольт-амперних характеристиках транзистора, миттєве положення якої відображає поточний стан підсилювального елемента під впливом змінної складової вхідного сигналу. Водночас рух робочої точки в своїй часовій послідовності окреслює лінію, яка визначає динаміку зміни стану транзистора у часі.

Варто додати, що, як впливає з означень, між поняттями «точки покою» і «робочої точки» існує суттєва різниця, яка унеможливує їх ототожнення.

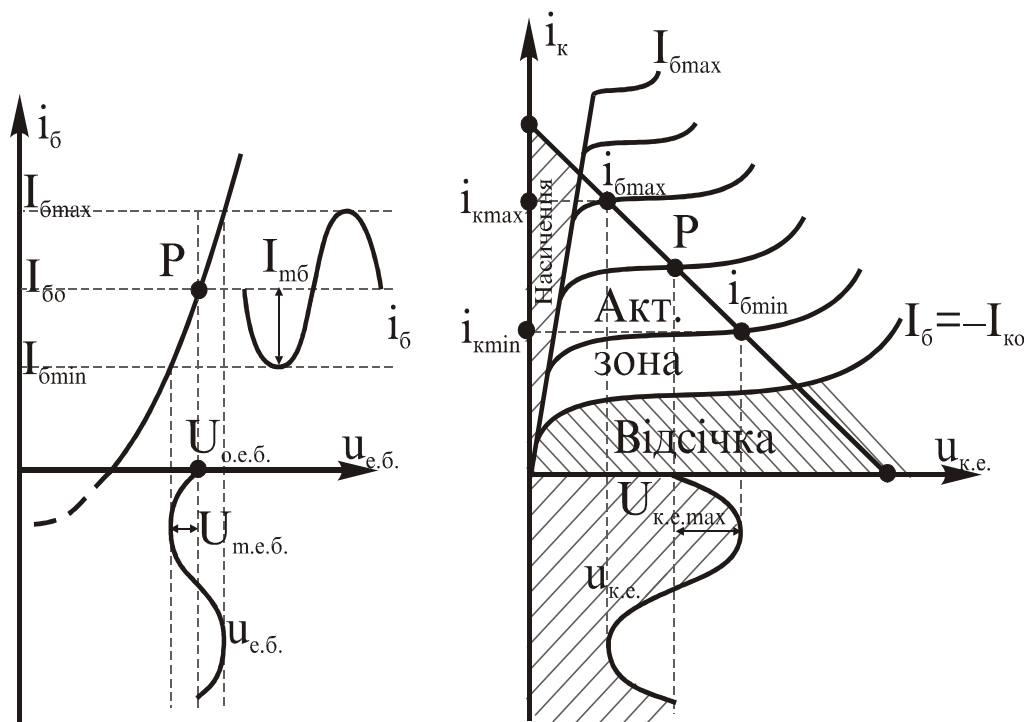


Рисунок 13.2

Розглянемо роботу підсилювального каскаду попереднього підсилення. Особливістю такого каскаду є те, що робоча точка не виходить за межі активної зони транзистора, а точка покою лежить приблизно посередині цієї зони.

Положення точки покою визначається рівнем постійного струму бази $I_{0.b.}$, що встановлюється за допомогою розподільвача напруги $R_D-R_B-R_B'$.

Рівень базового струму $I_{\bar{b}o}$ залежить від опору транзистора R_B . Тому при зміні останнього точка спокою буде пересуватись по лінії навантаження в межах активної зони.

За наявності змінної вхідної напруги U_{Bx} (сигналу) робоча точка на вхідній характеристиці змінюватиме своє місце розташування в межах ділянки $i_{\bar{b}min} \leq i_{\bar{b}} \leq i_{\bar{b}max}$. Водночас така зміна базового струму призведе до відповідної зміни колекторного струму і напруги.

Відтак транзистор працює в динамічному режимі, тобто його вихідний опір, і відповідно спад напруги між емітером та колектором, змінюються за тим же законом, що і вхідний сигнал.

Рівнянням динамічного режиму є вираз:

$$U_{KE} = E_K - i_K R_K = E_K - \beta i_B R_K \quad (13.2)$$

Графічним відображенням залежності (13.2) є пряма лінія, яка проходить поза точкою початку координат і має від'ємний кутовий коефіцієнт. Якщо побудувати цю пряму в осях (I_K, U_{KE}) та сумістити з вихідними характеристиками транзистора, то їх точки перетину визначать розв'язок задачі. Це означає, що за відомим законом зміни напруги і струму вхідного сигналу у графічний спосіб можна відшукати відповідний закон зміни струму та напруги вихідного сигналу.

Графічно динаміка передачі сигналу зі входу на вихід з підсиленням останнього зображена на рис. 13.2.

З наведеного рисунку видно, що вихідний сигнал формується напругою потужного джерела E_K , є значно підсиленим і за формою повторює вхідний сигнал. Також видно, що передача сигналу відбувається з інверсією, тобто фаза вихідної напруги протилежна фазі вхідної напруги сигналу. Це пояснюється залежністю опору транзистора від струму бази – при зростанні останнього опір транзистора падає і навпаки.

Як зазначалося вище, пасивні елементи підсилувального каскаду є допоміжними.

Зокрема, вхідна ємність C_{Bx} використовується для фільтрації постійної складової базового струму, котра обумовлюється дією вхідного джерела U_{Bx} . Ця складова впливає на положення точки спокою і повинна бути включена.

Ємність $C_{ВИХ}$ використовується з тією ж метою, але по відношенню до вихідного сигналу. З її допомогою фільтрується постійна складова напруги U_{KE} .

Резистор R_e використовується для термічної стабілізації положення точки покою транзистора. Змінна складова струму протікає через ємність C_e , а постійний струм емітера – через резистор R_e . Падіння напруги на ньому знижує потенціал емітера по відношенню до бази і тим самими змінює рівень постійної складової струму I_{K0} . Вмикання резистора R_e призводить до появи від'ємного зворотного зв'язку між вхідним та вихідним сигналами. При зростанні температури транзистора його опір зменшується (особливо це відчутно для базового прошарку) і всі складові струмів зростають. Це призводить до зсуву робочої точки P вгору по лінії навантаження, і режим роботи транзистора змінюється. Наявність резистора R_e стабілізує положення цієї точки, оскільки зростання постійної складової струму I_{OB} знижує потенціал емітера і вхідна напруга U_{OEB} зменшується. Як наслідок, точка покою транзистора залишається в заданому положенні і режим роботи каскаду майже не змінюється.

Остання обставина дуже важлива, тому що положення точки покою визначає *класи* або *режими підсилення*, яких налічується чотири: А, В, С та АВС.

Режим А характеризується тим, що точка покою P вибирається на навантажувальній прямій каскаду посередині активної зони транзистора, як це зображено на рис. 13.3, а. Рівень вхідного сигналу в режимі А повинен бути таким, щоб робота підсилювального каскаду відбувалась в межах його активної зони. В такому випадку нелінійні спотворення підсилюваної напруги будуть відсутніми. Завдяки цьому клас А широко застосовується в каскадах попереднього підсилення. Але він має суттєвий недолік: дуже низький ККД підсилювача, котрий не перевищує 0,5. Тому клас А використовується досить рідко і в більшості випадків каскад за таким режимом працює, як попередній підсилювач напруги, для якого штатний ККД не є визначальним.

Режим В характеризується тим, що точка покою вибирається на межі області відсічки, тобто, на початку динамічної, або перехідної характеристики транзистора (рис. 13.3, б). В режимі В змінні складові струму та напруги транзистора виникають лише для додатних напівперіодів вхідної на-

пруги. Якщо вхідна напруга підсилювального каскаду має синусоїдальну форму, то вихідна матиме вигляд імпульсу косинусоїдальної форми, тобто нелінійні спотворення дуже значні. Тому режим В використовують, як правило, у кінцевих каскадах підсилення, що працюють безпосередньо на навантаження. Клас В характеризується значно вищим ККД порівняно з А, оскільки постійний струм бази в цьому випадку майже дорівнює нулеві. ККД підсилювального каскаду в цьому режимі може досягати 80%.

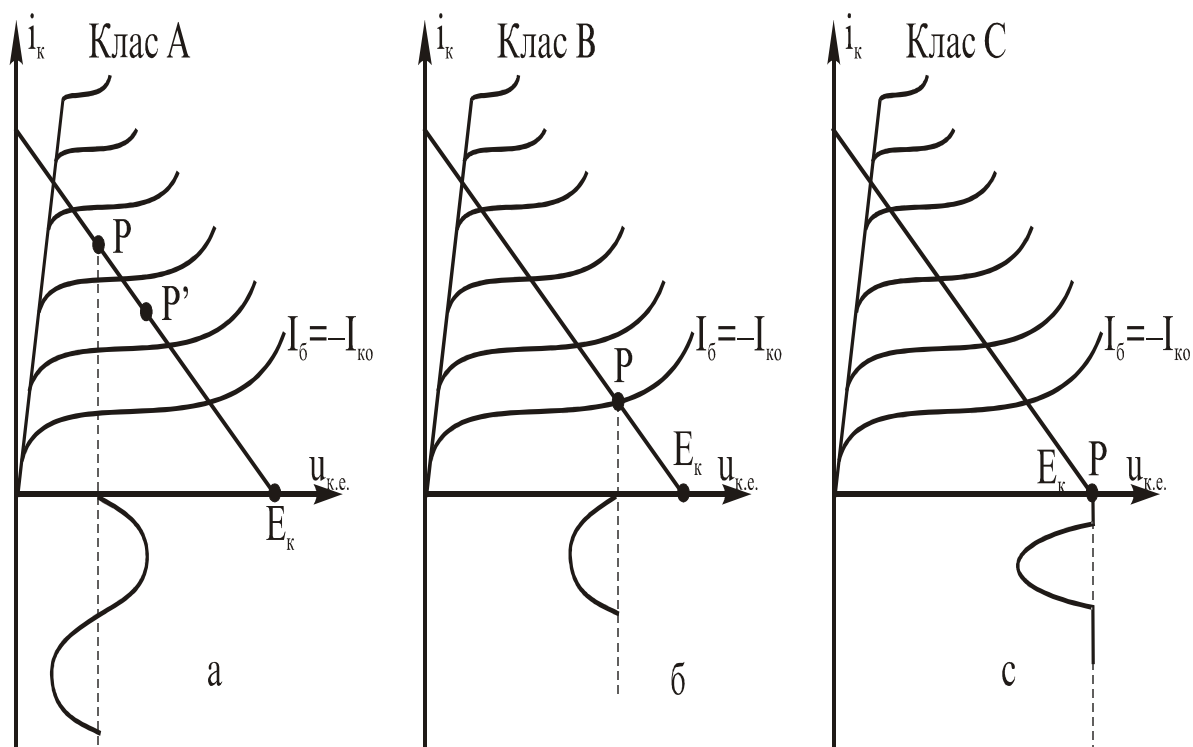


Рисунок 13.3

Інколи використовують проміжний режим роботи підсилювального каскаду. Робоча точка в цьому випадку лежить між А та В (рис 13.3, а). В цьому випадку ККД підсилювача більший, ніж в режимі А, а нелінійні спотворення менші, ніж в режимі В.

Режим С характеризується тим, що робоча точка **P** вибирається за межею відсічки і струм в транзисторі виникає на протязі деякої частини додатнього напівперіоду вхідної напруги (рис. 13.3, с). В лабораторній роботі такий режим здійснюється шляхом розмикання кола постійного струму бази. Цей режим супроводжується дуже великими нелінійними спотвореннями підсилюваної напруги, але ККД каскаду може бути дуже високим і наближатись до одиниці. Режим С використовується в вибіркових підсилювачах та автогенераторах, які, завдяки присутності коливальних конту-

рів або інших частотно залежних пристроїв, виділяють лише головну гармоніку з несинусоїдної напруги, яка виникає внаслідок великих нелінійних спотворень. Вказаний клас підсилення використовується також у підсилувачах, що формують сигнали спеціальної форми.

Порядок виконання роботи

1. В середовищі MicroCap зібрати схему, яка зображена на рис. 13.4.

Модель біполярного транзистора $Q1$ (яку задає викладач) вибирається у вікні, фрагмент якого показаний на рис. 13.5. Викликати це вікно можна за допомогою опції «Компоненты/Analog Primitives/Active Devices/NPN».

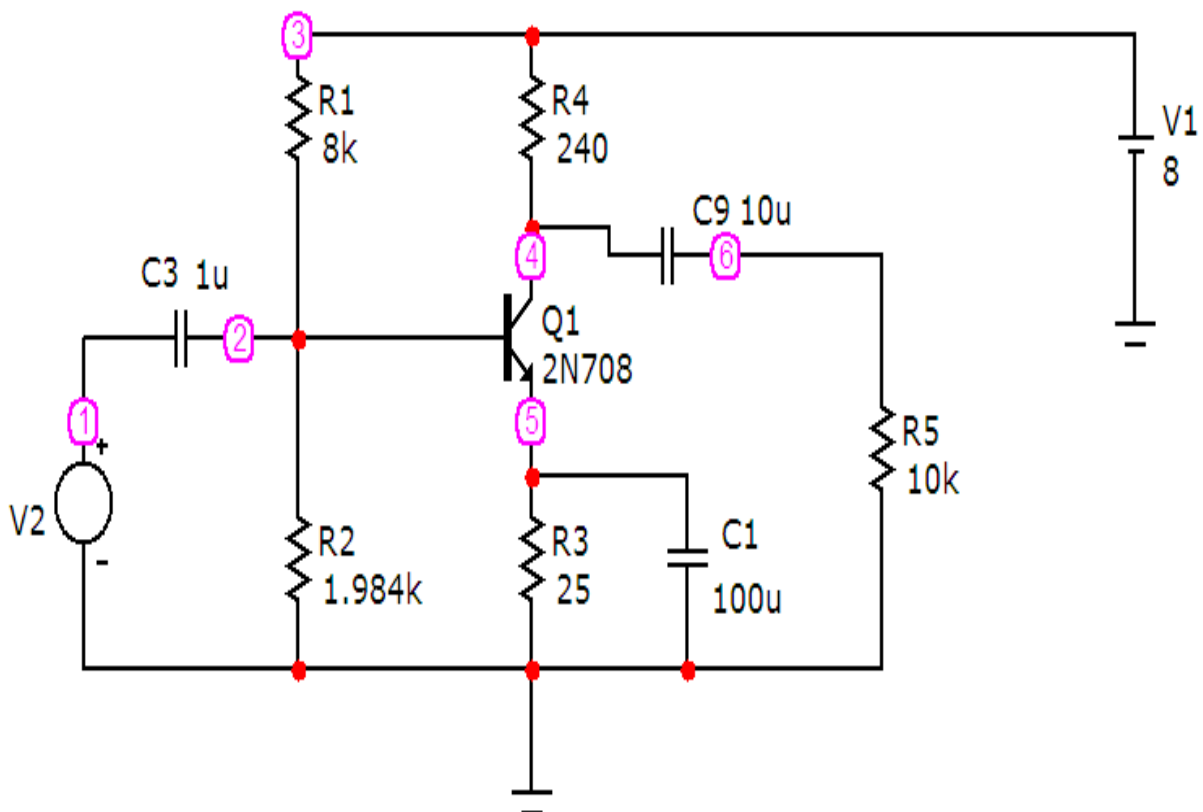


Рисунок 13.4

Параметри джерела синусоїдної напруги $V2$ задаються у вікні (рис. 13.6), яке з'являється при перенесенні компонента на робоче поле програми. В цьому вікні слід вибрати вкладинку *Sin* і задати такі параметри: частоту 100 KГц ; амплітуду 40 мВ ; початкову фазу 0° .

Під час виконання лабораторної роботи частоту та амплітуду задає викладач.

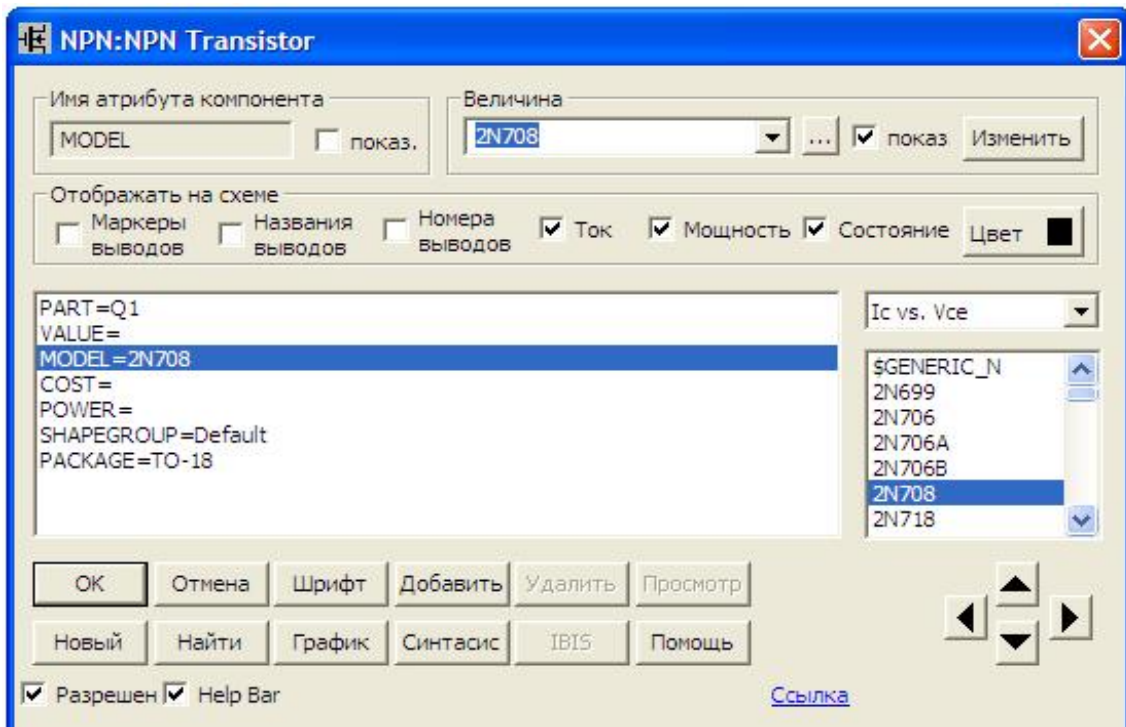


Рисунок 13.5

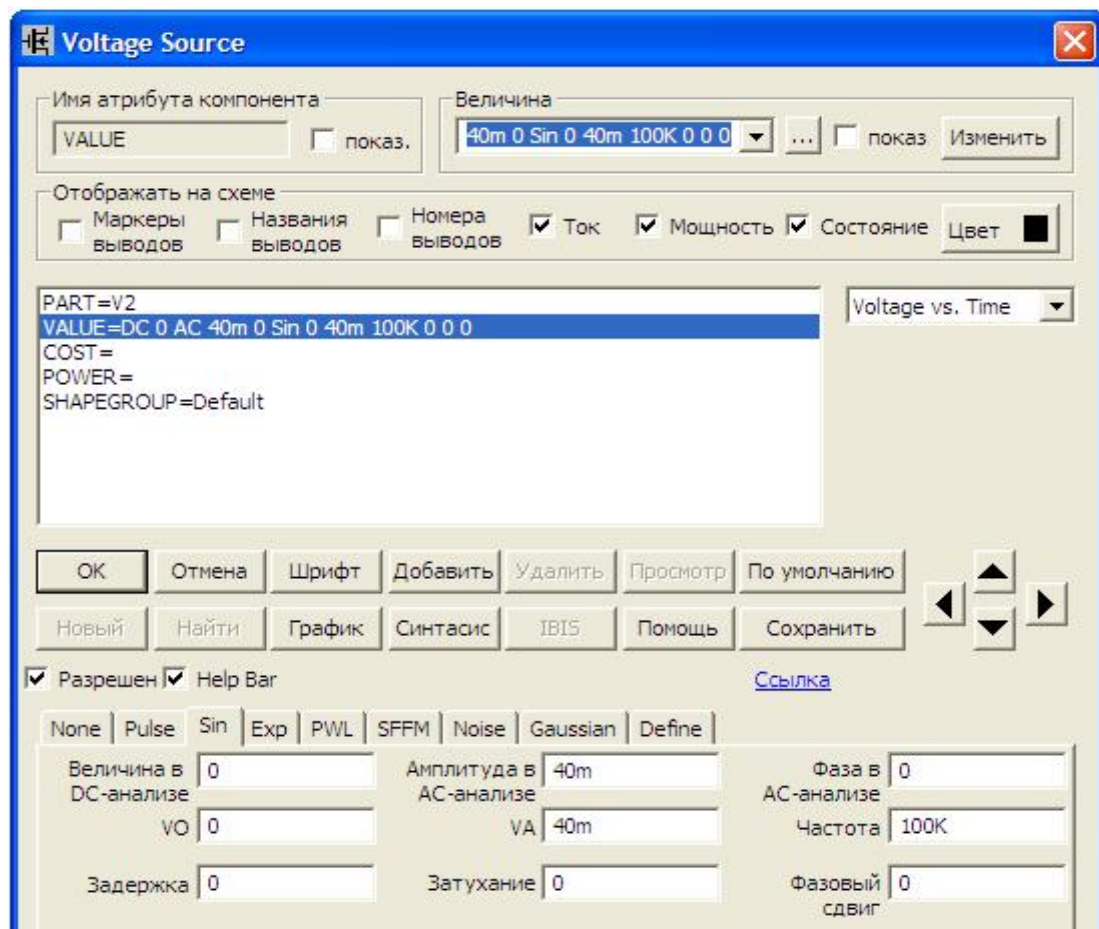


Рисунок 13.6

2. На верхній панелі головного вікна відкриваємо опцію «Анализ» і вибираємо в ній рядок «Анализ переходных процессов (Transient)». Після цього на екрані з'являється вікно (рис. 13.7), в якому слід задати: діапазон розрахунку – 100ц; крок розрахунку – 0.1ц; діапазони виведення графіків вхідної – V(6) та вихідної – V(5) напруги. Далі натискається кнопка «Запустить». Графіки зображені на рис. 13.8. Їх потрібно роздрукувати.

3. Дослідимо частотні властивості підсилювача.

Відомо, що комплексний коефіцієнт підсилення за напругою підсилювального каскаду визначається порівнянням двох комплексних напруг – вихідної $\underline{U}_{вих}(j\omega)$ та вхідної $\underline{U}_{вх}(j\omega)$, заданих на деякій частоті $\omega = 2\pi f$ синусоїдного сигналу. Остання в загальному випадку є незалежною і знає зміни від нуля до нескінченності (теоретично)

$$\underline{K}_U(j\omega) = \frac{\underline{U}_{вих}(j\omega)}{\underline{U}_{вх}(j\omega)} = K(\omega)e^{j\varphi(\omega)}.$$

В наведеному співвідношенні модуль комплексного коефіцієнта підсилення, що дорівнює $K(\omega) = \frac{U_{mвих}(\omega)}{U_{mвх}(\omega)}$, називають амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ) підсилювача, а аргумент $\varphi(\omega) = \psi_{вих}(\omega) - \psi_{вх}(\omega)$ – його фазочастотною характеристикою (ФЧХ). Обидві характеристики залежать від значення частоти вхідного сигналу і поряд з самим комплексним коефіцієнтом підсилення відображають частотні властивості електронного підсилювача на системному рівні.

Відтак побудуємо графіки АЧХ та ФЧХ досліджуваного підсилювального каскаду. Для цього на верхній панелі головного вікна відкриваємо опцію «Анализ» і вибираємо в ній рядок «Частотный анализ (АС)». Після цього на екрані з'являється вікно (рис. 13.9), в якому слід задати:

- діапазон частот – в нашому випадку задамося від 5 МГц до 10 кГц (від більшого значення до меншого) з логарифмічною шкалою частоти;
- границя темпу змін розрахункових точок (віконце «Максимальное изменение %») – в нашому випадку прийнято 5%;
- діапазони виведення графіка амплітудно-частотної характеристики – в нашому випадку прийнято від 10 кГц до 5 МГц з кроком 1 кГц.

Далі натискається кнопка «Запустить». Графіки АЧХ та ФЧХ підсилювача показані на рис. 13.10. Їх потрібно роздрукувати.

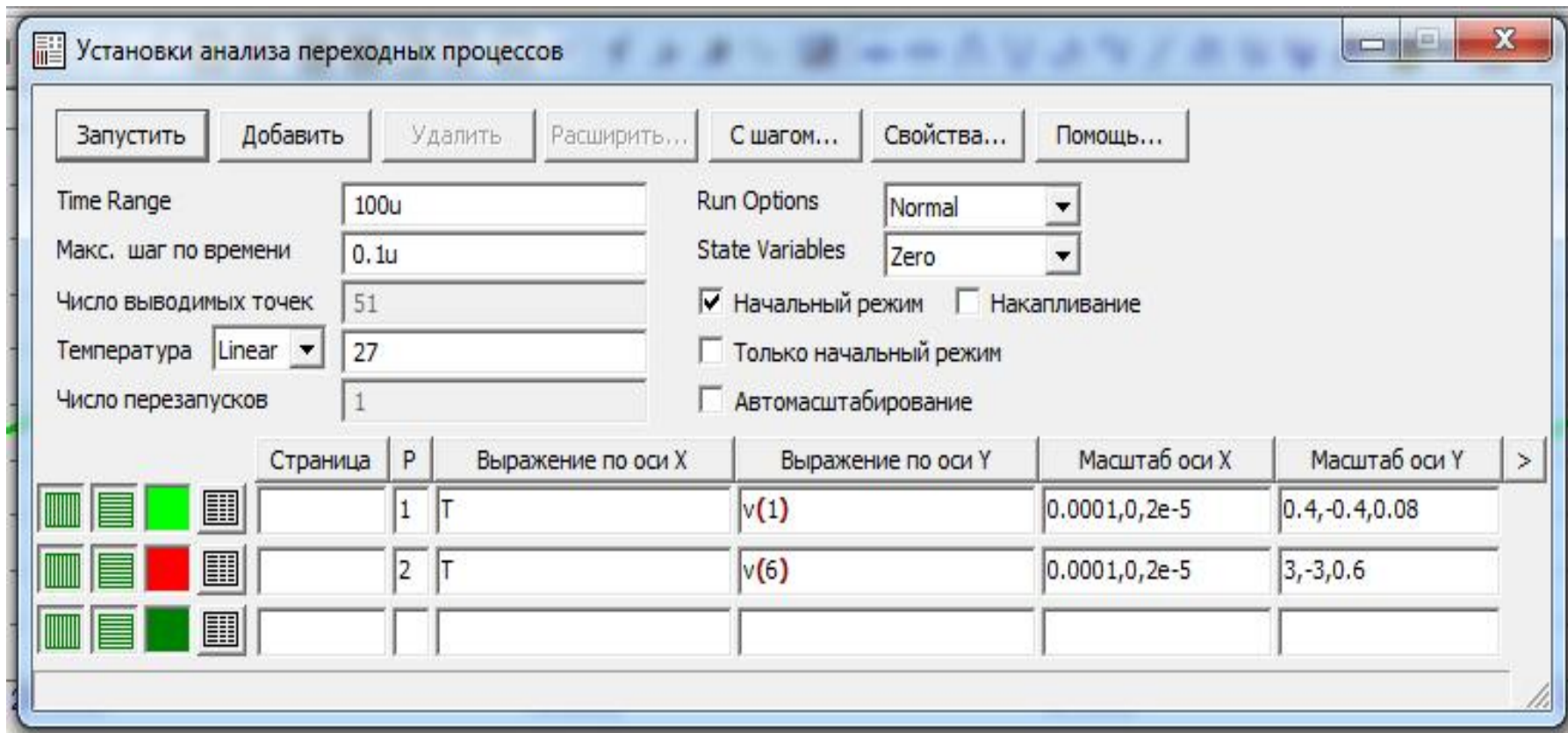


Рисунок 13.7

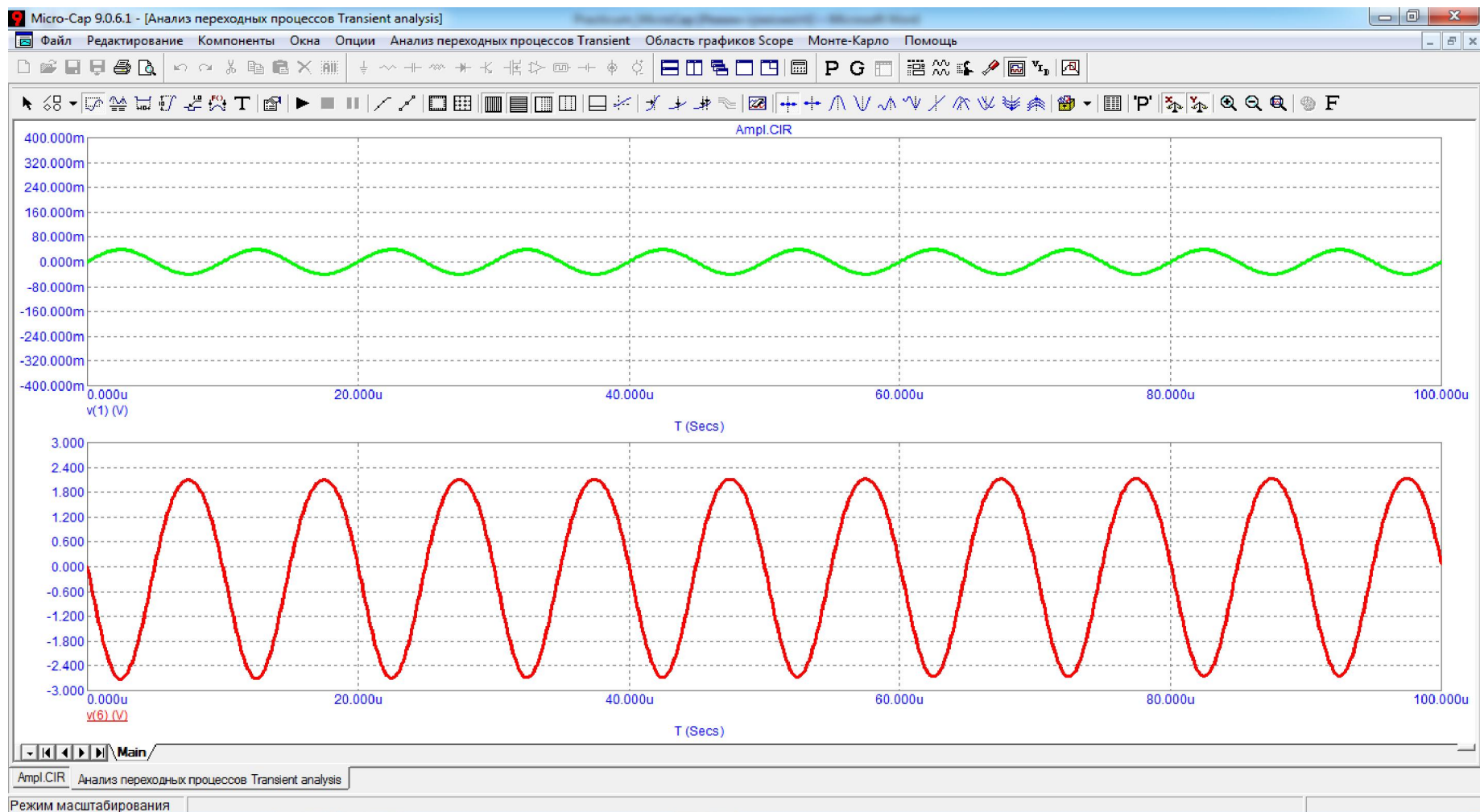


Рисунок 13.8

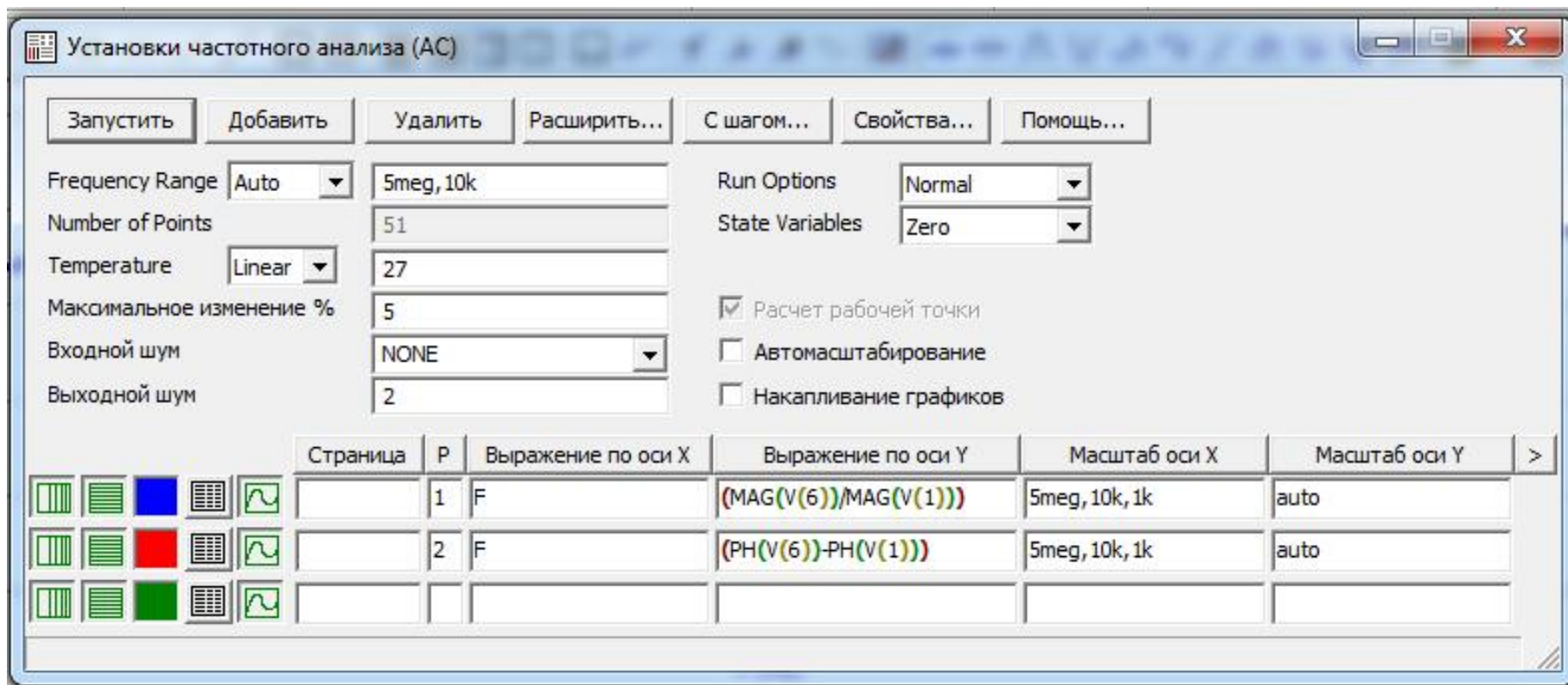


Рисунок 13.9

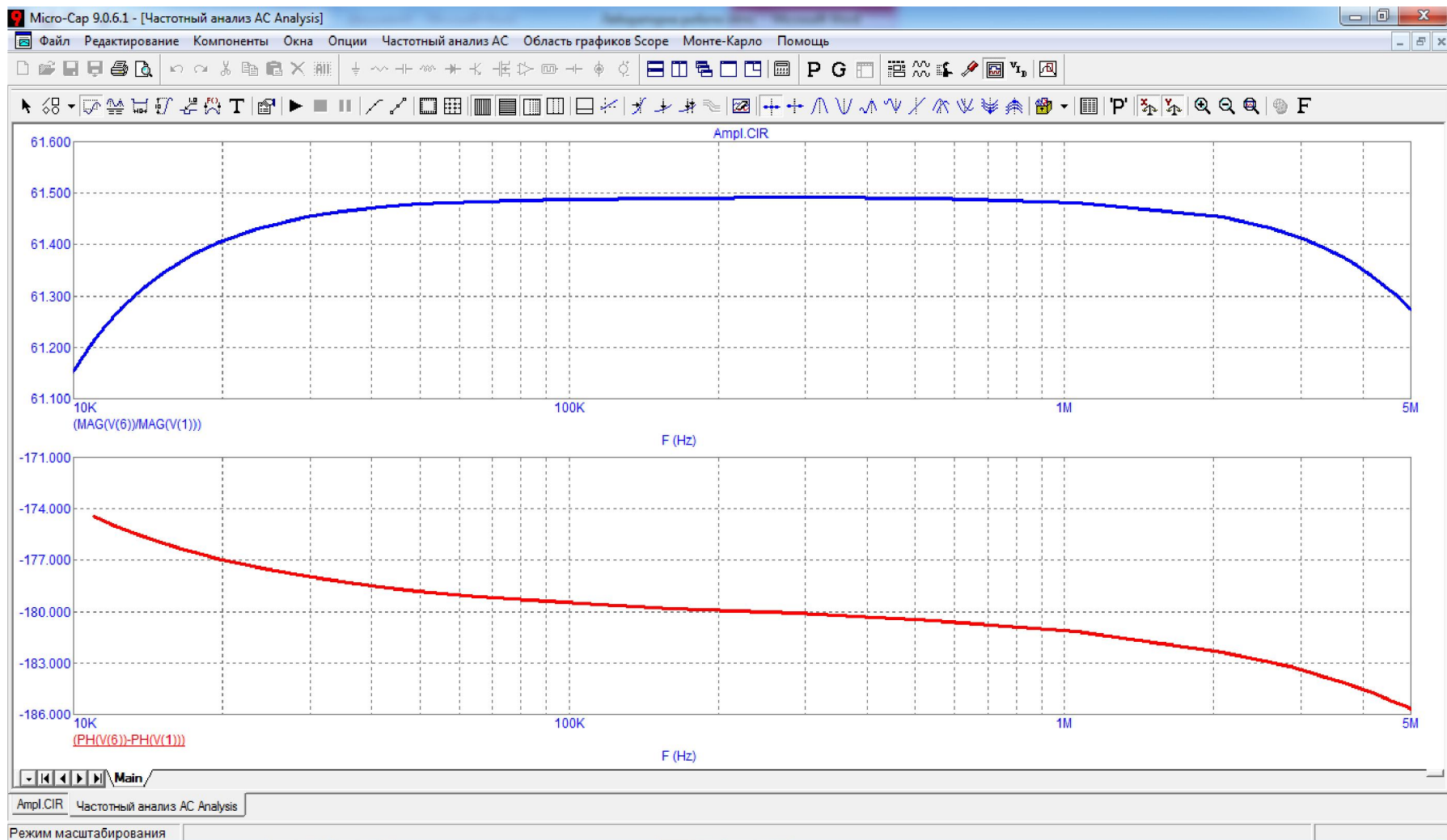


Рисунок 13.10

За допомогою графіка АЧХ легко визначити коефіцієнт підсилення за напругою. На робочій частоті 100 кГц він дорівнює $K_u = 61,35$ одиниць. Водночас, як видно з рисунка, суттєва зміна частоти сигналу виявляє порушення рівномірності підсилення і помітне зменшення коефіцієнта підсилення. У зв'язку з цим вводять поняття *смуги прозорості*, яка охоплює увесь частотний діапазон, де поточні значення коефіцієнта підсилення перевищують рівень $\frac{1}{\sqrt{2}} K_{max} \approx 0,707 K_{max}$, що забезпечує рівномірне підсилення кожної із гармонік спектру сигналу, але у випадку, якщо його ширина менша від ширини смуги прозорості. Інакше спостерігаються спотворення сигналу, які називають частотними і відносять, поряд з фазовими, до лінійних спотворень сигналів.

4. Існує і інший різновид спотворень сигналу. Він пов'язаний з нелінійними властивостями підсилювального елемента. На рис. 13.11 та на рис. 13.12 показано приклади нелінійних спотворень відносно вхідного синусоїдного сигналу. В першому випадку причиною стало чимале збільшення амплітуди вхідної напруги, що призвело до виходу підсилювача з квазілінійного режиму роботи – режиму «малого сигналу». В результаті під час підсилення робоча точка виходить за межі активної області в зону насичення та в зону відсічки струмів біполярного транзистора. В другому випадку причиною нелінійних спотворень синусоїдного сигналу стало суттєва зміна розташування точки покою, де навіть в умовах режиму «малого сигналу» робоча точка може полишати межі активної області. Місце ж розташування точки покою можна змінити, наприклад, зміною співвідношення між резисторами дільника напруги R_1 і R_2 . Як видно з обох рисунків, характерною особливістю нелінійних спотворень є зміна спектрального складу вихідного сигналу порівняно з вхідним – в ньому з'являються нові, кратні частотам вхідного сигналу, гармонійні складові.

Наразі пропонується дослідити зазначені режими роботи підсилювача, для чого спочатку потрібно за інших сталих умов збільшити амплітуду вхідної напруги до значення 160 мВ і в режимі «Аналіз перехідних процесів (Transient)» дослідити та роздрукувати часові діаграми вхідної і вихідної напруг. Потому повторити дослід, попередньо зменшивши вдвічі такі параметри – значення амплітуди вхідної синусоїдної напруги $U_{max} = 80$ мВ, таким чином повернувши лінійний режим роботи, та значення опору резистора $R_2 = 1$ кОм, тобто знову створивши передумови, але вже інші, для нелінійного спотворення синусоїдного сигналу.

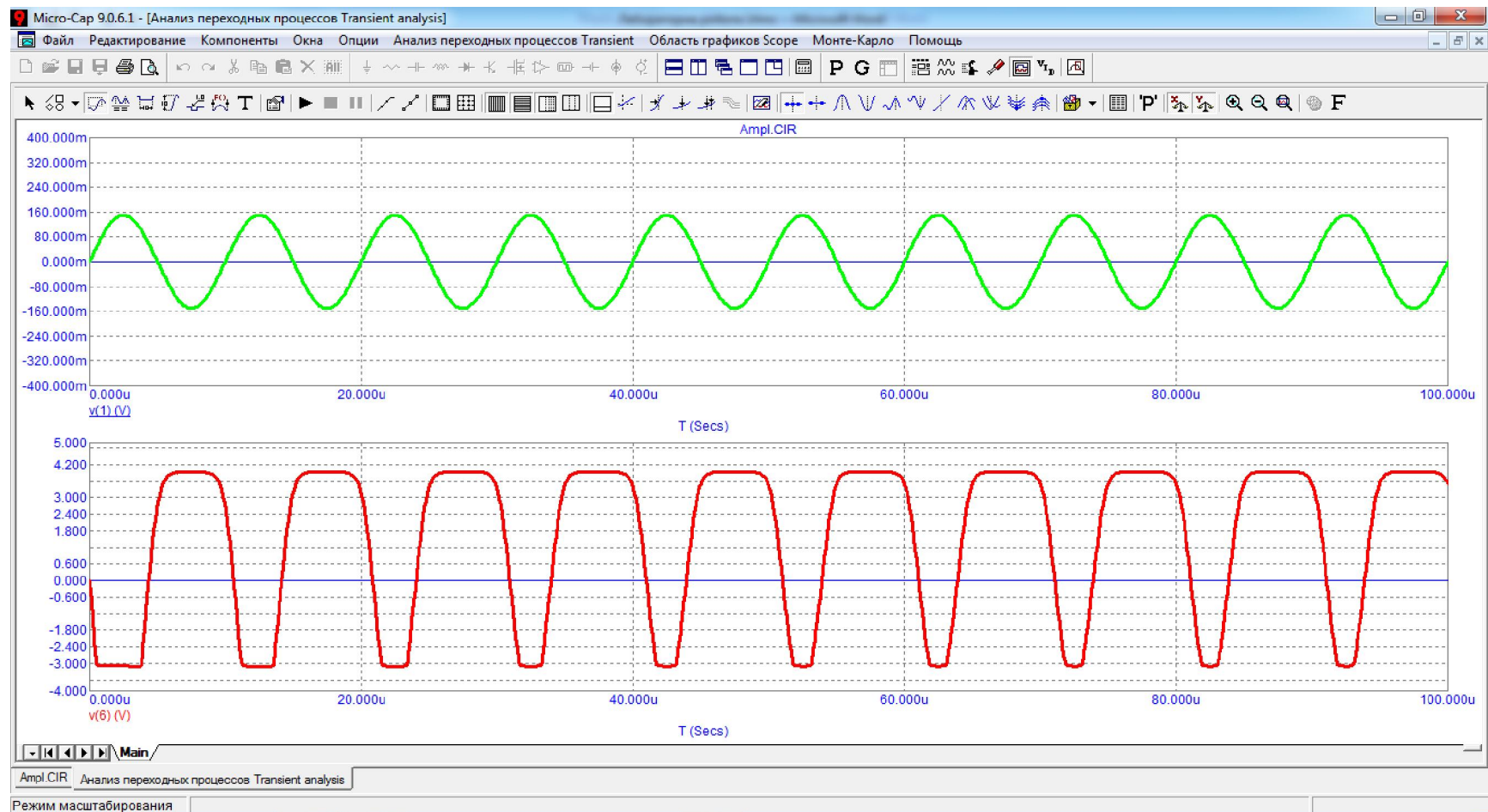


Рисунок 13.11

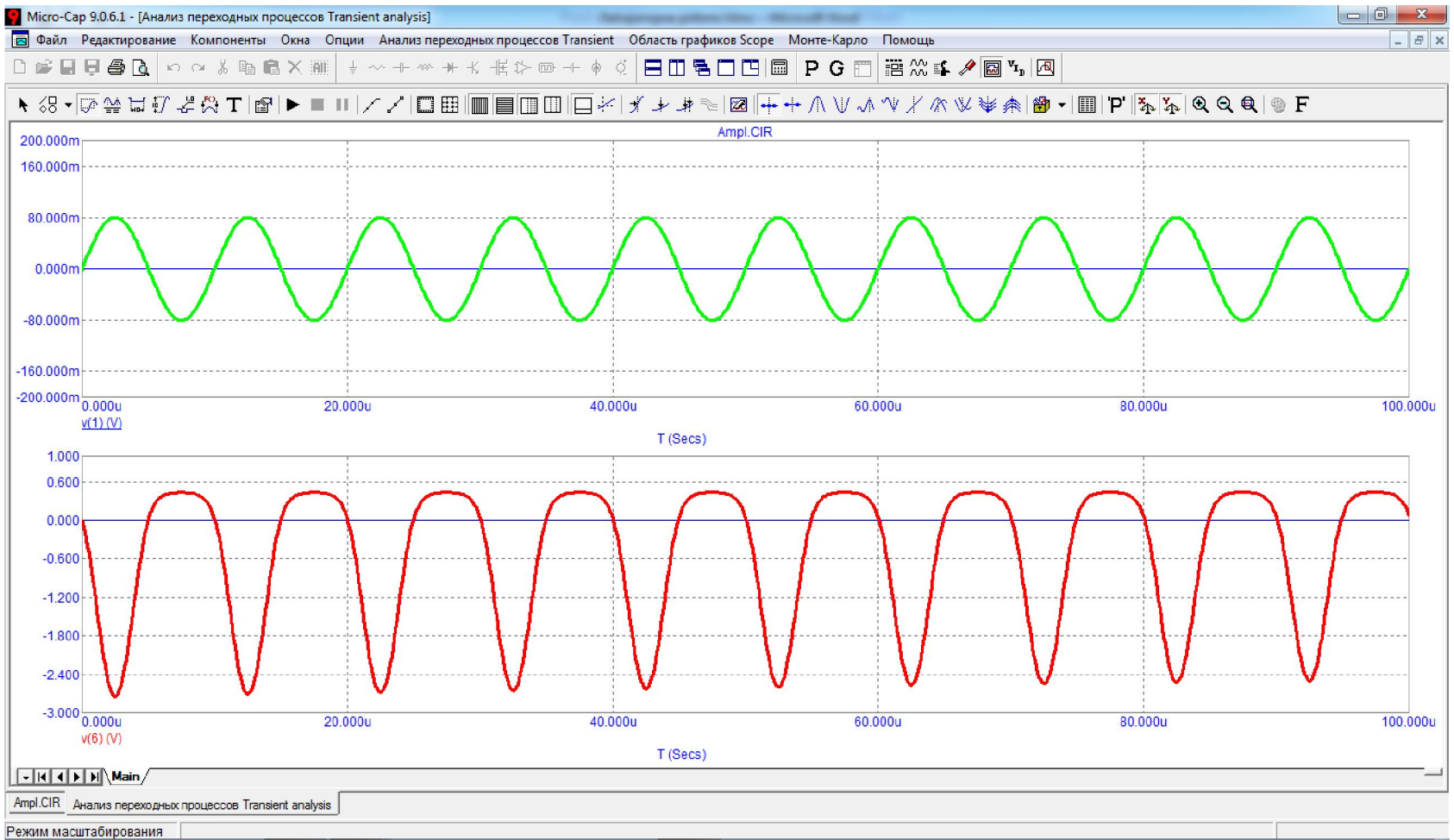


Рисунок 13.12

Обробка результатів дослідження

1. За графіками вхідного та вихідного сигналу визначити коефіцієнт підсилення напруги. Порівняти його зі значенням, отриманим за допомогою амплітудно-частотної характеристики.
2. Зробити висновки по роботі.

Контрольні питання

1. Конструкція біполярного транзистора.
2. Вхідні та вихідні характеристики біполярного транзистора.
3. Режими роботи біполярного транзистора.
4. Пояснити роботу схеми підсилювального каскаду та призначення її елементів.
5. Існуючі класи підсилення сигналу та їх особливості.

Лабораторна робота №14мс

Дослідження компенсаційного стабілізатора постійної напруги

Мета роботи: вивчення схеми, принципу дії та головних властивостей компенсаційного стабілізатора напруги.

Короткі теоретичні відомості

Стабілізатором називається пристрій, призначений для утримання в заданих межах коливання напруги живлення, струму або напруги на опорі навантаження на певному фіксованому рівні.

В разі стабілізації напруги певні обмеження накладаються на коливання струму навантаження. Це ж стосується напруги, якщо стабілізації підлягає струм.

Розрізняють два типи стабілізаторів – параметричні та компенсаційні. Робота параметричного стабілізатора будується на властивостях ВАХ деяких нелінійних елементів. Наприклад, для стабілізації напруги використовується напівпровідниковий діод – стабілітрон, на зворотній вітці ВАХ якого є ділянка стабілізації напруги. (рис. 14.1, а). Якщо ввімкнути його в зворотному напрямі та встановити струм I_{CT} , що відповідає вказаній ділянці, то в певних межах коливання напруги живлення падіння напруги на самому стабілітроні змінюватись майже не буде. Звідси витікає схема найпростішого параметричного стабілізатора, що зображена на рис. 14.1, б.

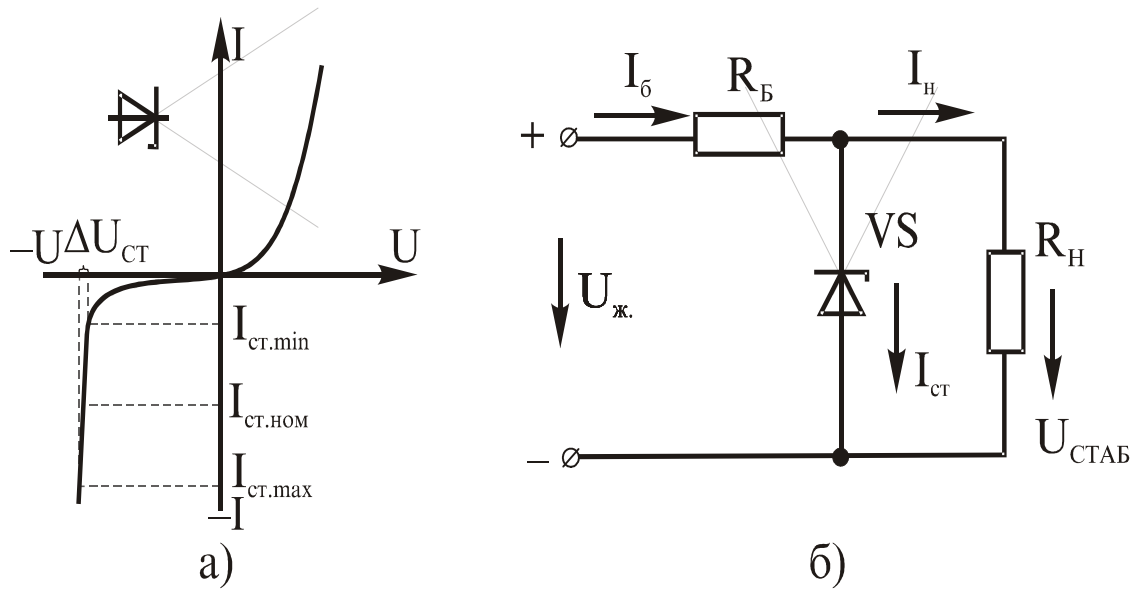


Рисунок. 15.1

Резистор R_B використовується для обмеження струму $I_{ст}$, тобто, з його допомогою встановлюється потрібний режим роботи стабілітрона.

На відміну від параметричного, в компенсаційному стабілізаторі використовується активний елемент – транзистор, котрий вмикається послідовно з навантаженням. Принцип дії стабілізатора базується на принципі розподілу напруги живлення між опорами транзистора та навантаження таким чином, щоб рівень напруги на останньому залишався незмінним.

Найпростіша схема компенсаційного стабілізатора зображена на рис. 14.2.

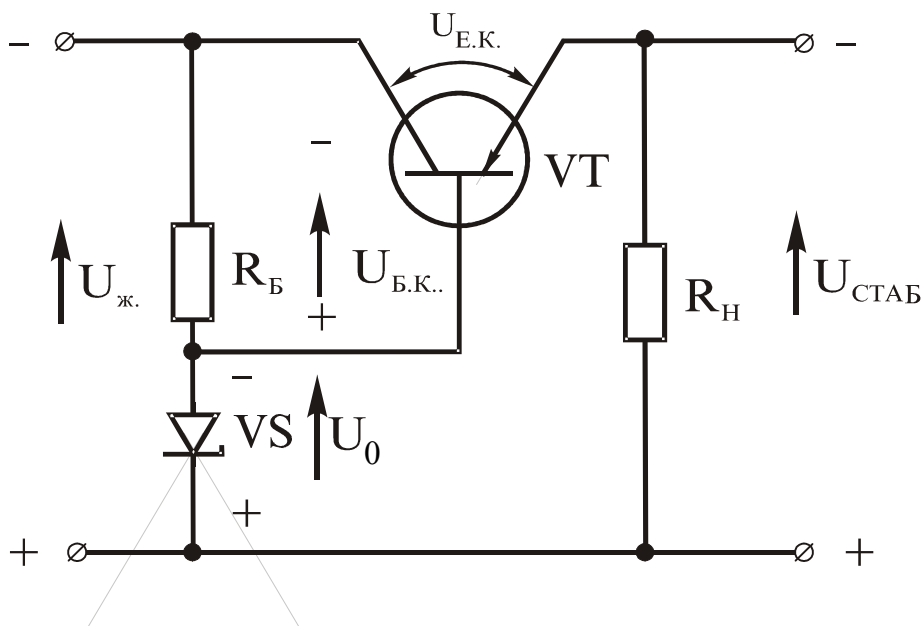


Рисунок. 14.2

Потенціал бази транзистора VT фіксований відносно його колектора і дорівнює напрузі стабілізації U_0 стабілітрона VS . Тому стан транзистора VT , або його опір, залежатиме тільки від рівня напруги, $U_{БК}$ яка одночасно є спадом напруги на резисторі R_B . Оскільки U_0 залишається незмінним, то $U_{БК}$ змінюється пропорційно напрузі живлення $U_{Ж}$. Відповідно, змінюється і опір транзистора VT , тобто спад напруги між його емітером і колектором $U_{ЕК}$. Між входною та вихідною напругами стабілізатора існує зв'язок:

$$U_{Ж} = U_{ЕК} + U_{СТАБ}.$$

Звідси $U_{СТАБ} = U_{Ж} - U_{ЕК}$.

Пропорційна зміна $U_{ЕК}$, відносно $U_{Ж}$ не змінює різниці між ними й вихідна напруга $U_{СТАБ}$ залишається стабілізованою.

З іншого боку $U_{СТАБ} \approx U_{ОП}$, оскільки через відкритий емітер-базовий перехід стабілітрон вмикається паралельно опору навантаження.

Розглянута схема стабілізатора має невисокий коефіцієнт стабілізації, який залежить від температури. Вона використовується для живлення невідповідальних споживачів.

На рис. 14.3 наведена принципова схема стабілізатора з регульованим рівнем стабілізованої напруги.

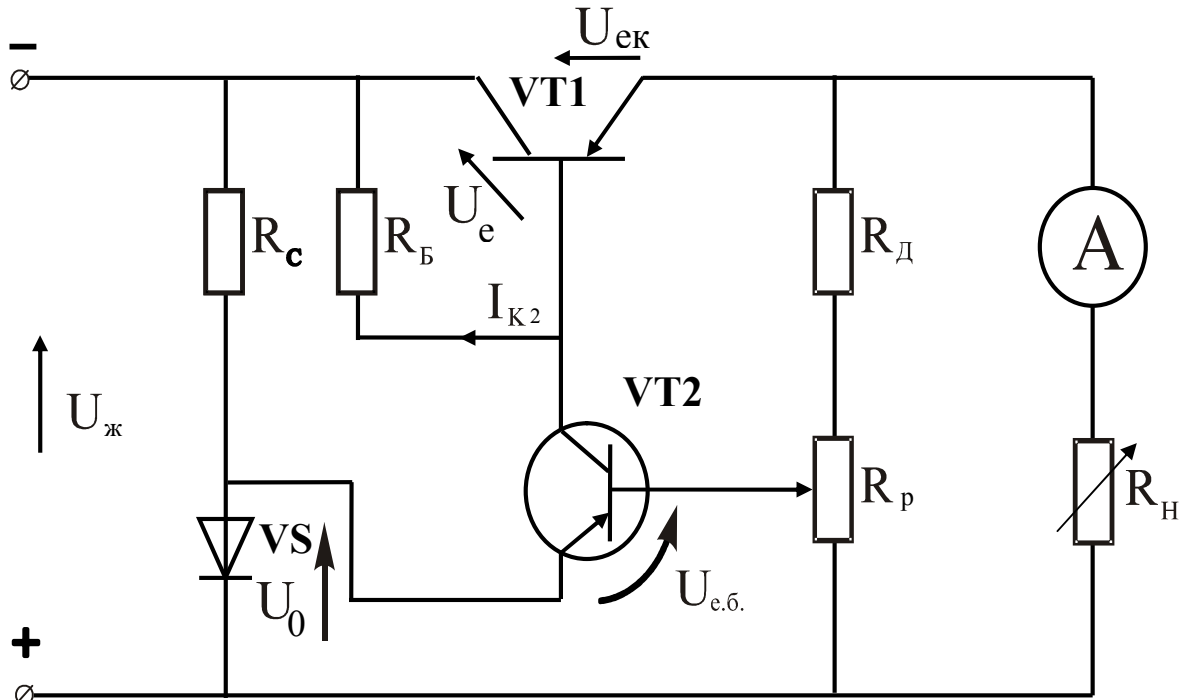


Рисунок. 14.3

Вона працює за тим же принципом, що й попередня, але має ряд відмінностей. Головною є регулювання рівня стабілізованої напруги. Досягається це введенням в схему додаткового транзистора $VT2$. Потенціал його емітера відносно бази фіксований і дорівнює U_0 . Тому стан транзистора (його опір), залежить тільки від падіння напруги на резисторі R_p , що визначає потенціал його бази. Змінюючи опір R_p , регулюють напругу U_{EB} транзистора $VT2$, що призводить до зміни його колекторного струму I_{K2} . Цей струм створює падіння напруги на резисторі R_B , яка рівна напрузі U_{BK} транзистора $VT1$, і є регулюючою для останнього.

Якщо з деякої причини напруга живлення зросте, то миттєво зросте і напруга на розподільвачі R_D-R_p . Внаслідок цього потенціал бази транзистора $VT2$ зменшиться і напруга U_{EB} зросте. Струм колектора також зросте, що призведе до зростання напруги U_{EB} транзистора $VT1$, внаслідок чого його опір збільшиться. Підвищення опору означає зростання напруги U_{EK} , тобто, компенсуватиметься приріст напруги на навантаженні за рахунок значного швидкого зростання напруги U_{EK} транзистора $VT1$. Цей процес відбувається практично миттєво і триватиме, доки потенціал бази транзистора $VT2$ не впаде до попереднього рівня.

Те ж саме буде відбуватися і в разі зниження напруги $U_{Ж}$, з тією різницею, що вхідна напруга U_{EB} транзистора $VT2$ зменшиться, а його опір зросте. Як наслідок, напруга U_{BK} транзистора $VT1$ також зменшується і його опір пропорційно знижується, що призводить до компенсації спаду напруги на навантаженні.

Якість роботи стабілізатора оцінюється його коефіцієнтом стабілізації $K_{СТ}$. Він визначається через відносні прирости вхідної та вихідної напруги на перехідній характеристиці стабілізатора:

$$K_{СТ} = \frac{\left(\frac{\Delta U_{Ж}}{U_{Ж.НОМ}} \right)}{\left(\frac{\Delta U_{СТАБ}}{U_{СТАБ.НОМ}} \right)} \quad (14.1)$$

Для його розрахунку потрібно побудувати перехідну характеристику $U_{СТ}=f(U_{Ж})$, типовий вигляд котрої зображено на рис. 14.4. На цьому ж рисунку зображена методика визначення $K_{СТ}$ у відповідності з виразом (14.1).

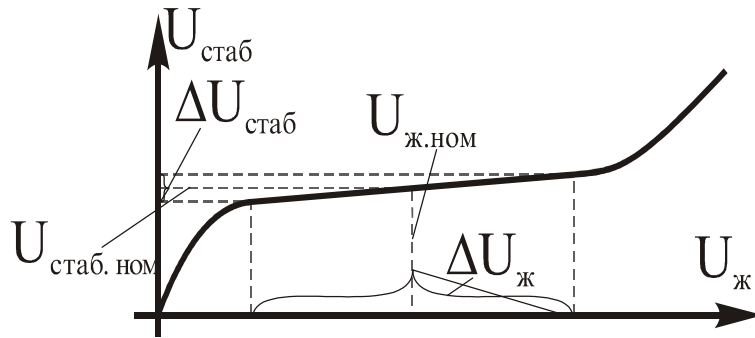


Рисунок. 14.4

Коефіцієнт стабілізації повинен бути значно більшим одиниці. Для якісних стабілізаторів, що працюють на відповідальних споживачів, значення K_{CT} може досягати 10^5 .

Порядок виконання роботи

1. В середовищі MicroCap зібрати схему, яка зображена на рис. 14.5.

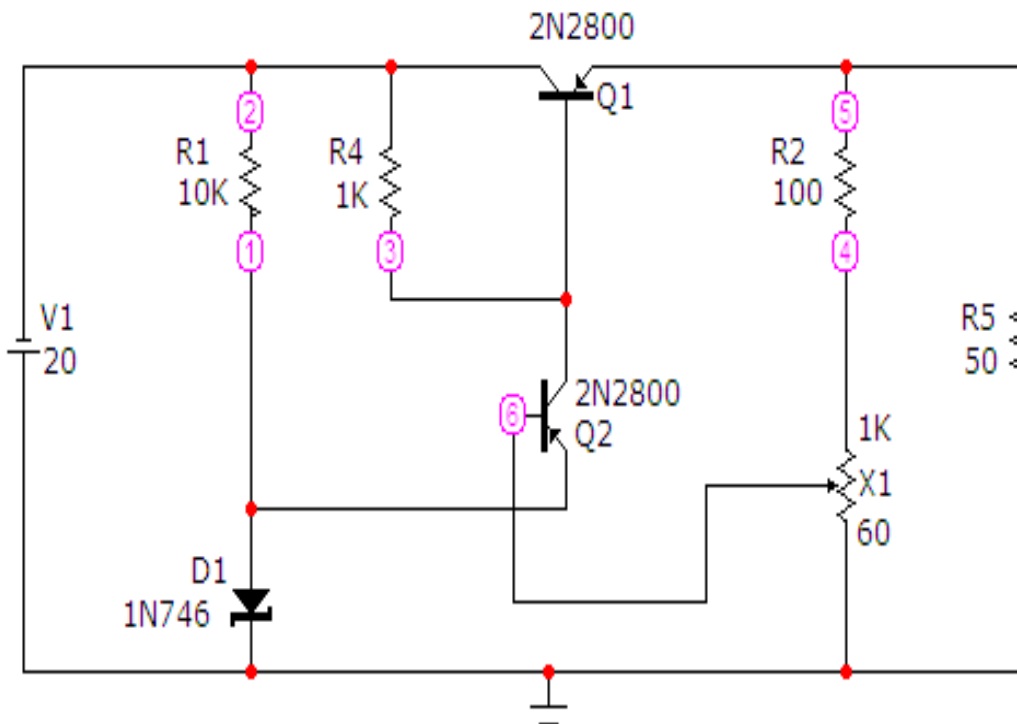


Рисунок 14.5

Модель біполярного транзистора $Q1$ (яку задає викладач) вибирається у вікні, фрагмент якого показаний на рис. 14.6. Викликати це вікно можна за допомогою опції «Компоненты/Analog Primitives/Active Devices/PNP».

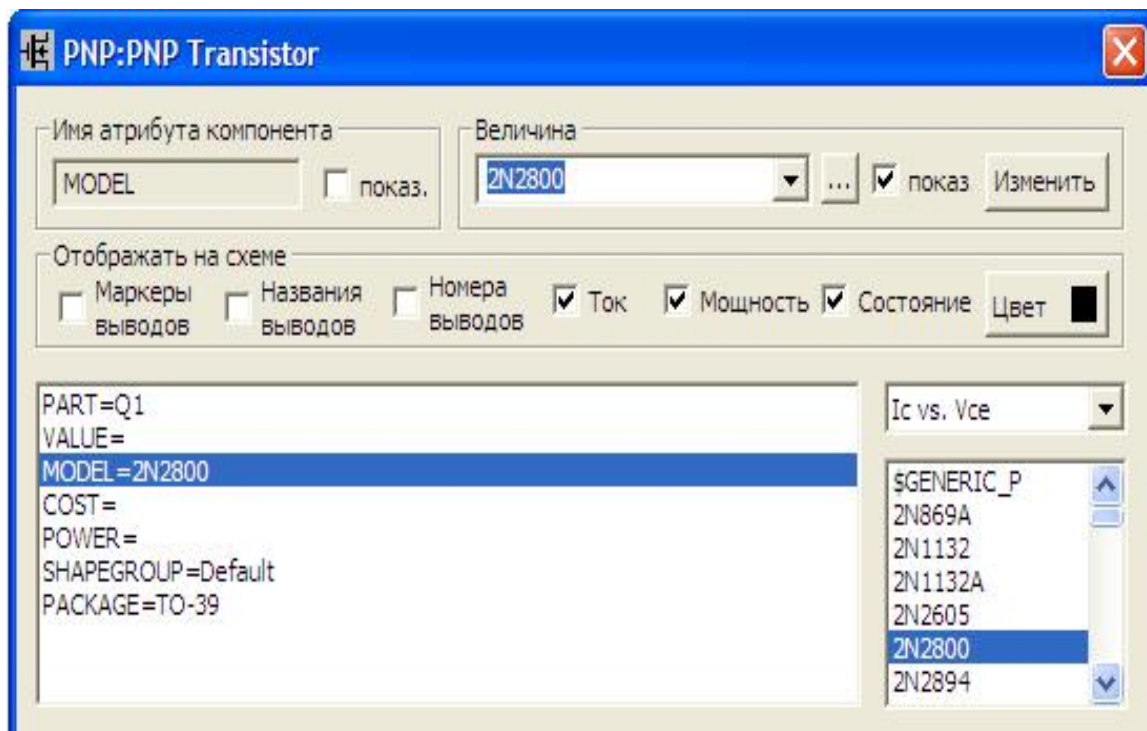


Рисунок. 14.6

Модель стабилитрона *DI* (яку задає викладач) вибирається у вікні, фрагмент якого показаний на рис. 14.7. Викликати це вікно можна за допомогою опції «Компоненты Analog Primitives/Passive Components/Zener».

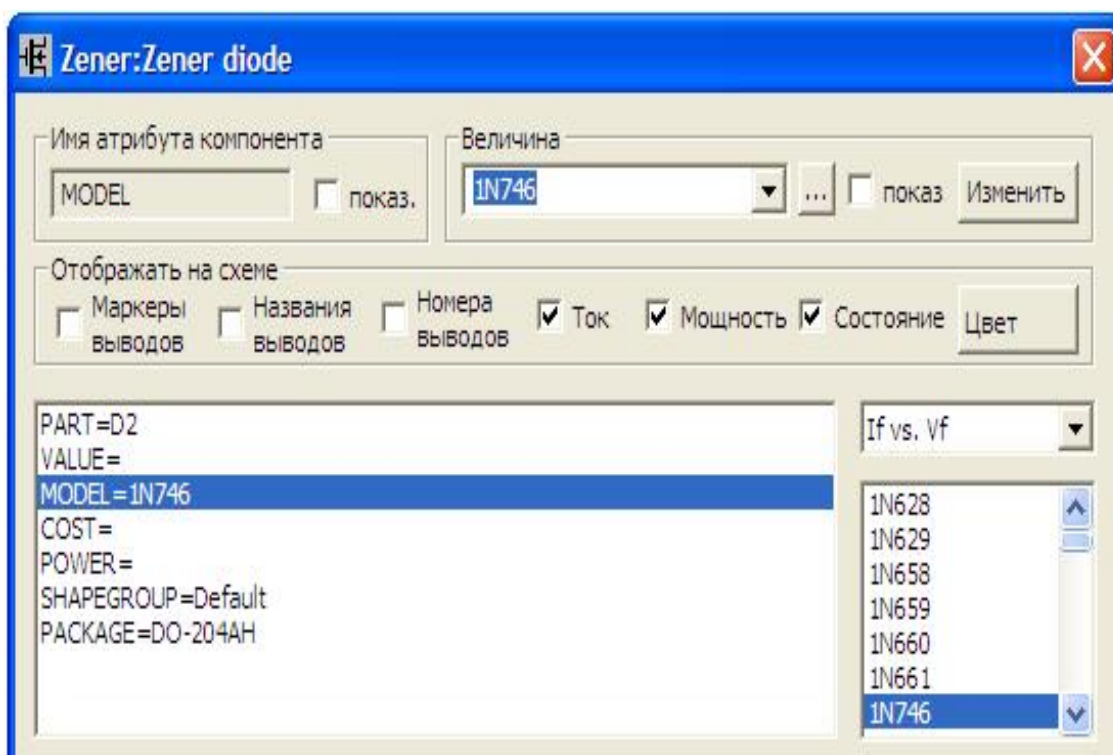


Рисунок. 14.7

Потенціометр $X1$ можна викликати на екран опцією «Компоненты/Analog Primitives/Macros/Pot». Його атрибути задаються у вікні (рис. 14.8), яке з'являється при перенесенні компонента на робоче поле програми.

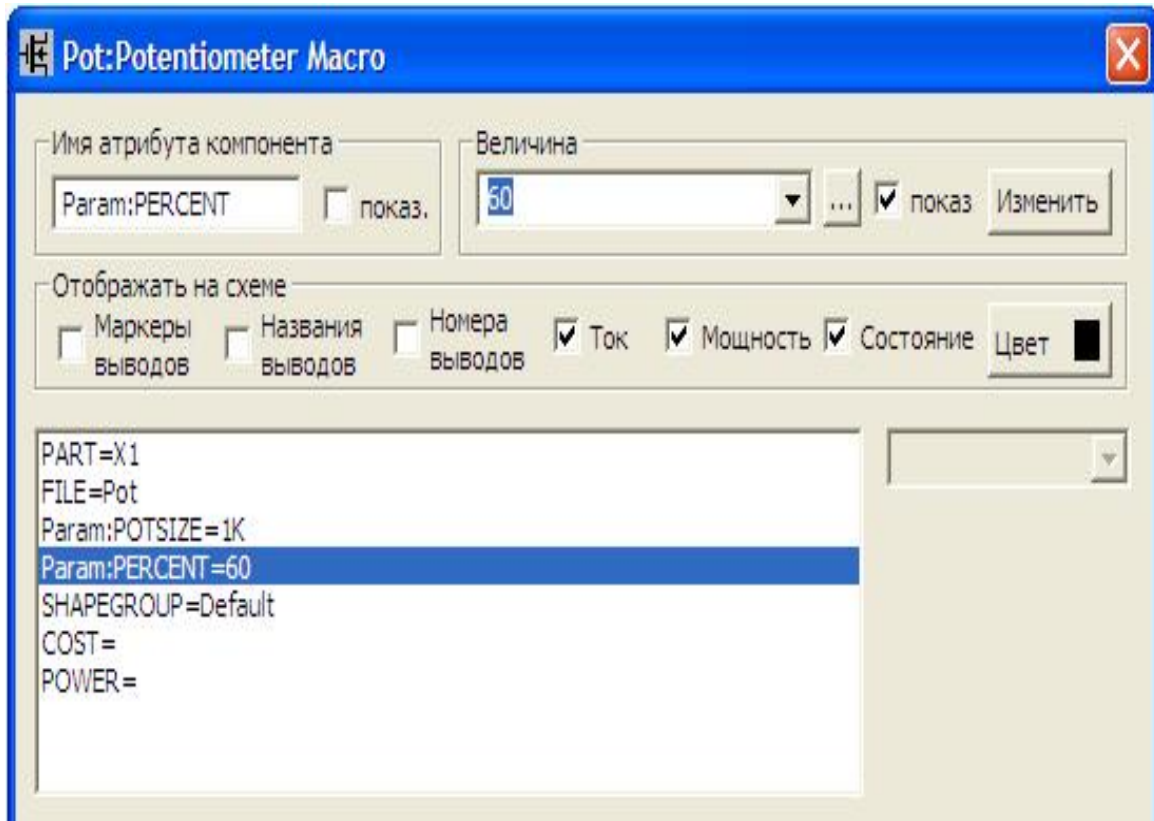


Рисунок. 14.8

В цьому вікні необхідно обов'язково ввести такі дані:

- $PART$ – ім'я потенціометра;
- $FILE$ – ім'я макроса;
- $Param:POTSIZE$ – загальний опір потенціометра (Ом);
- $Param:PERCENT$ – долю загального опору від початку потенціометра до рухомого контакту (%).

2. При напрузі живлення 20 В , змінюючи атрибут $Param:PERCENT$ потенціометра $X1$ та опір навантаження $R5$, встановити вихідну напругу $V(5) = 9\text{ В}$ і струм навантаження $I(R5) = 0.3\text{ А}$. Для цього слід на верхній панелі головного вікна відкрити опцію «Анализ» і запустити режим «Динамический анализ по постоянному току (Dynamic DC)», як це показано на рис. 14.9 – 14.10.

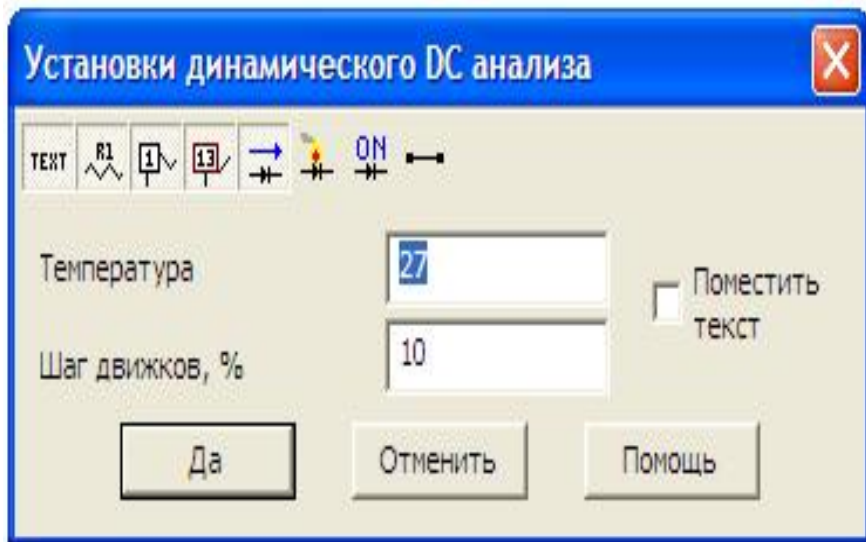


Рисунок. 14.9

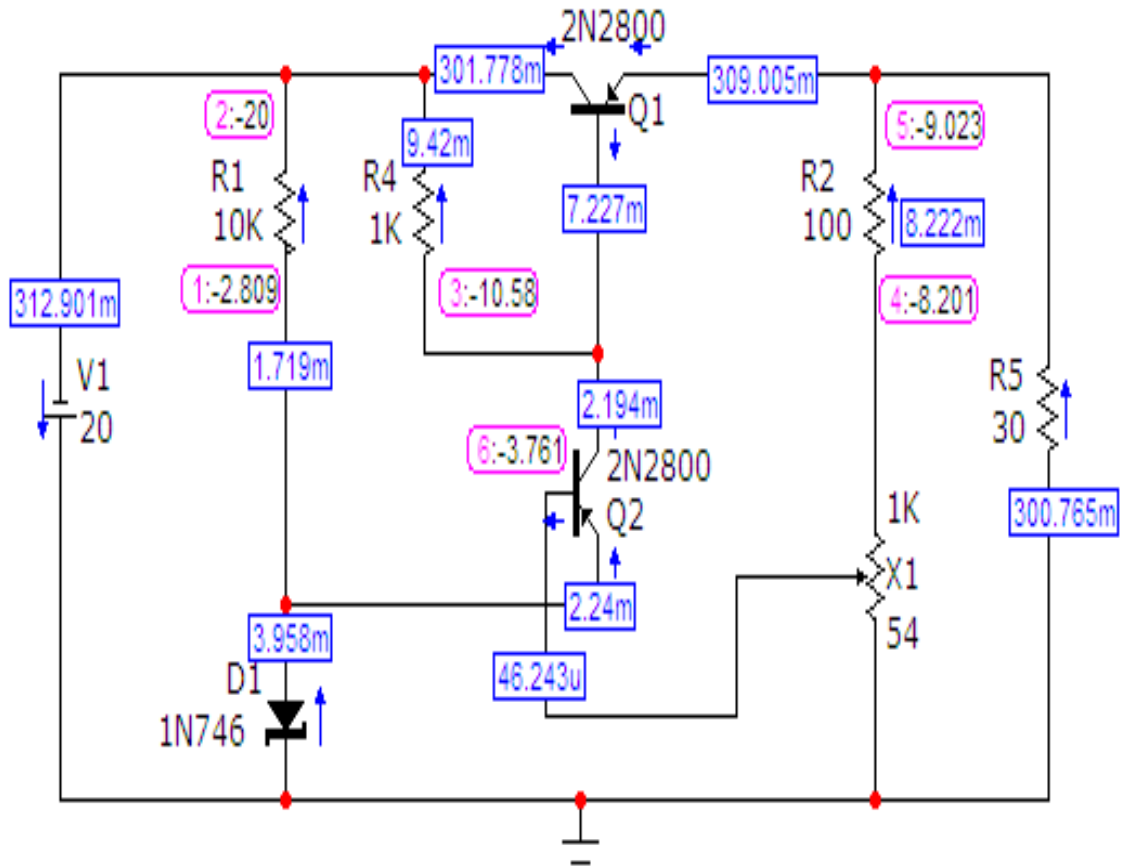


Рисунок. 14.10

З рис. 14.10 видно, що необхідний режим має місце при значеннях $Param:PERCENT = 54\%$ та $R5 = 30 \text{ Ом}$.

3. Не змінюючи параметрів схеми, зняти залежність $U_{вих} = f(U_{жс})$.

Для цього необхідно на верхній панелі головного вікна відкрити опцію «Анализ» і запустити режим «Анализ по постоянному току (DC)», після чого на екрані з'явиться вікно, зображене на рис. 14.11.

В ньому необхідно задати такі параметри:

- ім'я змінної – в нашому випадку це вхідна е.р.с. $V1$;
- діапазон та крок корегування цієї змінної – в нашому випадку прийнято 50,0,0.1;
- границя темпу змін розрахункових точок (віконце «Максимальное изменение %») – в нашому випадку прийнято 5%;
- характеристики графіку, що виводиться – в нашому випадку по вісі Х задається вхідна напруга з масштабом (50,0,5), по вісі Y – вихідна напруга з масштабом (Auto).

Далі натискається кнопка «Запустить».

Графік зображений на рис. 14.12.

Його слід роздрукувати.

4. В режимі роботи стабілізатора при $V(5) = 9 В$, змінюючи опір резистора $R5$ зняти навантажувальну характеристику $I_n = f(U_{cm})$ стабілізатора.

Для цього слід знову запустити режим «Динамический анализ по постоянному току (Dynamic DC)» з опцією «Многовариантный анализ», як це показано на рис. 14.13.

У віконцях цієї опції слід вказати:

- елемент, опір якого підлягає корегуванню, – $R5$;
- межі корегування – від 5 Ом до 60 Ом;
- крок корегування – 5 Ом.

Після натискання кнопки «Запустить» починається перерахунок режиму. Кожен наступний крок перерахунку виконується при натисканні кнопки «Next».

Значення потенціалу $V(5)$ і струму $I(R5)$ після кожного кроку перерахунку необхідно внести в таблицю 14.1.

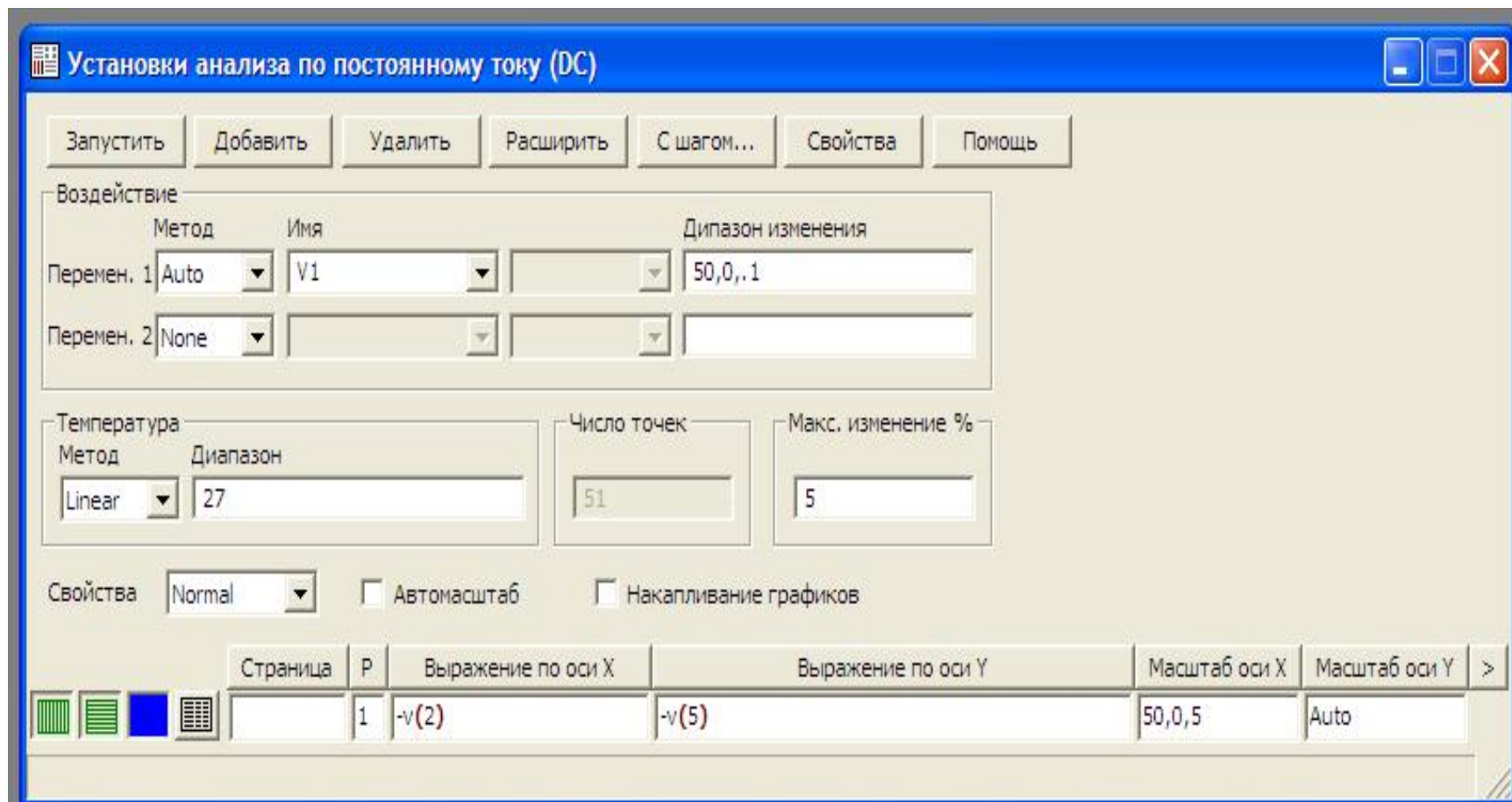


Рисунок. 14.11

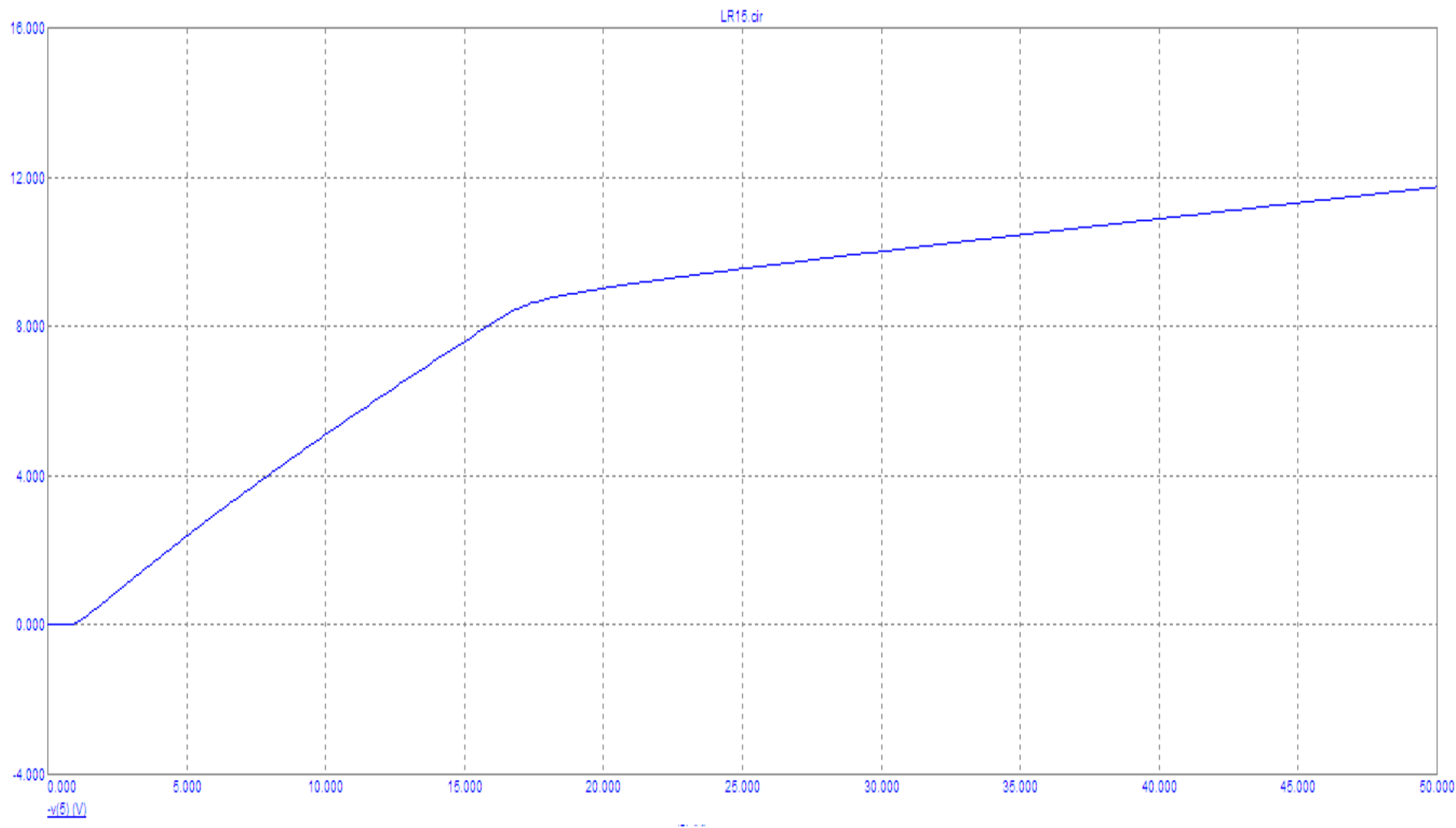


Рисунок. 14.12

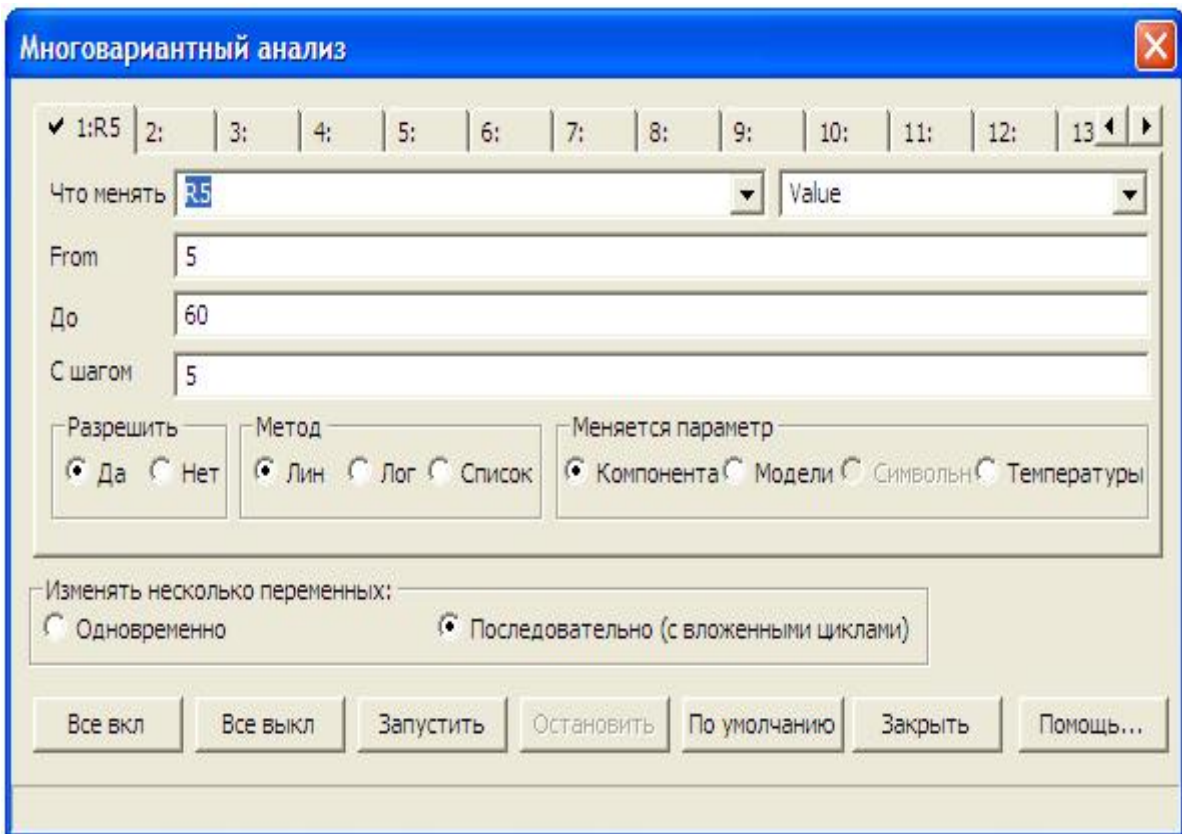


Рисунок. 14.13

5. Аналогічно п.2 встановити почергово $V(5) = 12\text{ В}$ та $V(5) = 15\text{ В}$ при струмі навантаження $I(R5) = 0.3\text{ А}$. Для кожного з цих випадків аналогічно п.3 зняти залежність $U_{вих} = f(U_{жс})$ і аналогічно п.4 зняти навантажувальну характеристику $I_n = f(U_{см})$. Дані для навантажувальної характеристики необхідно внести в таблицю 14.1.

Таблиця 14.1

$U_{см} = 9\text{ В}$		$U_{см} = 12\text{ В}$		$U_{см} = 15\text{ В}$	
$U_{вих}\text{ В}$	$I_n\text{ А}$	$U_{вих}\text{ В}$	$I_n\text{ А}$	$U_{вих}\text{ В}$	$I_n\text{ А}$

Обробка результатів дослідження

1. Для кожної з кривих $U_{вих} = f(U_{ж})$ розрахувати коефіцієнт стабілізації, взявши $U_{ж.ном.} = 20\text{ В}$ та $U_{ст.ном.} = 9, 12$ та 15 В .
2. Побудувати залежність $K_{stab} = f(U_{ст.ном.}/U_{ж.ном.})$.
3. Побудувати в одній системі координат навантажувальні характеристики стабілізатора.
4. Зробити висновки за результатами виконаної роботи.

Контрольні питання

1. Конструкція біполярного транзистора.
2. Вхідні та вихідні характеристики біполярного транзистора.
3. Режими роботи біполярного транзистора.
4. Конструкція стабілітрона.
5. Принцип роботи стабілітрона.
6. Призначення та області використання стабілізаторів.
7. Перелічити існуючі типи стабілізаторів.
8. Як визначається коефіцієнт стабілізації?
9. Навести схеми та пояснити роботу найпростіших параметричних та компенсаційних стабілізаторів.

Лабораторна робота №15тс

Дослідження трифазного однофазного випрямляча (схема Міткевича) в некерованому режимі роботи

Мета роботи: дослідити основні електричні властивості трифазного однофазного випрямляча в некерованому режимі його роботи на активне та активно-індуктивне навантаження.

Короткі теоретичні відомості

Випрямлячем називають пристрій, призначений для перетворення змінного струму в постійний. До основних вузлів випрямляча відносять трансформаторний, вентильний та частотно-фільтрувальний блоки. *Вентильний блок* є обов'язковим. Він, власне, і здійснює перетворення змінного струму в однонаправлений пульсуючий. Це відбувається завдяки особливому характеру електричних властивостей вентильних елементів, які і складають основу цього блоку: вентильні елементи здатні проводити електричний струм провідності тільки в одному напрямку, забезпечуючи тим самим однонаправленість проходження струму і через навантаження. Їх

основний режим роботи – ключовий. В цьому режимі такий елемент здатен знаходитися як завгодно довго в одному із двох стійких станів – низькоомному, електричний опір в якому за першого наближення відсутній, що відповідає замкнутому стану електричного ключа, та альтернативному – високоомному з відповідно протилежними наведеними якостями. Серед різновидів можливих вентильних елементів на сьогодні найбільш поширеними є напівпровідникові діоди та напівпровідникові тріодні тиристори різних модифікацій. Електричний опір діодів залежить від полярності прикладеної напруги, де за прямої діод перебуває в низькоомному стані і навпаки – за зворотної. На відміну від діодів опір тріодних вентильних елементів залежить не тільки від полярності прикладеної напруги, але від дії інших, в першу чергу, зовнішніх, чинників, наприклад, імпульсів електричних струмів в електродах керування. Така обставина створює можливість організувати керований режим роботи як вентильного елемента окремо, так і випрямляча в цілому, де у спосіб побудови певного алгоритму комутації різних груп вентильних елементів випрямляч набуває здатності штучно задавати параметри випрямленої електричної енергії.

Повна класифікаційна схема випрямлячів доволі розгалужена. Тому розглянемо наразі тільки декілька класифікаційних ознак. Зокрема за ознакою числа фаз мережі живлення випрямлячі поділяють на однофазні та трифазні, а за вихідною потужністю – малої потужності (одиниці кіловат), середньої потужності (десятки кіловат) та великої потужності (більше сотні кіловат).

Трифазні випрямлячі можуть бути зібрані за різними схемами. Однією з канонічних схем є схема трифазного одноктного випрямляча, який ще називають схемою Міткевича. Топологію цієї схеми наведено на рис. 15.1.

Даний випрямляч має ряд особливостей і використовується для живлення низьковольтних обмоток збудження синхронних двигунів середньої та великої потужності, а також – у комбінованому варіанті як кероване джерело струму зварювання агрегатів типу ТД, які дозволяють здійснювати зварювальні роботи в режимі безперервного струму та імпульсному режимі, коли струм дуги підтримується пакетом з кількох півперіодів фазної напруги і між якими існує нульовий проміжок.

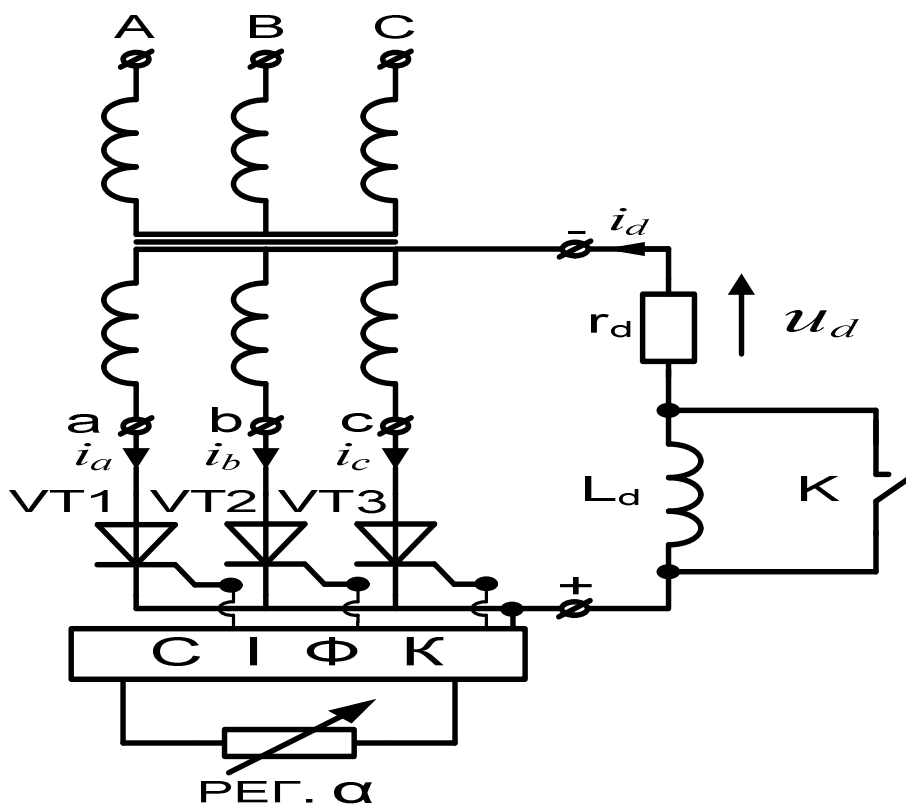


Рисунок 15.1

Наразі розглянемо особливості роботи випрямлячів даного типу. В схемі випрямляча вентильні елементи (в некерованому режимі – діоди, а в керованому – тиристри) увімкнуті послідовно у вторинні обмотки трансформатора. Тому робочим є тільки один півперіод фазної напруги. Саме за цієї причини випрямляч класифікується як однокатодний. Це означає, що струм у вторинних обмотках є пульсуючим і має нульову гармонічну складову, яка створює постійне магнітне поле і підмагнічує осердя трансформатора. Варто зазначити, що таке додаткове підмагнічування негативно позначається на роботі трансформатора, оскільки викликає перегрівання обмоток та зростання втрат в його осерді. Для запобігання додаткових втрат, встановлена потужність трансформатора повинна на 30-40% перевищувати потужність навантаження, що є головним недоліком такого випрямляча.

Вентильні елементи випрямляча можуть бути з'єднані або в анодну, або катодну групи. На рис. 15.1 представлено катодну групу тиристорів, оскільки їх катоди з'єднано між собою спільною струмопровідною шиною. Через це потенціали катодів усіх вентилів за будь-яких умов залишаються однаковими і визначаються наведеною е.р.с. тієї фази, в якій знаходиться

увімкнений вентиль, який і передає потенціал на шину. В некерованому режимі з поміж трьох вентильних елементів в увімкненому стані буде перебувати лише елемент тієї фази, потенціал на аноді якого перевищуватиме потенціали на анодах інших вентилів. Для керованого режиму додатково і домінуючою умовою ще має бути «зовнішній дозвіл» на вмикання даного елемента, наприклад, імпульс струму на його керуючому електроді, що має надійти в певний момент часу від системи імпульсно-фазного керування (СІФК). Сам момент часу визначається заданим кутом вмикання α , тобто фазним кутом, відлік якого здійснюється відносно точок природньої комутації – моментів вмикання вентильних елементів в некерованому режимі (коли $\alpha = 0$). Кожна така точка визначає певний момент часу, коли миттєве значення однієї з трьох фазних е.р.с., наведених на вторинних обмотках трансформатора, починає перевищувати значення інших двох. Наприклад, для фази a такою точкою природньої комутації є момент часу, що відповідає куту в 30^0 ел., для фази b – 150^0 ел., а для фази c – 270^0 ел. відповідно. Відтак кількість точок природньої комутації на періоді напруги живлення для даної схеми випрямляча дорівнює трьом. Тривалість часу, протягом якого вентильний елемент відповідної фази перебуває в увімкненому стані і через нього проходить імпульс фазного струму, складає для некерованого режиму третину періоду. Для керованого режиму цей час в залежності від значення кута α може бути і меншим. Таким чином, імпульси струмів кожної з трьох фаз послідовно у часі проходять через відповідні увімкнені вентиля і в своїй сумі формують в навантаженні повний період випрямленого струму та напруги, через що число пульсацій за період в трифазному однотактному випрямлячеві дорівнює трьом: $m_n = 3$.

За об'єднання вентильних елементів в анодну групу напрям випрямленого струму та полярність випрямленої напруги зміняться на протилежні.

Середнє значення (постійна складова) випрямленої пульсуючої напруги U_d в некерованому режимі визначається з виразу:

$$U_d = \frac{3}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{3}}^{+\frac{\pi}{3}} U_{2m} \cos \Theta d\Theta = \frac{3U_{2m}}{2\pi} 2 \sin \frac{\pi}{3} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} U_{2m} = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} U_2 \approx 1,17 U_2,$$

де: $U_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}U_{2m}$ – діюче значення фазної напруги вторинної обмотки трансформатора.

Дане співвідношення отримано за умови суміщення точки початку відліку змінної інтегрування Θ з амплітудою однієї з пульсацій випрямленої напруги. Коефіцієнт «три» перед інтегралом визначає кількість таких пульсацій на періоді.

Водночас середнє значення випрямленого струму I_d в некерованому режимі визначається за законом Ома $I_d = \frac{U_d}{r_d}$. Співвідношення є чинним як для суто активного, так і для активно-індуктивного навантаження.

Порядок виконання роботи

1. В середовищі MicroCap зібрати схему некерованого трифазного однотактного випрямляча (рис. 15.2) в режимі роботи на активне навантаження. Типи напівпровідникових випрямних діодів $D1$, $D2$, $D3$ задає викладач.

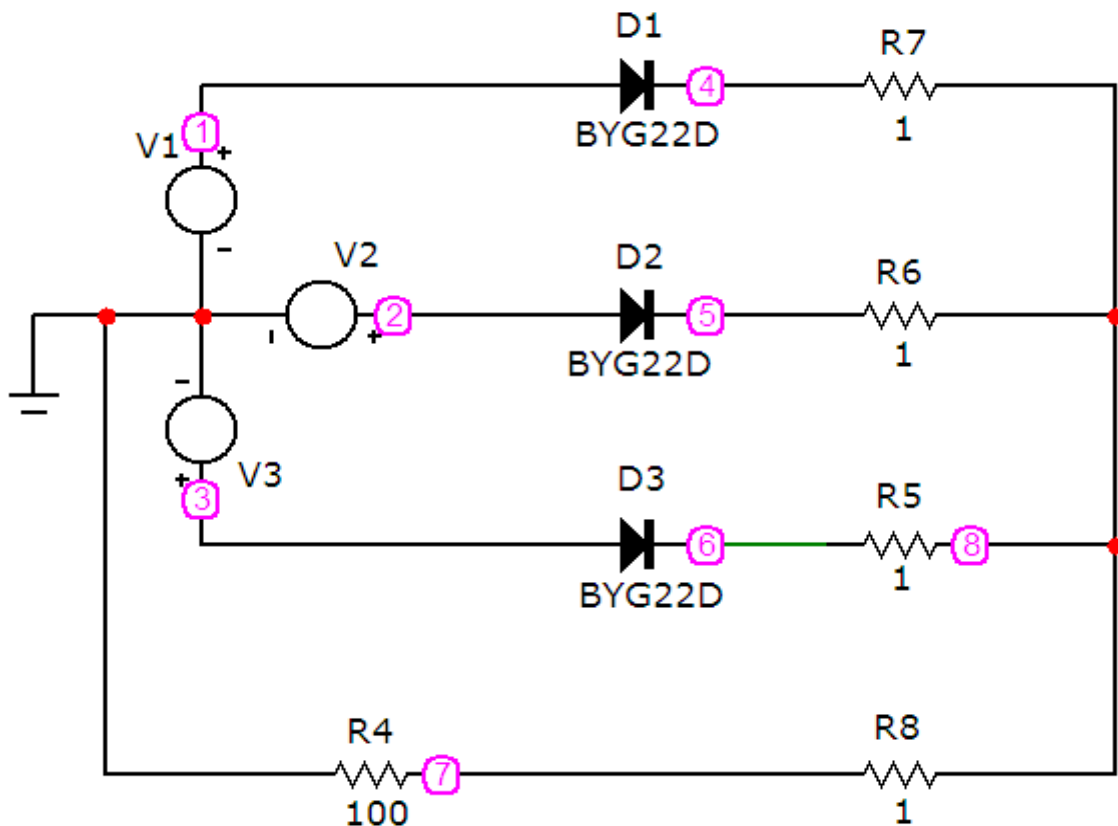


Рисунок 15.2

Параметри трьох фазних джерел $V1$ (фаза A), $V2$ (фаза B), $V3$ (фаза C), які формують трифазну синусоїдну напругу, задаються з урахуванням фази в кожному з трьох вікон, що з'являються при перенесенні відповідних компонентів на робоче поле програми. В цих вікнах слід вибрати вкладку Sin і занести такі параметри: частоту 50 Гц; амплітудні значення е.р.с. 100 В; початкові фази 0° , -120° і $+120^\circ$ для джерел $V1$ (фаза A), $V2$ (фаза B), $V3$ (фаза C) відповідно.

Для прикладу на рис. 15.3 наведено вікно із заданими параметрами джерела $V2$ фази B .

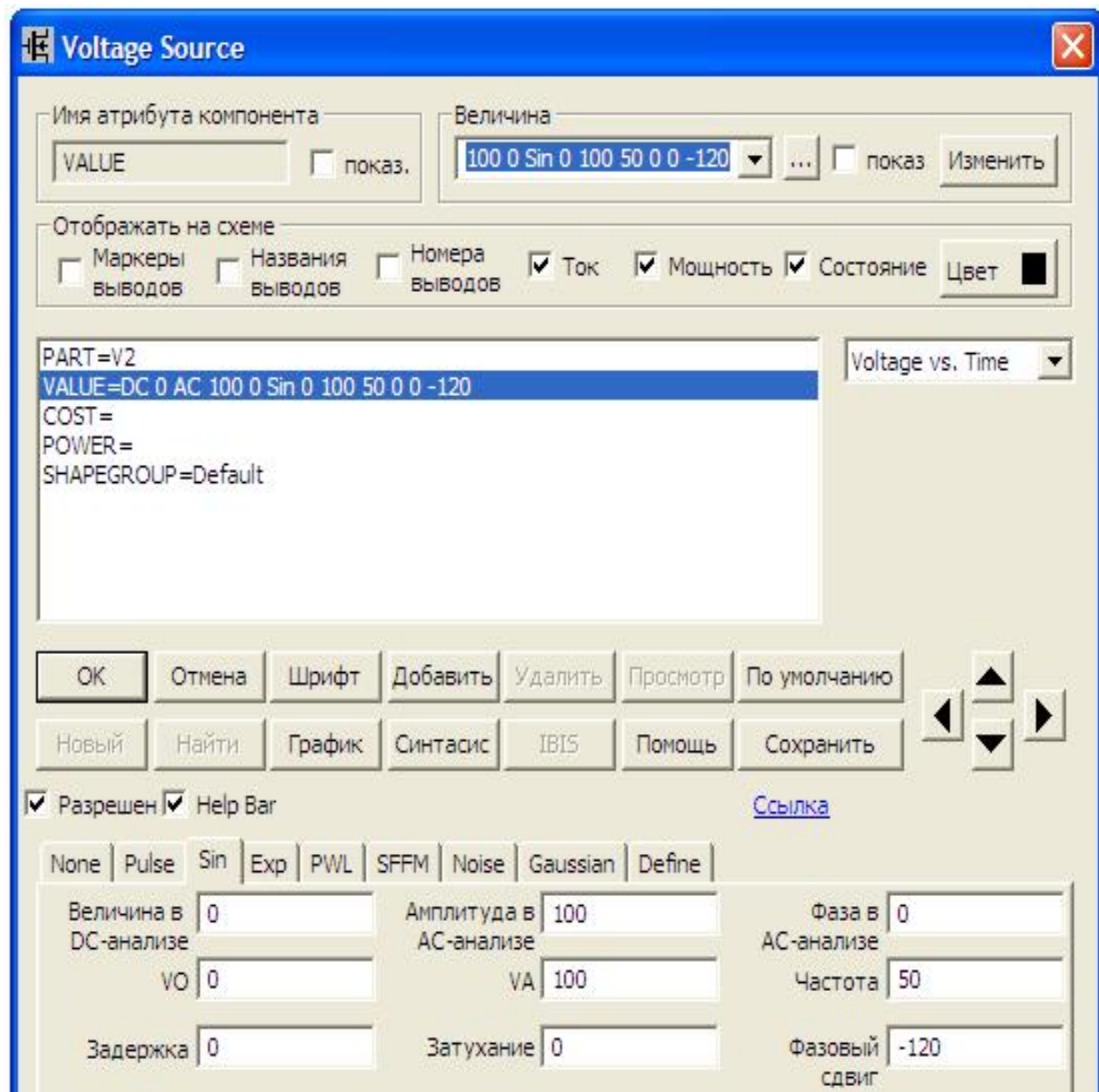


Рисунок 15.3

2. На верхній панелі головного вікна відкриваємо опцію «Анализ» і вибираємо в ній рядок «Анализ переходных процессов (Transient)». Після цього на екрані з'являється вікно (рис. 15.4), в якому слід задати представ-

лені на рисунку параметри. В цьому випадку в першій системі координат буде побудована трифазна система е.р.с., в другій системі координат – миттєва напруга на навантаженні, в третій – миттєвий струм в навантаженні, а в четвертій – імпульси струмів через увімкнені вентилі в кожній з фаз випрямляча. Діапазон розрахунку складає 0,08 секунди і складає чотири періоди напруги живлення.

Далі натискається кнопка «Запустити».

Результат моделювання показано на рис. 15.5. Усі графіки потрібно дослідити, проаналізувати, наприкінці роботи – роздрукувати.

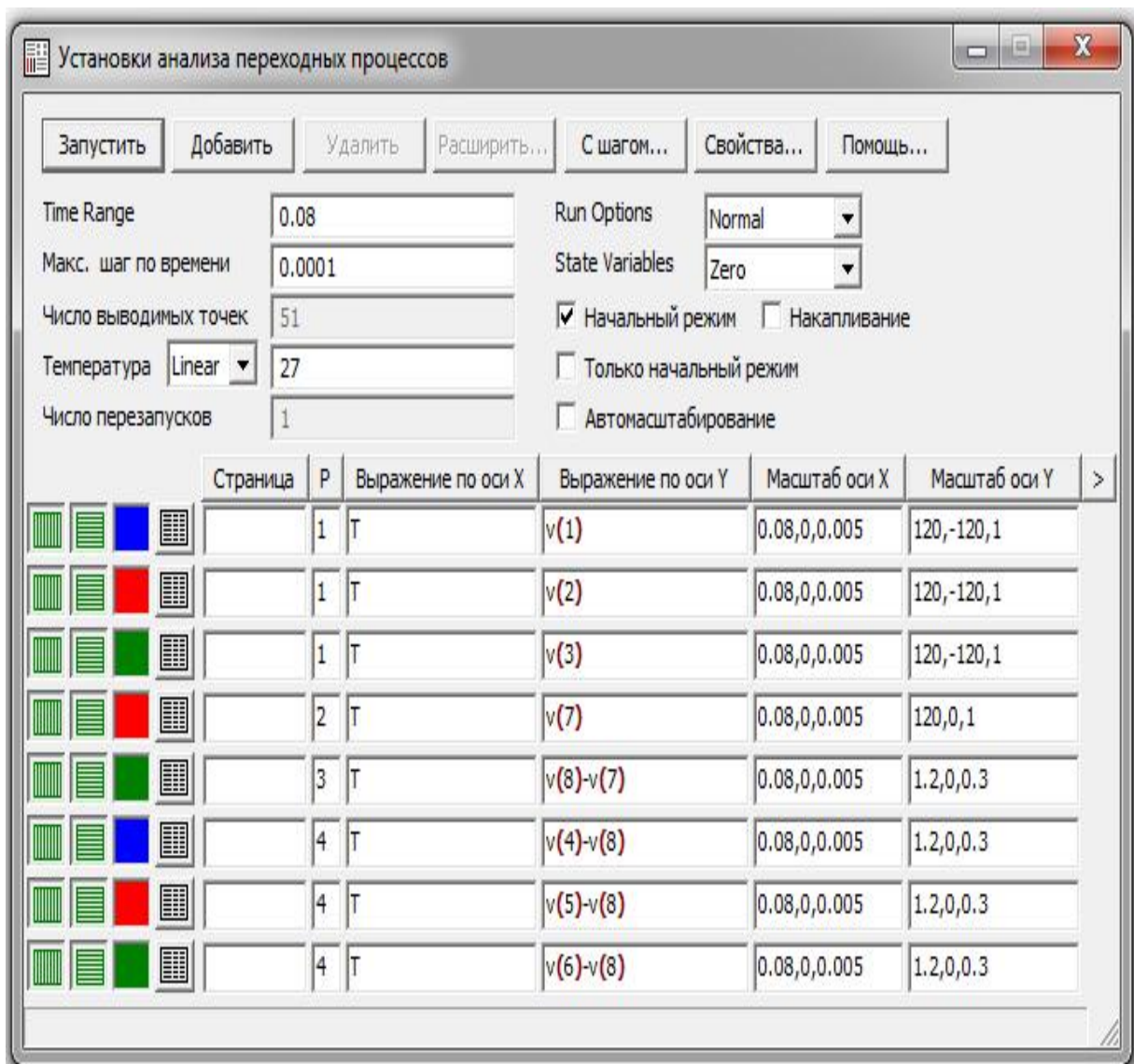


Рисунок 15.4

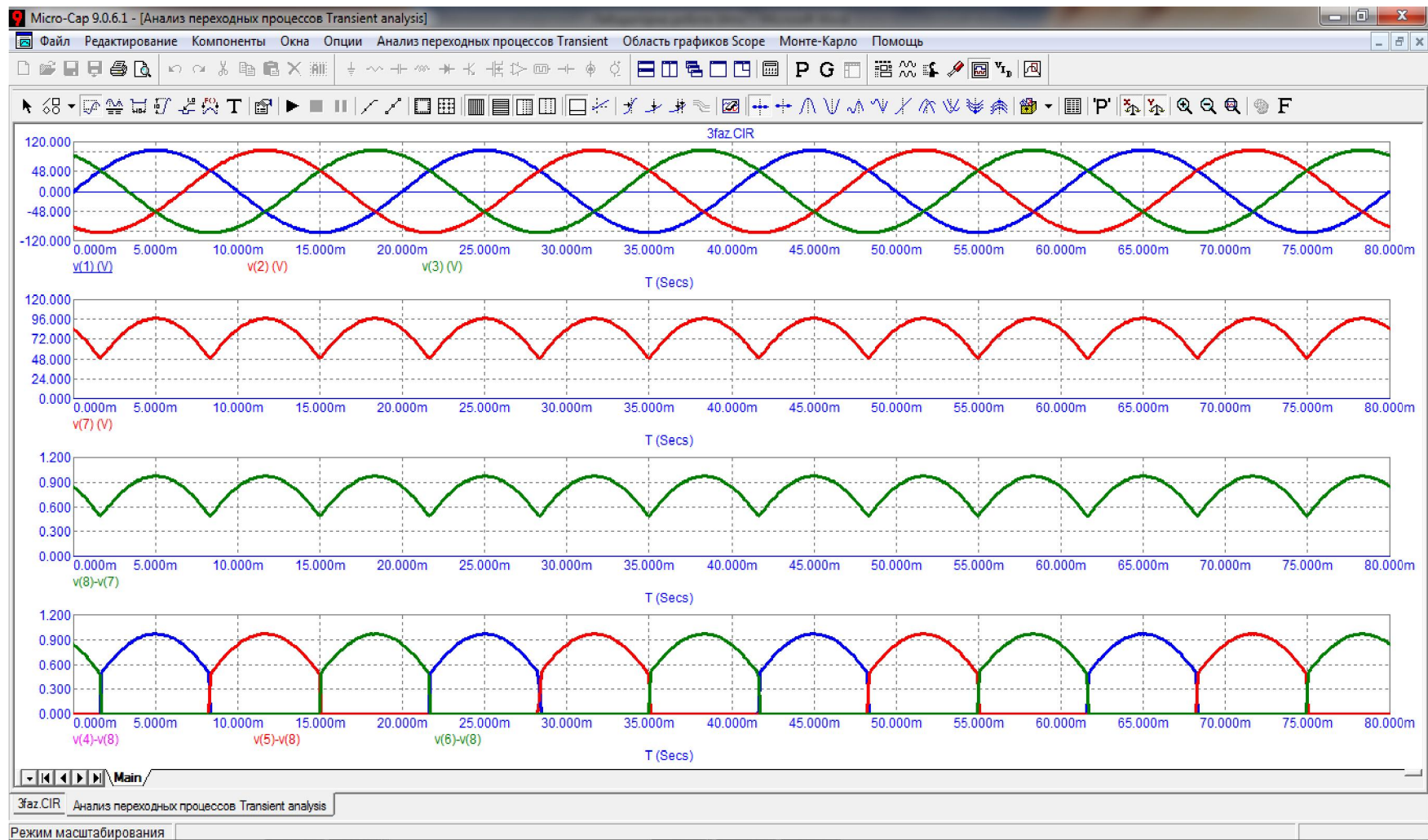


Рисунок 15.5

3. Для дослідження роботи випрямляча в режимі активно-індуктивного навантаження в середовищі MicroCap потрібно зібрати схему, яку показано на рис. 15.6. В цій схемі в навантаження окрім активного опору $R_4 = 100$ Ом введено лінійну індуктивність, індуктивний опір якої на частоті $f = 50$ Гц наближено дорівнює опору R_4 : $X_{L1} = 2\pi f L_1 \approx R_4$. Такий реактивний опір буде мати індуктивність приблизно 0,3 Гн, яку потрібно задати у відповідному вікні.

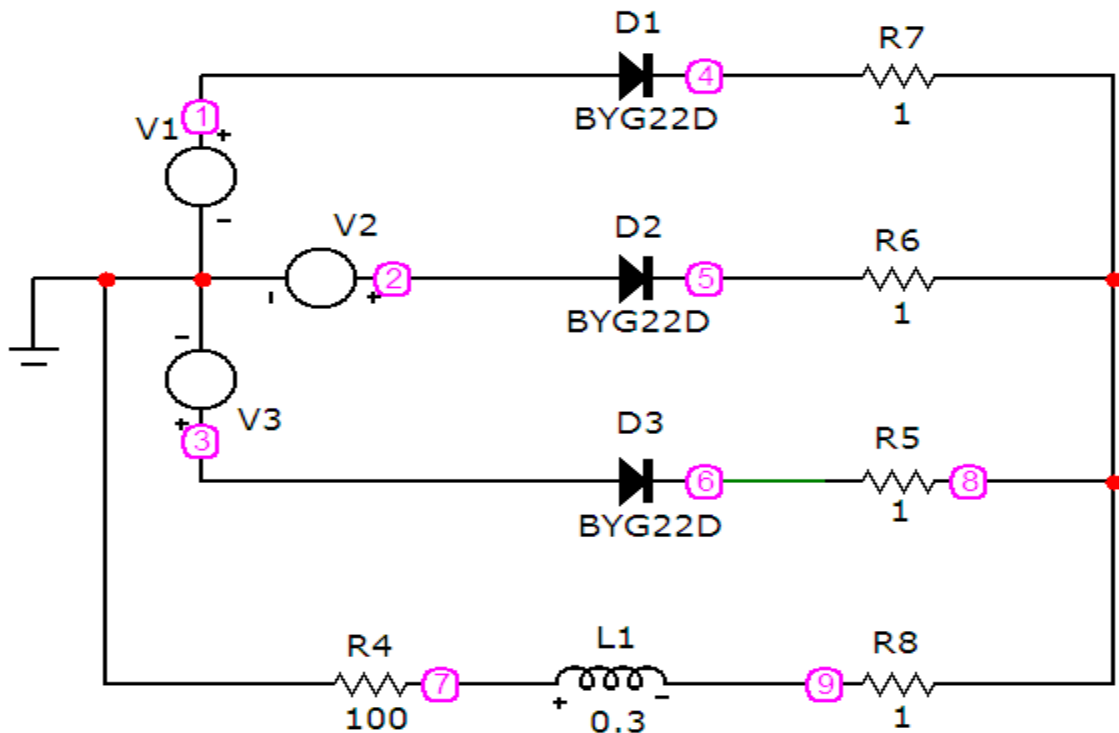


Рисунок 15.6

4. Повторити дослід подібно п. 2.

Результати, які показано на рис. 15.7, потрібно роздрукувати, порівняти з результатами попереднього дослід (див. рис. 15.5) та проаналізувати.

5. За інших рівних умов суттєвим чином збільшити значення індуктивного опору активно-індуктивного навантаження, встановивши таке співвідношення: $X_{L1} = 2\pi f L_1 \geq 5 R_4$.

6. Повторити дослід подібно п. 2 та п. 4. Під час проведення дослід потрібно пам'ятати, що нумерація точок попередньої схеми (див. рис. 15.2) дещо відрізняється від нумерації точок схеми цього дослід (рис. 15.6), що потребує відповідних змін у вікні, показаному на рис. 15.4. Результати дослід представлено рис. 15.8.

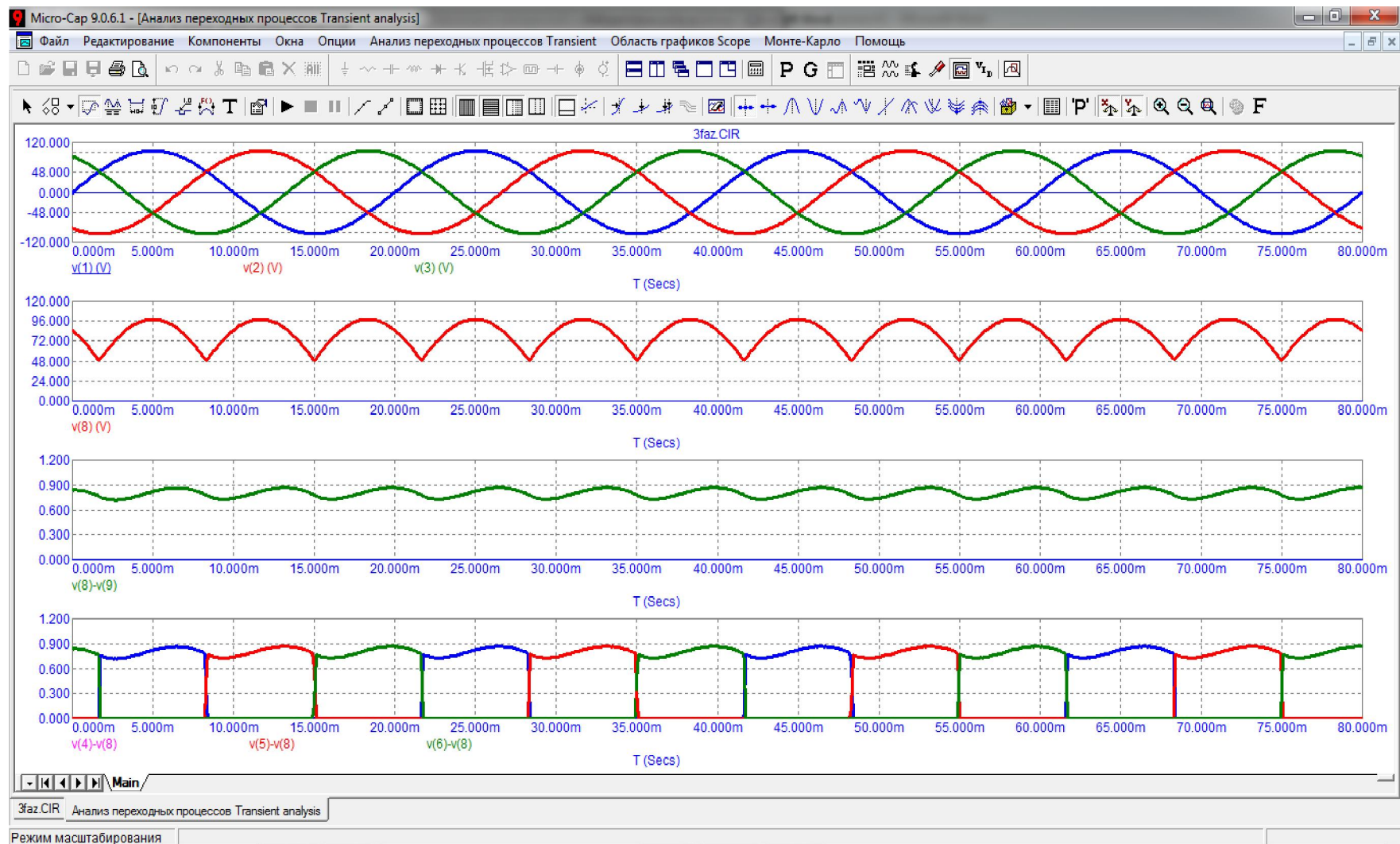


Рисунок 15.7

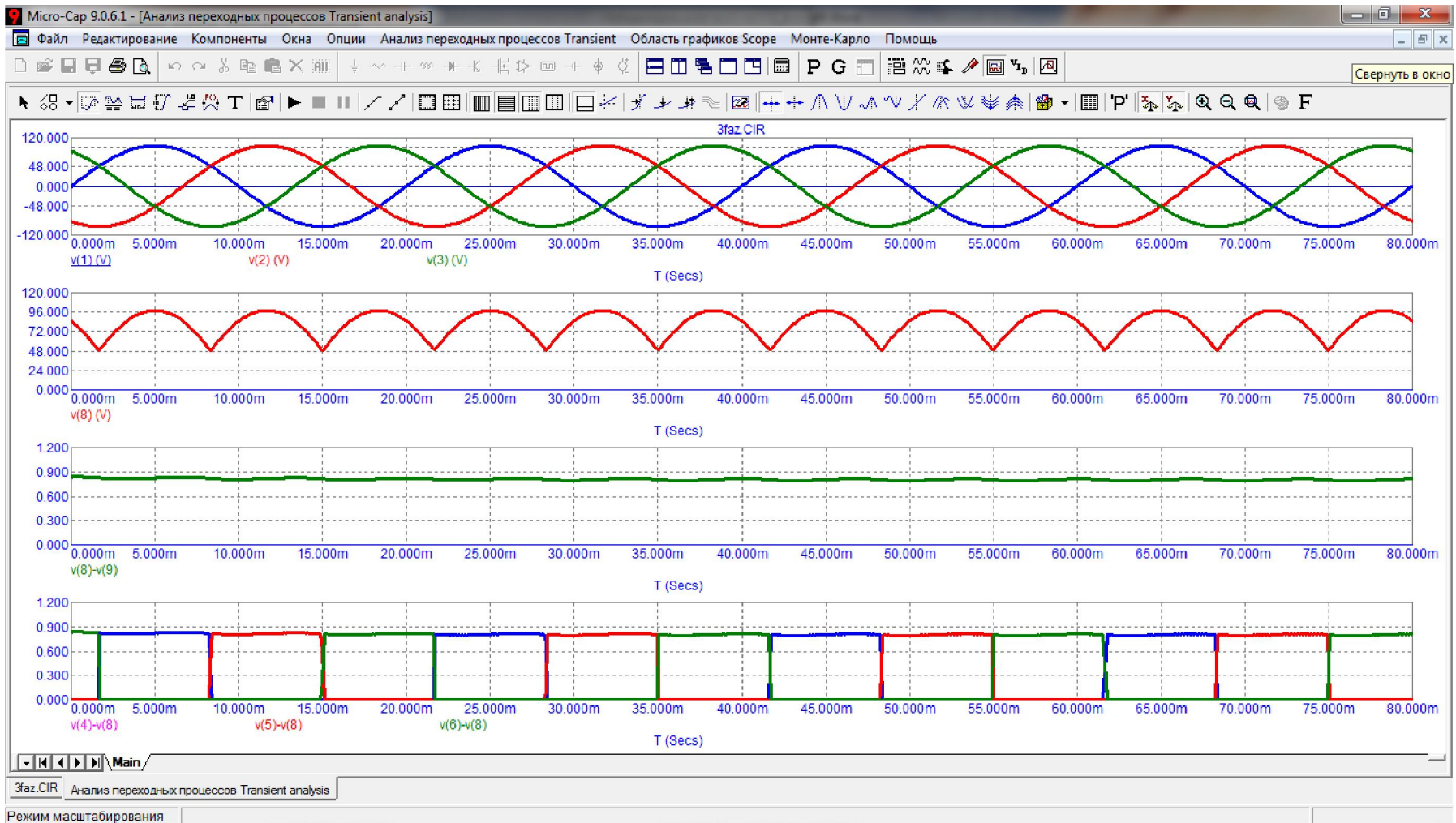


Рисунок 15.8

Обробка результатів дослідження

1. За заданих параметрів провести теоретичний розрахунок роботи некерованого трифазного однопольного випрямляча в активному та активно-індуктивному режимах і накреслити суміщені часові діаграми миттєвих напруг і струмів. Результати розрахунку порівняти з результатами досліду.
2. Зробити висновки по роботі.

Контрольні питання

1. Що називають випрямлячами змінного струму?
2. Назвіть основні вузлові ланки структурної схеми випрямляча, поясніть їх призначення.
3. Що складає основу вентиляного блоку випрямляча. Розкрийте принцип його роботи.
4. Які із схем випрямлячів відносять до трифазних? В чому подібність та відмінність таких випрямлячів?
5. Який головний недолік трифазної однопольної схеми випрямляча?
6. Чим відрізняється керований режим роботи випрямляча від некерованого? Що таке кут вмикання?
7. Наведіть формули визначення середнього значення випрямленої напруги досліджуваного випрямляча в некерованому та керованому режимах роботи.

Лабораторна робота №16тс

Дослідження трифазного мостового випрямляча (схема Ларіонова) в некерованому режимі роботи

Мета роботи: дослідити основні електричні властивості трифазного мостового випрямляча в некерованому режимі його роботи на активне та активно-індуктивне навантаження.

Короткі теоретичні відомості

Принципова електрична схема трифазного мостового випрямляча, яку ще називають схемою Ларіонова, наведена на рис. 16.1.

До складу випрямляча входять дві групи вентиляних елементів: катодна та анодна. В цій схемі катодну групу утворюють тиристори VT1, VT3 і VT5, а анодну – тиристори VT2, VT4 та VT6. Потенціали катодів елементів, що входять до катодної групи, через їх безпосередній гальванічний

зв'язок є завжди однаковими поміж собою, в анодній – відповідно, потенціали анодів.

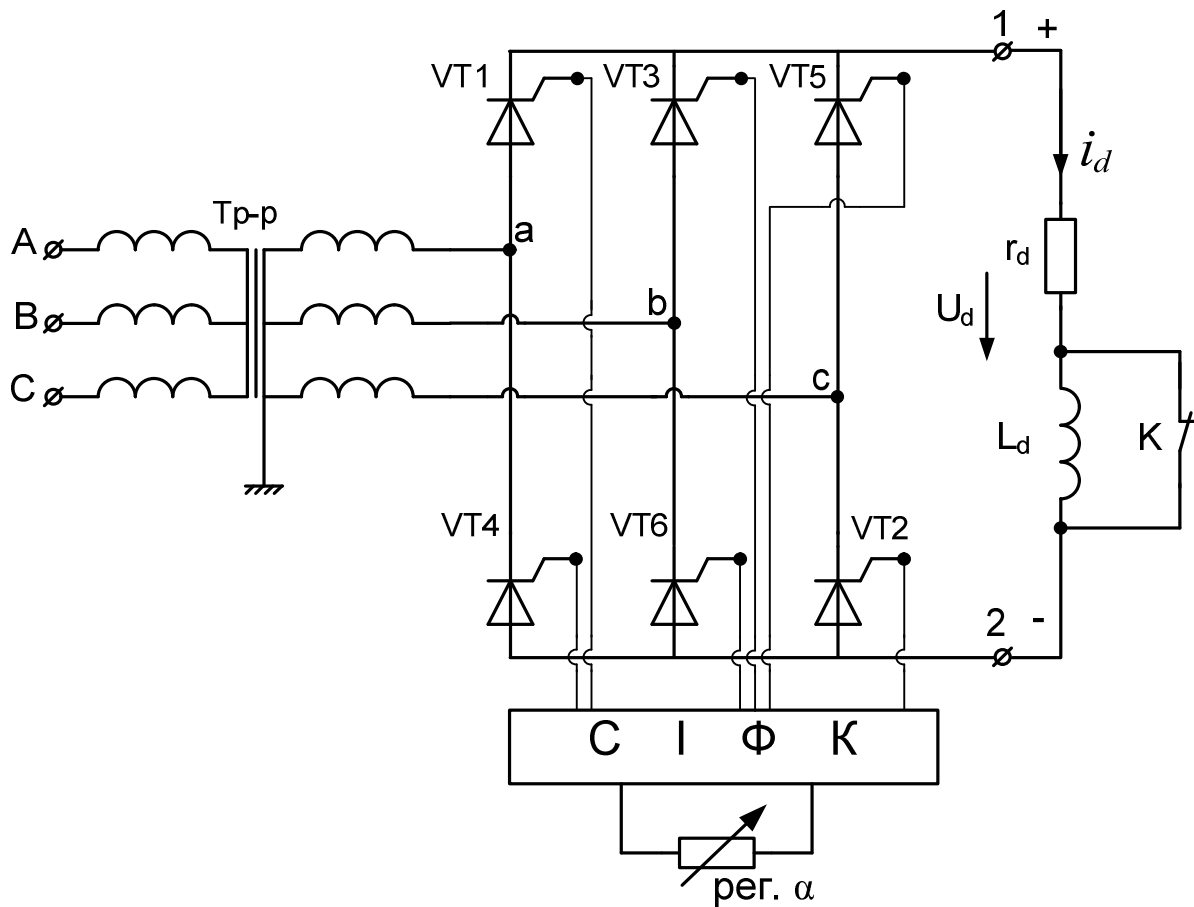


Рисунок 16.1

Для даної схеми робочими є обидва півперіоди фазної напруги вторинних обмоток трансформатора, тому випрямляч належить до класу двотактних.

Наразі розглянемо роботу випрямляча в некерованому режимі! Це означає, що кут вмикання для вентильних елементів випрямляча дорівнює нулю: $\alpha = 0$. Реалізувати такий режим можна або за допомогою напівпровідникових діодів, або тиристорів, на керуючі електроди яких імпульси від СІФК надходять в моменти часу, що відповідають точкам природньої комутації.

Якщо заземлити нульову точку вторинних обмоток трансформатора (рис. 16.1), то розподіл потенціалів в схемі випрямляча можна розглядати відносно цієї точки. Тоді в деякий довільний поточний момент часу з поміж трьох вентильних елементів катодної групи (VT1, VT3 і VT5) в уві-

мкненому стані буде тільки один елемент і лише той, додатний потенціал на аноді якого в цей момент часу буде найвищим порівняно з потенціалами на анодах інших елементів цієї групи. Відповідно, для елементів анодної групи (VT2, VT4 і VT6) навпаки – для увімкненого тиристора від’ємний потенціал на його катоді має бути найнижчим з поміж інших елементів цієї ж групи. Наприклад, коли найвищий додатний потенціал матиме фаза a , в катодній групі увімкнеться тиристор VT1, який своїм анодом підключений до цієї фази. Через цей відкритий вентиль катодна шина і відповідно затискач «1», до якого під’єднано опір навантаження, отримує потенціал фази a : $\varphi_a = e_a$. В цей час в анодній групі на момент вмикання тиристора VT1 у відкритому стані вже перебував вентиль VT6 з найменшим з поміж інших фаз потенціалом. Своїм катодом він підключений до фази b , тому через цей відкритий тиристор анодна шина і нижній затискач «2» отримують потенціал фази b . Оскільки до навантаження прикладається різниця потенціалів між затискачами «1» і «2», то для миттєвої напруги на навантаженні для даного проміжку часу, тобто коли увімкнено тиристори VT1 і VT6, можна записати $u_d = \varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_a - \varphi_b = u_a - u_b = u_{ab}$.

Таким чином, на навантаження подається лінійна напруга з вторинних обмоток трансформатора u_{ab} . Такий стан з моменту вмикання тиристора VT1 триватиме протягом *шостої* частини періоду напруги живлення, аж допоки не увімкнеться прямою напругою тиристор VT2, який своїм катодом підключений до фази c і потенціал на катоді якого на той момент часу стане найнижчим, та не вимкнеться зворотною напругою тиристор VT6. З цього моменту часу і протягом наступної *третьої* частини періоду напруги живлення вентиль VT2 перебуватиме в увімкненому стані, внаслідок чого від’ємний потенціал фази c вторинної обмотки трансформатора безпосередньо передаватиметься через нього до навантаження (точка 2), створюючи лінійну напругу U_{ac} : $u_d = \varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_a - \varphi_c = u_a - u_c = u_{ac}$.

Вимкнеться вентильний елемент VT1 зворотною напругою, яка з’явиться на ньому внаслідок вмикання тиристора VT3. Послідовність цього процесу така. У відповідний момент часу на підключеному до фази b аноді тиристора VT3 з’являється більш високий потенціал ніж потенціал фази a , в цей час присутній на його катоді. Різниця цих потенціалів створює на вентилі VT3 пряму напругу і в некерованому режимі вентиль відразу вмикається. Оскільки в увімкненому стані вентиля спад напруги на

ньому незначний (за ідеалізації – дорівнює нулю), вентиль VT3 безпосередньо передає потенціал з фази *b* до катодної шини, що водночас, по-перше, створює на елементі VT1 зворотну напругу і його вимикає, а, по-друге, формує відповідний додатний потенціал в точці 1 навантаження.

Таким чином, вентиль фази *a* VT1 катодної групи у відкритому стані перебуватиме лише третину часу від повного періоду напруги живлення, протягом якої половину часу працюватиме в парі з вентилем VT4 фази *b* анодної групи, а після – з VT6 фази *c* тієї ж групи. Наступних дві третини періоду вентиль VT1 перебуватиме у вимкненому стані і струм не пропускатиме. Надалі процес для вентиля VT1 повторюватиметься.

Для інших тиристорів випрямляча комутація відбувається аналогічно і її причини подібні.

Такий алгоритм перемикання тиристорів зберігається в усіх точках природної комутації, тобто вимикання тиристора попередньої фази є наслідком вмикання тиристора, підключеного до наступної фази. Якщо черговий тиристор за будь-якої причини не увімкнеться, то працюючий тиристор залишатиметься відкритим до моменту зміни знаку прикладеної до нього фазної напруги, що зазвичай спостерігається в керованому випрямлячеві за умови $\alpha \neq 0$.

Кількість точок природної комутації на періоді напруги мережі живлення для трифазного випрямляча мостового типу дорівнює шести, що безпосередньо позначається на кількості пульсацій випрямлених струму та напруги. Зокрема вихідна напруга даного випрямляча має шестифазні пульсації: $m_n = 6$.

Середнє значення випрямленої напруги U_d , як і у випадку трифазного однопольового випрямляча, можна визначити через площу однієї пульсації. В некерованому режимі, коли $\alpha = 0$:

$$U_d = \frac{6}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{+\frac{\pi}{6}} \sqrt{3} U_{2m} \cos \Theta d\Theta = \frac{6\sqrt{3} U_{2m}}{2\pi} 2 \sin \frac{\pi}{6} = \frac{6\sqrt{3}}{2\pi} U_{2m} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_2 \approx 2,34 U_2,$$

де: $U_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{2m}$ – діюче значення фазної напруги вторинної обмотки трансформатора.

Наприкінці варто зазначити, що в трифазному мостовому випрямлячі, на відміну від однотактного, відсутній ефект вимушеного намагнічування осердя трансформатора. Запобігає цьому вкрай негативному явищу двотактний характер режиму роботи випрямляча, відповідно до якого струм у вторинній обмотці трансформатора проходить нарізно двічі за період. В кожному випадку імпульси цього струму мають однакову форму, але є протилежними за знаком, що унеможливорює появу постійної складової в його спектрі, а відтак – і в спектрі магнітного потоку, породженого цим струмом. Трифазний мостовий випрямляч знаходить сьогодні найбільш широке використання внаслідок своїх хороших техніко-економічних показників.

Порядок виконання роботи

1. В середовищі MicroCap зібрати схему некерованого трифазного випрямляча (рис. 16.2) в режимі роботи на активне навантаження. Типи напівпровідникових випрямних діодів катодної групи $D1, D3, D5$ та анодної групи $D2, D4, D6$ задає викладач.

Параметри трьох фазних джерел $V1$ (фаза A), $V2$ (фаза B), $V3$ (фаза C), які формують трифазну синусоїдну напругу, задаються з урахуванням фази в кожному з трьох вікон, що з'являються при перенесенні відповідних компонентів на робоче поле програми. В цих вікнах слід вибрати вкладинку Sin і занести такі параметри: частоту 50 Гц ; амплітудні значення е.р.с. 100 В ; початкові фази $0^\circ, -120^\circ$ і $+120^\circ$ для джерел $V1$ (фаза A), $V2$ (фаза B), $V3$ (фаза C) відповідно. Для прикладу на рис. 16.3 наведено вікно із заданими параметрами джерела $V2$ фази B .

2. На верхній панелі головного вікна відкриваємо опцію «Анализ» і вибираємо в ній рядок «Анализ переходных процессов (Transient)». Після цього на екрані з'являється вікно (рис. 16.4), в якому слід задати представлені на рисунку параметри. В цьому випадку в першій системі координат буде побудована трифазна система е.р.с., в другій системі координат – миттєва напруга на навантаженні, в третій – миттєвий струм в навантаженні, в четвертій – імпульси струмів через увімкнені вентилі катодної групи випрямляча, а в п'ятій – імпульси струмів в кожній з фаз вторинної обмотки трансформатора. Діапазон розрахунку складає $0,08$ секунди і складає чотири періоди напруги живлення.

Далі натискається кнопка «Запустить».

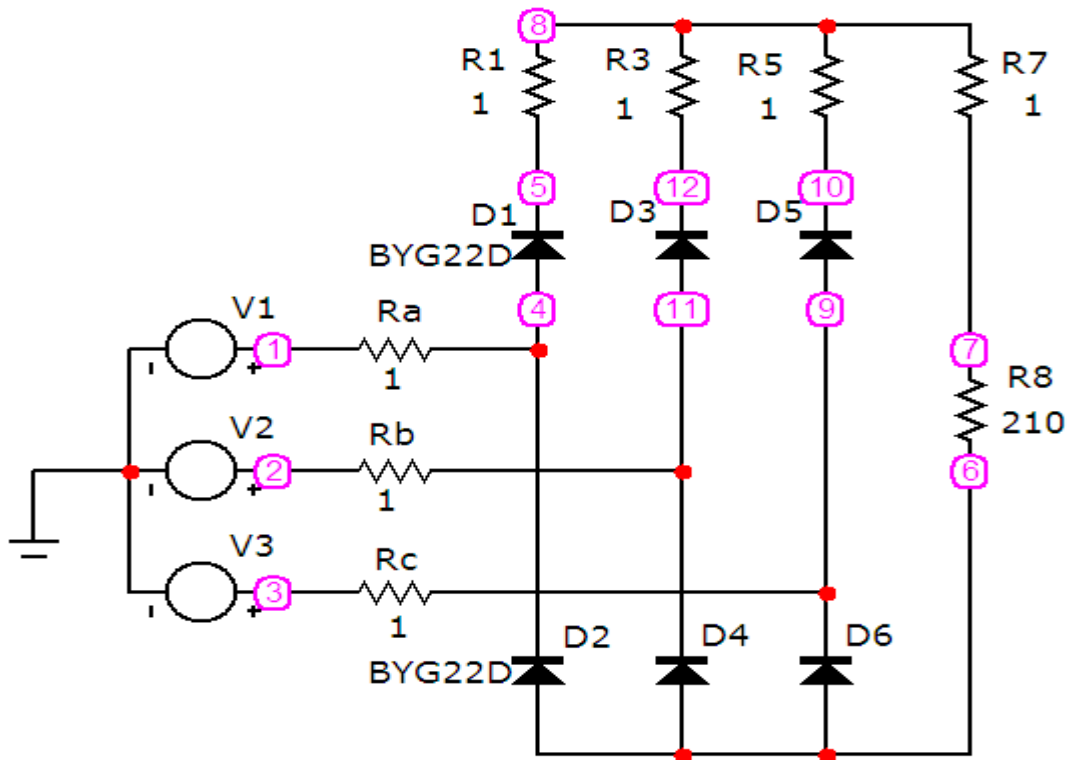


Рисунок 16.2

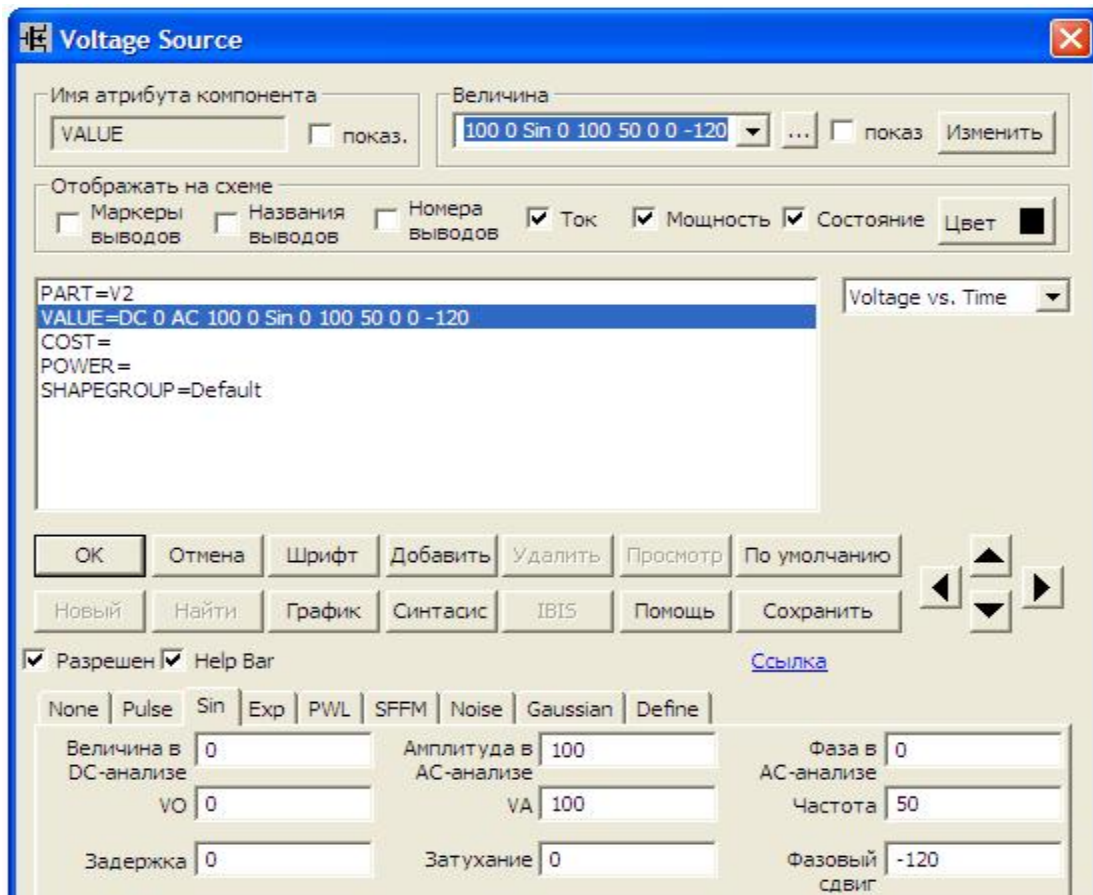


Рисунок 16.3

Результат моделювання показано на рис. 16.5. Усі графіки потрібно дослідити, проаналізувати, наприкінці роботи – роздрукувати.

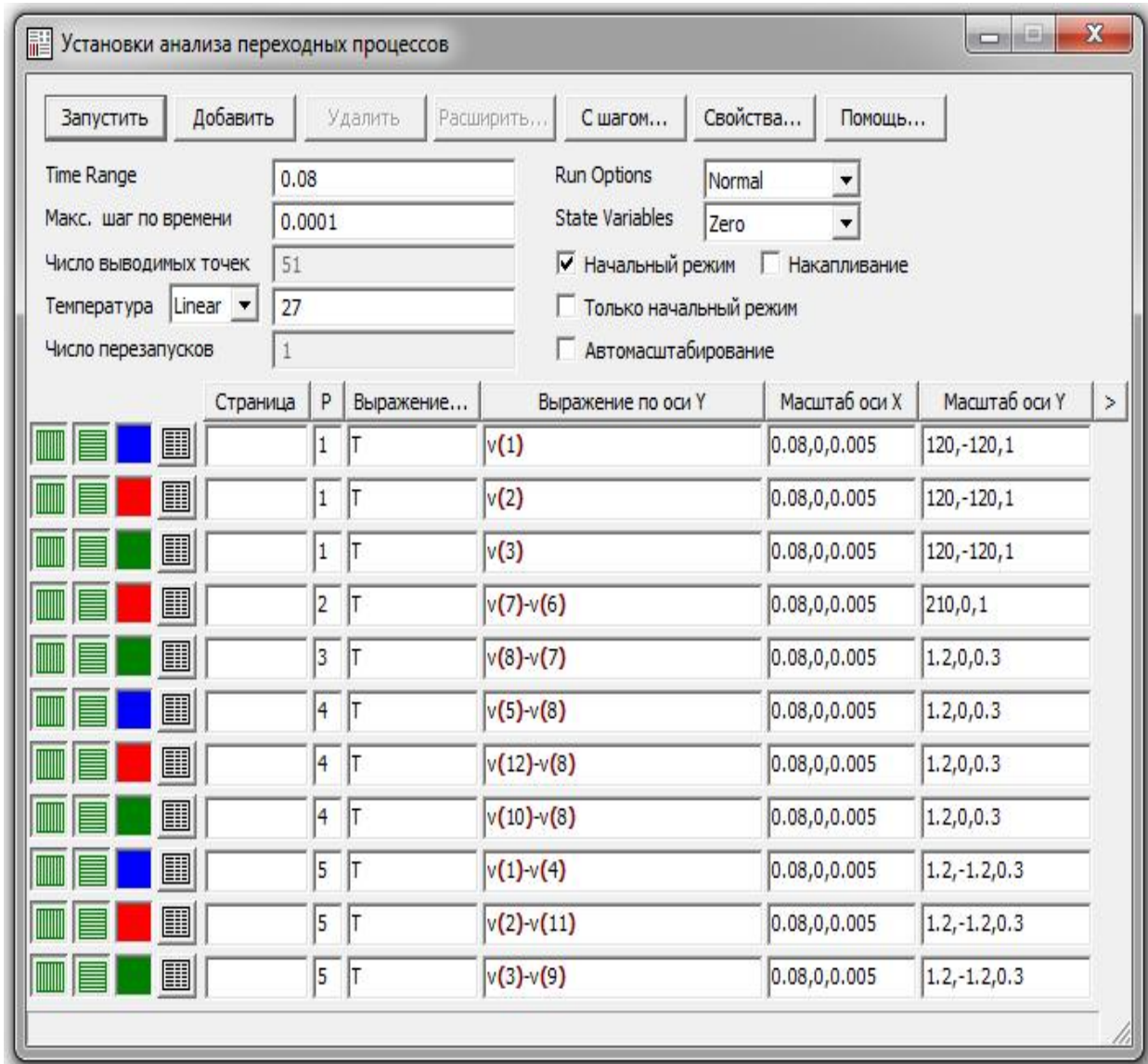


Рисунок 16.4

3. Для дослідження роботи випрямляча в режимі активно-індуктивного навантаження в середовищі MicroCap потрібно зібрати схему, яку показано на рис. 16.6. В цій схемі в навантаження окрім активного опору $R_8 = 210$ Ом введено лінійну індуктивність, індуктивний опір якої на частоті $f = 50$ Гц наближено дорівнює значенню опора R_8 : $X_{L1} = 2\pi f L_1 \approx R_8$. Такий реактивний опір буде мати індуктивність з параметром, наприклад, $L_1 = 0,7$ Гн, значення якої потрібно задати у відповідному вікні.

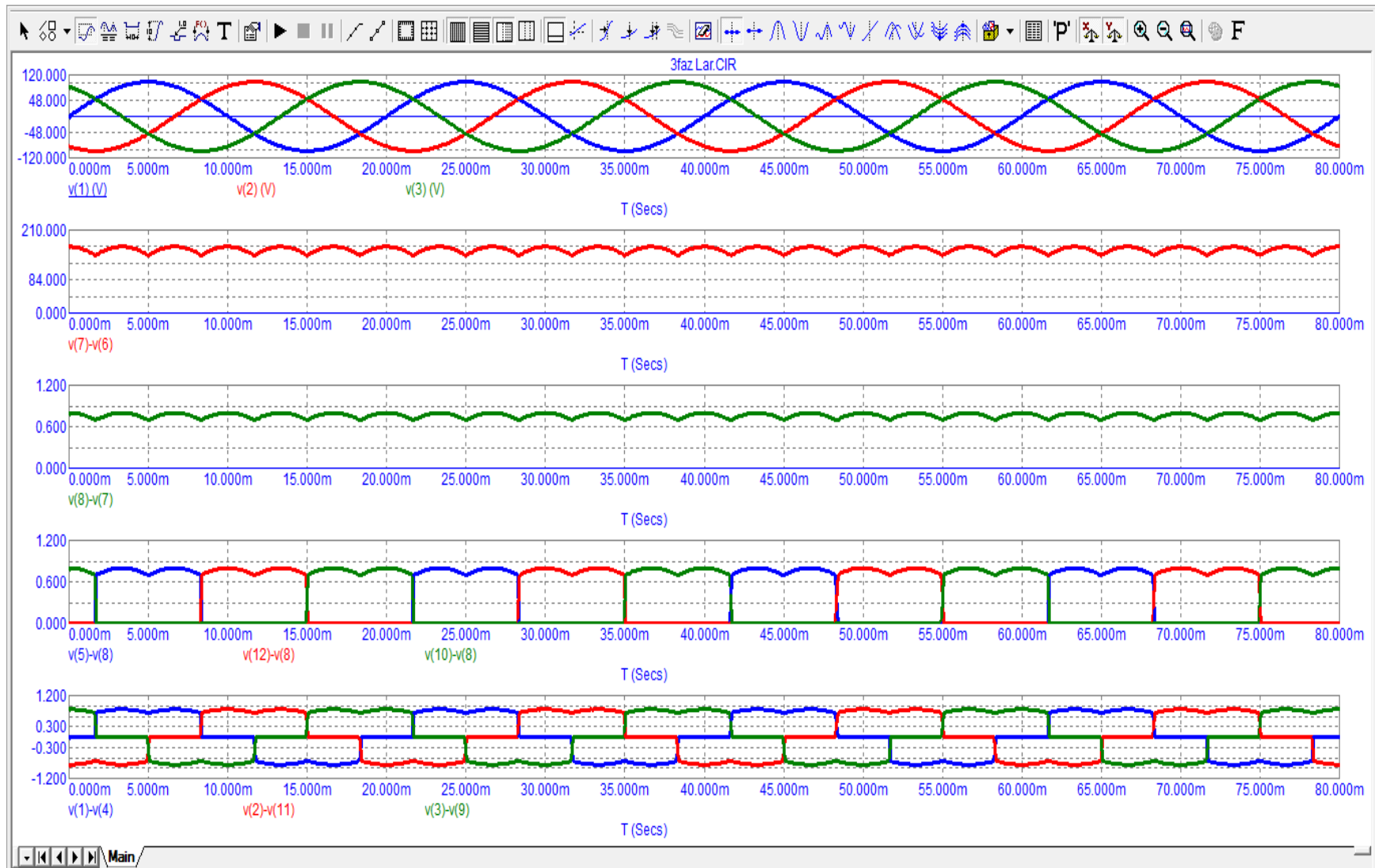


Рисунок 16.5

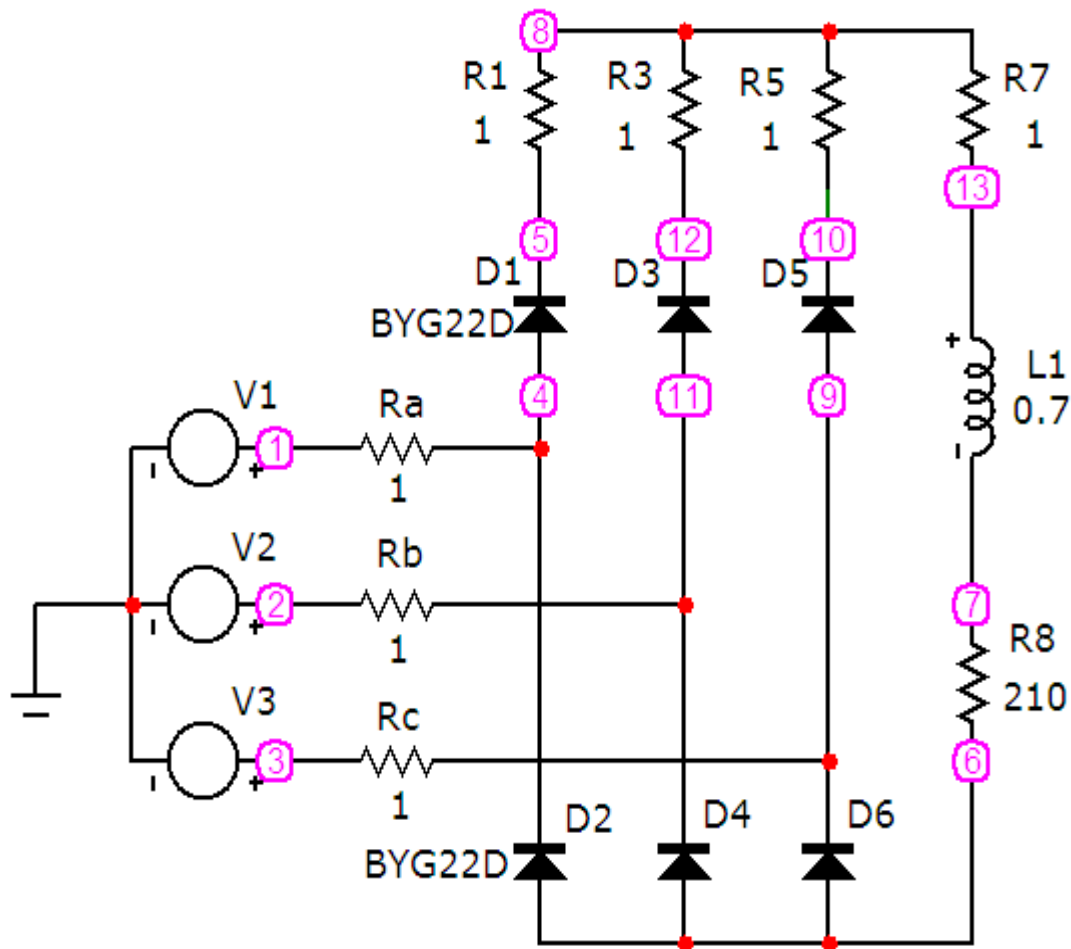


Рисунок 16.6

4. Повторити дослід подібно п. 2.

Наразі потрібно зауважити, що нумерація точок в даній схемі (рис. 16.6) дещо відрізняється від нумерації точок в схемі попереднього дослідження (рис. 16.2), що потребує відповідних змін. Результати цих змін наведено у вікні рис. 16.7.

Результати дослідження (рис. 16.8) потрібно роздрукувати, порівняти з результатами попереднього дослідження (рис. 16.5) та проаналізувати.

Обробка результатів дослідження

1. За заданих параметрів провести теоретичний розрахунок роботи некерowanego трифазного однофазного випрямляча в активному та активно-індуктивному режимах і накреслити суміщені часові діаграми миттєвих напруг і струмів. Результати розрахунку порівняти з результатами дослідження.

2. Зробити висновки по роботі.

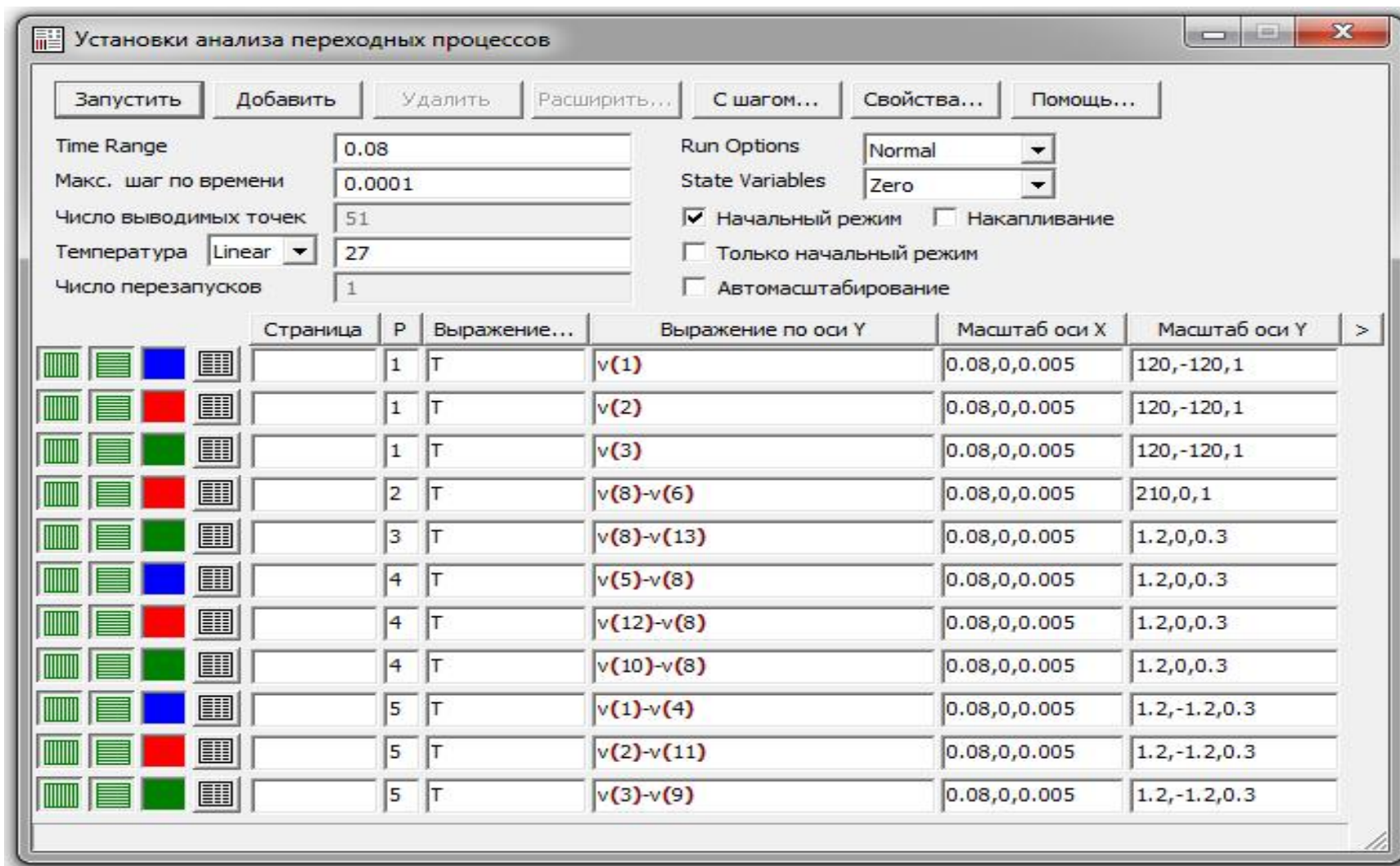


Рисунок 16.7

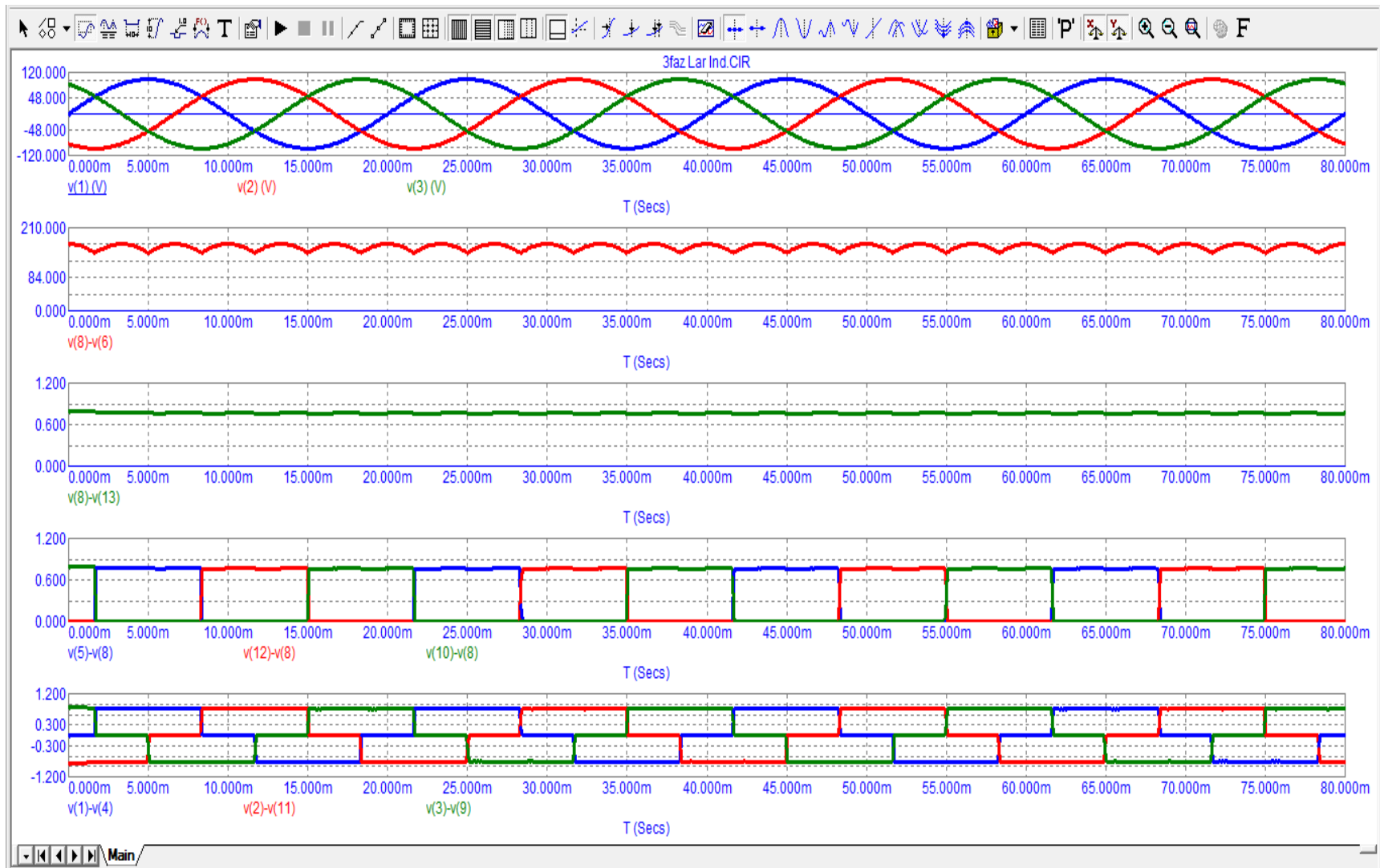


Рисунок 16.8

Контрольні питання

1. В чому відмінність трифазного мостового випрямляча від трифазного однопоточного?
2. Назвіть основні вузлові ланки структурної схеми трифазного мостового випрямляча, поясніть їх призначення.
3. Що складає основу вентиляційного блоку трифазного мостового випрямляча? Розкрийте принцип його роботи.
4. Наведіть формули визначення середнього значення випрямленої напруги досліджуваного випрямляча в некерованому та керованому режимах роботи.

ЛІТЕРАТУРА

Основна

1. Теоретичні основи електротехніки. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими та розподіленими параметрами : підручник / [Карпов Ю. О., Каців С. Ш., Кухарчук В. В. та ін.] під ред. проф. Ю. О. Карпова – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 377 с.
2. Теоретичні основи електротехніки. Перехідні процеси в лінійних колах. Синтез лінійних кіл. Електричні та магнітні нелінійні кола : підручник : підручник / [Карпов Ю. О., Ведміцький Ю. Г., Кухарчук В. В. та ін.] під ред. проф. Ю. О. Карпова – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 527 с.
3. Амелина М. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8] / Амелина М. А., Амелин С. А. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 464 с. ил.

Рекомендована

1. Карпов Ю.О. Теоретичні основи електротехніки. Комп'ютерні розрахунки та моделювання лінійних електричних кіл : навчальний посібник / Карпов Ю.О., Каців С.Ш., Кухарчук В.В. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 213 с.
2. Каців С. Ш. Комп'ютерне моделювання електричних кіл. [лабораторний практикум] / Каців С. Ш., Мад'яров В. Г., Говор І. К. – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 89 с.

Навчальне видання
Каців Самоїл Шулімович
Ведміцький Юрій Григорович
Коваль Андрій Миколайвич
Говор Ігор Костянтиневич

Теоретичні основи електротехніки

*Комп'ютерне моделювання електричних та електронних кіл
в середовищі MicroCap*

Лабораторний практикум
Навчальний посібник

Редактор В. Дружиніна

Коректор З. Поліщук

Оригінал-макет підготовлено С. Кацивом

Підписано до друку

Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman.

Друк різнографічний. Ум. друк. арк.

Наклад прим. Зам. №

Вінницький національний технічний університет,
навчально-методичний відділ ВНТУ.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, к. 2201.

Тел. (0432) 59-87-36.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.

Тел. (0432) 59-87-38.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.