

# Лабораторна робота №1. Випрямлячі наруги. Діодний міст

© Коломієць Р. О.

Травень, 2020

**Мета роботи:** Навчитися збирати прості електричні схеми та досліджувати їх роботу у програмі LTspice XVII — на прикладі двохпівперіодних випрямлячів, зокрема діодного мосту.

## 1 Основи роботи з LTspice XVII

LTspice — це найбільш популярний на сьогоднішній день некомерційний (безкоштовний) симулятор роботи електричних схем, що використовує SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) — алгоритм моделювання процесів, що протікають в електронних схемах, зокрема тих, що містять мікросхеми. Цей алгоритм був розроблений у кінці 70-х років ХХ століття в університеті Берклі (Каліфорнія, США), і нині є стандартом де-факто для систем автоматизованого проектування (САПР) електронних схем. Алгоритми SPICE використовують як комерційні (MultiSim, HSPICE, CircuitMaker, MicroCap), так і некомерційні програми. LTspice — програмний продукт фірми Linear Technology, доступний для безкоштовного та вільного завантаження і використання. На відміну від комерційних продуктів LTspice має відносно „малу“ бібліотеку готових компонентів, проте в ньому є можливість створювати свої компоненти.

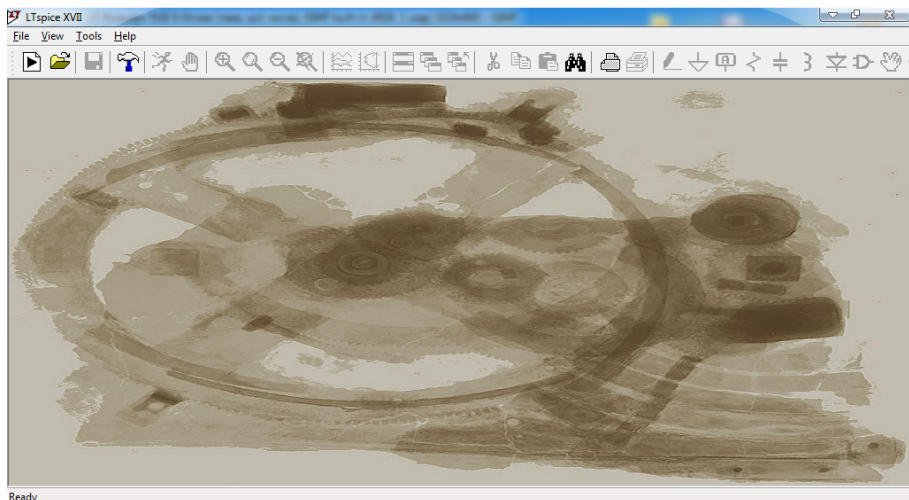


Рис. 1

## 1.1 Встановлення

LTspice працює від будь-якою версією ОС Windows, також працює в Linux з-під емулятора Wine. Завантажується з офіційного сайту <http://www.linear.com>.

Встановлюється як звичайна Windows-програма. Оскільки LTspice є некомерційним продуктом, до нього немає ніяких кряків, кейгенів тощо. В нього також немає тріальних версій — лише повноцінні робочі. Встановили?.. Тоді почнемо огляд...

## 1.2 Короткий огляд LTspice XVII

На рис. 1 показаний вигляд головного вікна програми LTspice XVII. Бачимо стандартні рядок заголовку, рядок меню та панель інструментів зверху...

Взагалі SPICE-симулятори працюють із спеціальним файлом — так званим *нетлістом* — файлом, який містить опис з'єднань електрорадіоелементів (ЕРЕ). Цей файл може мати розширення *.cir*, *.net* або *.sc*. По великому рахунку, це текстовий файл, який може бути написаний як вручну у будь-якому текстовому редакторі (то

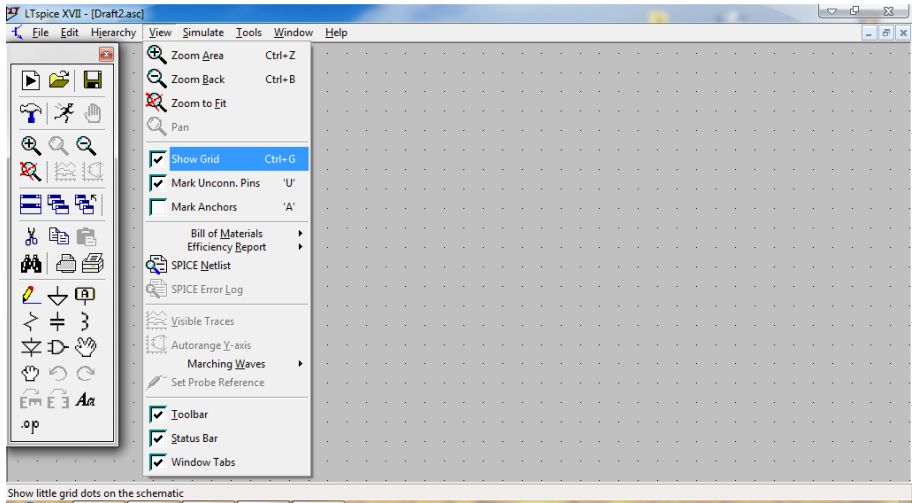










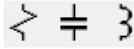

Рис. 2







є шлях справжнього самурая), або згенерований з файлу *.asc* — файлу графічного представлення електричної схеми. Для створення такого файлу натискаємо на панелі інструментів *New Schematic*. Після цього стають активними інші кнопки (зауваження для власників нетбуків з малим екраном: панель інструментів можна за допомогою мишки „відкріпити“ зверху і змінити розміри, наприклад, як на рис. 2). Якщо робоче поле без сітки (а за її допомогою схеми малювати значно простіше), то її можна включити через меню *View* → *Show grid* (рис. 2).

В наступній таблиці коротенько розглянуті інструменти LTspice, доступні з панелі.

Знак	Дія
	<i>New Schematic</i> — відкриває пусту робочу область для створення нової схеми.
	<i>Open</i> — відкриває файл із схемою ( <i>.asc</i> ), нетліст ( <i>.cir</i> , <i>.net</i> або <i>.sc</i> ), дані сигналу симуляції ( <i>.raw</i> , <i>.fra</i> ), файл ЕРЕ ( <i>.asy</i> ).

	<p><i>Save</i> — зберігає файл із схемою (.asc), нетліст (.cir, .net або .sc), дані сигналу симуляції (.raw, .fra), або файл ЕРЕ (.asy) — в залежності від того, яке вікно є активним.</p>
	<p><i>Control Panel</i> — відкриває панель з вкладками глобальних налаштувань симуляції.</p>
	<p><i>Run</i> — запуск симуляції.</p>
	<p><i>Halt</i> — зупинити симуляцію (кнопка стає активною лише тоді, коли йде симуляція роботи схеми).</p>
	<p><i>Zoom</i> — масштабування того, що знаходиться в активному вікні — будь то схема, графік симуляції чи щось інше. У вікні редактора схеми масштабування робиться прокручуванням коліщатка миші.</p>
	<p><i>Pic Visible Traces</i> — показує вікна із симулюваними сигналами. на відміну від багатьох комерційних програм симуляції в LTspice немає віртуального осцилографа, натомість осцилограму сигналу можна безпосередньо подивитися в будь-якій точці схеми, просто тицьнувши в неї віртуальним шупом.</p>
	<p><i>Tile Windows, Cascade Windows, Close All</i> — вистроює вікна плиткою, каскадом, або взагалі всі закриває. В LTspice для схем та симуляцій відводяться різні вікна, ці кнопки призначені для швидкого керування ними.</p>

	<p><i>Cut, Copy, Paste</i> — стандартні інструменти „вирізати“, „копіювати“, „вставити“.</p>
	<p><i>Search</i> — пошук компонента у великій схемі.</p>
	<p><i>Print Setup, Print</i> — налаштування друку та друк.</p>
	<p><i>Wire</i> — електричне з'єднання ЕРЕ (віртуальним проводом).</p>
	<p><i>Ground</i> — встановлення „землі“ (нульового вузла) на схему. В будь-якій схемі повинен бути як мінімум один земляний вузол, якщо їх кілька — то їх потенціали однакові, ставлять їх кілька для зручності, щоб не було зайвих з'єднань на схемі.</p>
	<p><i>Label Net</i> — „мітка“, електричне з'єднання між виводами різних ЕРЕ, які знаходяться в різних частинах схеми, щоб не захаращувати схему зайвими провідниками. Такий вузол може бути одно- або двонаправленим.</p>
	<p><i>Resistor, Capacitor, Inductor</i> — встановлення на схему відповідно резистора, конденсатора та котушки індуктивності.</p>
	<p><i>Diode</i> — встановлення на схему діода, який по замовчуванню вважається ідеальним (тобто має нульовий опір у прямому напрямку і нескінченно великий — в оберненому). Якщо потрібно, можна вибрати модель якогось реального діода.</p>

	<p><i>Component</i> — встановлення на схему всіх інших компонентів: біполярних і польових транзисторів, джерел напруги/струму, логічних елементів, операційних підсилювачів та інших мікросхем, стабілітронів, діодів Шоттки тощо. . .</p>
	<p><i>Move, Drag</i> — переміщення EPE по робочому полю</p>
	<p><i>Undo, Redo</i> — відмінити дію, повернути відмінену дію. Важливо відзначити, що в LTspice чомусь не працюють стандартні комбінації клавіш <i>Ctrl+Z</i> та <i>Ctrl+Y</i> — замість них зроблені <i>F9</i> та <i>Shift+F9</i> відповідно. Видимо, тут причиною є якісь комерційні патенти. . .</p>
	<p><i>Rotate, Mirror</i> — перевернути або віддзеркалити EPE. Інструменти активні тільки тоді, коли вибрано <i>Drag</i> або <i>Move</i>, тобто при переміщенні EPE.</p>
	<p><i>Text</i> — помістити на схему текстовий коментар</p>
	<p><i>SPICE Directive</i> — помістити на схему SPICE-директиву (спеціальну команду для SPICE-алгоритму).</p>

Тепер розглянемо для прикладу моделювання роботи однопівперіодного випрямляча в LTspice.

## 2 Приклад: моделювання роботи однопівперіодного випрямляча

Для початку треба позакривати всі вікна (крім панелі інструментів, якщо вона у такому вигляді, як на рис. 2). Натиснути *New Schematic*, і якщо треба, увімкнути видимість сітки (для зручності малювання схеми).

Однопівперіодному випрямлячу потрібне джерело синусоїдальної напруги. На практиці таким джерелом є, як правило, мережевий трансформатор, який перетворює напругу з 220 В на якусь менше значення. Почнемо з цієї мережевої напруги.

Для створення імітатора мережевої напруги треба натиснути на *Component*, і вікні, яке відкрилося, вибрати *Voltage* (джерело напруги) — рис. 3.

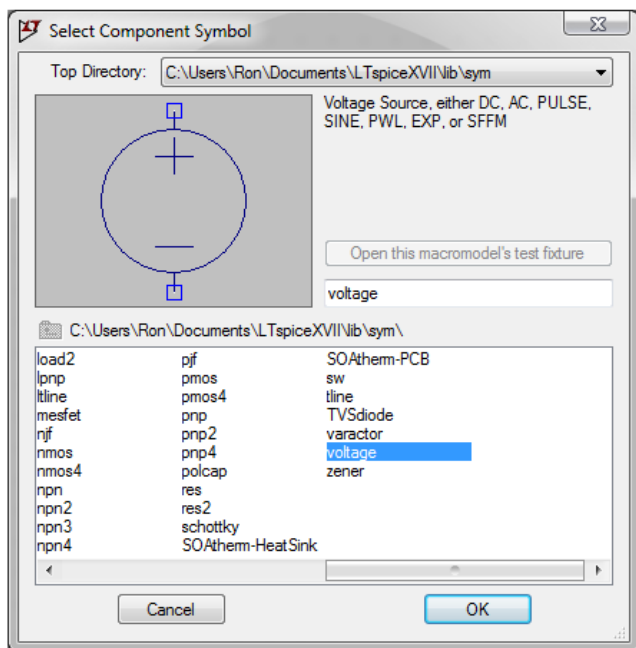


Рис. 3

Джерело напруги розмістіть десь на робочому полі, воно автоматично буде назване «V1». Джерело «V2» можна „скинути“, натиснувши кнопку *ESC* або праву кнопку миші. Наведіть вказівник мишки на джерело напруги, щоб він перетворився на руку. Тоді натисніть праву кнопку — з’явиться вікно *Voltage Source - V1*. Це налаштування джерела постійної напруги. Але нам потрібна змінна напруга, тому в цьому вікні натискаємо кнопку *Advanced* і виставляємо форму сигналу — синусоїдальну, зміщення (*DC offset*) — 0 В, амплітудне значення 310 В і частоту 50 Гц (див. рис. 4). Зверніть увагу, що в LTspice вимагає ставити не діюче (220 В), а амплітудне значення напруги, яке визначається як

$$U_{amp} = \sqrt{2}U_{rms}.$$

У випадку електричної мережі маємо

$$U_{amp} = \sqrt{2} \cdot 220 = 1.414 \cdot 220 \approx 310 \text{ (V)}.$$

У стандартній бібліотеці компонентів LTspice трансформаторів немає. Їх потрібно створювати вручну. З одного боку, це незручно, проте з іншого — створення трансформатора в LTspice дозволяє

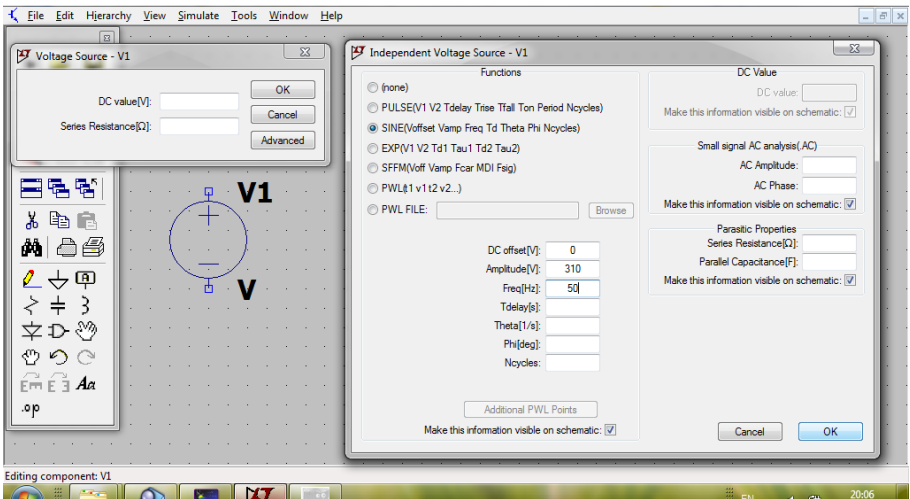


Рис. 4



врахувати його неідеальність, що дає точніші результати моделювання.

Для створення трансформатора в LTspice потрібно винести на робочу область дві котушки індуктивності, вказати їхні параметри, і, найголовніше, задати їх коефіцієнт зв'язку. Вибираємо на панелі інструментів *Inductor*, встановлюємо на робочу область дві котушки індуктивності. Для наочності одну з них віддзеркалюємо за допомогою відповідного інструменту на панелі або комбінації клавiш *Ctrl+E*. Також виносимо на робочу область „землю“ і за допомогою інструменту *Wire* з'єднуємо так, як показано на рис. 5.

Для того, щоб задати параметри трансформатора, потрібно задати індуктивності та активні опори обмоток, а також коефіцієнт магнітного (взаємоіндуктивного) зв'язку між обмотками. Для початку задамо індуктивність.

Припустимо, що індуктивність первинної обмотки становить 100 Гн (це доволі реалістичне число для трансформатора потужністю пару десятків Вт, виконаному на якісному осердді з електротехнічної сталі, у якій  $\mu \approx 400$ , і первинна обмотка якого містить десь біля 1000 або більше витків тонкого дроту). Якщо ми захочемо, щоб вихідна напруга становила приблизно 12 В, то коефіцієнт

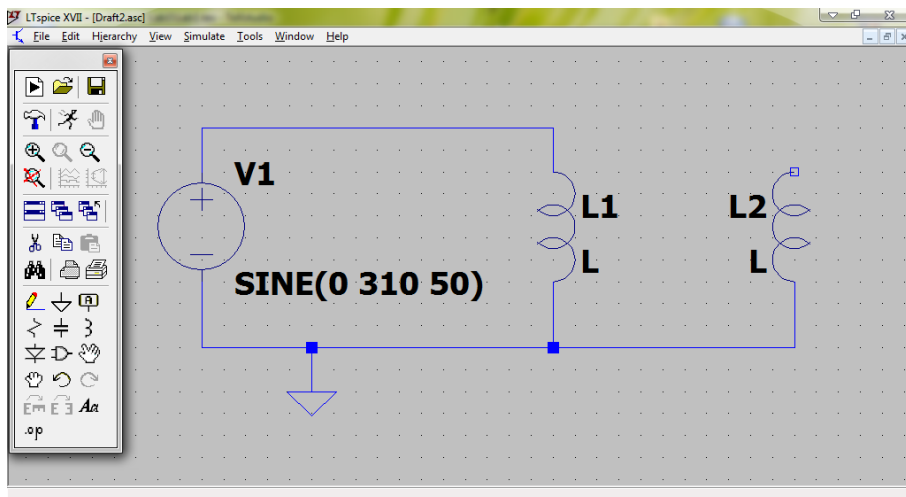


Рис. 5

трансформації буде дорівнювати:

$$K_{tr} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_{in}}{U_{out}} = \frac{220}{12} = 18,33.$$

Для правильно виготовленого трансформатора (якщо витримана правильна кількість витків на вольт, і передача енергії з первинної обмотки у вторинну відбувається з мінімальними втратами) справедливе співвідношення

$$L_1 = L_2 K_{tr}^2,$$

де  $L_1$  — індуктивність первинної обмотки (більше число), а  $L_2$  — індуктивність вторинної обмотки (менше число). Тоді

$$L_2 = \frac{L_1}{K_{tr}^2} = \frac{100}{18,33^2} \approx 0,2976 \text{ Гн} = 297,6 \text{ мГн}.$$

Знаючи, що первинні обмотки мережевих понижувальних трансформаторів мотаються тонким дротом і містять велику кількість витків, і тому мають більший активний опір, а вторинні обмотки мотаються товстішим дротом і тому мають суттєво менший активний опір, покладаємо, що опір первинної обмотки становить 100 Ом, а вторинної — 1 Ом. Наводимо вказівник миші на відповідну індуктивність, натискаємо праву кнопку та відкриваємо вікно виставлення параметрів котушки. Для  $L_1$  виставляємо індуктивність 100 Гн та опір 100 Ом (див. рис. 6), а для індуктивності  $L_2$  — відповідно  $L = 0,2976$  Гн та опір  $R_{ser} = 1$  Ом. Інші параметри можна не задавати. Крім того, можна поставити галочку навпроти пункту *Show Phase Dot* — тоді LTspice відобразить точкою початок обмотки (хоча і в даному випадку це не суттєво).

Тепер вкажемо коефіцієнт зв'язку між обмотками. У якісних трансформаторів ця величина досягає 0,999. Для її задання потрібно скористатися SPICE-директивою за допомогою відповідного інструменту. Справа в тому, що взаємна індуктивність між обмотками — це все ж таки індуктивність, але це не окрема деталь. Для таких «неіснуючих якби деталей» (а крім взіємної індуктивності це ще й різноманітні паразитні параметри) і придумали SPICE-директиви. SPICE-директива — це якби команда, яка додає у схему

«невидимий» компонент, але він має якісь електричні параметри і враховується при моделюванні. Для задання коефіцієнту взаємодуктивного зв'язку додаємо SPICE-директиву (з пробілами)

$$K1 \quad L1 \quad L2 \quad 0.999$$

як показано на рис. 7. Зверніть увагу, що дробові числа вводяться з крапкою (як це прийнято в англійських країнах), а не з комою. У цьому вікні натискаємо *OK* і поміщаємо отримане магічне заклинання десь під трансформатором. В результаті всіх проведених маніпуляцій повинно получитися щось схоже на рис. 8. Також зверніть увагу, що при переміщенні компонента зв'язок не переміщується, тому спочатку правильно розставляйте компоненти, і лише потім з'єднайте їх.

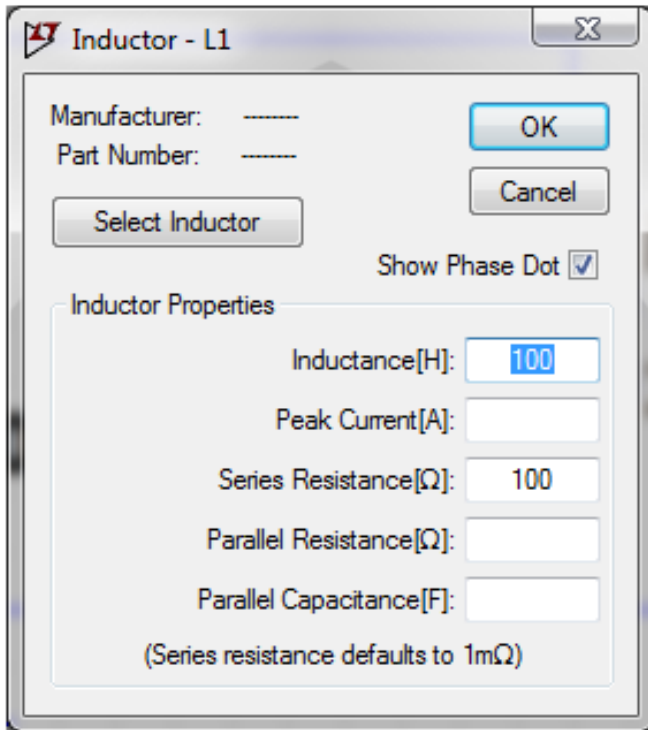


Рис. 6

Тепер на схему потрібно помістити діод, згладжуючий конденсатор та резистор, який виконує роль опору навантаження. Виставляємо всі ці компоненти на робоче поле. Для конденсатора задаємо значення 4700 мкФ (для задання одиниці вимірювання мкФ у відповідному вікні налаштування параметрів конденсатора потрібно ввести «4700u», оця літера „u“ вказує на мікروفаради ( $\mu F$ )). Крім того, ще потрібно вказати паразитний опір конденсатора. У ви-

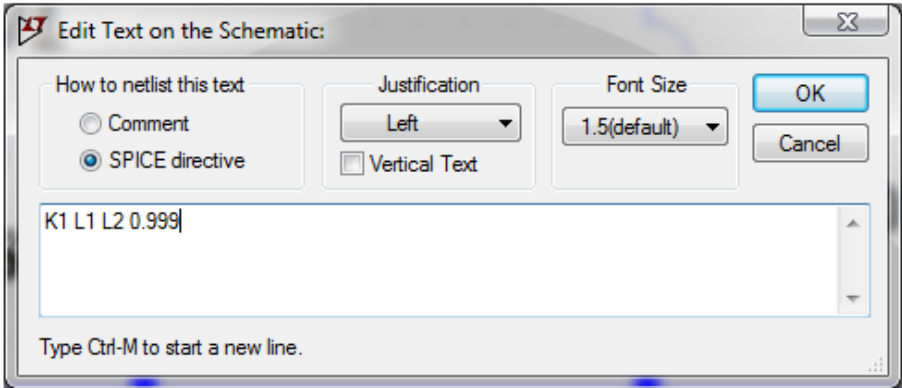


Рис. 7

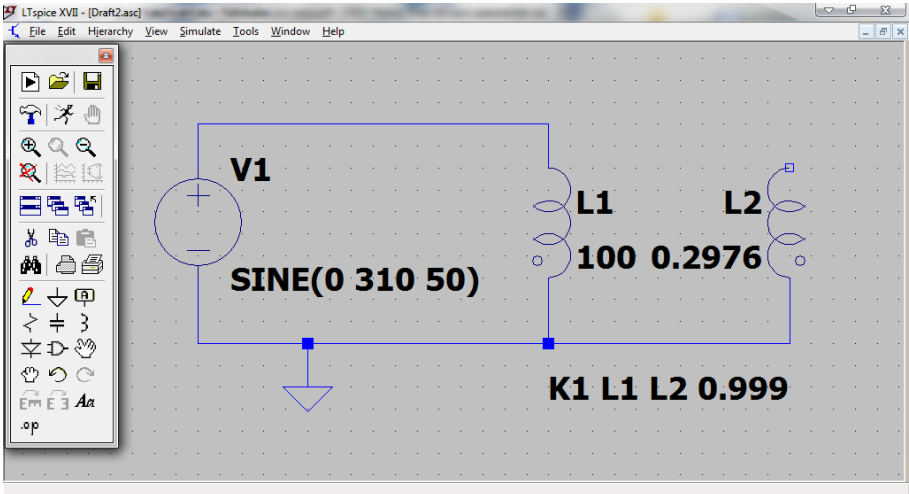


Рис. 8

прямокутних мережевої напруги, як правило, використовуються електrolітичні конденсатори, які мають відносно велику ємність, але і малий паразитний опір (тобто великий паразитний струм утікання). Тому у рядку *Equiv. Series Resistance* виставляємо 1 Ом (рис. 9).

Для задання опору резистора припустимо, що при напрузі 12 В струм через навантаження становить 0,1 А. Тоді по закону Ома:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{12}{0,1} = 120 \text{ Ом.}$$

Отримане число виставляємо у відповідному рядку параметрів резистора, а у рядку *Tolerance* (точність, допуск) виставляємо 5% (рис. 10).

Діод обираємо ідеальний, нічого не налаштовуємо. Зверніть увагу, що для всіх використаних компонентів по натисненню на кнопку *Select ...* можна вибрати модуль якогось реального EPE.

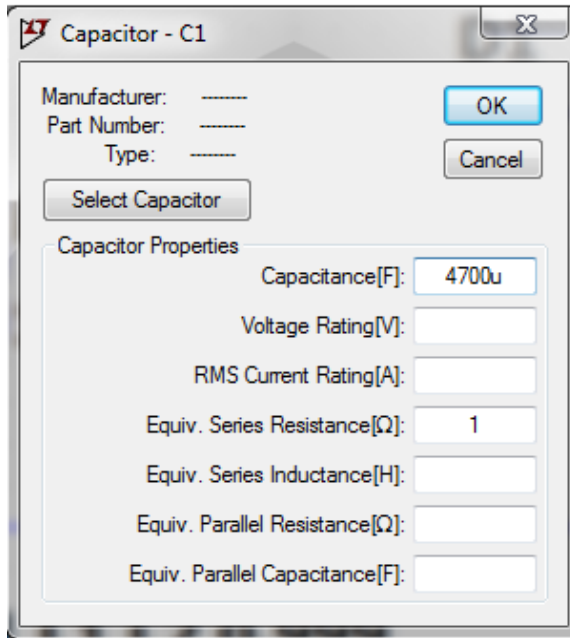


Рис. 9

В результаті повинна получитися схема, схожа на рис. 11.

Тепер вибираємо на панелі інструментів команду *Run* і відкривається вікно *Edit Simulation Command*, у якому обов'язково треба виставити час закінчення симуляції (*Stop time*) та час початку запису даних симуляції (*Time to start saving data*). Інші опції LTspice

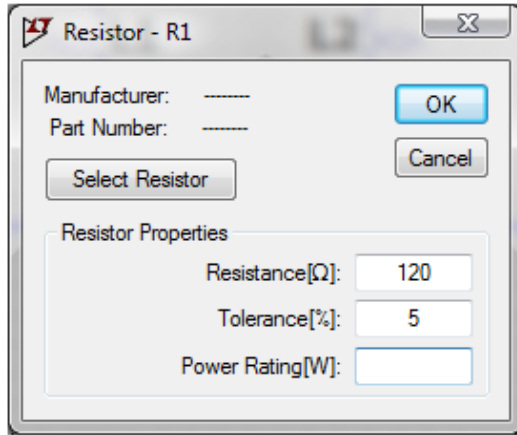


Рис. 10

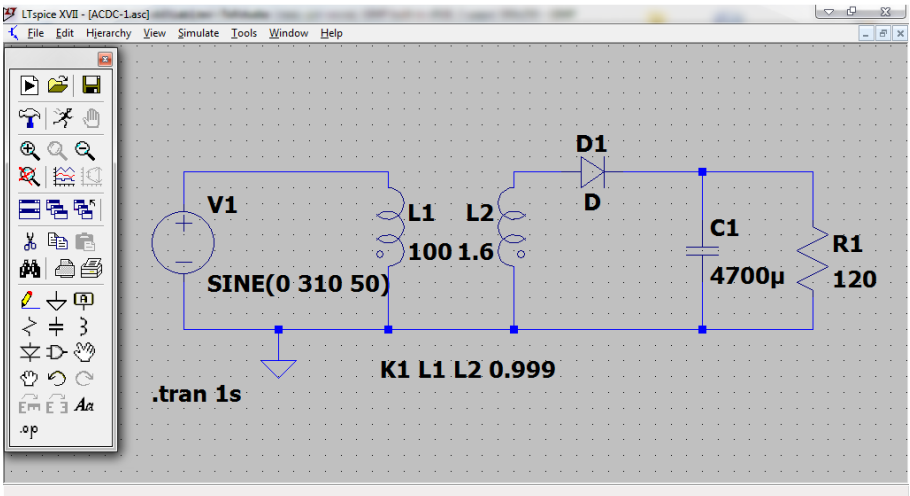


Рис. 11

виставить за замовчуванням сам. Для того, щоб не спостерігати перехідний процес, обмежимо інтервал симуляції 1,5 ... 2 с (див. рис. 12).

Натискаємо *OK*, і на екрані з'являється додаткове вікно з результатами симуляції. Поки що воно пусте, для того, щоб щось побачити потрібно навести мишку на будь-який провід у схемі — вказівник перетворюється на щуп. Для нашої схеми є сенс подивитися на сигнал на резисторі (червона стрілка на рис. 13).

Зверніть увагу на пульсації вихідного сигналу, а також на те, що його середнє значення не дорівнює 12 В — воно більше. Це відбувається внаслідок того, що конденсатор дещо „перезаряджається“ за рахунок різниці між амплітудним та діючим значеннями напруги (тобто 12 В — це діюче значення, а не амплітудне). Також зверніть увагу на те, що графік сигналу по горизонталі промаркований ніби-то від нуля, хоча до цього нуля вже пройшло 1,5 с. По вертикалі графік маркується не від нуля, а масштаб напруги

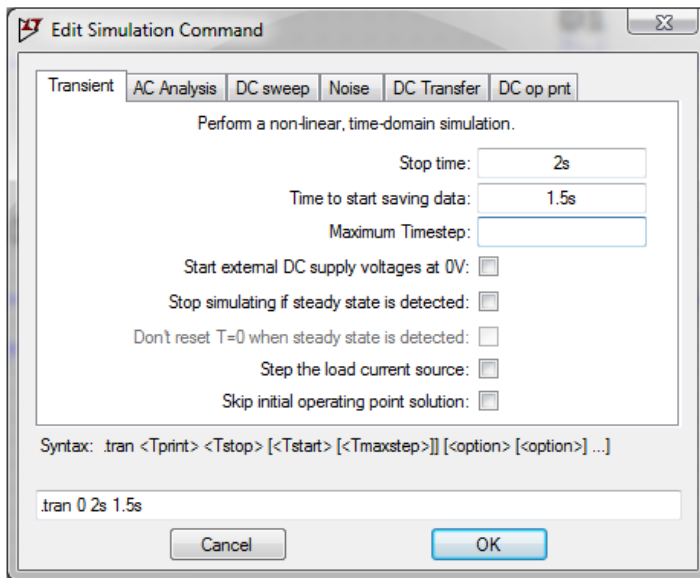


Рис. 12

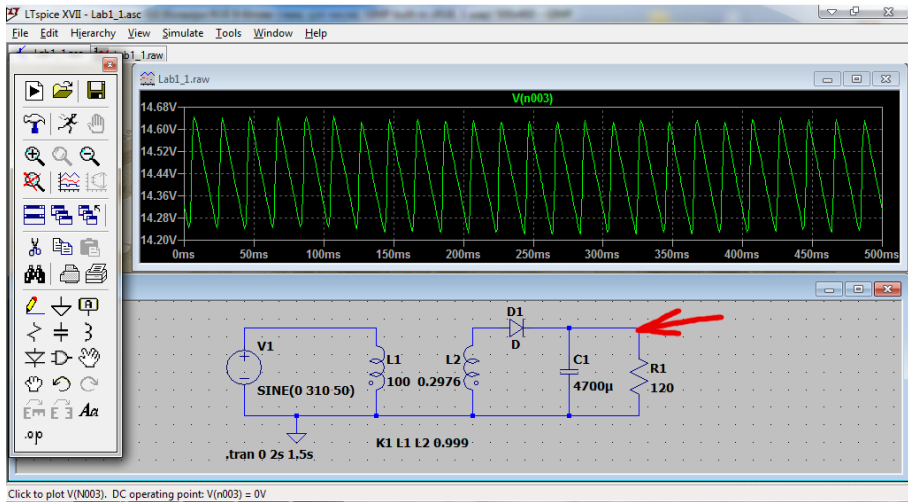


Рис. 13

програма сама підбирає таким, щоб графік заповнював більшу частину площі вікна.

Тепер подивимось форму вхідного сигналу. Але спочатку трошки підкоригуємо інтервал симуляції. Для цього треба зайти в меню *Simulate* і вибрати *Edit Simulation Cmd.* Знову відкриється вікно, як на рис. 12. Виставте час закінчення 0,1 с, а час початку - 0 с. Після цього потрібно знову зробити активним вікно із схемою і навести щуп на верхній край резистора (зелена стрілка на рис. 14). З'явиться новий графік (зелена крива). Зверніть увагу на перехідний процес — плавне наростання сигналу на самому початку. Це заряджається конденсатор. Тепер наведіть щуп між котушкою  $L2$  і діодом (синя стрілка на рис. 14). Ви побачите форму вхідного сигналу (синя крива).

Ну, і наостанок треба ще побачити пульсації вихідного сигналу без згладжувального конденсатора. Для цього закриваємо вікно симуляції, видаляємо конденсатор та провідники біля нього за допомогою інструменту *Cut* („ножиці“, в LTspice елемент не можна просто виділити). Потім знову запускаємо симуляцію (команду редагувати не треба, можна залишити все як і було — від 0 до 0,1 с).



Наводимо мишку на провідник між резистором і діодом і отримуємо нашу добре відому осцилограму (рис. 15).

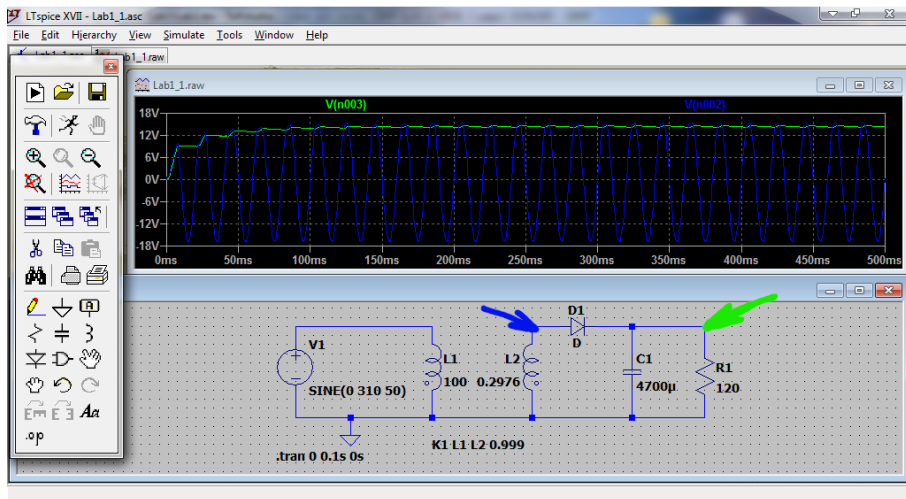


Рис. 14

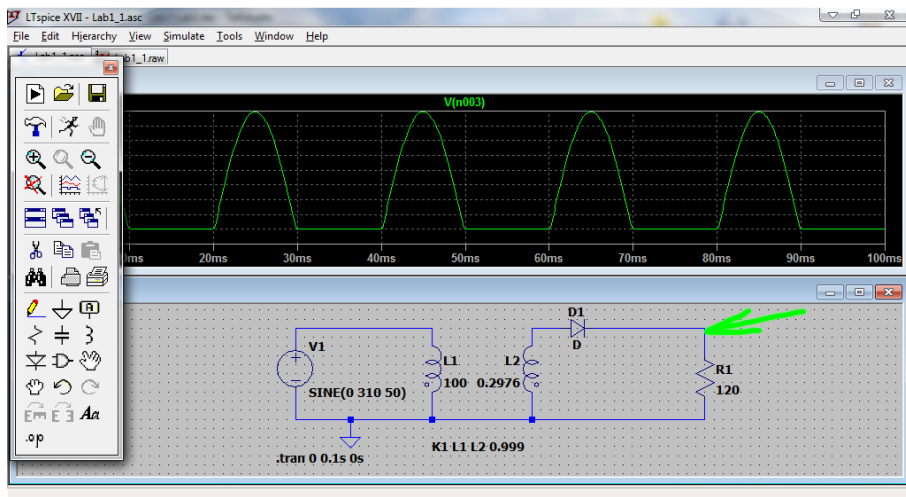


Рис. 15

### 3 Порядок виконання лабораторної роботи

Отже, основним завданням даної лабораторної роботи є дослідження схеми двохпівперіодного (мостового) випрямляча напруги. Послідовність виконання роботи рекомендується наступна.

1. Зібрати схему мостового випрямляча. За основу можна взяти, наприклад, рис. 16. Індуктивність первинної обмотки, коефіцієнт трансформації, номінальне значення конденсатора та струм через резистор взяти з таблиці. Варіант — номер студента у списку групи. Діоди поки вважати ідеальними, вказаними у таблиці типоніменалами діодів потрібно буде скористатися пізніше. Вхідна напруга вважається мережевою ( $U_{amp} = 310V, f = 50Hz$ ). Індуктивність вторинної обмотки, вихідну напругу та опір навантаження потрібно обчислити за формулами, що були наведені раніше. Активний опір первинної обмотки прийняти рівним 100 Ом, вторинної обмотки — 1 Ом, коефіцієнт взаємоіндуктивного зв'язку — 0,99. Зробити скріншот вікна зі схемою для звіту.

Варіант	$L1$ , Гн	$K_{tr}$	$C1$ , мкФ	$I$ , А	$D1 \dots D4$
1	90	20	220	0,1	1N914
2	120	25	250	0,1	1N4148
3	100	15	200	0,3	1N5817
4	80	25	180	0,3	1N5818
5	120	25	200	0,3	1N5819
6	100	20	220	0,2	BAT54
7	90	20	250	0,3	MBR0520L
8	120	15	200	0,3	MBR0530L
9	120	25	220	0,4	MBRS1100
10	80	20	270	0,4	MBRS130L

2. Промоделювати зібрану схему. Самостійно вибрати інтервал симуляції, щоб на графіку було видно від 2 до 7 ... 8 періодів сигналу. Зробити скріншот вікна з вхідним та вихідним сигналами для звіту.

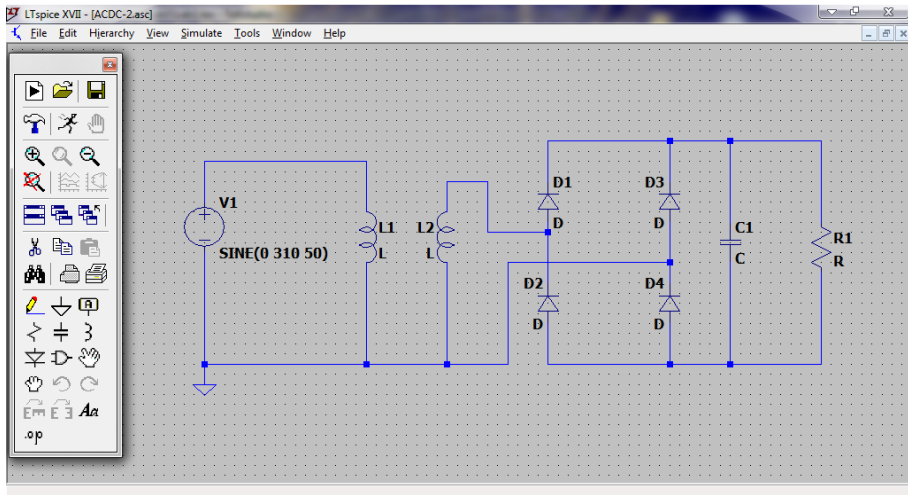


Рис. 16

3. За результатами моделювання оцінити коефіцієнт пульсацій для даної схеми.

4. Замінити ідеальні діоди в схемі на ті, що вказані у таблиці, а також прибрати із схеми конденсатор. Про моделювати ще раз схему з моделями реальних діодів та без конденсатора, зробити скріншот вікна з графіком пульсуючого сигналу. Оцінити, чи відрізняється форма вигналу від тієї, яка була при використанні ідеальних діодів. Зробити відповідний висновок.

## 4 Зміст звіту

Звіт рекомендується оформлювати у наступній послідовності.

- Назва роботи та мета її виконання.
- Варіант.
- Скріншот із зібраною схемою.
- Результати обчислення індуктивності вторинної обмотки та опору навантаження.

- Скріншот результатів симуляції при використанні ідеальних діодів.
- Результати розрахунку коефіцієнту пульсацій.
- Скріншот результатів симуляції при використанні моделей реальних діодів.
- Висновки. Чому дорівнює коефіцієнт пульсацій у вашій схемі? Чи не завадило б його зменшити? Як його можна зменшити? Чи відрізняються форми сигналів при використанні ідеальних та реальних діодів? Як вам LTspice?..