

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”
Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури

КУРСОВА РОБОТА

з кредитного модуля: Аналогова електроніка — 2
на тему: Вимірювач індуктивності на таймері NE555

Студента 2 курсу групи ДК-82

Напряму підготовки:

Радіоелектронні апарати

Спеціальності:

Телекомунікації та радіотехніка

Сопіра Р. Я

(прізвище та ініціали)

Керівник:

доцент, к.т.н. Короткий Є.В.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Національна оцінка:

Кількість балів: _____ Оцінка: ECTS _____

Члени комісії: _____
(підпис)

доцент, к.т.н. Короткий Є.В.
(вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

(вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Київ — 2020 рік

Зміст

Вступ.....	4
1. Вибір та дослідження принципової схеми приладу.....	5
1.1. Вибір принципової схеми.....	5
1.2. Остаточна принципова схема.....	6
1.3. NE555.....	8
2. Розрахунок принципової схеми.....	10
3. Моделювання роботи приладу.....	13
4. Створення прототипу.....	16
4.1. Розробка та виготовлення друкованої плати.....	16
4.2. Дослідження характеристик приладу.....	20
Висновки.....	22
Перелік використаних джерел.....	23

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ШИМ	Широтно-імпульсна модуляція
SPICE	Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
ПЗ	Програмне забезпечення

ВСТУП

Метою даного курсового проекту є розробка приладу для вимірювання довільної індуктивності. Принцип вимірювання ґрунтується на поступовому зростанні струму через індуктивність і перетворенні часу зростання струму від нульового значення до максимального у квазіпостійний струм, що вимірюється мікроамперметром і є еквівалентним реальному номіналу вимірюваної індуктивності.

Задача приладу — виміряти значення індуктивності електронного компонента. Бажаною умовою є максимальна простота та прийнятна при цьому точність вимірювань.

Завданням курсової роботи є:

- Розробка або вибір принципової схеми приладу, детальне ознайомлення із принципом її роботи;
- Виконання розрахунку необхідних залежностей та характеристик схеми;
- Моделювання роботи приладу;
- Створення робочого прототипу приладу, його налаштування;

ВИБІР ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ПРИЛАДУ

1.1. Вибір принципової схеми

Головною задачею приладу є вимірювання невідомої індуктивності. Для цього була обрана наступна^[1] принципова схема на основі мікросхеми NE555^[2] (далі 555 таймер) зображена на рис. 1.1

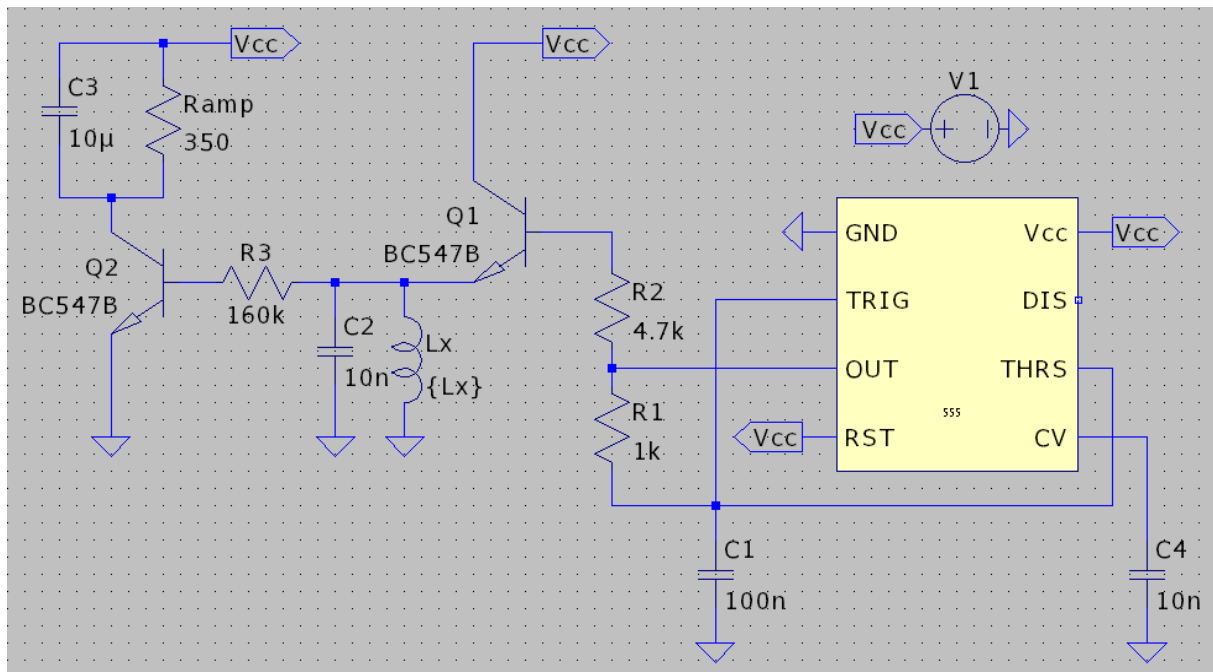


Рис. 1.1 (принципова схема приладу)

У наведеній вище схемі 555 таймер генерує імпульси напруги, що подаються на базу транзистора Q_1 , включений по схемі з загальним колектором, що періодично відкривається і подає напругу на індуктивність. Принцип вимірювань полягає у тому, що струм через індуктивність не може змінюватися миттєво і зростатиме поступово, при цьому прикладена напруга буде зменшуватись.

Тому вимірявши час за який струм зміниться від нуля до свого максимального значення можна розрахувати індуктивність. Чим шукана індуктивність більша, тим більший час наростання струму. Частина схеми на основі транзистора Q_2 та ємності C_3 перетворює цей час наростання у квазіпостійний струм через мікроамперметр. У момент відкриття Q_1 струм

індуктивності буде мінімальним і значна частина струму буде направлена у базу транзистора Q_2 , відкриваючи його. Із збільшенням струму індуктивності струм направлений у базу Q_2 зменшується і транзистор закривається.

Цей механізм якраз і перетворює зростання струму у імпульси струму через колектор Q_2 , які заряджають конденсатор C_3 , який в моменти коли Q_2 закритий, розряджається через мікроамперметр, якому на принциповій схемі рис. 1.1 відповідає опір R_{amp} (внутрішній опір реального амперметра).

1.2. Остаточна принципова схема

У випадку симуляції у програмі LTSpice^[3], і у випадку дослідження прототипу даної схеми побудованої на макетній платі було знайдено два значних її недоліки:

- 1) струм колектора Q_1 перевищує (>100 мА у діючому значенні) максимально допустимий струм вказаний в документації до використаного транзистора BC547B^[4];
- 2) у випадку відсутності індуктивності струм через мікроамперметр M2001^[5] перевищує допустимі межі вимірювання;

Тому було вирішено зробити невеликі правки у фінальній схемі приладу (рис. 1.2), які полягають у наступному:

- 1) щоб обмежити струм колектора Q_1 достатньо включити резистор (R_k) із незначним опором, однак тим самим зменшиться коефіцієнт підсилення за струмом зазначеного транзистора;
- 2) для надійного обмеження струму мікроамперметра було вирішено включити паралельно амперметру кремнієвий діод КД522Б та збільшити опір гілки амперметра шляхом послідовного включення додаткового опору (1 кОм). У випадку відсутності індуктивності транзистор Q_2 у момент імпульсу буде відкритий, на амперметрі буде створюватись значна напруга, якої достатньо для відкривання діоду D_1 , що в свою чергу

створить гілку із низьким опором, яка забере на себе значну частину струму.

Маємо наступну остаточну принципову схему приладу:

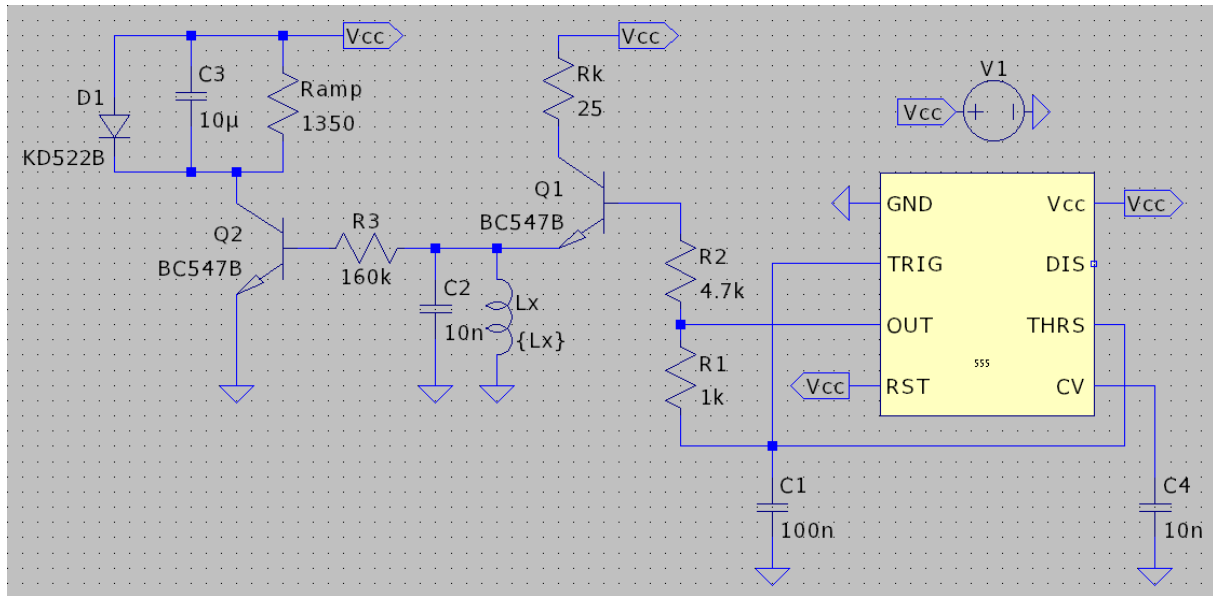


Рис. 1.2 (остаточна принципова схема приладу)

У такій схемі діюче значення струму колектора Q_1 не перевищує 100 мА, а струм мікроамперметра (М2001) близький до його верхньої межі вимірювання у 500мкА, напруга живлення (V_{cc}) складає +5 В.

1.3. NE555

NE555 являє собою універсальну мікросхему таймера, що може використовуватися для генерації одиночних імпульсів або їх послідовностей (наприклад, ШІМ-сигнал), і фактично є асинхронним RS-тригером з порогами входу, що точно задані за допомогою двох прецензійних компараторів і вбудованого дільника напруги з двома опорними напругами для порівняння. Також у мікросхемі є транзисторний ключ з відкритим колектором, що повторює вихід OUT (див. Рис. 1.3).

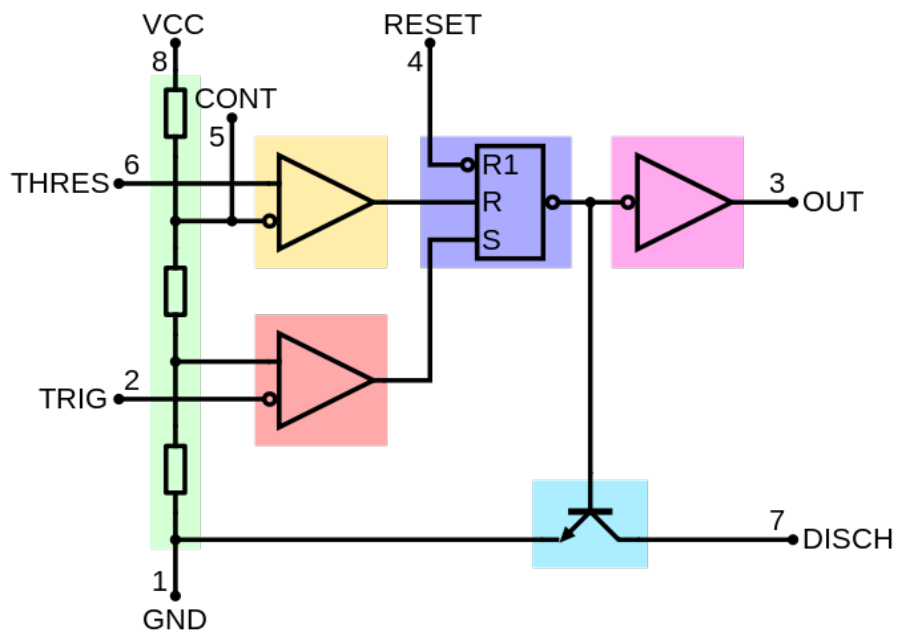


Рис. 1.3 (внутрішня структура NE555)

Базовий принцип роботи мікросхеми не є досить складним: дільник напруги (між контактами 8 й 1), що складається із трьох однакових послідовних резисторів задає компараторам опорні напруги для порівняння (на рис. 1.3 - $2/3$ напруги живлення (VCC) для верхнього, та $1/3$ напруги живлення (VCC) для нижнього). Якщо напруга на вході 6 (THRES) верхнього компаратора (виділений жовтим кольором) буде більшою за $2/3$ VCC, на виході компаратора з'явиться логічна одиниця, яка перемкне тригер у логічний нуль. Якщо ж на вході 2 (TRIG) напруга впаде нижче за $1/3$ VCC, то нижній компаратор

(виділений червоним кольором) переключить тригер у положення логічної одиниці.

Вхід RESET (4) використовується, як зрозуміло із назви, для скидання мікросхеми у відоме початкове положення. Для скидання використовується логічний нуль, тому рекомендується подавати на цей вхід напругу живлення і для запобігання випадковим скиданням.

Входи VCC (8) та GND (1), плюс та мінус (земля) напруги живлення. Мікросхема розрахована на напругу живлення від +5 до +16 В.

Вхід CONT (5) може бути використаний для того, щоб задавати інший рівень опорної напруги для верхнього компаратора. Якщо вхід не використовується, документація рекомендує заземлювати даний вхід через конденсатор (до 10 нФ) для зменшення рівня шумів.

Вихід DISCH (7) зазвичай використовується у моно- та астабільному режимі для розряджання конденсатора.

У моностабільному режимі (рис 1.4 а) 555 таймер використовується для генерації одиночних прямокутних імпульсів, тривалість яких задається постійною часу RC-ланцюга.

У астабільному режимі (рис. 1.4 б) 555 таймер працює як генератор тих самих прямокутних імпульсів із частотою та коефіцієнтом заповнення, які задаються опорами R_A , R_B та конденсатором C .

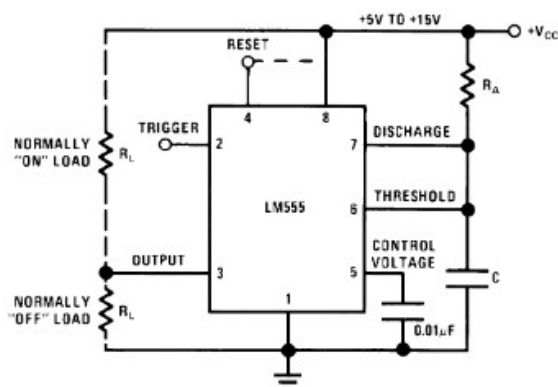


Рис. 1.4 а) (моностабільний режим)

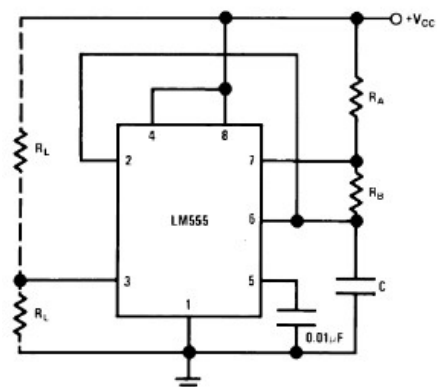


Рис. 1.4 б) (астабільний режим)

РОЗРАХУНОК ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ

Для розрахунку невідомої індуктивності необхідно розрахувати залежність струму через дану індуктивність від часу при подачі на неї певного постійного значення напруги. Тобто у такій постановці задачі схему на рис. 1.2 насправді можна спростити до наступної:

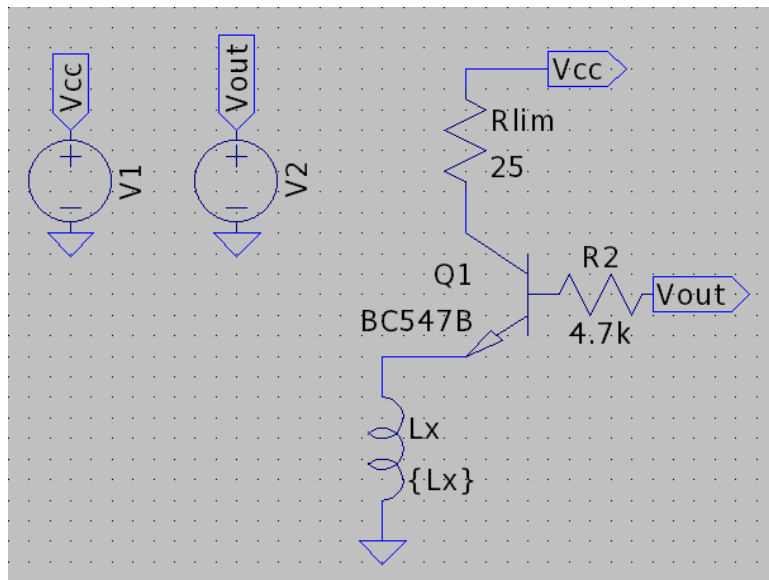


Рис 2.1 (спрощена схема)

де V_{CC} - напруга живлення, а V_{OUT} — напруга на виході таймера.

Частиною схеми з транзистором Q_2 та конденсатором C_2 фактично можна знехтувати, тому, що увесь основний струм емітера Q_1 буде втікати у невідому індуктивність L_x , а конденсатор C_2 майже моментально зарядиться через відкритий транзистор від джерела живлення і стане еквівалентний розриву кола.

За другим законом Кірхгофа складаємо рівняння напруг для контурів із індуктивністю:

$$U_L + U_{KE} + U_{R_k} - V_{CC} = 0 \quad (2.1)$$

$$U_L + U_{BE} + U_{R_2} - V_{OUT} = 0 \quad (2.2)$$

Напруга на індуктивності: $U_L = L \frac{di_L}{dt}$

Тому із (2.1) маємо: $L \frac{di_L}{dt} + U_{KE} + U_{R_k} - V_{CC} = 0$, звідки отримуємо наступне:

$$L \frac{di_L}{dt} = V_{CC} - U_{KE} - i_K R_k \quad (2.3) \quad \text{де } U_{R_k} = i_K R_k$$

Також маємо можливість скласти наступні рівняння для струмів:

$$i_e \approx i_L, \quad i_K \approx \alpha \cdot i_e, \quad i_K \approx \alpha \cdot i_L \quad (2.4)$$

де α — коефіцієнт передачі за струмом, який для розрахунку будемо вважати постійним, бо його зміна не є надто суттєвою.

Підстановкою (2.4) у (2.3) отримуємо таке диференціальне рівняння першого порядку:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{CC} - U_{KE} - \alpha R_k \cdot i_L}{L}$$

Рішенням даного рівняння у загальному випадку буде наступна функція:

$$i_L(t) = \frac{V_{CC} - U_{KE}}{\alpha R_k} - k_1 e^{\frac{-\alpha R_k}{L} t}$$

Виконавши підстановку початкових умов, а саме, що струм через індуктивність у нульовий момент часу є рівним нулю, знаходимо коефіцієнт k_1 :

$$0 = \frac{V_{CC} - U_{KE}}{\alpha R_k} - k_1 e^0 \Rightarrow k_1 = \frac{V_{CC} - U_{KE}}{\alpha R_k}$$

І отримуємо фінальне рівняння:

$$i_L(t) = \frac{V_{CC} - U_{KE}}{\alpha R_k} (1 - e^{\frac{-\alpha R_k}{L} t}),$$

Яке для зручності перепишемо наступним чином:

$$i_L(t) = i_{Lm} (1 - e^{-\tau t}) \quad (2.5)$$

$$\text{де } i_{Lm} = \frac{V_{CC} - U_{KE}}{\alpha R_k}, \quad \tau = \frac{\alpha R_k}{L}$$

Звідси уже можемо вивести час зміни струму:

$$i_L = i_{Lm} - i_{Lm} \cdot e^{-\tau t} \Rightarrow \frac{i_{Lm} - i_L}{i_{Lm}} = e^{-\tau t}$$

$$t = -\ln\left(\frac{i_{Lm} - i_L}{i_{Lm}}\right) \cdot \frac{1}{\tau} \quad (2.6)$$

З формули (2.6), можна виразити значення індуктивності:

$$-\ln\left(\frac{i_{Lm}-i_L}{i_{Lm}}\right) \cdot \frac{1}{t} = \tau$$

$$L = -\alpha R_k t \div \left[\ln\left(\frac{i_{Lm}-i_L}{i_{Lm}}\right)\right] \quad (2.7)$$

Також виведемо коефіцієнт передачі за струмом α для транзистора Q_1 :

$$\alpha = \frac{i_K}{i_e}$$

Струм колектора:
$$i_k = \frac{U_{R_k}}{R_k}$$

Струм емітера:
$$i_e = i_K + i_o = \frac{U_{R_k}}{R_k} + \frac{U_{R_2}}{R_2}$$

Маємо:
$$\alpha = \frac{i_K}{i_k + i_o} = \frac{U_{R_k}}{R_k} \div \left(\frac{U_{R_k}}{R_k} + \frac{U_{R_2}}{R_2}\right) = \frac{U_{R_k}}{R_k} \cdot \left(\frac{R_k R_2}{U_{R_k} R_2 + U_{R_2} R_k}\right)$$

Припустивши, що напруга на котушці рівна нулю, із рівнянь (2.1) та (2.2):

$$U_{R_k} = V_{CC} - U_{KE} \quad ,$$

$$U_{R_2} = V_{OUT} - U_{BE}$$

Остаточна розрахункова формула:

$$\alpha \approx \left(\frac{V_{CC} - U_{KE}}{R_k}\right) \cdot \left(\frac{R_k R_2}{(V_{CC} - U_{KE}) R_2 + (V_{OUT} - U_{BE}) R_k}\right) \quad (2.8)$$

Однак, для більш точного розрахунку необхідно все-таки враховувати хоч і досить швидко, але зміну напруги від її максимуму до нуля за певний час, адже згідно до рівнянь (2.1) та (2.2) у початковий момент вона може мати досить значний вплив.

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПРИЛАДУ

Моделювання приладу було виконане у програмі LTspice. У таблиці 3.1 наведені значення часу наростання струму від нуля до заданого значення розраховані за формулами (2.6) і (2.8) та отримані в результаті симуляції.

Таблиця 3.1

	L_x , мкГн								
	100			200			300		
	<i>Теор-не</i>	<i>Сим-ція</i>	<i>Похибка</i>	<i>Теор-не</i>	<i>Сим-ція</i>	<i>Похибка</i>	<i>Теор-не</i>	<i>Сим-ція</i>	<i>Похибка</i>
I_L , мА	t , мкс		Δ , %	t , мкс		Δ , %	t , мкс		Δ , %
20	0.797	0.969	21.5	1.595	1.572	1.4	2.392	2.191	8.4
40	1.793	1.662	7.3	3.585	3.024	15.7	5.378	4.382	18.5
60	3.118	2.562	17.8	6.236	4.858	22.1	9.354	7.137	23.7
80	5.107	3.856	24.5	10.214	7.489	26.7	15.321	11.085	27.7
100	9.209	6.590	28.4	18.419	12.773	30.7	27.628	18.937	31.5

$$V_{CC} = 5 \text{ (В)}, V_{OUT} = 4,082 \text{ (В)}, U_{KE} = 2,235 \text{ (В)}, U_{BE} = 0,829 \text{ (В)}$$

Розрахунок за формулою (2.6) дає можливість наближено оцінити швидкість зміни струму через індуктивність з прийнятною точністю.

Нижче наведені графіки струму через індуктивність ($i_L(t)$) отримані в LTspice при різних значеннях індуктивності L_x (100, 200 та 300 мкГн).

SPICE-директива: **.tran 20u**

Графіки струму через індуктивність:



Рис. 3.1 $L_x = 100 \text{ мкГн}$

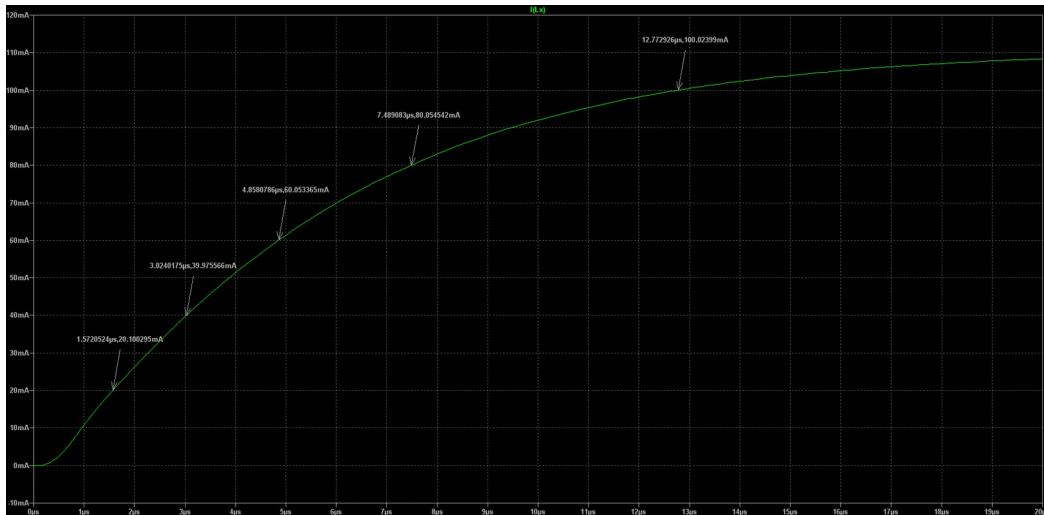


Рис. 3.2 $L_x = 200 \text{ мкГн}$

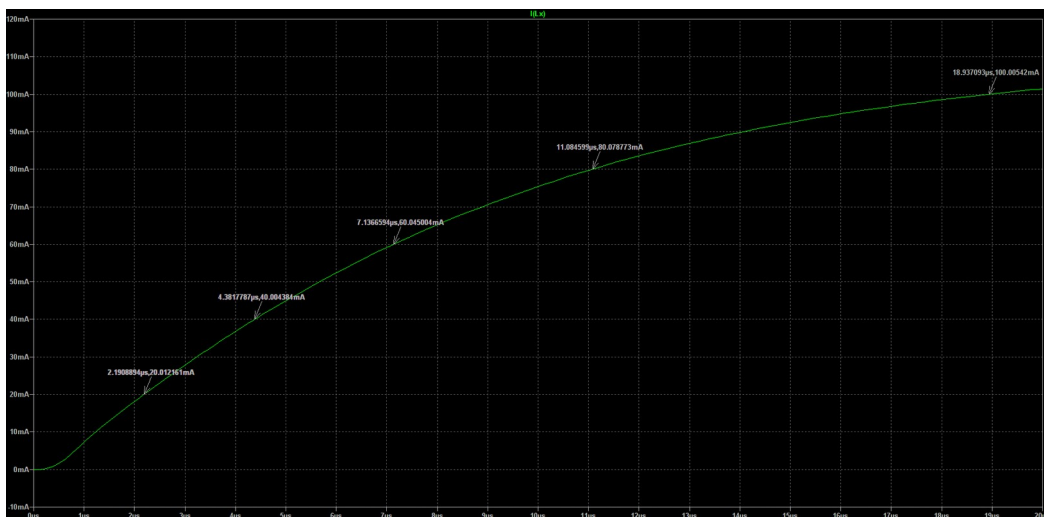


Рис. 3.3 $L_x = 300 \text{ мкГн}$

Також варто отримати значення струмів амперметра за різних значень L_x :

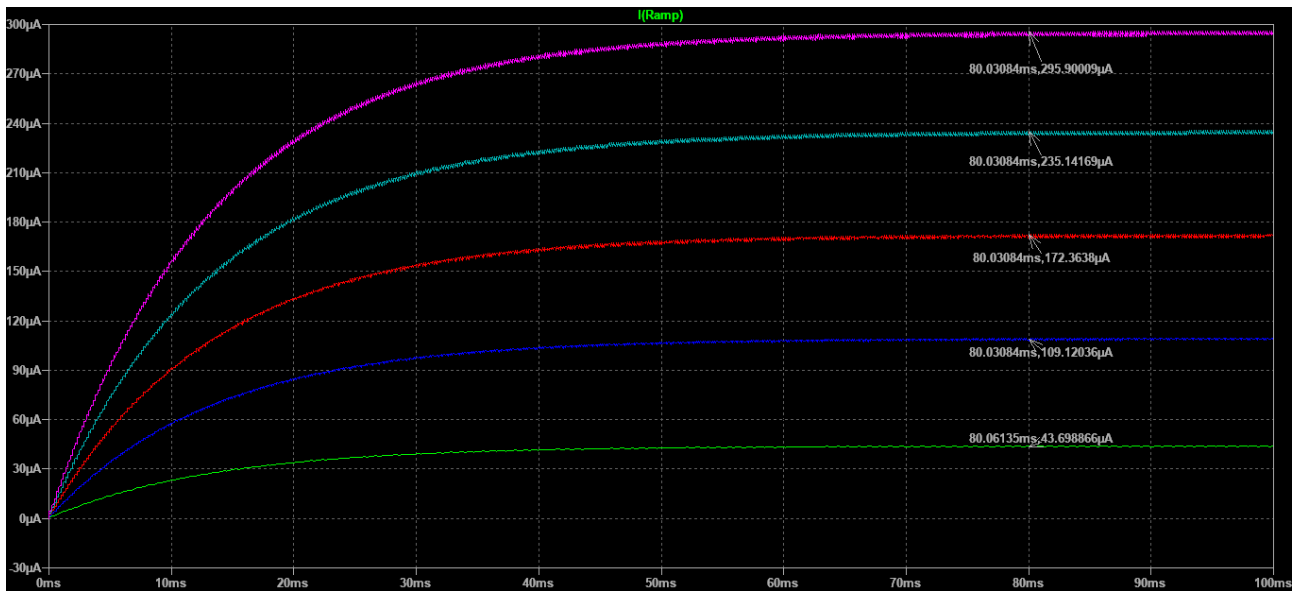


Рис. 3.4 (залежність струму амперметра від вимірюваної індуктивності)

SPICE-директиви: **.tran 100m**

.step param Lx 100u 500u 100u

Таблиця 3.2

L_x , мкГн	100	200	300	400	500
$I_{\text{амп}}$, мкГн	43.7	109.1	172.4	235.1	295.9

Скористаємося цією таблицею для того щоб у програмі Graph^[6] лінійно апроксимувати дану залежність:

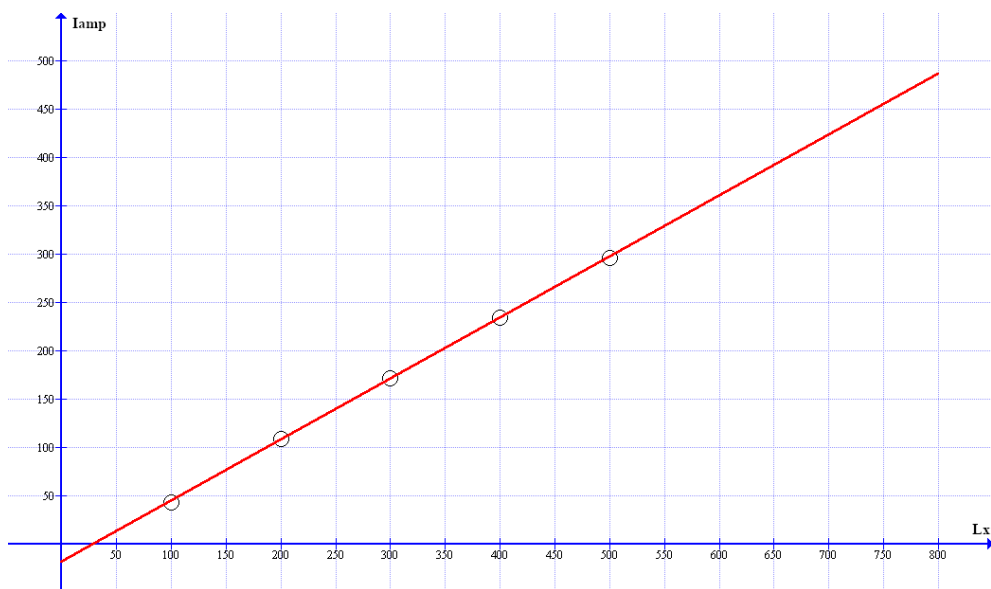


Рис. 3.5 (апроксимована залежність $I_{\text{амп}}(L_x)$)

СТВОРЕННЯ ПРОТОТИПУ

4.1. Розробка та виготовлення друкованої плати

Для створення друкованої плати використовувалося вільне ПЗ KiCad^[7], яке містить у собі редактор електричних схем Eeschema, редактор друкованих плат Pcbnew та багато інших інструментів призначених для розробки багатопшарових друкованих плат.

У Eeschema було створено принципову схему приладу, а у Pcbnew було виконане розведення плати, з урахуванням того, що доріжки на платі будуть виконані уручну і повинні бути якомога більш простими. Приблизні розміри плати - 60 на 40 мм.

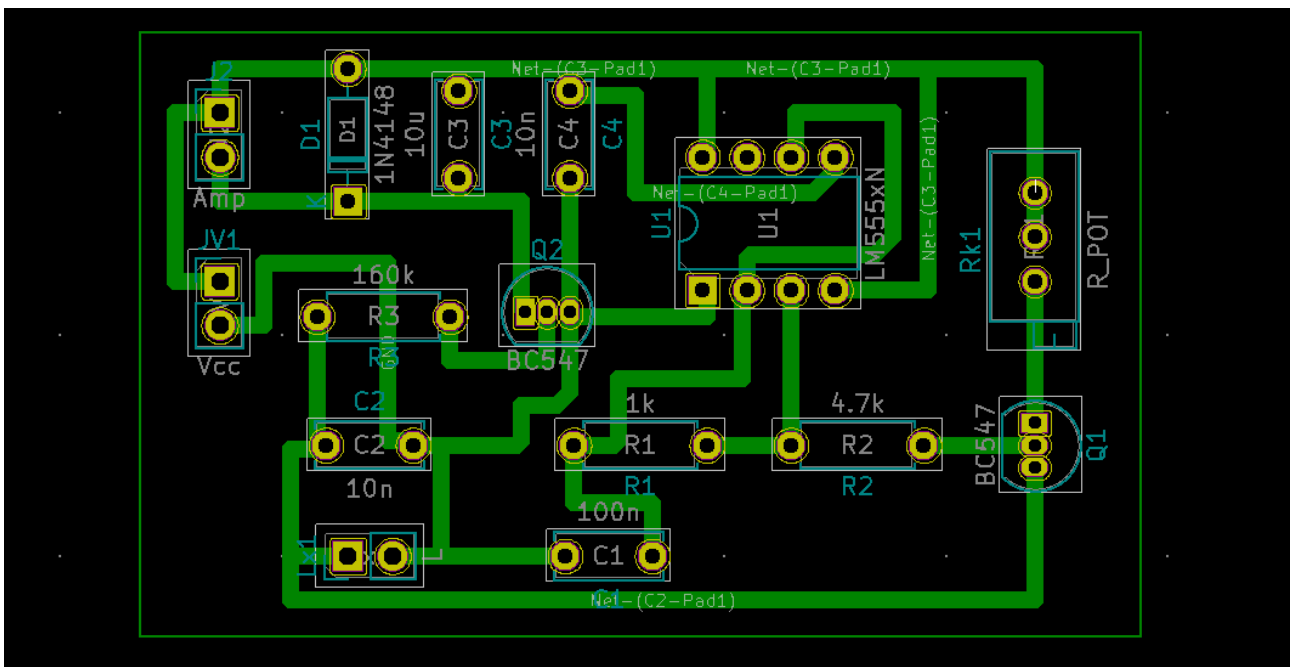


Рис. 4.1 (схема друкованої плати)

За рис. 4.1 за допомогою лаку дзеркально наносимо доріжки на мідний шар текстоліту:

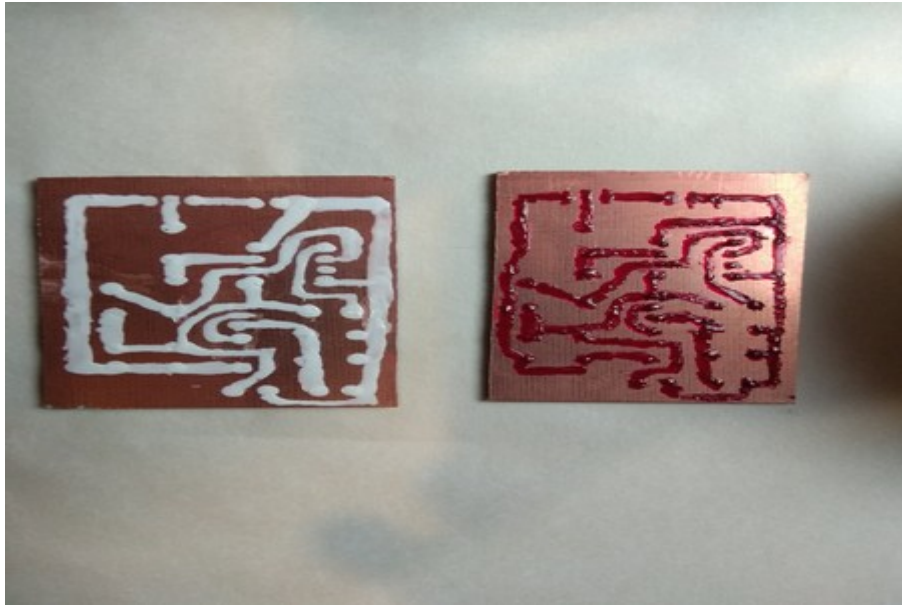


Рис. 4.2

На випадок якихось непередбачуваних проблем робимо ще запасну плату.

Плати з нанесеними доріжками поміщаємо у ємність із розчином хлорного заліза, після травлення знімаємо лак:

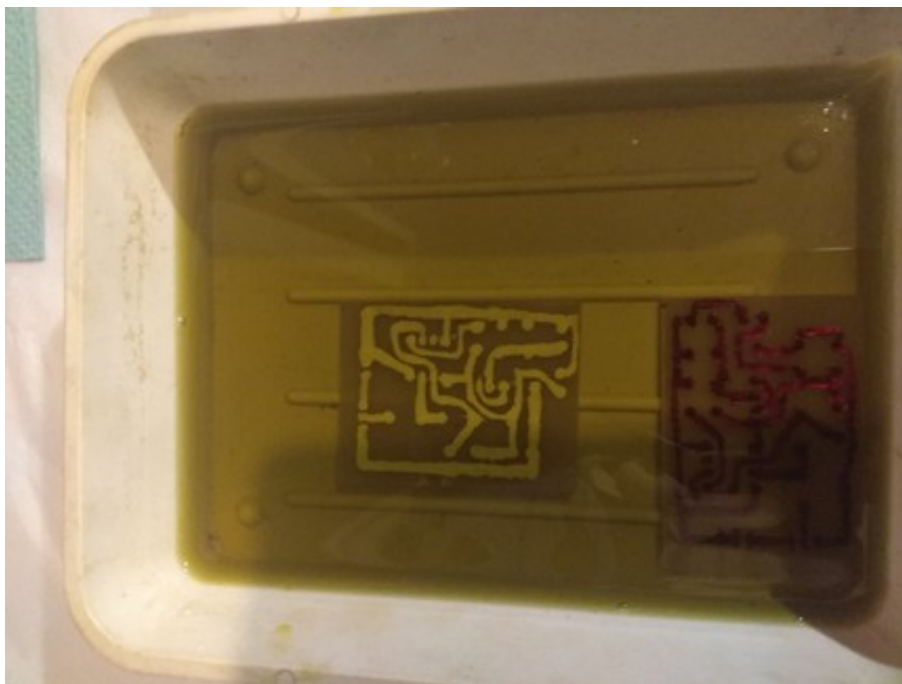


Рис. 4.3

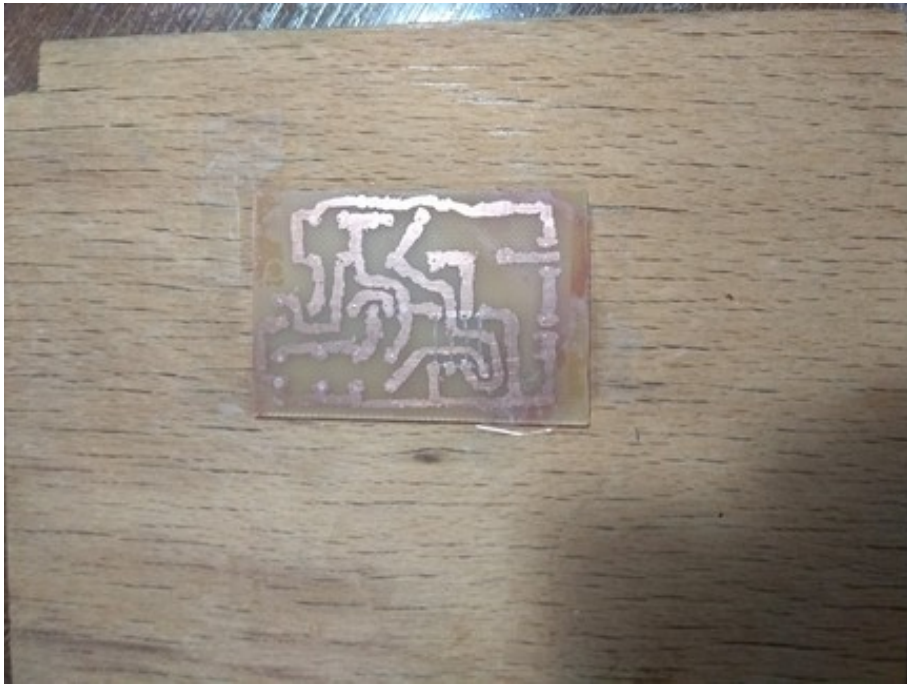


Рис. 4.4

Відмічаємо необхідні отвори, висверлюємо їх й припаюємо всі необхідні компоненти та виводи для живлення, амперметра та вимірювальних щупів:

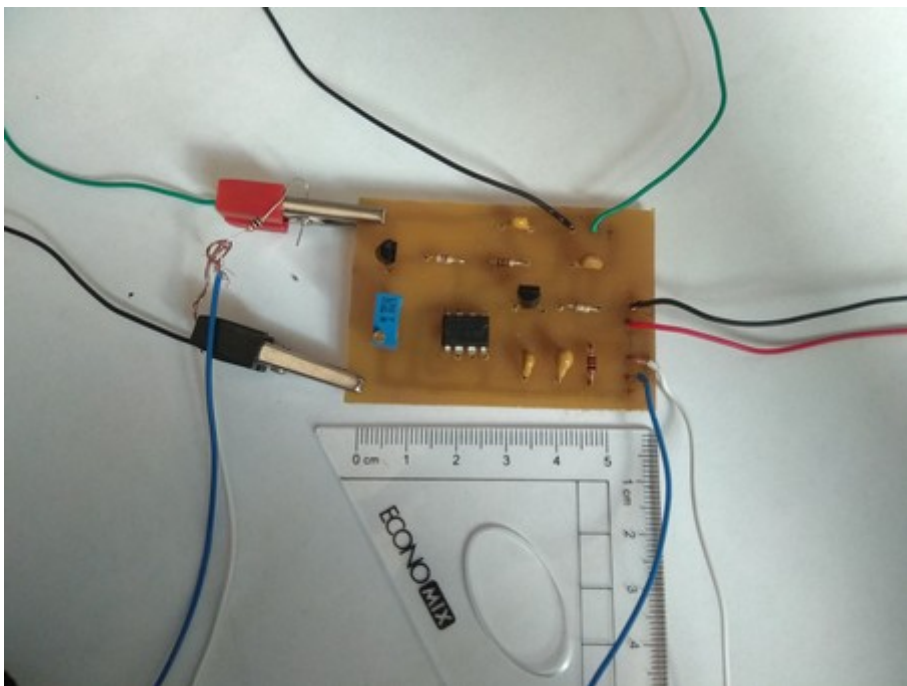


Рис. 4.5

Перевіряємо плату на працездатність: у випадку коли зразок для вимірювання відсутній, мікроамперметр повинен показати значення струму

близьке до верхньої межі вимірювань
$$I_{amp} = \frac{U_{\partial}}{R_{amp}} \approx \frac{0.65}{1350} = 480 (\mu A)$$

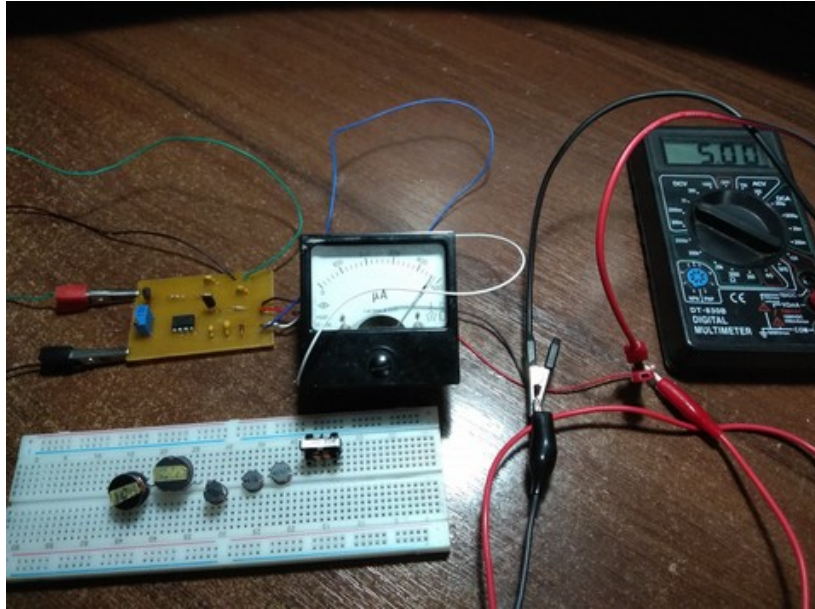


Рис. 4.6

Що і спостерігаємо. Також виконаємо перевірку із включеною індуктивністю у 100 мкГн: у симуляції маємо струм у 43.7 мкА (таб 3.2), а на практиці маємо струм у 20 мкА

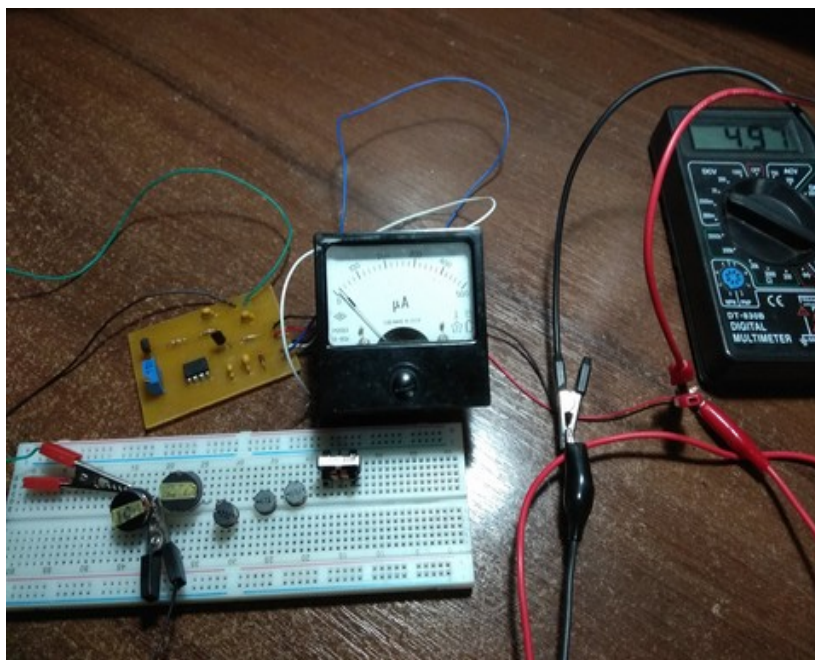


Рис. 4.7

4.2. Дослідження характеристик приладу

Тепер, переконавшись що прилад працює, пробуємо вимірювати наявні індуктивності і будуємо таблицю по результатам:

Таблиця 4.1

L_x, мкГн	100	220	330	470	680
$I_{амп}$, мкГн	20	60	110	180	270

Як і у випадку із таблицею 3.2 застосовуємо лінійну апроксимацію:

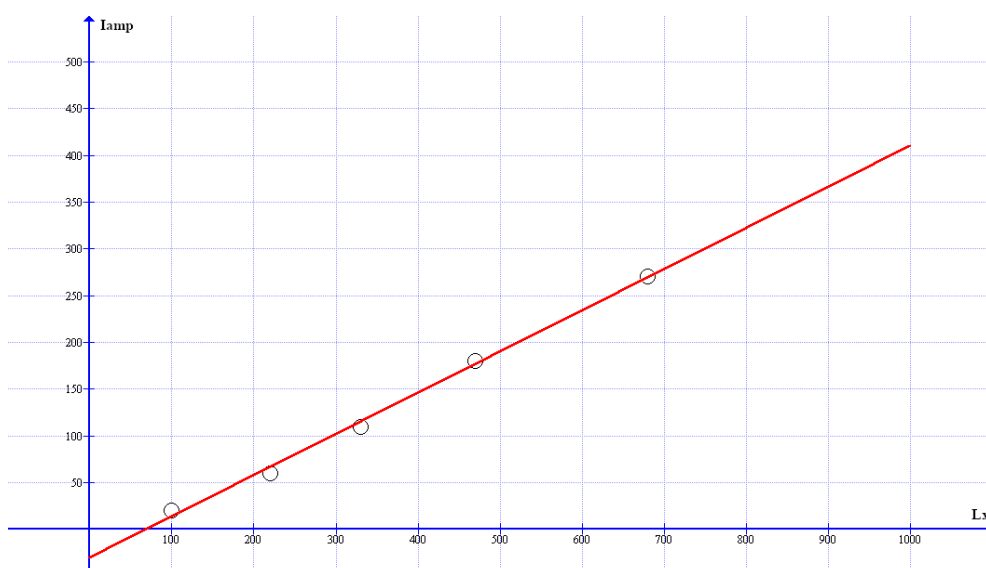


Рис. 4.8 (експериментальна залежність $I_{амп}(L_x)$)

Для порівняння отриманих результатів із результатами симуляції, користуючись графіком на рис. 3.5 побудуємо наступну остаточну таблицю:

Таблиця 4.2

L_x, мкГн	Симуляція	Експеримент	Від-на похибка
	$I_{амп}$, мкГн	$I_{амп}$, мкГн	Δ, %
100	44	20	54.6
220	127	60	52.8
330	190	110	42.1
470	287	180	37.3
680	410	270	34.2

Знявши покази мікроамперметра та застосовуючи графік на рис. 4.8 можна визначити вимірювану індуктивність.

Як бачимо практичні результати досить відрізняються від отриманих в симуляції, але цим можна скористатись — з таблиці 4.2 відмічаємо, що на останньому значенні індуктивності, струм через мікроамперметр знаходиться лише на половині від максимального — це, можливо, дасть змогу вимірювати й більші значення індуктивності, збільшуючи діапазон, який раніше задавався можливостями мікроамперметра M2001. Але важливо пам'ятати, що принцип роботи приладу ґрунтується на перетворенні часу зростання струму через зразок в постійний струм амперметра, де на транзистор Q_1 подаються імпульси напруги фіксованої частоти з виходу 555 таймера і якщо ця частота буде зовеликою, то струм просто не буде встигати свого максимального значення й на амперметрі ми отримаємо вже невірні значення струму.

ВИСНОВКИ

Результатом виконання роботи став робочий прототип приладу для вимірювання індуктивності електронних компонентів на основі мікросхеми NE555 та амперметра M2001. У середовищі KiCAD була розроблена і виготовлена друкована плата.

Був проведений розрахунок та моделювання необхідних параметрів та залежностей даного приладу у симуляторі LTSpice, зокрема, отримана залежність струму амперметра від значення індуктивності, наближена залежність струму через індуктивність та залежність часу зміни струму через неї від значення самої індуктивності.

Розбіжності між розрахованими параметрами і залежностями та отриманими експериментально, на мою думку, можуть бути спричинені, наприклад, допусками використаних елементів, зокрема транзисторів, опору у колекторі транзистора Q_1 , відсутністю в схемі блоку стабілізації за напругою та струмом.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. The NE555 based inductivity meter [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://apexys-toan.blogspot.com/2011/02/ne555-based-inductivty-meter.html>.
2. xx555 Precision Timers [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne555.pdf>.
3. Analog Devices LTspice [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>.
4. NPN Epitaxial Silicon Transistor BC546/547/548/549/550 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/BC546.pdf>.
5. Амперметр M2001 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.quartz1.com/price/PIC/720Q0326302.pdf>.
6. Graph [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.padowan.dk/>.
7. KiCad EDA A Cross Platform and Open Source Electronics Design Automation Suite [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://kicad-pcb.org/>.