

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

КУРСОВА РОБОТА

з дисципліни Аналогова електроніка
на тему: Підвищуючий DC-DC перетворювач (5-12 В)

Студента 2 курсу групи ДК-61

Напряму підготовки: Телекомунікації та
радіотехніка

Пономаренка Б. А.
(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 - 2018

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1 – Вибір та дослідження принципової схеми приладу.....	4
1.1. Схеми пристрою.....	4
1.2. Принцип роботи схеми.....	4
РОЗДІЛ 2 – Розрахунок принципової схеми приладу.....	8
2.1. Розрахунок періоду пилоподібних імпульсів струму через котушку.....	8
2.2. Виведення формули зміни струму через котушку при збільшенні струму споживання.....	10
2.3. Проведення дослідження залежності напруги на виході від струму споживання.....	13
РОЗДІЛ 3 – Моделювання роботи приладу.....	16
3.1. Результат симуляції пристрою.....	16
3.2. Перевірка теоретичних розрахунків періоду пилоподібних імпульсів струму через котушку.....	18
3.3. Перевірка формули зміни струму через котушку при збільшенні струму споживання.....	20
3.4. Перевірка залежності напруги на виході від струму споживання.....	22
РОЗДІЛ 4 – Розробка та дослідження конструкції приладу.....	25
4.1. Процес створення приладу на макетній платі.....	25
4.2. Експериментальна перевірка характеристик пристрою, розрахованих в другому та третьому розділах.....	25
ВИСНОВКИ.....	33
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	34

ВСТУП

Підвищуючі DC-DC перетворювачі напруги використовують для отримання високої напруги з більш низької.

Оскільки в сучасних портативних пристроях використовують швидкодіючі мікропроцесори, які мають велике енергоспоживання та малу напругу живлення ядра, а також цілий ряд інших пристроїв, напруга живлення яких становить 3,3..5 В, то виникає необхідність побудови як підвищуючих, так і понижуючих перетворювачів напруги. Наприклад, такі перетворювачі потрібні для того, щоб живити потужні світлодіоди, які працюють у пристроях із низькою напругою живлення, і т.д.

Традиційно перетворювачі будують за такими топологіями: step-up (підвищуючий), step-down (понижуючий), inverting (підвищення або пониження напруги на виході). В даній курсовій роботі, як видно із назви, було реалізовано саме підвищуючий DC-DC перетворювач.

За мету курсової роботи я поставив створити простий у створенні, дешевий (менше 2\$ на покупку деталей), та ефективний у роботі пристрій, який має такі характеристики:

- 1) Постійна напруга живлення складає 5 В.
- 2) Вихідна напруга складає 12В.

Для створення даного перетворювача необхідно розв'язати такі задачі:

- 1) Розробка принципової схеми приладу, а також пояснення принципу її роботи.
- 2) Розрахунок принципової схеми приладу, а саме:
 - розрахунок періоду пилоподібних імпульсів струму через котушку;
 - виведення формули зміни струму через котушку при збільшенні струму споживання;
 - проведення дослідження залежності напруги на виході від струму споживання.
- 3) Моделювання роботи приладу в симуляторі LTSpice XVII;
- 4) Створення робочого прототипу приладу та експериментальна перевірка характеристик пристрою, розрахованих у 2 розділі та отриманих в результаті симуляції у 3 розділі.

РОЗДІЛ 1

Вибір та дослідження принципової схеми приладу.

1.1. Схема пристрою.

Схема приладу (Рис.1.1.1.) була взята з джерела [1]. Як можна бачити, у схемі використано небагато елементів, а саме резистори (R1-R5), р-n-p (Q2) та n-p-n (Q1,Q3) транзистори, конденсатори (полярні (C1,C3) та неполярні (C2)), діод (1N4148), стабілітрон (BZX84C12).

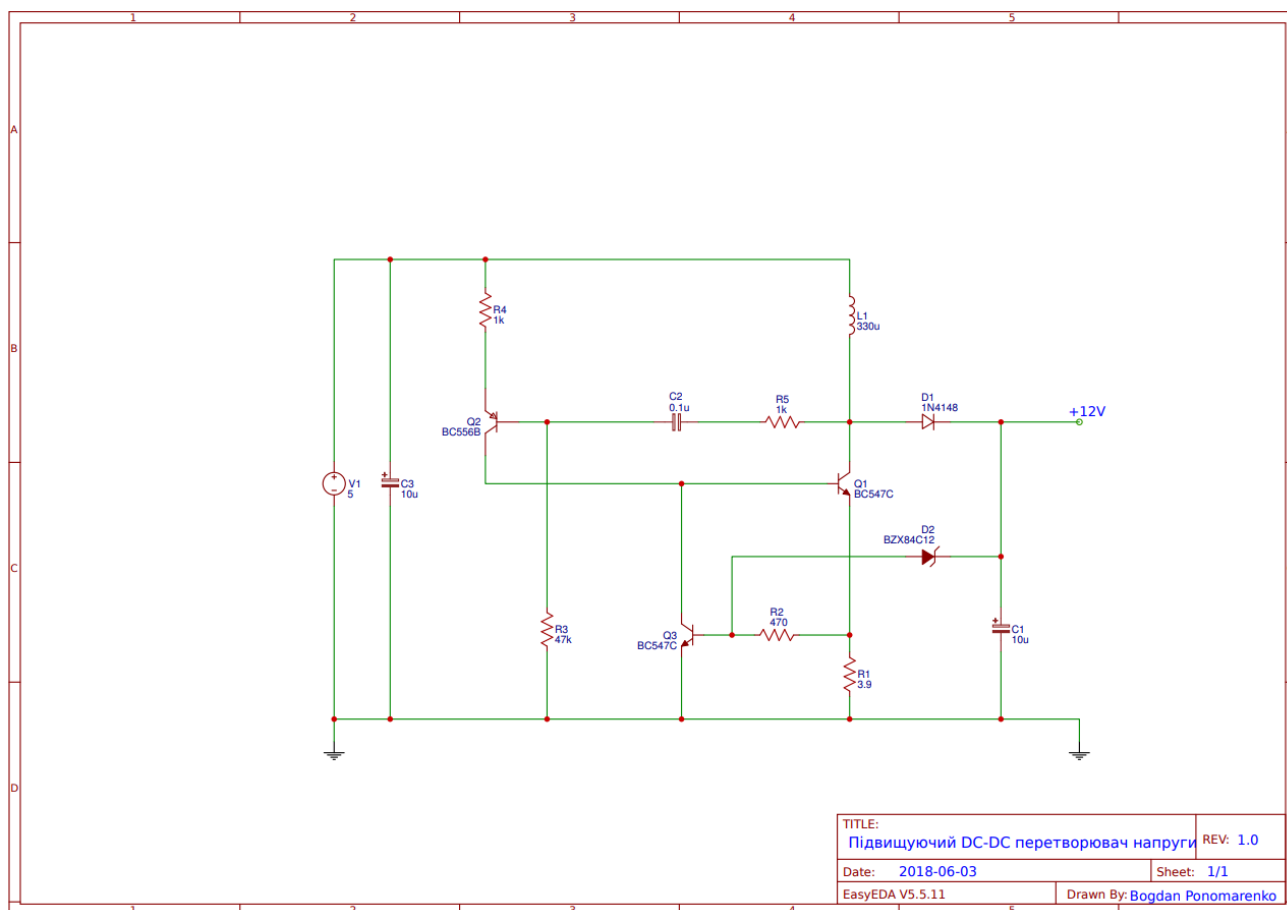


Рис.1.1.1. Принципова схема підвищуючого DC-DC перетворювача напруги.

1.2. Принцип роботи схеми.

Тепер перейдемо до принципу роботи самої схеми. Всі імпульсні перетворювачі напруги базуються на явищі ЕДС самоіндукції. Вищеописана схема не є виключенням. Отже, для початку можна описати принцип роботи імпульсного перетворювача напруги, зображеного на Рис.1.2.1.

Принцип роботи імпульсного перетворювача напруги:

1) Спочатку формується струм I_L через котушку L , для того, щоб у ній накопичилася енергія магнітного поля. Для цього ми замикаємо ключ S , і через котушку починає протікати велике значення струму, вона починає накопичувати якусь енергію.

2) Далі коло дуже швидко розривається за допомогою ключа S для створення великої ЕДС самоіндукції (при чому чим швидше розмикаємо коло, тим більшою буде ЕДС). Енергія, яка запаслася в магнітному полі, хоче «вийти назовні», струм прагне підтримуватися на тому самому рівні, який був у момент розмикання ключа. В результаті, напруга на виході з котушки різко зростає (щоб «пробити» шлях для струму),

3) Тоді накопичений струм повинен кудись піти. Якщо потенціал на аноді діода D буде більшим за потенціал на катоді, то діод D відкриється, і ЕДС зарядить конденсатор.

4) Конденсатор C , використовуючи здатність накопичувати заряд, зберігає його і виводить його на резистор навантаження R .

5) Ключ S тим часом знову замикається, і котушка знову починає накопичувати енергію. В той самий час навантаження живиться від конденсатора $C1$, а діод D не дає струму піти назад до колектора транзистора $Q1$ (щоб той не вийшов з ладу).

6) Ключ S знову розмикають, і енергія з котушки L знову проходить через діод D в конденсатор $C1$, цим самим підвищуючи напругу, яка просіла за час, коли ключ був замкнутий.

7) Цикл замикається, і всі дії повторюються знову.

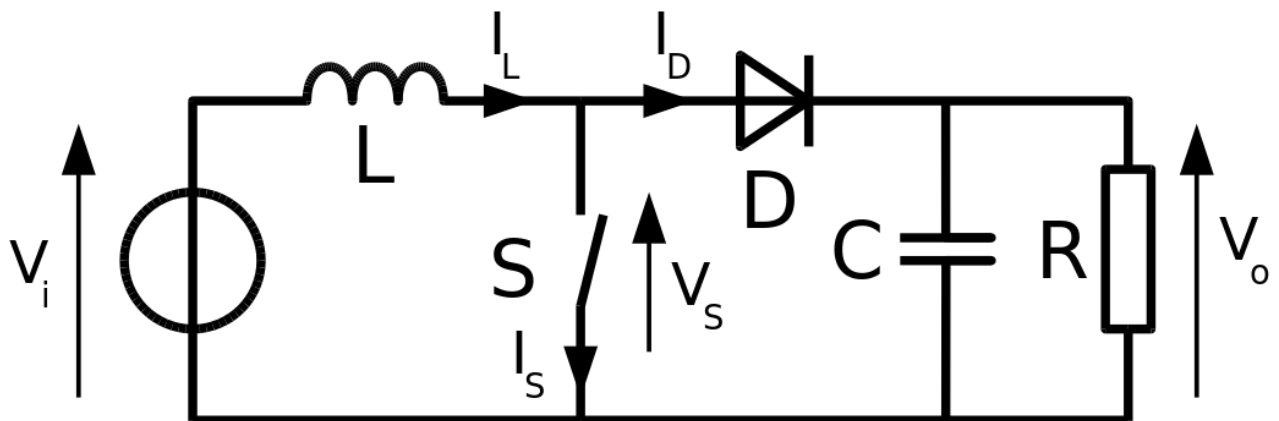


Рис.1.2.1. Схема імпульсного перетворювача напруги.

Тепер перейдемо до принципу роботи моєї схеми. Як можна помітити, вищезгадані схеми є досить схожими, але в них є суттєві відмінності. Моя схема є більш вдосконаленою, вона є виконаною на 3 транзисторах, і в якості ключа використовують 2 n-p-n транзистори $Q1$ та $Q2$.

Принцип роботи схеми зводиться до того, що струм через котушку періодично переривається транзистором $Q1$, а енергія самоіндукції напрямляється через діод в конденсатор C_3 , і через нього йде в навантаження..

Отже, розглянемо принцип роботи моєї схеми більш детально:

1) Коли напруга живлення подається на транзистор Q_2 , це призводить схему до дії. На резистор R_4 подається напруга живлення, яка створить струм, що протікатиме в транзисторі Q_2 від емітера до колектора. Через базу транзистора протікатиме дуже малий. Для того щоб позбутися зайвої напруги з бази транзистора Q_2 , було додано резистор R_3 з досить великим опором (47 кОм), і під'єднано його до землі.

2) Отже, на виході транзистора Q_2 маємо струм колектора, який іде напряму до бази транзистора Q_1 , який є нашим ключем. Транзистор Q_1 відкривається. В цей час діод D_1 є закритим. Тоді згідно І закону Кірхгофа струм через котушку I_L дорівнює струму через колектор I_C (струм через резистор R_5 не враховуємо, адже він є дуже малим). Отже, $I_L = I_{Q1C}$.

3) Струм через котушку починає зростати. На ній починає накопичуватись якась енергія. В цей час напруга на резисторі R_1 становитиме приблизно 0.7 В. Цієї напруги достатньо для відкривання транзистора Q_3 .

4) В той же час резистор R_2 виконує роль обмежувача струму бази I_{Q3B} , для того щоб транзистор Q_3 не вийшов з ладу. Маємо подільник напруги, що складається з резисторів R_1 та R_2 . Оскільки $R_2 \gg R_1$, то практично вся напруга (99,2 %), що входить в цей подільник, виділятиметься на резисторі R_1 , тоді як на резисторі R_2 виділятиметься лише 0,8 % від цієї напруги. Таким чином в базу буде втікати досить малий струм, який не спричинить неполадки з даним транзистором.

5) Відкривання транзистора Q_3 зумовлює утворення струму колектора I_{Q3C} , який в свою чергу змусить закритись транзистор Q_1 . З цього видно, що транзистор Q_1 і є ключем, що керується струмом колектора транзистора Q_3 .

6) Після закривання транзистора струм, накопичений на котушці L_1 змушений кудись піти. Однак він не може піти через транзистор, так як він має великий опір між колектором та емітером, коли закритий, тому єдиний шлях для струму лежить через діод D_1 . Якщо тільки напруга на аноді цього діода буде більшою за напругу на катоді на 0,6 – 0.7 В (напруга відкривання для діода 1N4148), то відповідно діод відкриється, і ЕДС самоіндукції зарядить конденсатор.

7) Вихідну напругу знімаємо з резистора навантаження, підключеного паралельно до конденсатора C_1 .

8) Напругу на виході стабілізує стабілітрон D_2 , який під'єднано паралельно до конденсатора C_1 . Якщо цього не зробити, то конденсатор C_1 зарядиться до максимальної напруги, що може привести до виведення з ладу навантаження (якийсь пристрій), яке приєднаємо до цього конденсатора.

9) Далі транзистор відкривається знову, і всі етапи повторяються заново. При цьому енергія з котушки L_1 знову проходить через діод D_1 в конденсатор C_1 ,

цим самим підвищуючи напругу, яка просіла за час, коли транзистор був замкнений.

RC-ланцюжок, який складається з елементів C_2 та R_5 , присутній для того, щоб на котушці утворювався досить великий струм під час фази on-state. Якщо даний ланцюжок буде відсутній, то струм через котушку становитиме декілька сотень мікроампер, і це не дозволить отримати на виході шукану підсилену напругу.

РОЗДІЛ 2

Розрахунок принципової схеми приладу

В даному розділі я теоретично розв'яжу поставлені викладачем задачі, які стосуються характеристик елементів схеми курсової роботи.

2.1. Розрахунок періоду пилоподібних імпульсів струму через котушку

В даному розділі я розрахую період пилоподібних імпульсів струму через котушку. Як уже відомо з попереднього розділу, базовий принцип роботи імпульсного перетворювача напруги складається з двох фаз:

- on-state, коли ключ (транзистор Q1 для нашої схеми) замкнутий, що призводить до зростання струму в катушці, і відповідно накопиченню енергії в ній;

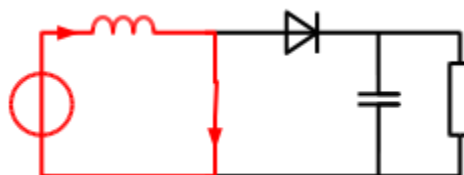


Рис.2.1.1. Загальна схема включення елементів схеми у режимі on-state.

- off-state, коли ключ (транзистор Q1 для нашої схеми) розімкнений, що призводить до того, що єдиний шлях для протікання струму в колі лежить через діод, конденсатор та резистор навантаження. В результаті енергія, яка накопичилася у фазі on-state, передається в навантаження через діод, конденсатор.

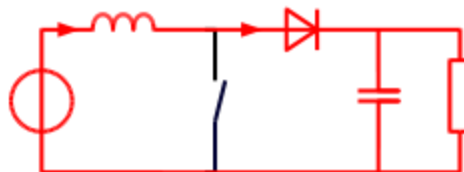


Рис.2.1.2. Загальна схема включення елементів схеми у режимі off-state.

В якості прикладу розрахунків періоду пилоподібних імпульсів струму через котушку для підвищуючого імпульсного перетворювача напруги була використана стаття від компанії Texas Instruments [3].

Отже, розпочнемо з того, що запишемо основне рівняння, яке описує залежність між струмом та напругою на катушці.

Маємо:

$$U_L = -L \frac{dI_L}{dt},$$

де U_L – напруга на катушці, I_L – струм на катушці.

Впродовж першої фази (on-state) діод D1 закритий, транзистор Q1 відкритий, до котушки прикладена напруга живлення. Також присутній резистор R1, до якого прикладена напруга, яка розраховується за законом Ома. Запишемо рівняння струмів для транзистора Q1 за I законом Кірхгофа. Маємо:

$$I_{Q1e} = I_{Q1b} + I_{Q1c}.$$

Оскільки $I_{Q1c} \gg I_{Q1b}$, то ми можемо знехтувати струмом бази. Тоді $I_{Q1c} = I_{Q1e}$.

В попередньому розділі ми отримали, що $\Delta I_L = I_{Q1c}$.

Отже, можемо сміливо записати, що $\Delta I_L = I_{Q1c} = I_{Q1e}$.

Тепер за законом Ома розпишемо напругу на резисторі R1. Маємо:

$$U_{R1} = I_{R1} * R_1 = I_{Q1e} * R_1 = \Delta I_L * R_1.$$

Далі запишемо рівняння напруг за II законом Кірхгофа для контуру, що містить джерело живлення V_1 , котушку L_1 , резистор R_1 . Маємо:

$$U_{in} = U_L + U_{R1} = U_L = L \frac{dI_L}{dt} + \Delta I_L * R_1.$$

Оскільки всі прирости є досить малими, на розглянутих відрізках напруги є постійними, то замість диференціалів можна спокійно підставити дельти (Δ). Маємо:

$$U_{in} = U_L + U_{R1} = U_L = L \frac{\Delta I_L}{\Delta t_{on}} + \Delta I_L * R_1.$$

Тепер Δt_{on} можна замінити на τ_{on} , де τ_{on} – період, впродовж якого ключ (транзистор) – замкнений.

Аналогічні дії зробимо для фази off-state. Маємо, що впродовж друго фази транзистор Q1 закритий, діод буде відкритий, до катушки прикладена різниця напруг навантаження та живлення. Враховуючи це, запишемо рівняння напруг за II законом напруг для контуру, що містить джерело живлення U_{in} , котушку L_1 , напругу навантаження U_{out} , а також падіння напруги на діоді U_{D1} .

Маємо:

$$U_{out} = U_{in} + U_{L1} + U_{D1}.$$

Виразимо звідси U_{L1} , і отримаємо:

$$U_{L1} = U_{out} - U_{in} - U_{D1} = L \frac{\Delta I_L}{\Delta t_{off}}.$$

Для обох фаз значення зміни струму на котушці ΔI_L буде однаковим. Тепер Δt_{off} можна замінити на τ_{off} , де τ_{off} – період, впродовж якого ключ (транзистор) – незамкнений.

Тепер можемо записати систему рівнянь, яка містить і τ_{on} , і τ_{off} .

Маємо:

$$\begin{cases} U_{in} = L \frac{\Delta I_L}{\tau_{on}} + \Delta I_L * R_1. \\ U_{out} - U_{inp} - U_{D1} = L \frac{\Delta I_L}{\tau_{off}}. \end{cases}$$

Виражаємо з цих рівнянь τ_{on} і τ_{off} . Отримаємо:

$$\begin{cases} \tau_{on} = \frac{L * \Delta I_L}{U_{in} - \Delta I_L * R_1}. \\ \tau_{off} = \frac{L * \Delta I_L}{U_{out} - U_{in} - U_{D1}}. \end{cases}$$

Звідси можна отримати кінцеве рівняння для періоду пилоподібних імпульсів струму τ через котушку. Маємо:

$$\tau = \tau_{off} + \tau_{on} = \frac{L * \Delta I_L}{U_{in} - \Delta I_L * R_1} + \frac{L * \Delta I_L}{U_{out} - U_{in} - U_{D1}}.$$

Тепер, виразивши кінцеве рівняння, можна підставити номінали елементів у формули та отримати значення для періоду пилоподібних імпульсів струму.

Отже, $L_1 = 330 * 10^{-6}$ Гн;

$U_{in} = 5$ В;

$U_{out} = 12,6$ В;

$R_1 = 3,9$ Ом;

$\Delta I_L = 170 * 10^{-3}$ А (значення взято приблизно однакове як для симуляції так і для практичних розрахунків);

$U_{D1} = 0,67$ В – значення, яке ми шукаємо, знаючи, що струм який протікає через діод дорівнює струму котушки, і використовуючи ВАХ для діода 1N4148, взяту з datasheet) [2].

$$\text{Тоді } \tau = \frac{330 * 10^{-6} * 170 * 10^{-3}}{5 - 170 * 10^{-3} * 3,9} + \frac{330 * 10^{-6} * 170 * 10^{-3}}{12,61 - 5 - 0,67} = \frac{56,1 * 10^{-6}}{4,337} + \frac{56,1 * 10^{-6}}{6,94} = 21 * 10^{-6} \text{ с.}$$

Дане значення можна порівняти з практичним та теоретичним у подальших розділах.

2.2. Виведення формули зміни струму через котушку від часу при збільшенні струму споживання

В цьому підрозділі буде виведено формулу зміни струму через котушку при збільшенні струму споживання. Для цього схему треба трохи модифікувати, додавши резистор R_6 в якості навантаження. Зробивши це, можна помітити, що під час симуляції та експерименту напруга на виході досить сильно просідає. І її може бути недостатньо для живлення пристроїв.

В якості прикладу розрахунків була використана стаття [4].

Тепер ми можемо розрахувати необхідну залежність. Одразу треба підмітити, що цю залежність можна знайти лише при роботі схеми у фазі off-state, тобто коли транзистор Q1 буде розімкнутий, адже саме тоді діод буде відкритий, енергія накопичується на конденсаторі та знімається з резистора навантаження.

Тому для даного випадку ми можемо записати рівняння для напруг у контурі, що містить джерело живлення U_{in} , котушку L_1 , діод D_1 , та резистор R_6 в якості навантаження. Використовуючи II закон Кірхгофа, маємо:

$$U_{out} = U_{in} + U_{L1} + U_{D1},$$

де U_{D1} – падіння напруги на діоді D_1 .

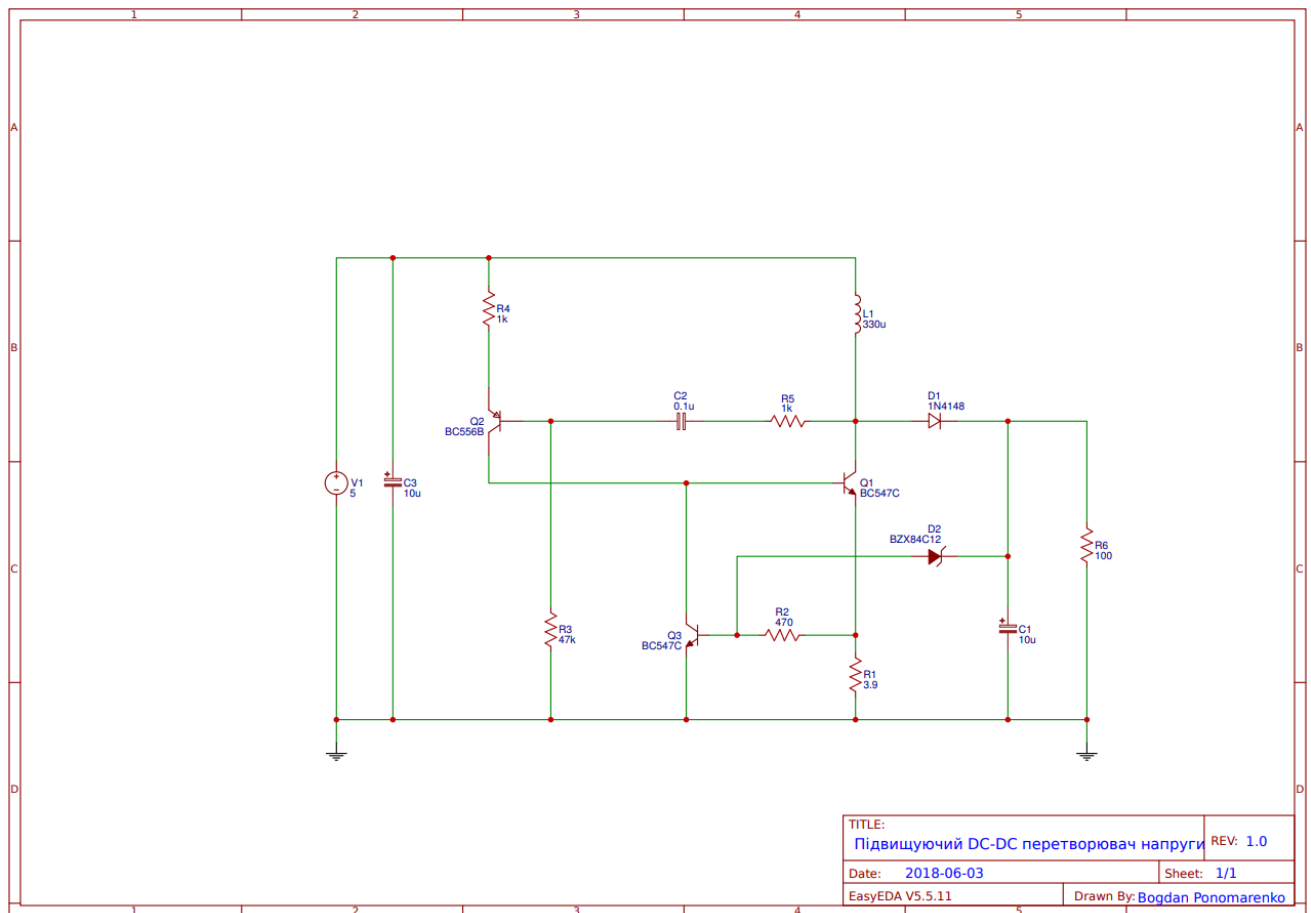


Рис.2.2.1. Принципова схема з резистором навантаження

Напругу U_{D1} знайдемо з ВАХ для діода 1N4148. Оскільки в даному контурі струми котушки, діода та резистора навантаження рівні між собою (оскільки вони з'єднані послідовно), то струм, який протікає через діод, дорівнює струму котушки. Отже, $I_{L1} = I_{R6}$.

За законом Ома розпишемо U_{out} . Маємо:

$$U_{out} = I_{out} * R_6,$$

де $I_{out} = I_{R6}$ – струм споживання.

Замість U_{L1} підставимо раніше отриману формулу :

$$U_{L1} = L \frac{\Delta I_L}{\Delta t_{off}}.$$

Отримаємо такий вираз:

$$I_{out} * R_6 = L \frac{\Delta I_L}{\Delta t_{off}} + U_{in} + U_{D1}.$$

Виразимо звідси ΔI_L через I_{out} . Отримаємо кінцеву формулу для шуканої залежності:

$$\Delta I_L = \frac{(R_6 * I_{out} - U_{in} - U_{D1}) * \tau_{off}}{L}$$

Тепер, знаючи значення U_{in} , U_{D1} (шукаємо, знаючи, що струм який протікає через діод дорівнює струму котушки, і використовуючи ВАХ для діода 1N4148, взяту з datasheet), τ_{off} , L , можемо побудувати таблицю значень, змінюючи струм навантаження I_{out} (для цього змінюємо номінал резистора R_6). Значення для I_{out} були взяті з симуляції в LTSpice. Маємо:

Таблиця 2.2.1. Таблиця значень для ΔI_L , I_{out} , R_6 .

R_6 , Ом	I_{out} , мА	ΔI_L , мА
100	42.20	185.47
150	27.1	186.70
200	21.32	187.40
250	17.11	188.00
300	14.29	188.42
350	12.27	188.75
400	10.74	188.81
450	9.57	189.27
500	8.62	189.43
550	7.85	189.76
600	7.20	189.87
650	6.65	189.98
700	6.18	190.13
750	5.77	190.20
800	5.42	190.57
850	5.10	190.53
900	4.82	190.66
950	4.57	190.81
1000	4.34	190.75

Як можна бачити, струм на котушці не дуже сильно залежить від зміни струму навантаження. Зі зростанням струму навантаження пульсації струму на котушці залишатимуться практично незмінними. Можна сказати, що котушка в кожний момент часу є джерелом струму.

На основі даних значень було побудовано графік залежності $\Delta I_L(I_{out})$.

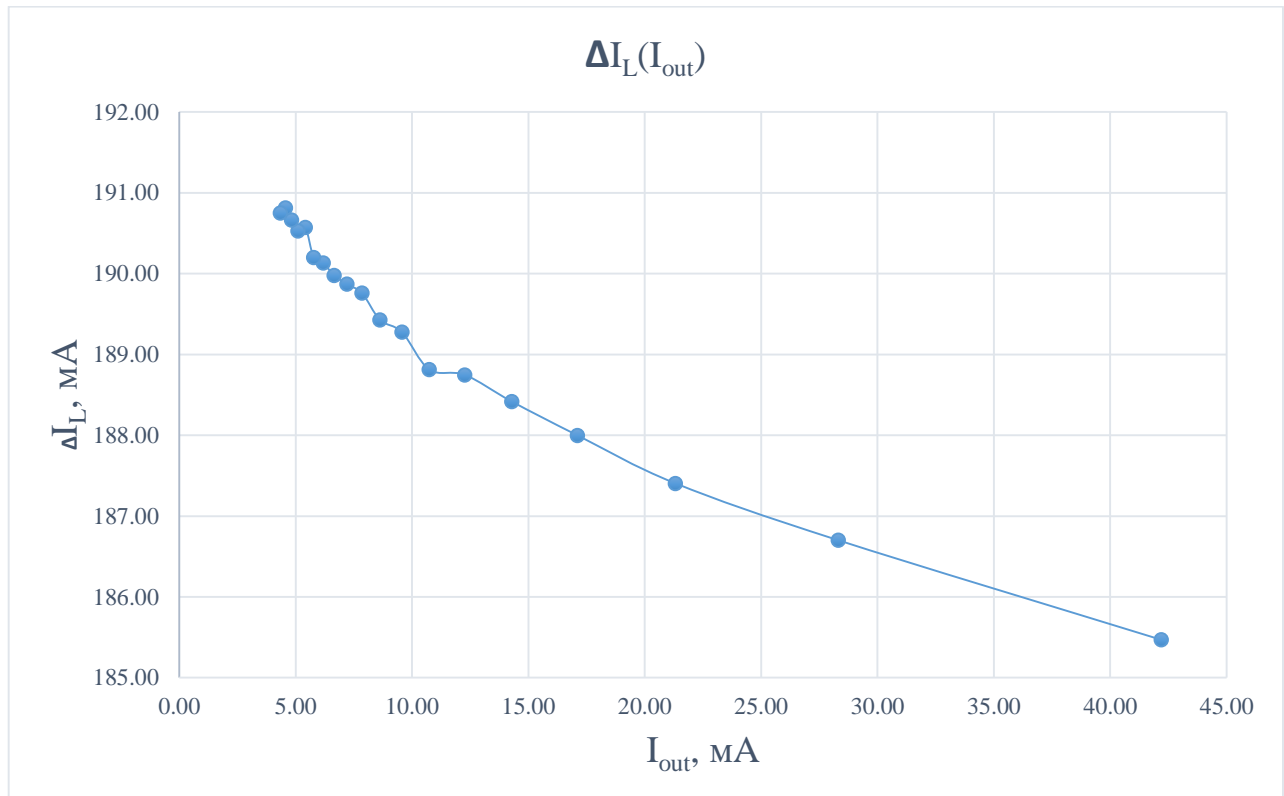


Рис.2.2.2. Графік залежності $\Delta I_L(I_{out})$.

Як бачимо з графіка, залежність є лінійною.

2.3. Проведення дослідження залежності напруги на виході від струму споживання

В цьому підрозділі я проведу дослідження залежності напруги на виході від струму споживання. В якості прикладу розрахунків була використана стаття [4]. Також я скористаюся формулами, виведеними в попередньому підрозділі 2.2.

Отже, запишемо формулу залежності пульсації струму на котушці від струму споживання (навантаження). Маємо:

$$\Delta I_L = \frac{(R_6 * I_{out} - U_{in} - U_{D1}) * \tau_{off}}{L}$$

Тепер виразимо звідси струм навантаження I_{out} . Отримаємо:

$$I_{out} = \frac{\frac{\Delta I_L * L}{\tau_{off}} + U_{in} + U_{D1}}{R_6}$$

Тепер за законом Ома виразимо вихідну напругу, і отримаємо:

$$U_{out} = \frac{\Delta I_L * L}{\tau_{off}} + U_{in} + U_{D1}.$$

Тепер робимо так само, як і у підрозділі 2.2, і отримуємо таблицю значень для U_{out} , I_{out} при різному опорі навантаження. Маємо:

Таблиця 2.3.1. Таблиця значень для U_{out} , I_{out} при різному опорі навантаження.

R_6 , Ом	I_{out} , мА	ΔI_L , мА	U_{out}
100	42.20	185.47	5.947863
150	27.1	186.70	5.987343
200	21.32	187.40	6.009903
250	17.11	188.00	6.028938
300	14.29	188.42	6.042333
350	12.27	188.75	6.052908
400	10.74	188.81	6.055023
450	9.57	189.27	6.069828
500	8.62	189.43	6.074763
550	7.85	189.76	6.085338
600	7.20	189.87	6.088863
650	6.65	189.98	6.092388
700	6.18	190.13	6.097323
750	5.77	190.20	6.099438
800	5.42	190.57	6.111423
850	5.10	190.53	6.110013
900	4.82	190.66	6.114243
950	4.57	190.81	6.119178
1000	4.34	190.75	6.117063

Як бачимо, напруга навантаження очікувано просіла, як уже було згадано в підрозділі 2.2. З таблиці значень 2.3.1. видно, що вона практично не змінює своє значення, при цьому зменшується значення струму при збільшенні номіналу резистора R_6 .

Щодо ще одного завдання, яке стосується знаходження струму, при якому значення вихідної напруги впаде до значення 11,5 В, то його неможливо виконати, адже при підключеному навантаженні вихідна напруга сильно просідає, і стає набагато меншою за 12,6 В, тому не є можливим проведення даного дослідження.

Було побудовано графік залежності $U_{out}(I_{out})$ (рис. 2.2.3):

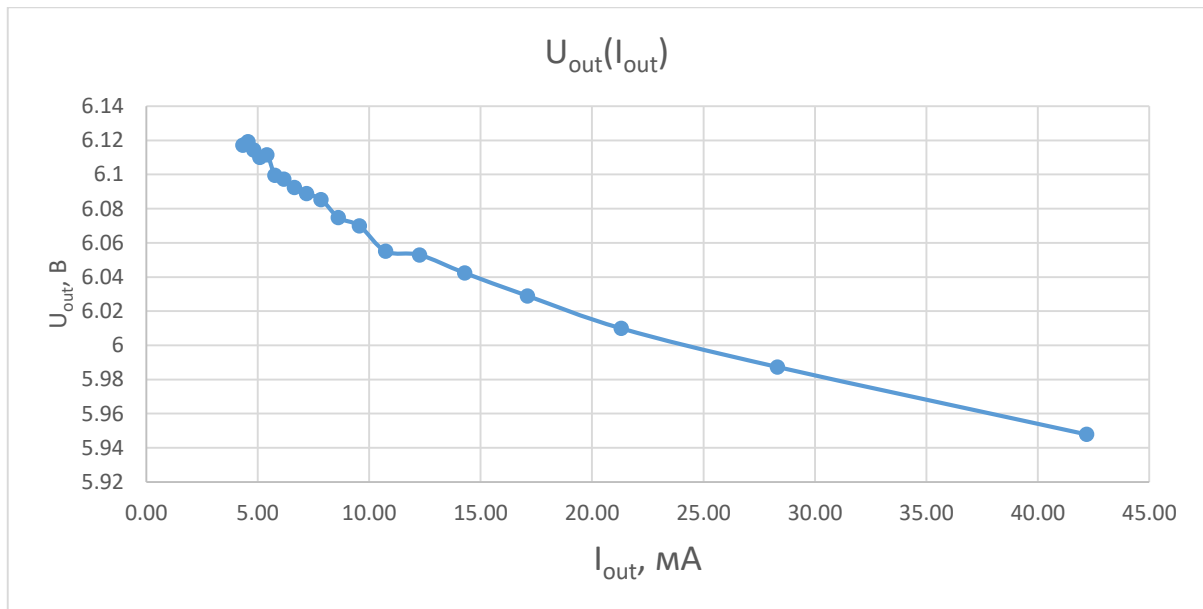


Рис.2.2.3. Графік залежності $U_{out}(I_{out})$ для теоретичних розрахунків при зміні опору навантаження..

Як можна бачити, залежність $U_{out}(I_{out})$ є дуже схожою на залежність $\Delta I_L(I_{out})$. Дана залежність є лінійною, і є характерною для резистора, адже при збільшенні струму, напруга теж повинна зростати, тут відбувається схожим чином.

Для нашої схеми виконуватиметься твердження, що чим меншим буде опір навантаження, тим довше котушка буде підтримувати струм у ній. Це пояснюється законом збереження енергії котушки. Для кожного резистора навантаження котушка установлює таку напругу, при якій через неї потече початковий струм (найбільший), після чого почне вкачувати в неї енергію, яка була запасена під час фази on-state. Оскільки для меншого опору треба прикласти меншу напругу для проходження струму, то потужність, яка виділятиметься на резисторі, буде меншою, ніж для резистора з більшим опором, і через це енергії котушки вистачить на більш довгий час.

РОЗДІЛ 3

Моделювання роботи приладу

Симуляція схеми була проведена, використовуючи програму LTSpice XVII [1].

3.1. Результат симуляції пристрою.

Сама схема виглядає ось так на рис.3.1.1. В процесі симуляції я користувався командами F2 для вставки елементів та F3 для проведення з'єднань між компонентами.

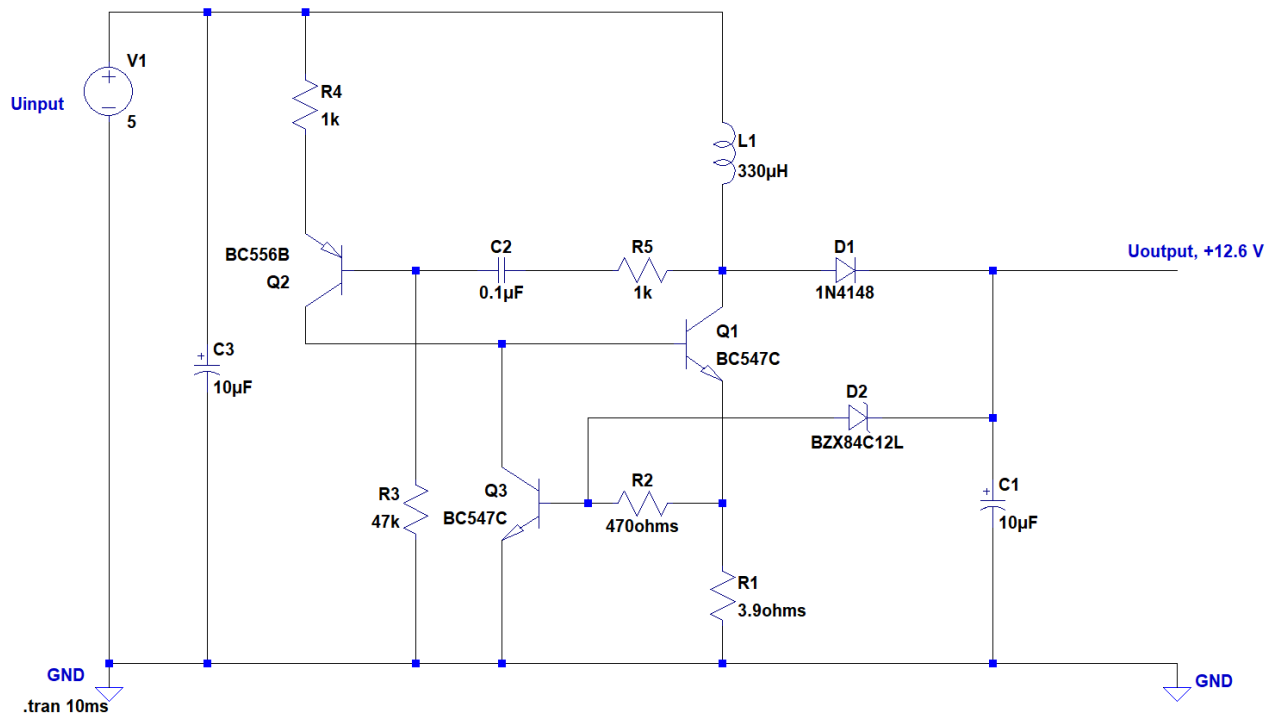


Рис.3.1.1. Схема підвищуючого DC-DC перетворювача напруги.

Вихідну напругу знімали між контактом U_{output} та землею GND.

Симуляцію було проведено в режимі Transient analysis з часом зупинки 10 мс. Всі інші поля вікна налаштувань я залишив без змін. Налаштування режиму симуляції зображено на рис.3.1.2.

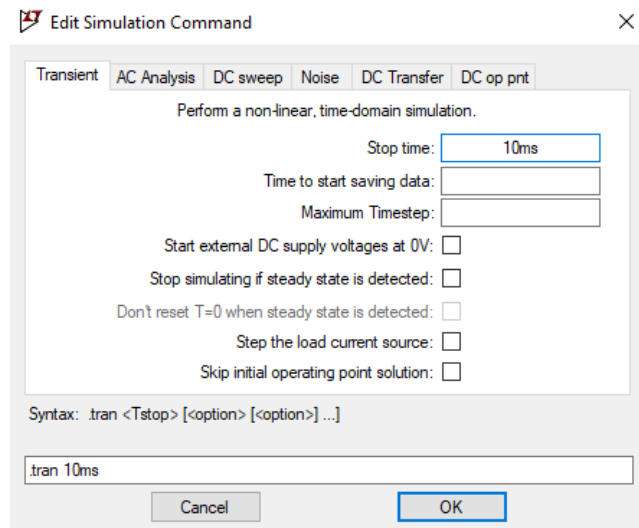


Рис.3.1.2. Налаштування режиму симуляції.

В результаті отримали напругу на виході, зображену на рис.3.1.3.

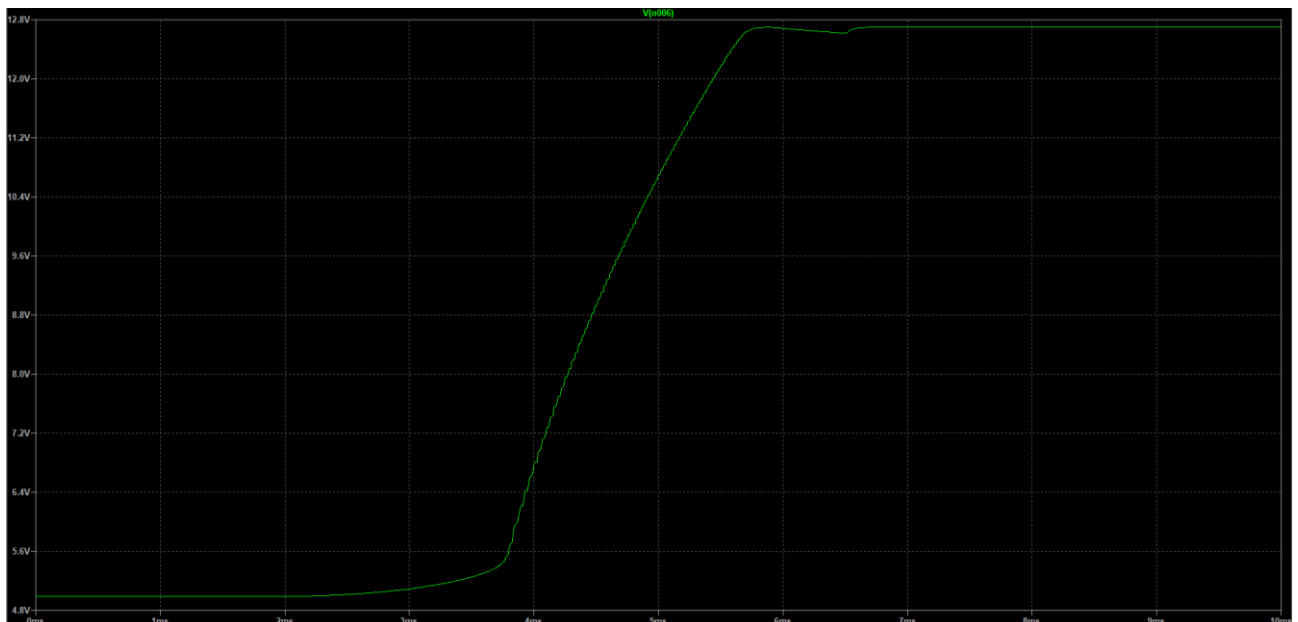


Рис.3.1.3. Вихідна напруга схеми.

Тепер на графіку, зображеному вище, було визначено максимальну напругу, яка є шуканою вихідною напругою U_{output} . Для цього я натиснув на підпис графіка V(n006), який розташовано вгорі, і відкривалося вікно, зображене на рисунку 3.1.4, де і було показано вихідну напругу.

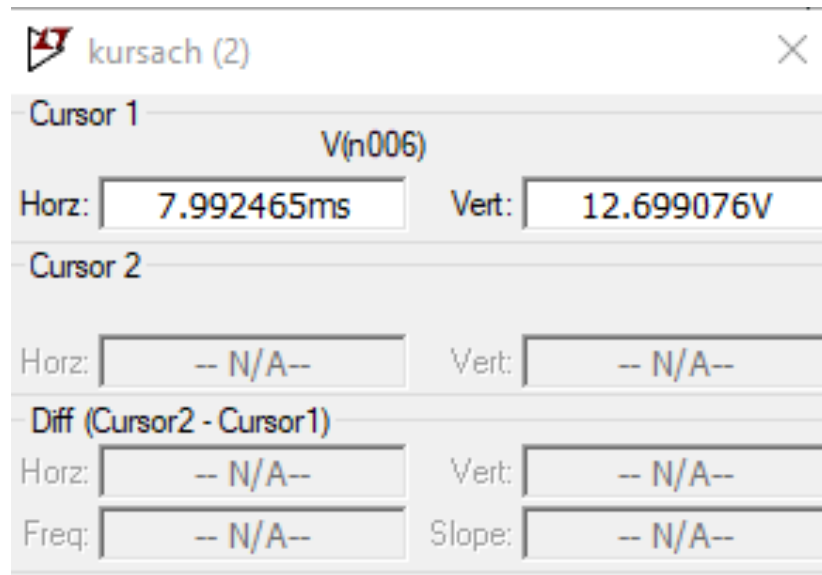


Рис.3.1.4. Вихідна напруга схеми.

Отже, як можна бачити, вихідна напруга становить 12.699 В, що в принципі є хорошим результатом, адже шукана напруга повинна була становити 12 В, тому отримане значення з певною похибкою співпадає з теоретичним. Якщо треба досягнути точного значення у 12 В треба експериментально змінити номінали деяких компонентів у схемі.

3.2. Перевірка теоретичних розрахунків періоду пилоподібних імпульсів струму через котушку.

Для виконання даної задачі спочатку запустимо симуляцію. Після цього натиснемо на котушку індуктивності. В результаті отримаємо такий графік залежності пилоподібних імпульсів струму через котушку від часу, зображений на рисунку 3.2.1.



Рис.3.2.1. Графік пилоподібних імпульсів струму через котушку.

Звідси можна визначити амплітуду імпульсів струму на котушці, ΔI_L . Для цього зробимо аналогічно з тим, як було визначено вихідну напругу. Це показано на рис.3.2.3.

Маємо, що $\Delta I_L = 171,63 \text{ mA}$.

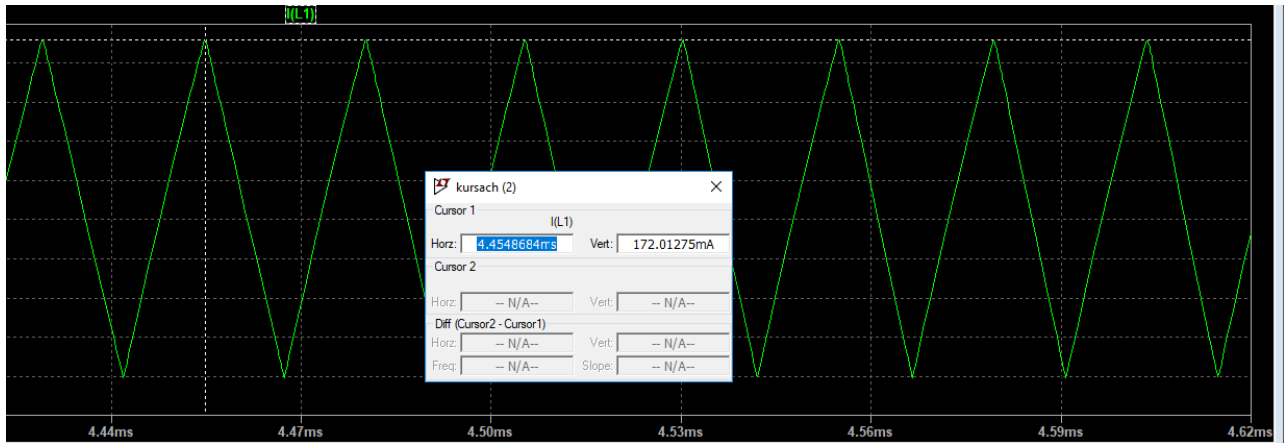


Рис.3.2.3. Амплітуда імпульсів струму на котушці L_1 .

Тепер можна визначити період імпульсів струму τ_s на котушці. Він складається з двох частин: τ_{off} та τ_{on} , де τ_{on} – період, впродовж якого транзистор Q1 буде відкритий, і в котушці накопичується магнітна енергія;

τ_{off} – період, впродовж якого транзистор Q1 закритий, і вся накопичена енергія через діод йде у навантаження.

Отже, використовуючи рис.3.2.4, знайдемо τ_s :

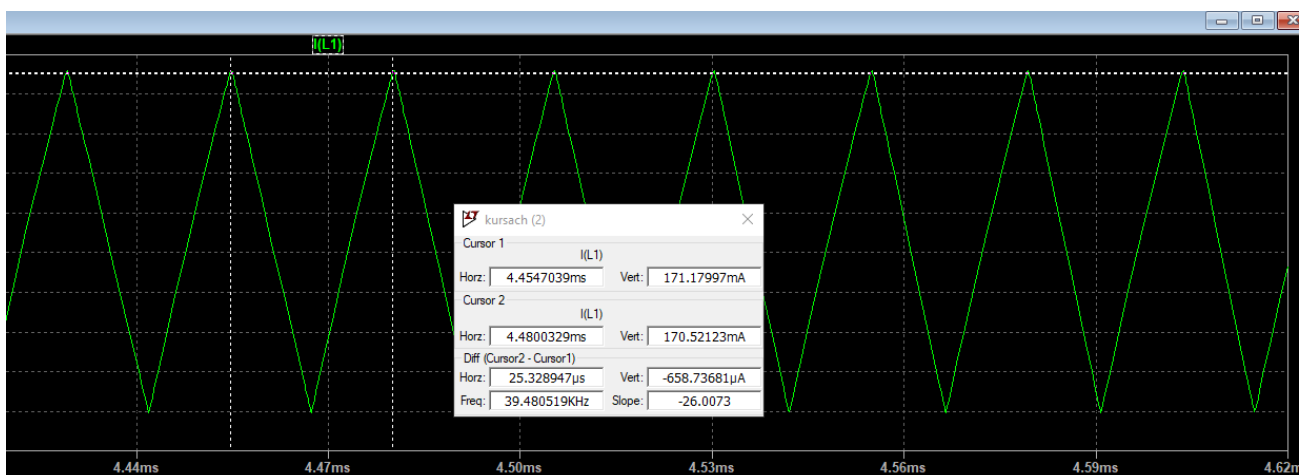


Рис.3.2.4. Тривалість періоду імпульсів струму на котушці.

Отже, маємо, що $\tau_s = 25,32$ мс. Порівняючи з результатом, розрахованим теоретично (де значення $\tau_s = 22,4$ мс) можна сказати, що розрахункова формула є вірною, однак вона має похибку у $\sim 12\%$, що пояснюється тим, що ми не врахували допуски елементів, використаних у схемі, а також опори транзистора, котушки для запису кінцевої формули.

3.3. Перевірка формули зміни струму через котушку при збільшенні струму споживання.

В даному підрозділі я досліджу залежність струму котушки від струму споживання, додавши навантаження до схеми.

Спочатку продемонструю схему з навантаженням, вона зображена на рис.3.3.1.

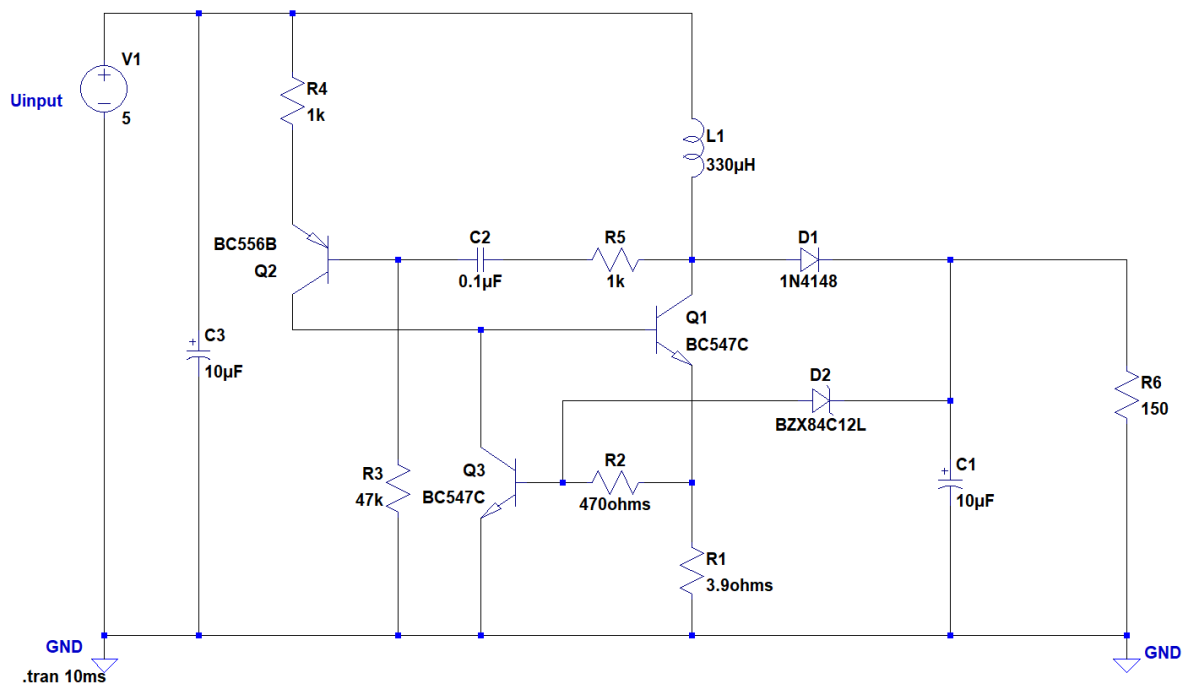


Рис.3.3.1. Схема підвищуючого DC-DC перетворювача напруги з резистором навантаження.

В якості навантаження використаний резистор R6 (значення опору буде змінено).

Тепер, змінюючи значення резистора R6, було знайдено відповідні значення між імпульсом струму в котушці та струмом споживання.

На рис.3.3.2. зображені значення для обох струмів. Зеленим кольором позначено струм через котушку, світло-фіолетовим – струм навантаження.

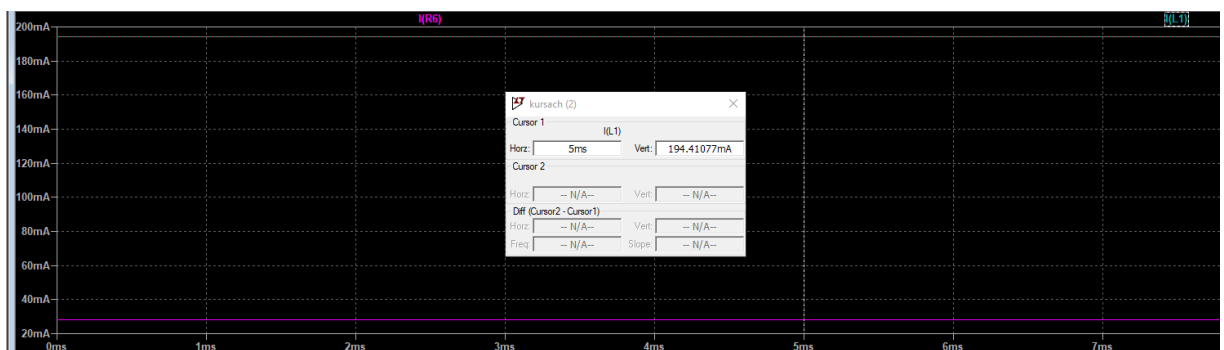


Рис.3.3.2. Значення струмів I_L , I_{out} при $R_6=150$ Ом.

Було побудовано таблиця 3.3.1 для значень для I_L , I_{out} , отриманих із симуляції.

Маємо:

Таблиця 3.3.1. Значення для I_L , I_{out} , отриманих із симуляції.

R_6 , Ом	I_{out} , мА	I_L , мА
100	42.20	208.31
150	27.1	194.41
200	21.32	187.40
250	17.11	183.20
300	14.29	180.38
350	12.27	178.36
400	10.74	176.84
450	9.57	175.66
500	8.62	174.71
550	7.85	173.94
600	7.20	173.30
650	6.65	172.74
700	6.18	172.27
750	5.77	171.86
800	5.42	171.50
850	5.10	171.19
900	4.82	170.91
950	4.57	170.66
1000	4.34	170.43

Побудовано графік залежності I_L (I_{out}), зображений на рис.3.3.3.

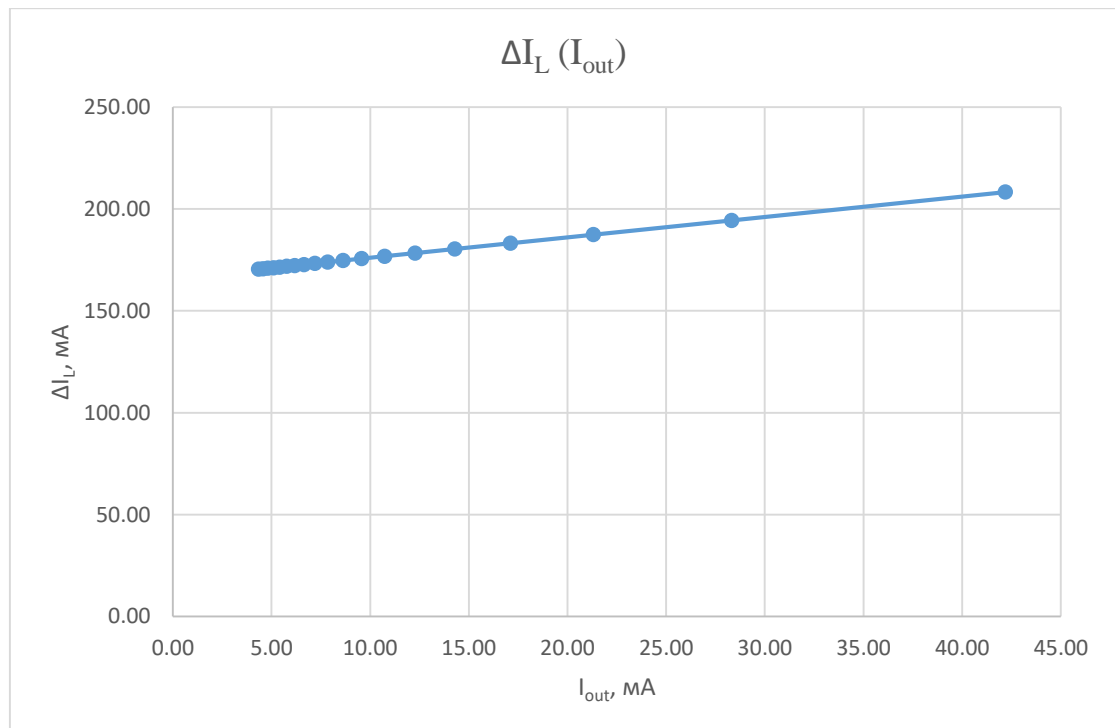


Рис.3.3.3. Графік залежності ΔI_L (I_{out}).

В результаті ми отримали, що струм через котушку практично не змінюється при зміні струму навантаження. Особливо це помітно з резисторами, номінал яких становить ~ 500 Ом і більше. Порівнюючи отримані в симуляції результати з теоретичними розрахунками, можна помітити, що вони сходяться з певною похибкою (не більше 10%), що в принципі є прийнятною нормою, враховуючи допуски елементів, а також враховуючи вплив деяких елементів схеми на кінцеву формулу (ними просто нехтують для спрощення розрахунків).

3.4. Перевірка залежності напруги на виході від струму споживання.

В цьому підрозділі я перевірю останній теоретичний розрахунок, а саме залежність напруги на виході від струму споживання.

Для зняття необхідних показників буду дивитися на струм $I(R_6)$ та напругу навантаження (V_{n006}). В якості прикладу на рис.3.4.1. показані напруга та струм резистора навантаження для резистора з номіналом $R_6 = 150$ Ом.

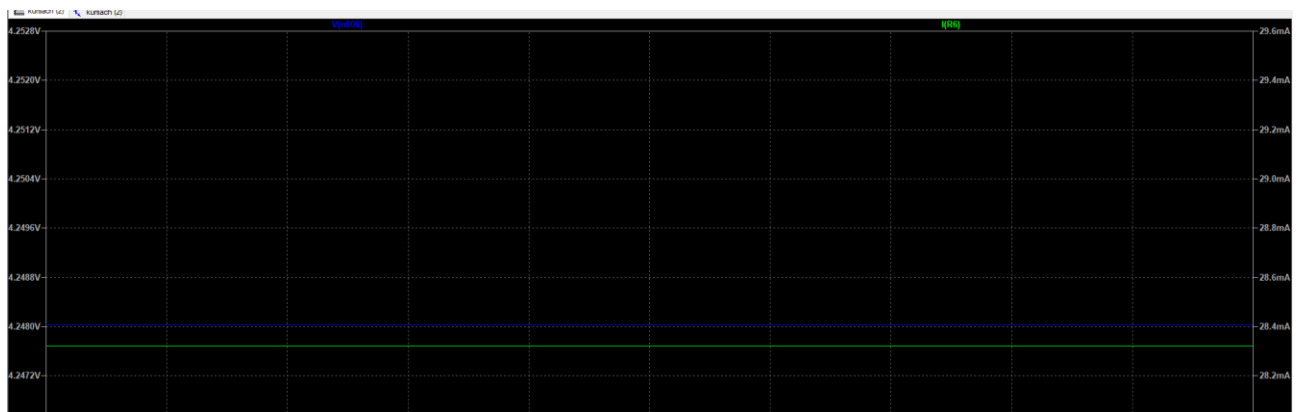


Рис.3.4.1. Значення струму I_{out} та напруги U_{out} при $R_6=150$ Ом.

Отже, в результаті симулювання і зняття показників були отримані результати, та оформлені у таблицю 3.4.1. Маємо:

Таблицю 3.4.1. Таблиця значень U_{out} , I_{out} в залежності від опору R_6 .

R_6 , Ом	I_{out} , мА	U_{out} , В
100	42.20	4.220
150	27.1	4.248
200	21.32	4.264
250	17.11	4.278
300	14.29	4.287
350	12.27	4.295
400	10.74	4.296
450	9.57	4.307
500	8.62	4.310
550	7.85	4.318
600	7.20	4.320
650	6.65	4.323
700	6.18	4.326
750	5.77	4.328
800	5.42	4.336
850	5.10	4.335
900	4.82	4.338
950	4.57	4.342
1000	4.34	4.340

Побудовано графік залежності U_{out} (I_{out}), зображений на рис. 3.4.2.

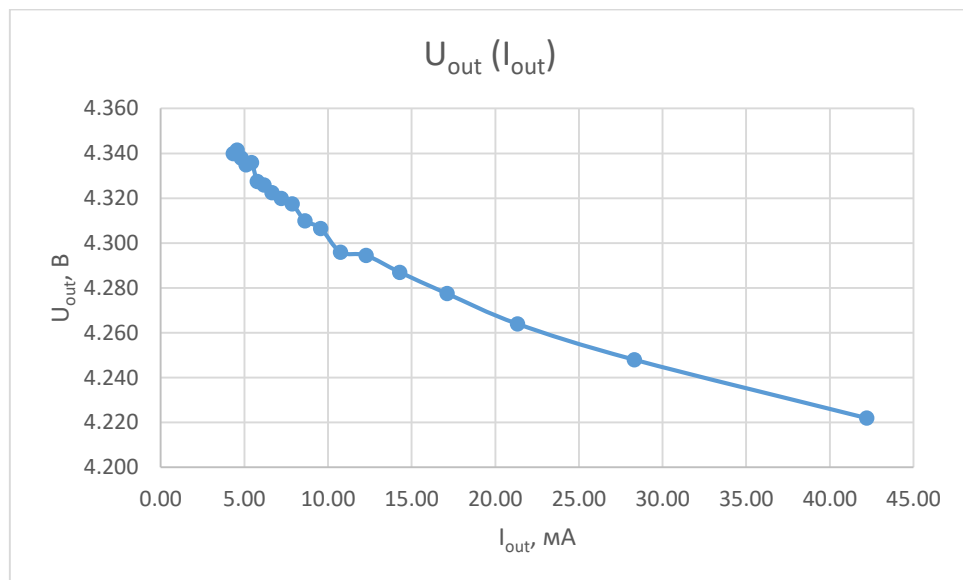


Рис. 3.4.2. Графік залежності U_{out} (I_{out}) для результатів симуляції при різному опорі навантаження.

Аналізуючи отримані значення і графік, бачимо, що вихідна напруга U_{out} практично змінюватися не буде, при цьому струм навантаження буде залежати від зміни опору резистора R_6 .

Порівнюючи отримані значення із теоретичними розрахунками, можна підмітити, що між ними є досить велика похибка, яка складає $\sim 50\%$, однак

сталість вихідної напруги при зміні опору резистора характерна для обох видів розв'язку задачі, тому можна сказати, що теоретичний метод задовільняє відповідь. Похибки можна пояснити допусками елементів, а також неврахуванням деяких характеристик елементів схеми у кінцевій формулі для спрощення розрахунків.

РОЗДІЛ 4

Розробка та дослідження конструкції приладу

4.1. Процес створення приладу на макетній платі

Отже, в даному підрозділі я опишу те, як розроблявся прилад. Для створення схеми була використана макетна плата MB-102 для з'єднання контактів елементів між собою без пайки. Також були закуплені всі необхідні компоненти схеми. В якості джерела живлення +5 В було використано модуль живлення MB-V2 (MB-102), який може живитися від повербанка або ж ноутбука за допомогою кабеля type A – type A. Після того як всі елементи були готові, я зібрав готову схему. Ось як вона виглядає (рис.4.1.1):

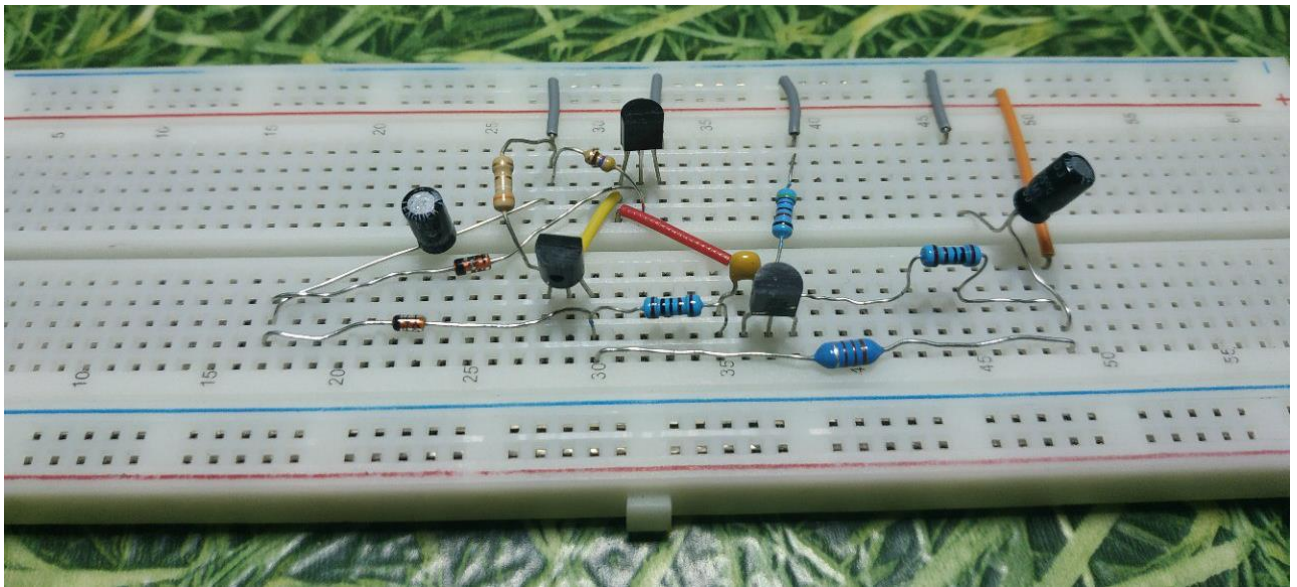


Рис.4.1.1. Схема мого приладу, зібрана на макетній платі.

Після даних дій у мене була отримана робоча схема. Тому я мав змогу розпочати практичні розрахунки, необхідні для перевірки теоретичних значень та значень, отриманих під час симуляції.

4.2. Отже, спочатку я перевіряв вихідну напругу даної схеми. На рисунку 4.2.1. зображений результат цієї перевірки.

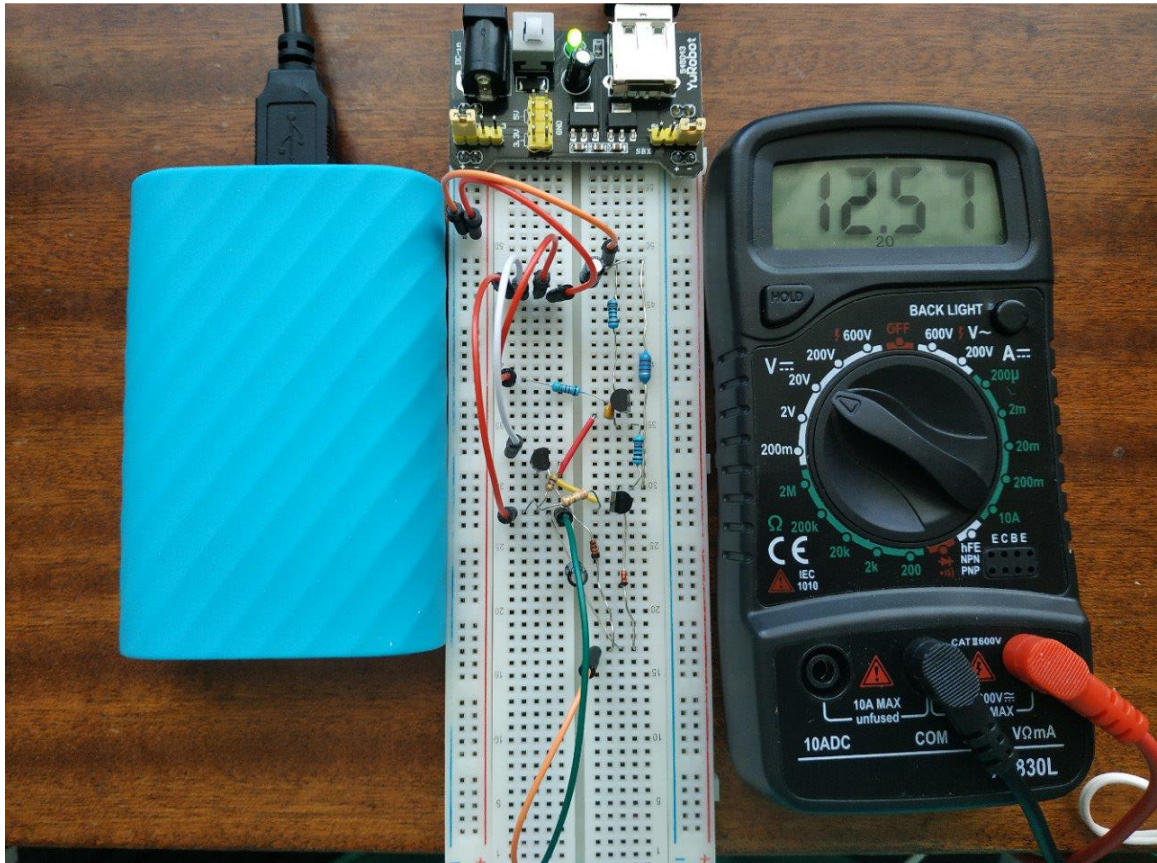


Рис. 4.2.1. Перевірка вихідної напруги схеми.

Як можемо бачити, вихідна напруга в експерименті склала 12.57 В.

Тоді було складено таблицю 4.2.1 для похибок між результатами симуляції, експерименту, теорії. Теоретичне значення бралося як істинне.

Маємо:

Таблиця 4.2.1. Таблиця значень вихідних напруг та похибок між ними.

	$U_{out}, \text{В}$	абсолютна похибка, Δ	відносна похибка, $\delta, \%$
теоретично	12.6	-	-
практично	12.57	0.03	0.238095238
симуляція	12.69	0.09	0.714285714

Бачимо, що розбіжності між значеннями є дуже мізерними, тому можна із впевненістю казати, що складання схеми було виконано успішно.

Після цього необхідно було перевірити правильність розрахунків періоду пилоподібних імпульсів струму через котушку. Для цього мультиметром було заміряно струм на котушці (рис. 4.2.2):

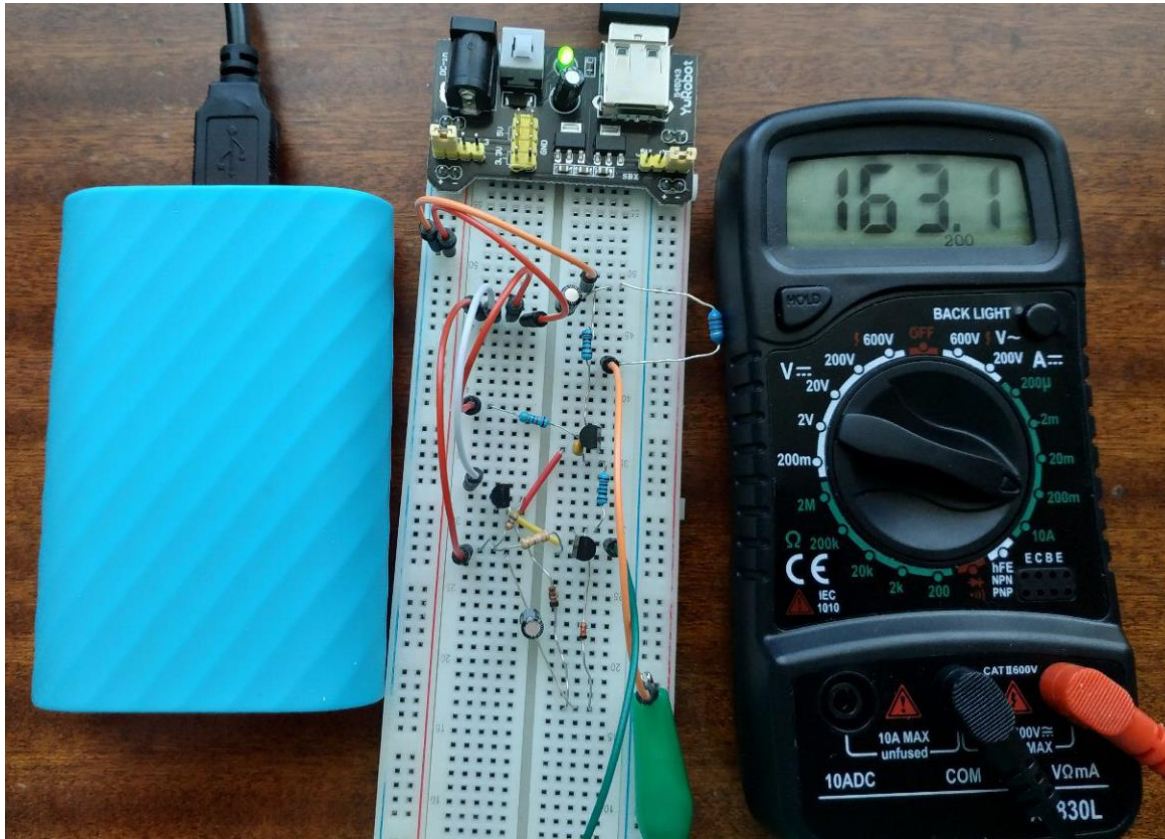


Рис.4.2.2. Амплітудне значення пульсацій струму на котушці.

Отже, амплітуда пульсацій склала 163,1 мА. Знаючи це число, можна розрахувати значення періоду пилоподібних імпульсів струму через котушку.

Отримали значення:

$$\tau = \frac{330 \cdot 10^{-6} \cdot 163,1 \cdot 10^{-3}}{5 - 163,1 \cdot 10^{-3} \cdot 3,9} + \frac{330 \cdot 10^{-6} \cdot 163,1 \cdot 10^{-3}}{12,57 - 5 - 0,67} = \frac{53,823 \cdot 10^{-6}}{4,3639} + \frac{53,823 \cdot 10^{-6}}{6,9} = (12,33 + 7,8) \cdot 10^{-6} = 20,13 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Складемо таблицю 4.2.2, у якій порівняємо результати для періоду пилоподібних імпульсів струму через котушку, отримані різними методами.

Теоретичне значення бралось як істинне.

Таблиця 4.2.2. *Таблиця значень періодів пилоподібних імпульсів струму та похибок між ними.*

	τ, мкс	абсолютна похибка, Δ	відносна похибка, δ, %
теоретично	22	-	-
практично	20.13	1.87	8.5
симуляція	26.45	4.45	20.22

Отже, як бачимо, похибка між теоретичним та практичним значенням склала лише 8,5%, що говорить про вірність виведеної формули, та її досить високу точність. Проте можна помітити, що похибка для симуляції складає 20%, що можна пояснити людським фактором під час знаходження результатів, а також допуск елементів, які вносять свій вплив на дану характеристику.

Тепер перевіримо розрахунки для формули зміни струму через котушку при збільшенні струму споживання. Для цього скористаємося мультиметром, і, змінюючи опір навантаження, по черзі зніматимемо задані характеристики.

Приклад зняття показників (при $R_6 \sim 190 \text{ Ом}$) показаний на рисунку 4.2.3 (знімаємо показники струму навантаження) та на рисунку 4.2.4. (знімаємо показники струму через котушку). Маємо:

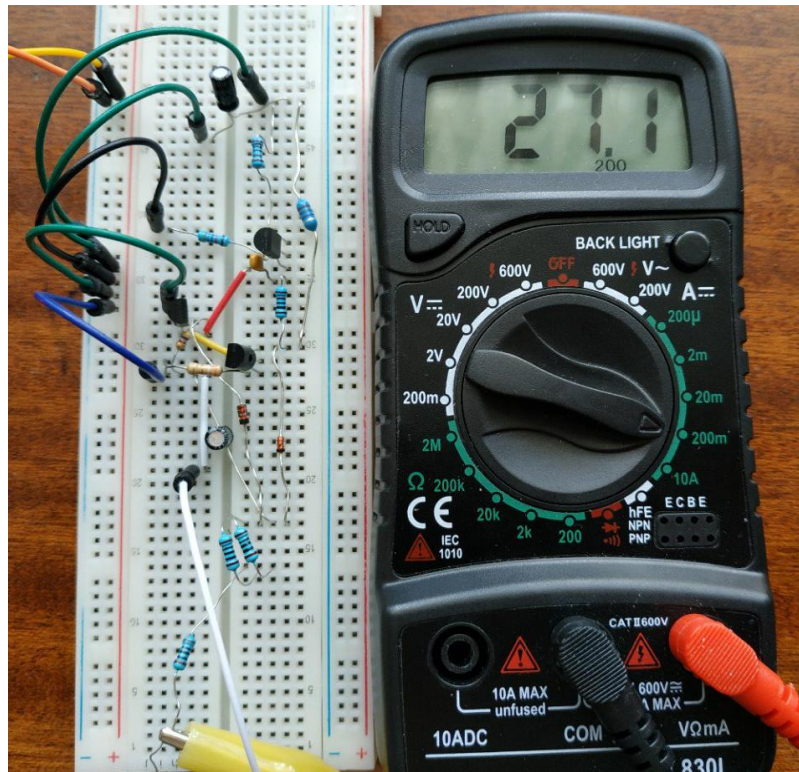


Рис. 4.2.3. Показники струму навантаження при $R_6 = 150 \text{ Ом}$.

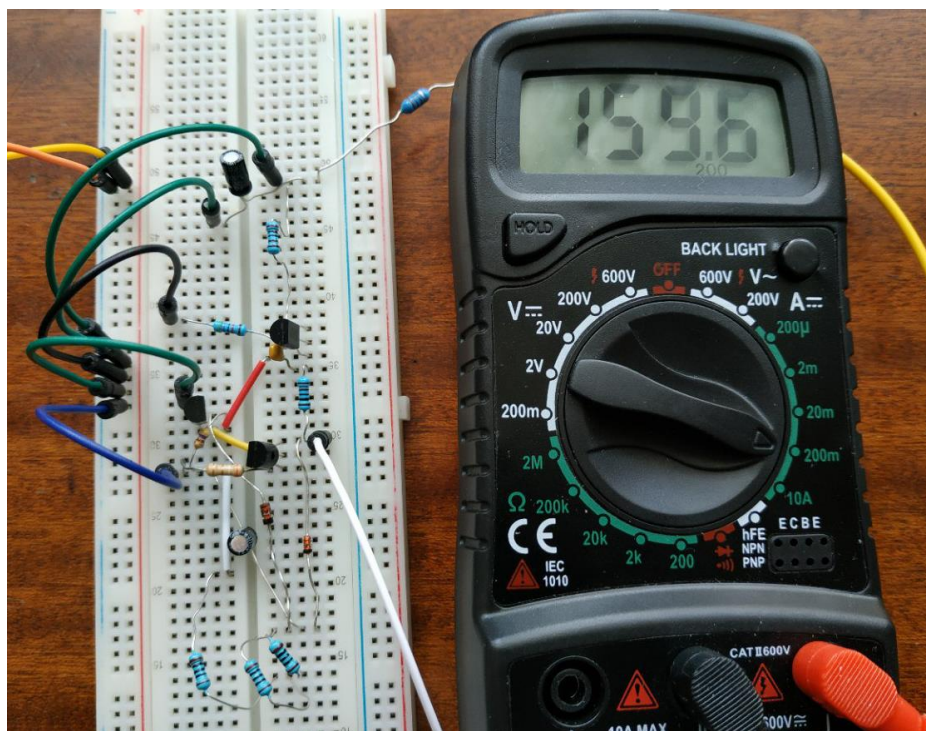


Рис. 4.2.3. Показники струму через котушку при $R_6 = 150 \text{ Ом}$.

Аналогічні дії проробили для різного навантаження. Отримані дані оформили у таблицю 4.2.3.

Таблиця 4.2.3. *Результати експериментального дослідження залежності струму котушки від струму навантаження.*

R_6 , Ом	I_{out} , мА	ΔI_L , мА
100	42.20	154.70
150	27.1	159.60
200	21.32	158.30
250	17.11	155.10
300	14.29	156.60
350	12.27	159.40
400	10.74	160.10
450	9.57	161.70
500	8.62	157.80
550	7.85	155.70
600	7.20	158.60
650	6.65	156.20
700	6.18	166.00
750	5.77	155.80
800	5.42	156.20
850	5.10	155.87
900	4.82	155.40
950	4.57	156.30
1000	4.34	156.43

Отримали, що струм через котушку практично не змінюється при збільшенні струму навантаження. Схожа ситуація вийшла при теоретичних розрахунках цього питання.

Тепер можемо порівняти між собою результати симуляції, теорії та практики. Порівняння оформлено у таблиці 4.2.4.

Таблиця 4.2.4. Таблиця значень залежностей струму котушки від струму навантаження та похибок між ними.

R_6 , Ом	I_{out} , мА	симуляція	теорія	практика
		ΔI_L , мА	ΔI_L , мА	ΔI_L , мА
100	42.20	208.31	185.47	164.70
150	27.1	194.41	186.70	159.60
200	21.32	187.40	187.40	158.30
250	17.11	183.20	188.00	155.10
300	14.29	180.38	188.42	156.60
350	12.27	178.36	188.75	159.40
400	10.74	176.84	188.81	160.10
450	9.57	175.66	189.27	161.70
500	8.62	174.71	189.43	157.80
550	7.85	173.94	189.76	155.70
600	7.20	173.30	189.87	158.60
650	6.65	172.74	189.98	156.20
700	6.18	172.27	190.13	166.00
750	5.77	171.86	190.20	155.80
800	5.42	171.50	190.57	156.20
850	5.10	171.19	190.53	155.87
900	4.82	170.91	190.66	155.40
950	4.57	170.66	190.81	156.30
1000	4.34	170.43	190.75	156.43

Отже, можемо бачити, що для вихідного практичне струму значення струму котушку склало в середньому 156 мА. Характер залежності ΔI_L (I_{out}) для практичних значень буде той самий, що і для теоретичних значень, та результатів симуляції. Тобто при підвищенні струму навантаження струм котушки майже не буде змінюватися. Якщо вважати теоретичне значення за істинне, то можна сказати, що похибки між значеннями не перевищують 15 %. Дана похибка є цілком прийнятною, і це означає, що теоретичні розрахунки були проведені правильно.

Після цього проведемо практичне дослідження залежності напруги на виході від струму споживання.

В попередньому завданні було знайдено струм навантаження I_{out} .

Отже, за законом Ома шукаємо показники напруги на виході за формулою $U_{out} = R_6 * I_{out}$, і складаємо таблицю для значень (табл. 4.2.5).

Таблиця 4.2.5. Таблиця практичних значень для I_{out} , U_{out} .

R_6 , Ом	I_{out} , мА	U_{out} , В
100	36.6	3.66
150	25.6	3.84
200	20.5	4.1
250	17.12	4.28
300	14.4	4.32
350	12.4	4.33
400	10.9	4.36
450	9.47	4.26
500	8.9	4.45
550	8.3	4.57
600	7.79	4.67
650	6.69	4.35
700	6.37	4.459
750	5.91	4.43
800	5.15	4.12
850	5.03	4.27
900	4.79	4.311
950	4.61	4.38
1000	4.41	4.41

Можемо скласти графік залежності вихідної напруги від струму навантаження (рис. 4.2.6). Маємо:

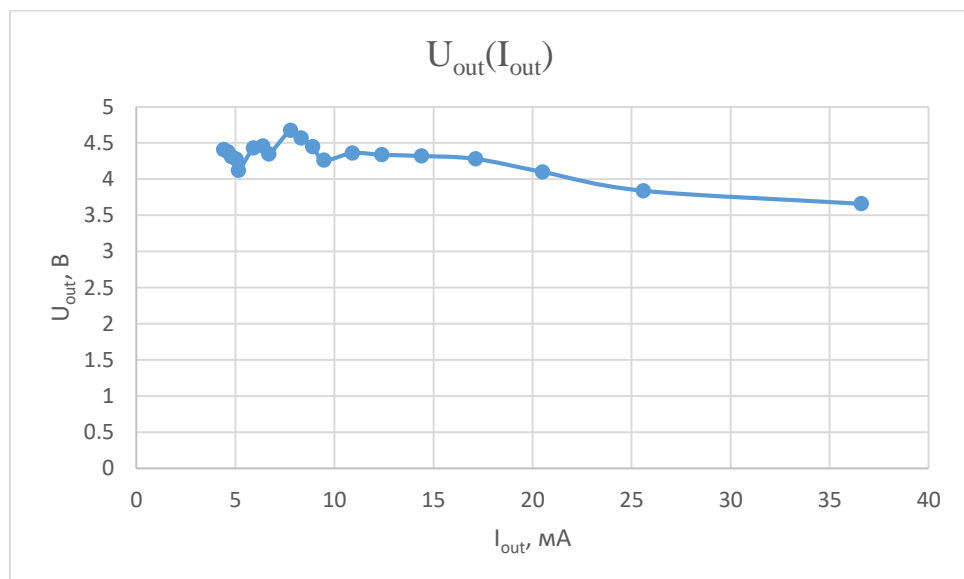


Рис. 4.2.4. Графік залежності напруги навантаження від струму навантаження $U_{out}(I_{out})$ при $R_6=150$ Ом.

Як можна бачити, напруга на виході практично не буде змінюватися, і лежатиме у межах між 4,5 та 5 В.

Перевіримо отримані значення із значеннями, отриманими теоретично та за допомогою симуляції (табл. 4.2.6). Маємо:

Таблиця 4.2.6. Порівняння практичних значень з теоретичними.

R ₆ , Ом	практика		симуляція		теорія	
	I _{out} , мА	U _{out} , В	I _{out} , мА	U _{out} , В	I _{out} , мА	U _{out} , В
100	36.6	3.66	42.2	4.222	42.2	5.947863
150	27.1	3.84	27.1	4.248	27.1	5.987343
200	20.5	4.1	21.32	4.264	21.32	6.009903
250	17.12	4.28	17.11	4.2775	17.11	6.028938
300	14.4	4.32	14.29	4.287	14.29	6.042333
350	12.4	4.3365	12.27	4.2945	12.27	6.052908
400	10.9	4.36	10.74	4.296	10.74	6.055023
450	9.47	4.2615	9.57	4.3065	9.57	6.069828
500	8.9	4.45	8.62	4.31	8.62	6.074763
550	8.3	4.5705	7.85	4.3175	7.85	6.085338
600	7.79	4.674	7.2	4.32	7.2	6.088863
650	6.69	4.3485	6.65	4.3225	6.65	6.092388
700	6.37	4.459	6.18	4.326	6.18	6.097323
750	5.91	4.4325	5.77	4.3275	5.77	6.099438
800	5.15	4.12	5.42	4.336	5.42	6.111423
850	5.03	4.2755	5.1	4.335	5.1	6.110013
900	4.79	4.311	4.82	4.338	4.82	6.114243
950	4.61	4.3795	4.57	4.3415	4.57	6.119178
1000	4.41	4.41	4.34	4.34	4.34	6.117063

Отже, аналізуючи значення таблиці 4.2.6, можемо прийти до висновку, що різниця між практичними значеннями та значеннями із симуляції є досить малою, і не перевищує 16,6 %, що є хорошим результатом, і підтверджує коректність виконаних дій. Однак похибка між практичними та теоретичними значеннями є досить значною (30-40%), і може пояснюватись впливом неврахованих елементів на кінцеву формулу, допусками елементів, паразитними параметрами елементів.

ВИСНОВКИ

Отже, після виконання всіх етапів можна підсумувати виконану роботу.

В першому розділі я навів принципову схему приладу, а також розписав її принцип роботи.

В другому розділі я провів теоретичні розрахунки завдань, заданих викладачем, а саме:

- Розрахунок періоду пилоподібних імпульсів струму через котушку;
- Виведення формули зміни струму через котушку при збільшенні струму споживання;
- Проведення дослідження залежності напруги на виході від струму споживання.

В третьому розділі я навів схему приладу в симуляторі LTSpice XVII. Результати симуляції з допустимою похибкою співпали з теоретичними розрахунками в першому розділі.

В четвертому розділі я описав збирання робочого прототипу на макетній платі та навів фото, які підтверджують правильну роботу схеми. Також були практично розраховані характеристики схеми, необхідні для порівняння з теоретичними значеннями, та результатами симуляції.

Для періоду пилоподібних імпульсів похибки між теоретичними та практичними значеннями склали 8,5 %, що говорить про досить непогану точність формули. Щодо симуляції, то похибка з теоретичними значеннями склали 20%, що можна пояснити неточністю моделі та людським фактором під час вимірювання періоду.

Для зміни струму через котушку при збільшенні струму споживання похибки між результатами симуляції, практичними розрахунками та теоретичними розрахунками склали не більше, ніж 15 % від істинного (теоретичного) значення, тому з впевненістю можемо казати про точність пророблених дій.

Для залежності напруги на виході від струму споживання похибки між практичними результатами та результатами із симуляції склали не більше, ніж 16,6 %, що говорить про те, що схема була зібрана вірно, і розрахунки були проведені коректно. Щодо теоретичних розрахунків, то тут похибка склали 30-40 %, що можна пояснити неточністю формули, та впливом знехтуваних при розрахунках компонентів кола на кінцеву формулу.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. LTspice XVIII / Linear Technology/Analog Devices / [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.linear.com/designtools/software/#LTspice> (дата звернення 02.06.2018).
2. Даташит на діод 1N4148 / [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/15021/PHILIPS/1N4148.html> (дата звернення 03.06.2018).
3. Стаття від Texas Instruments про розрахунок імпульсних перетворювачів напруги / [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.ti.com/lit/an/slva061/slva061.pdf> (дата звернення 04.06.2018).
4. Розрахунок залежності струму на котушці від струму навантаження, та від напруги навантаження / [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://embedderslife.wordpress.com/2014/01/06/smtps_boost_expl/ (дата звернення 04.06.2018).