

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

**КУРСОВА РОБОТА**

з дисципліни Аналогова електроніка  
на тему: Лінійний стабілізований лабораторний блок живлення

Студента 2 курсу групи ДК-61

Напряму підготовки: Телекомунікації та  
радіотехніка

Шваюка М.В.

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 рік

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| Вступ.....   | 3  |
| Розділ 1 – Розробка принципової схеми приладу.....                                 | 4  |
| 1.1 Вибір принципу роботи блоку живлення.....                                      | 4  |
| 1.2 Проектування двонапівперіодного випрямляча напруги.....                        | 4  |
| 1.3 Проектування стабілізатора напруги на стабілітроні.....                        | 5  |
| 1.4 Проектування підсилення струму.....  | 6  |
| 1.5 Проектування схеми обмеження максимального<br>струму навантаження.....         | 7  |
| Розділ 2 – Математичне обґрунтування деяких вузлів схеми.....                      | 10 |
| 2.1 Опис завдання.....   | 10 |
| 2.2 Розрахунок стабілізатора напруги на стабілітроні.....                          | 11 |
| 2.3 Розрахунок транзисторного каскаду.....   | 12 |
| Розділ 3 - Моделювання роботи приладу.....   | 14 |
| 3.1 Опис програми - симулятора.....  | 14 |
| 3.2 Опис схеми симуляції.....  | 14 |
| 3.3 Опис режиму симуляції.....   | 15 |
| 3.4 Перевірка роботи приладу без застосування<br>схеми обмеження струму.....       | 15 |
| 3.5 Перевірка залежності напруги виходу від різних<br>положень потенціометра.....  | 18 |
| 3.6 Перевірка роботи приладу із застосування схеми<br>обмеження струму.....        | 20 |
| 3.7 Порівняння значень, розрахованих у Розділі 2 із<br>отриманими у симуляції..... | 22 |
| Розділ 4 - Створення та дослідження робочого прототипу пристрою.....               | 24 |
| 4.1 Створення макету.....  | 24 |
| 4.2 Створення друкованої плати.....  | 24 |
| 4.3 Перевірка значень із Розділу 2 на реальному приладі.....                       | 28 |
| Висновки.....  | 30 |
| Перелік використаних джерел.....   | 32 |

## ВСТУП

Під час вивчення електроніки постійно виникає необхідність подавати на вхід схем якусь фіксовану постійну напругу, яка буде виступати їх напругою живлення. Тому блок живлення – це один із тих пристроїв, які використовуються найчастіше, тому будь-який радіоаматор, або студент, що тільки вивчає електроніку мусить мати його у своєму «арсеналі».

Існують 2 принципові конструкції блоків живлення: імпульсна та лінійна. Для свого блоку живлення я вибрав лінійну, бо вона простіше в реалізації.

До свого блоку живлення я пред'явив ряд вимог, які він має задовольняти для нормальної роботи:

1. Дешевизна та доступність компонентів.
2. Відносна простота схеми, щоб я самостійно міг його спроектувати.
3. Діапазон напруг на виході  $[0 - 16]\text{В}$ , чого буде достатньо для більшості схем, які він буде живити.
4. Напруга на виході має бути стабілізованою, майже не залежати від стрибків напруги у мережі та не сильно просідати під навантаженням.
5. У приладі має бути обмеження максимального струму навантаження щоб у випадку короткого замикання блок живлення не вийшов з ладу сам. Також для цієї ж цілі у ньому будуть встановлені 2 плавких запобіжники.
6. Максимальний номінальний струм навантаження має бути 1 А (це впливає із того, що у наявного в мене трансформатора максимальний струм вторинної обмотки = 1 А).

В ході цієї роботи було розроблено принципову схему приладу, математично пораховані номінали всіх її елементів, просимульовано схему у SPICE-симуляторі, створено робочий прототип на макетній платі, спроектовано та створено друковану плату приладу та корпус для нього.

## РОЗДІЛ 1

### Розробка принципової схеми приладу

#### 1.1. Вибір принципу роботи блоку живлення

Як я вже писав, існує 2 принципові конструкції блоків живлення: імпульсна та лінійна. В основі лінійних блоків живлення стоїть понижаючий трансформатор, який перетворює високу напругу у мережі на необхідну для конкретного блоку живлення. Перевага такого підходу у простоті схем, що дозволяє новачкам самостійно створити такий блок живлення у себе вдома, а не купувати готовий у магазині. Його ж недоліком є те, що зі збільшенням потужності, дуже сильно зростають габаритні розміри та вага приладу, через необхідність використання великогабаритних, розрахованих на великий струм трансформаторів, а також доволі низький ККД. Імпульсні ж схеми є набагато сучаснішими та досконалішими: вони менше гріються, вони набагато менші за розмірами, у них дуже високий ККД, але всі ці переваги перекреслюються одним недоліком: вони доволі складні в реалізації – тому не підходять для новачків. Саме тому для себе я вибрав лінійний блок живлення.

#### 1.2. Проектування двонапівперіодного випрямляча напруги

Будь-який лінійний блок живлення починається з того, що зі змінної напруги вторинної обмотки трансформатора необхідно отримати постійну напругу. Для цього я використав діодний міст. Але отримана зараз напруга має мало спільного із постійною, бо вона має дуже сильні пульсації. Щоб їх прибрати, я поставив згладжуючий електrolітичний конденсатор великої ємності. Щоб прибрати високочастотні завади, які неминуче будуть у мережі живлення, та і просто можуть наводитися від оточуючих нас приладів я поставив керамічний конденсатор малої ємності(взагалі, ця схема і з

високочастотними завадами буде працювати дуже добре, бо вона є простою, але все-таки краще їх відфільтрувати). Все, тепер у нас є джерело постійної напруги, величина якої коливається в залежності від амплітуди напруги у мережі живлення. Далі її треба стабілізувати та регулювати згідно наших потреб.

Також задля забезпечення більшої відмовостійкості приладу було додано 2 плавких запобіжника. І як потім виявилось – не даремно: на етапі тесту прототипу я випадково допустив коротке замикання, і запобіжник на 0.5А врятував всю схему.

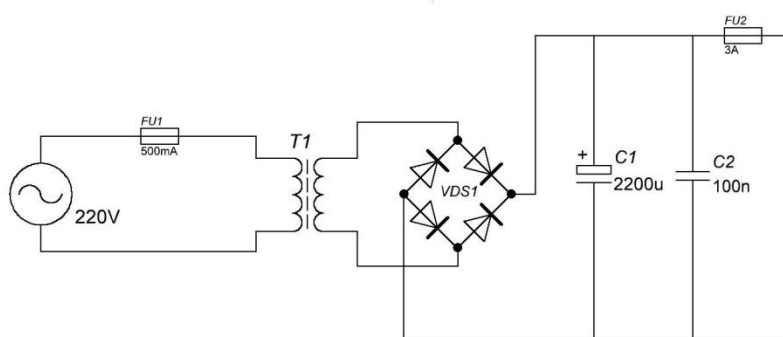


Рис. 1.1: Схема випрямляча напруги

### 1.3. Проектування стабілізатора напруги на стабілітроні

Під час вивчення курсу аналогової електроніки я ознайомився зі стабілітроном – напівпровідниковим приладом з нелінійною ВАХ, особливості якої дозволяють використовувати його для стабілізації вихідної напруги. Я відштовхувався від схеми, що має назву «Стабілізатор напруги на стабілітроні та транзисторі».

Так як мені необхідно отримати максимальну напругу на виході 16В – мені потрібен стабілітрон з такою напругою стабілізації. Але, нажаль, такого в мене не виявилось. Але знайшлися 2 стабілітрони на 8В кожен, які я успішно поєднав у послідовному з'єднанні, що дало мені сумарну напругу стабілізації як раз необхідні 16В. Потім для того щоб можна було змінювати вихідну напругу блоку живлення, я

додав подільник напруги між стабілітроном та транзистором, який у прототипі буде представлений потенціометром. Це дало мені можливість отримати на виході стабілізовану напругу, яку можна регулювати поворотом ручки потенціометра.

Вже потім, коли я зібрав прототип, у мене з'явилася чудова думка як збільшити точність регулювання напруги на виході: послідовно із потенціометром на 10 кОм, увімкнути змінний резистор на 1 кОм. Це в подальшому дало мені можливість дуже плавного регулювання напруги.

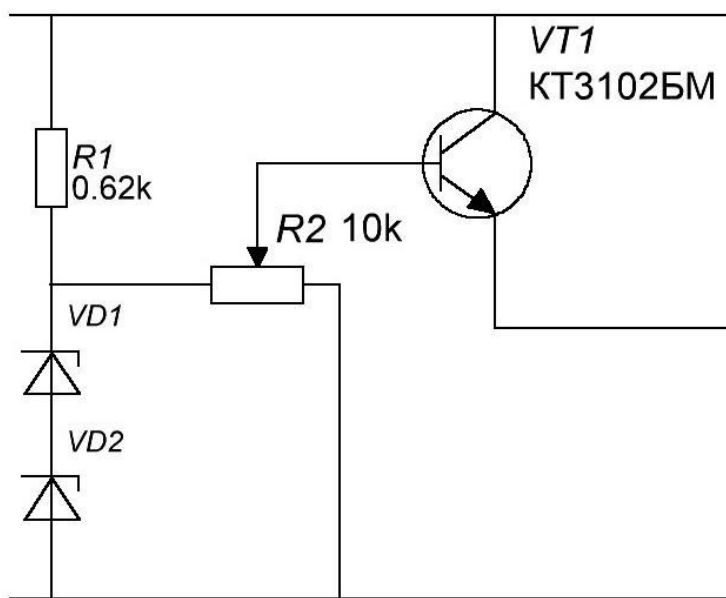


Рис. 1.2: Стабілізатор напруги на стабілітроні та транзисторі

#### 1.4. Проектування підсилення струму

Як я писав у вступі, мені необхідно забезпечити нормальну роботу блоку живлення при максимальному струмі навантаження 1А. Враховуючи це, стає зрозуміло, що проста схема зі стабілітрона та одного транзистора не зможе забезпечити стабільну роботу приладу(бо стабілітрони розраховані на дуже маленький струм, у даташиті на Д814Б – мої стабілітрони, вказана напруга стабілізації при струмі 5мА і щоб адекватно розрахувати схему я буду відштовхуватися саме від такого струму

стабілізації). Отже, той транзистор, який буде стояти одразу після стабілітрона має бути малопотужним та підсилювати струм стабілізації до лише десятків мА. І вже за допомогою цього підсиленого струму ми будемо керувати відкриванням потужного силового транзистора. Так як цей силовий транзистор при великому струмі навантаження буде сильно грітися, його необхідно встановити на радіатор.

### 1.5. Проектування схеми обмеження максимального струму навантаження

Однією з найважливіших функцій, які має містити нормальний лабораторний блок живлення є обмеження максимального струму навантаження. Наявність такого захисту може врятувати як сам блок живлення у випадку коли користувач створить коротке замикання, так і той прилад, який ми від нього живимо. Перш за все я обрав максимальний струм, який має видавати блок живлення. Я подумав: максимальний струм для нормальної роботи становить 1А. Візьмемо із запасом, щоб можна було на короткий час підключати навантаження із більшим струмом споживання, нехай він буде дорівнювати 2А.

Принцип роботи моєї схеми доволі простий: я використав 2 кремнієві діоди щоб отримати напругу на базі транзистора рівною 1,4В. Ця напруга рівномірно розподілиться на переході база-емітер транзистора (там завжди буде напруга приблизно 0,7В) та на резисторі також буде приблизно 0,7В. Саме номінал цього резистора задає максимальний допустимий струм навантаження, який можна обчислити із формули

—

Де: 0.7 – незмінна напруга на резисторі,  $R$  – опір резистора

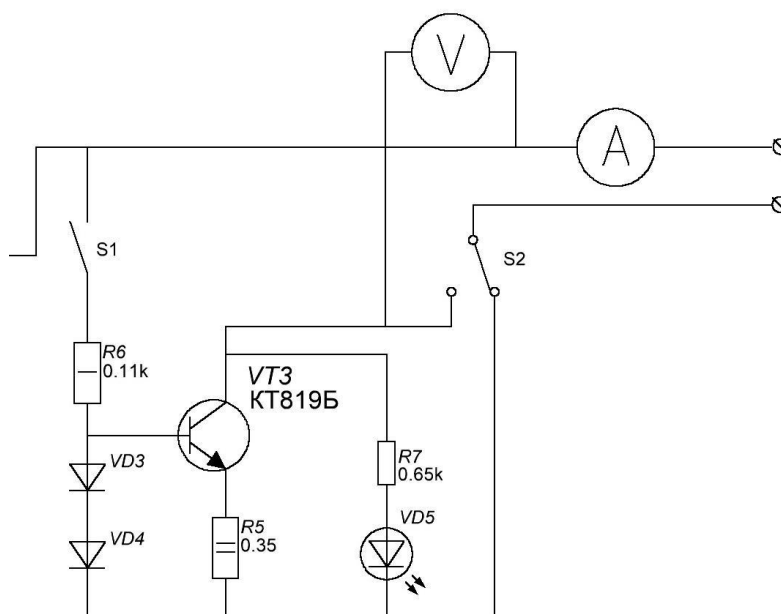


Рис. 1.3: Схема обмеження максимального струму навантаження

Але так як ми знаємо максимальний струм, легко вирахувати опір резистора, що становить 0.35 Ом. Транзистор у схемі має бути достатньо потужним щоб пропускати струм до 2А, тому його також треба встановити на радіатор.

Взагалі, в мене був план що я зможу задавати максимальний струм навантаження, для цього я послідовно із резистором встановив би ще один резистор, але змінного опору [0-7] Ом. Це дало б мені можливість регулювати максимальний струм навантаження від 90 мА до 2А. Але, нажаль, виявилось, що у природі не існує змінних резисторів з таким малим опором, тому такий підхід застосувати стало не можливо і все що робить моя схема – обмежує максимальний струм на рівні 2А.

Також у цієї схеми є ще два недоліки, викликані її простотою:

- вона зменшує максимальну напругу навантаження
- транзистор, VT3, який ввімкнений послідовно із навантаженням буде сильно нагріватися



а це не є дуже добре, тому я вирішив дати користувачу можливість обирати: йому потрібне обмеження максимального струму, або ні і він може вимкнути цю функцію за допомогою двухпозиційного перемикача.

А ще я додав світлодіодну індикацію того, що запрацювало обмеження максимального струму, щоб користувач одразу зрозумів, що коїться щось недобре.

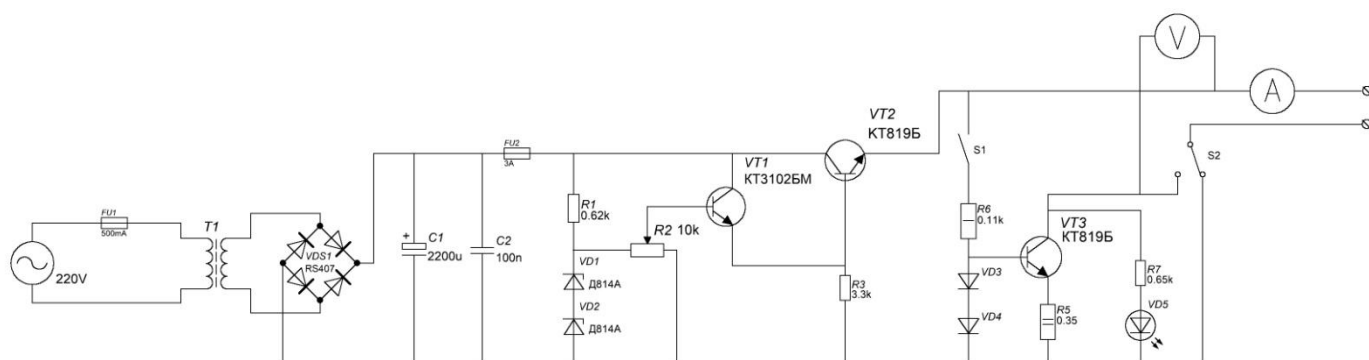


Рис. 1.4: Схема блоку живлення у повному вигляді



## 2.2. Розрахунок стабілізатора напруги на стабілітроні

Почнемо із розрахунку стабілізатора напруги на стабілітроні, необхідно обчислити наступні значення:

$\approx 5 \text{ мА}$ , із даташіта стабілітронів.

$\approx 2 * 8 = 16 \text{ В}$ , із даташіта стабілітронів.

$\approx 50 \text{ мкА}$ , із даташіта транзистора КТ3102БМ.

Маємо такі рівняння:

Далі скористаємося формулою  $U_{\text{нп}} = U_{\text{ст}} + U_{\text{пд}}$ , де  $1.4 \text{ В}$  – падіння напруги на рп - переходах двох транзисторів. Тоді :

$$U_{\text{нп}} = 15 + 1.4 = 16.4 \text{ В}$$

Тоді:

\_\_\_\_\_

### 2.3. Розрахунок транзисторного каскаду

Далі розрахуємо транзисторний каскад, який збільшує максимальний струм навантаження, а саме: \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_.

Нагадаю, що обчислення проходять за таких умов:

$$I_{B1} = 1 \text{ A}, \quad U_{B1} = 15 \text{ V}, \quad U_{B2} = 23 \text{ V}.$$

– із даташіта транзистора КТ819Б.

– із даташіта транзистора КТ3102БМ.

Так як \_\_\_\_\_ транзисторів незрівнянно малі у порівнянні із \_\_\_\_\_, можна записати:

Будемо розраховувати величини у зворотньому порядку:

\_\_\_\_\_

Далі скористаємося фактом, що на переході база – емітер завжди виділяється приблизно 0.7 В. \_\_\_\_\_ - напруга на базі  $VT1$  відносно землі.

\_\_\_\_\_

Далі розрахуємо транзистор  $VT1$ :

Тепер можна розрахувати :

\_\_\_\_\_

У Висновках буде представлена таблиця, де можна у зручній формі оцінити отримані результати та порівняти їх з отриманими у реальній схемі та у симуляторі.

## РОЗДІЛ 3

### Моделювання роботи приладу

#### 3.1. Опис програми - симулятора

Для проведення комп'ютерного моделювання роботи приладу я скористався програмою LTspice XVII. Це чудовий SPICE – симулятор, який має достатній для моїх цілей функціонал, і при цьому не захащений різними непотрібними для мене функціями, які ускладнюють роботу з ним.

#### 3.2. Опис схеми симуляції

Я не додавав у схему симуляції трансформатор та запобіжники, бо всім і так очевидно як вони працюють. Напруга на вторинній обмотці трансформатора представлена джерелом симусоїдальної напруги амплітудою 23 В(значення взяті з реального трансформатора) та частотою 50 Гц(частота змінної напруги у мережі живлення).

Також у мене була проблема з тим, що деяких компонентів, які я збирався використати у схемі приладу, не виявилось у бібліотеці елементів LTspice. Я вирішив її звівши значення, які написані у SPICE – моделях елементів бібліотеки зі значеннями моїх компонентів, взятими із даташита і таким чином знайшов аналоги. Таким чином я замінив стабілітрони, діоди та транзистор КТ3102БМ. Але треба розуміти, що такий крок може внести значну похибку у отримані результати.

Потенціометр  $R2$  у симуляції представлений двома резисторами  $R2$ ,  $R3$ , які утворюють подільник напруги. Навантаження представлено резистором  $R8$ .

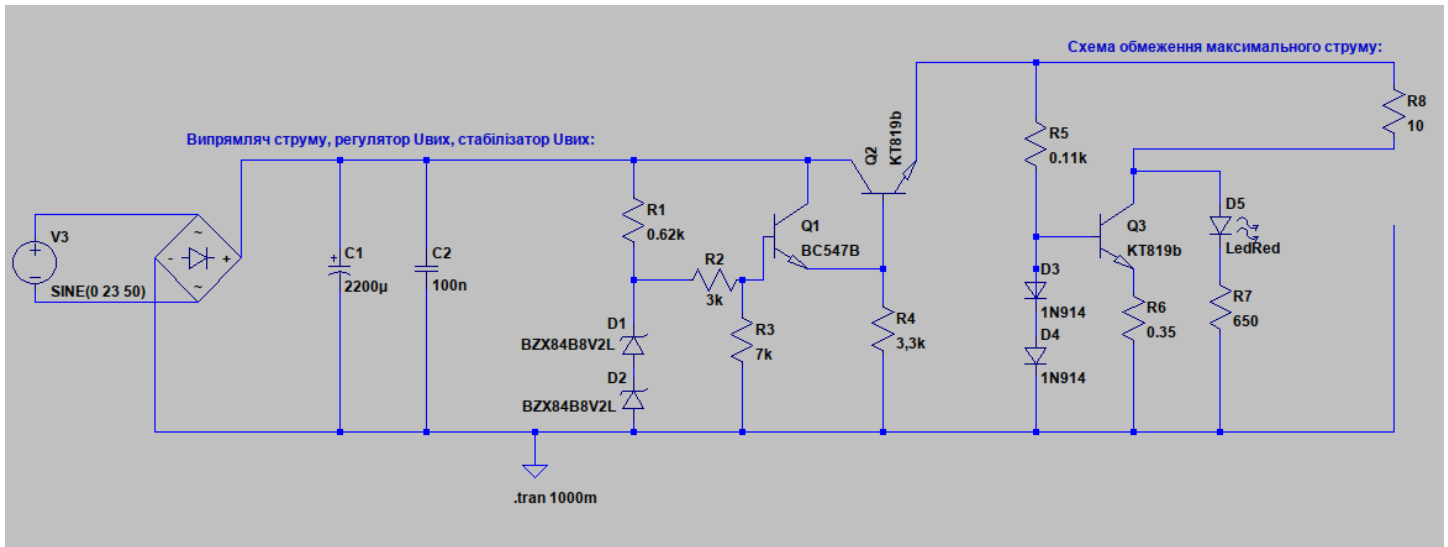


Рис. 3.1: Схема симуляції

### 3.3. Опис режиму симуляції

Симуляцію я проводив у режимі Transient analysis, на протязі 1 секунди. Цього часу достатньо для завершення всіх перехідних процесів та виходу приладу на сталий режим роботи.

### 3.4. Перевірка роботи приладу без застосування схеми обмеження струму

Спочатку перевіримо як прилад працює без схеми обмеження струму. Для цього від'єднуємо її за допомогою розривів кола. Значення потенціометра встановимо 3/7 кОм. Схема симуляції набула такого вигляду:

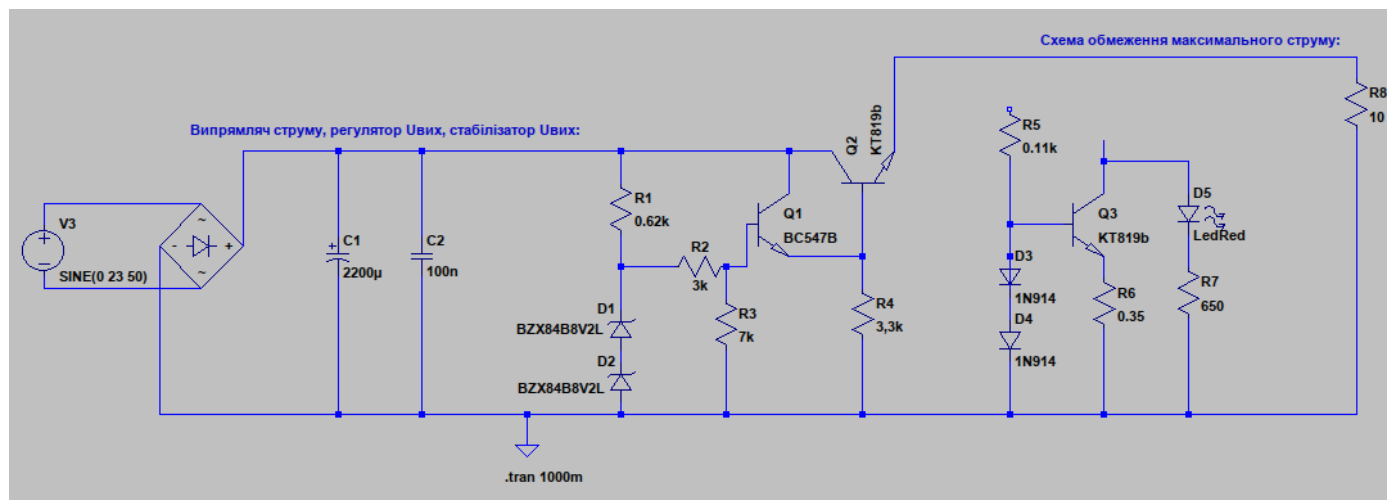


Рис. 3.2: Схема симуляції без схеми обмеження струму

Отримали такі результати:

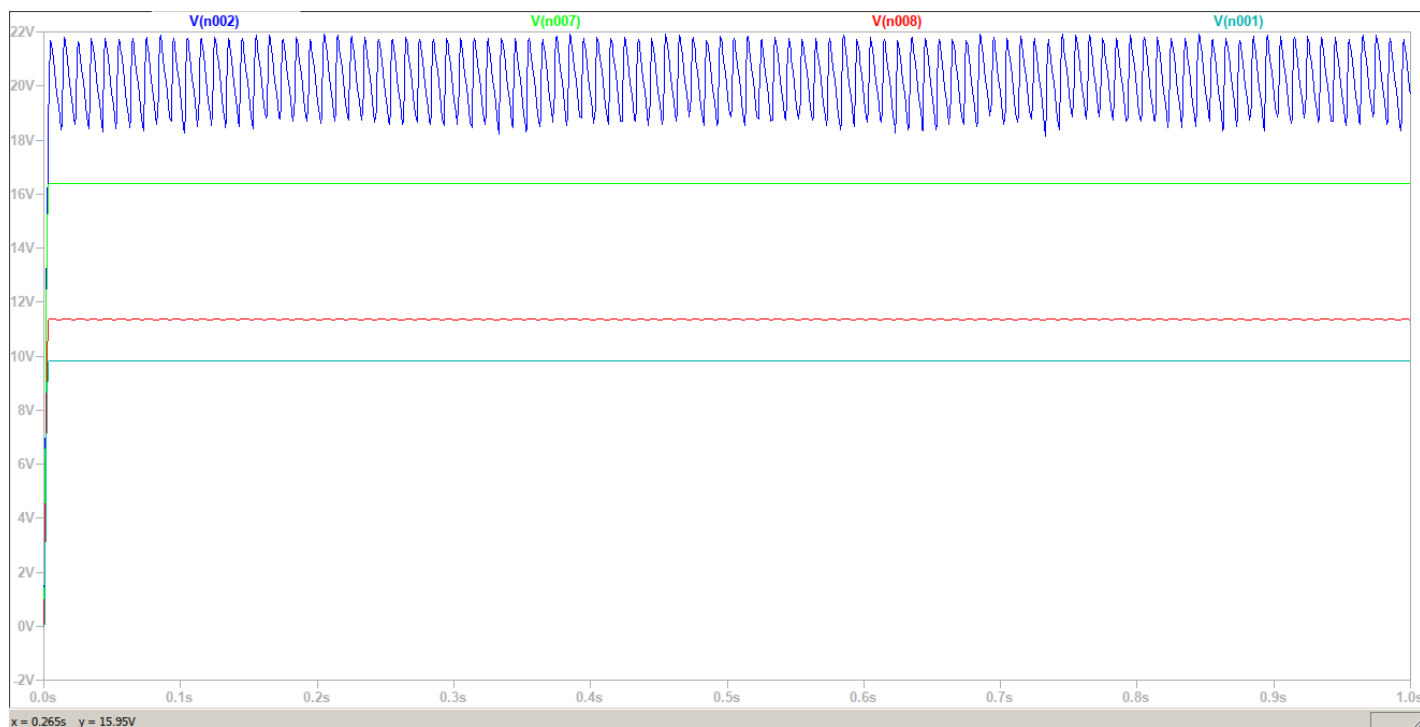


Рис. 3.3: Результати симуляції без схеми обмеження струму

На рисунку представлені значення таких напруг відносно землі (зверху вниз): Напруга на конденсаторі  $C1$ , напруга стабілізації стабілітронів, напруга на базі транзистора  $Q1$  (напруга, задана потенціометром), напруга виходу блоку живлення.



Легко можна пояснити кожну з них:

- Напруга на конденсаторі  $C1$  залежить від трансформатора, а її пульсації – від ємності згладжуючого конденсатора.
- Напруга стабілізації стабілітронів залежить від моделі стабілітронів.
- Напруга на базі транзистора  $Q1$  була задана потенціометром і від її величини залежить напруга виходу блоку живлення.
- Напруга виходу блоку живлення залежить від напруги на базі транзистора  $Q1$  і тут прослідковується одна цікава залежність. Напруга виходу менша за напругу на базі транзистора  $Q1$  приблизно на 1.5 В. Це величина падіння напруги на  $r_{pe}$  – переходах двох транзисторів, а це означає, що максимальна напруга виходу блоку живлення буде описуватися за формулою

Де:  $U_{out}$  – максимальна напруга на виході,  $U_{st}$  – напруга стабілізації  $\approx 16$  В,  $U_{be}$  – напруга відкриття  $r_{pe}$  – переходу  $\approx 0.7$  В.

Окремо я виділю падіння напруги на силовому транзисторі  $Q2$ :

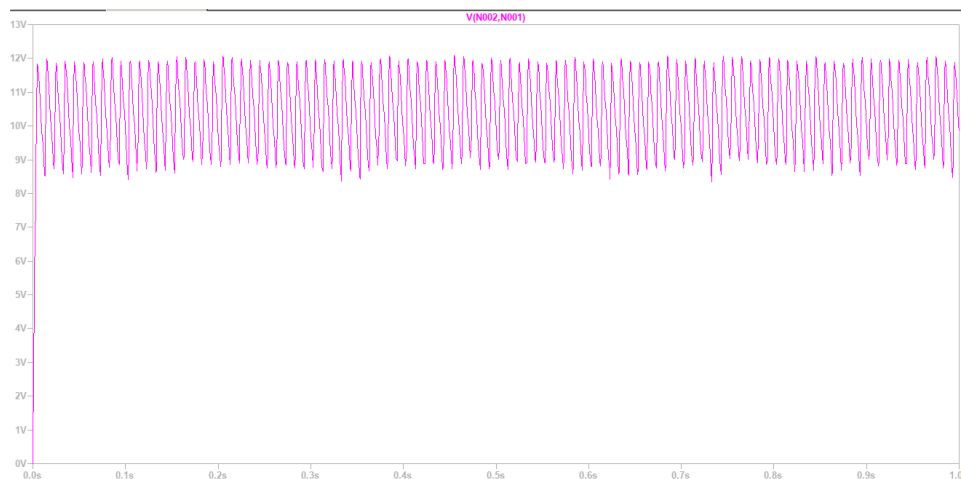


Рис. 3.4: Падіння напруги на силовому транзисторі  $Q2$

З цих графіків легко побачити очевидну формулу:

Де:  $U_{out}$  – напруга виходу,  $U_{C1}$  – напруга на конденсаторі  $C1$ ,  $U_{CE}$  – падіння напруги на переході колектор – емітер транзистора  $Q2$ .

### 3.5. Перевірка залежності напруги виходу від різних положень потенціометра

Для симуляції при різних положеннях потенціометра, застосуємо SPICE – директиву «step», яка дозволяє на одному графіку поєднати результати симуляції при різних параметрах якогось елемента. У моєму випадку, я буду змінювати величину резистора  $R2$ , це імітація крутіння ручки потенціометра. Тоді схема у симуляторі матиме вигляд:

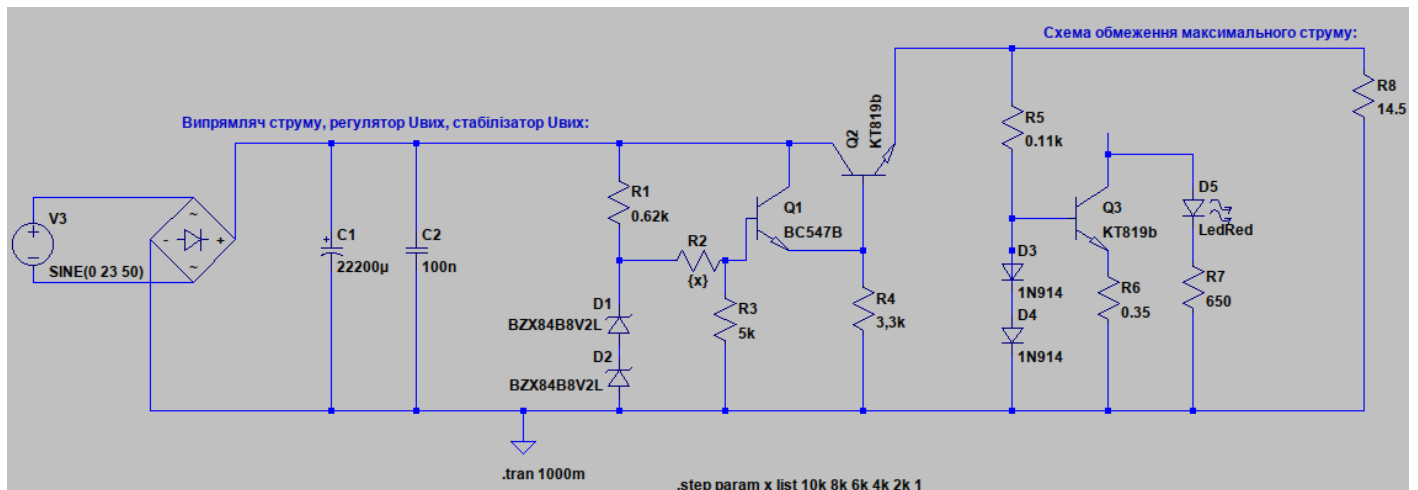


Рис. 3.5: Схема симуляції із директивою step

І ми отримаємо результат:

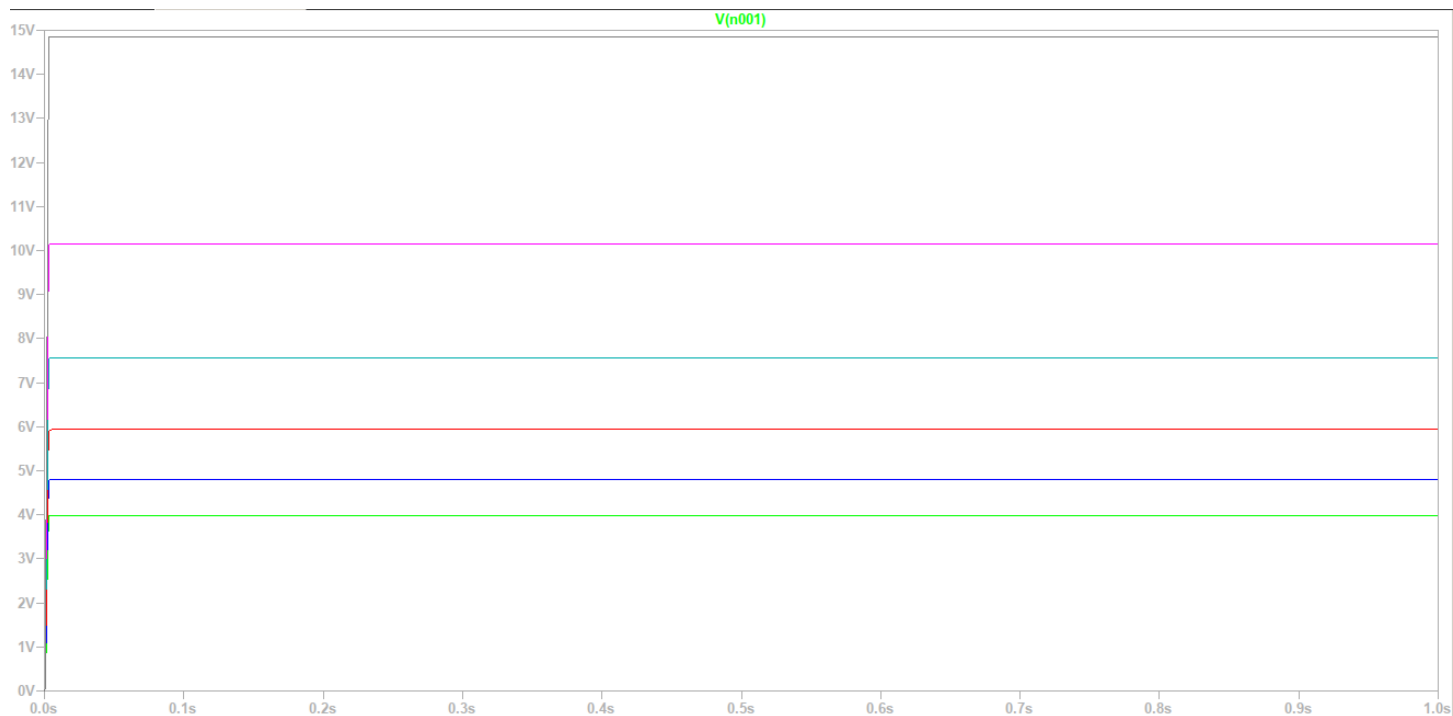


Рис. 3.6: Напруга виходу при симуляції із директивою step

На малюнку зображені значення напруги на виході блоку живлення при різних величинах резистора  $R2$  (зверху донизу):

1 Ом, 2 кОм, 4 кОм, 6 кОм, 8 кОм, 10 кОм.

З цього графіку можна зробити висновок: напруга виходу залежить від напруги на базі транзистора  $VT1$ , яка, в свою чергу, задається потенціометром  $R2$ .

### 3.6. Перевірка роботи приладу із застосування схеми обмеження струму

Для симуляції роботи обмеження струму, під'єднаємо цю схему до приладу. Перевіримо роботу схеми у 3 режимах роботи: номінальний ( $I_n < 1\text{ A}$ ), великий струм, коротке замикання. Напруга навантаження скрізь буде 10 В. Проведемо симуляцію для двох випадків: із застосуванням схеми обмеження струму, та без неї.

Схема симуляції набуде вигляду:

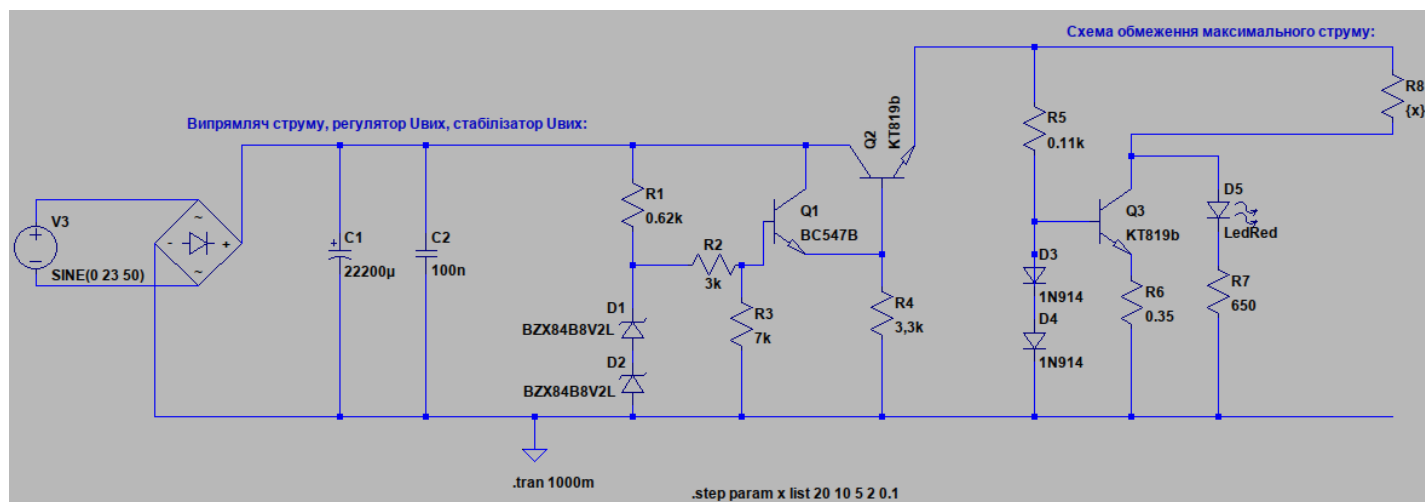


Рис. 3.8: Схема симуляції із схемою обмеження струму

Отримали такі значення:

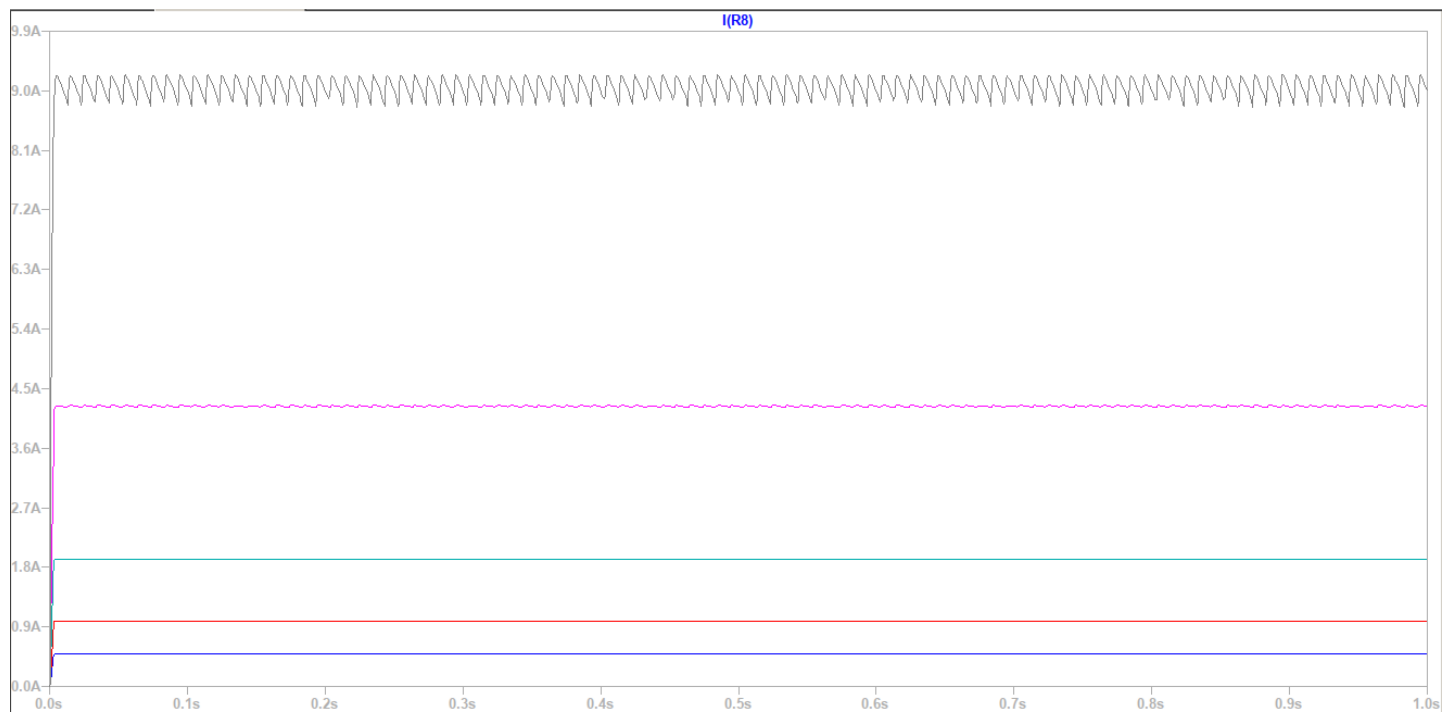


Рис. 3.8: Струм навантаження без схеми обмеження струму

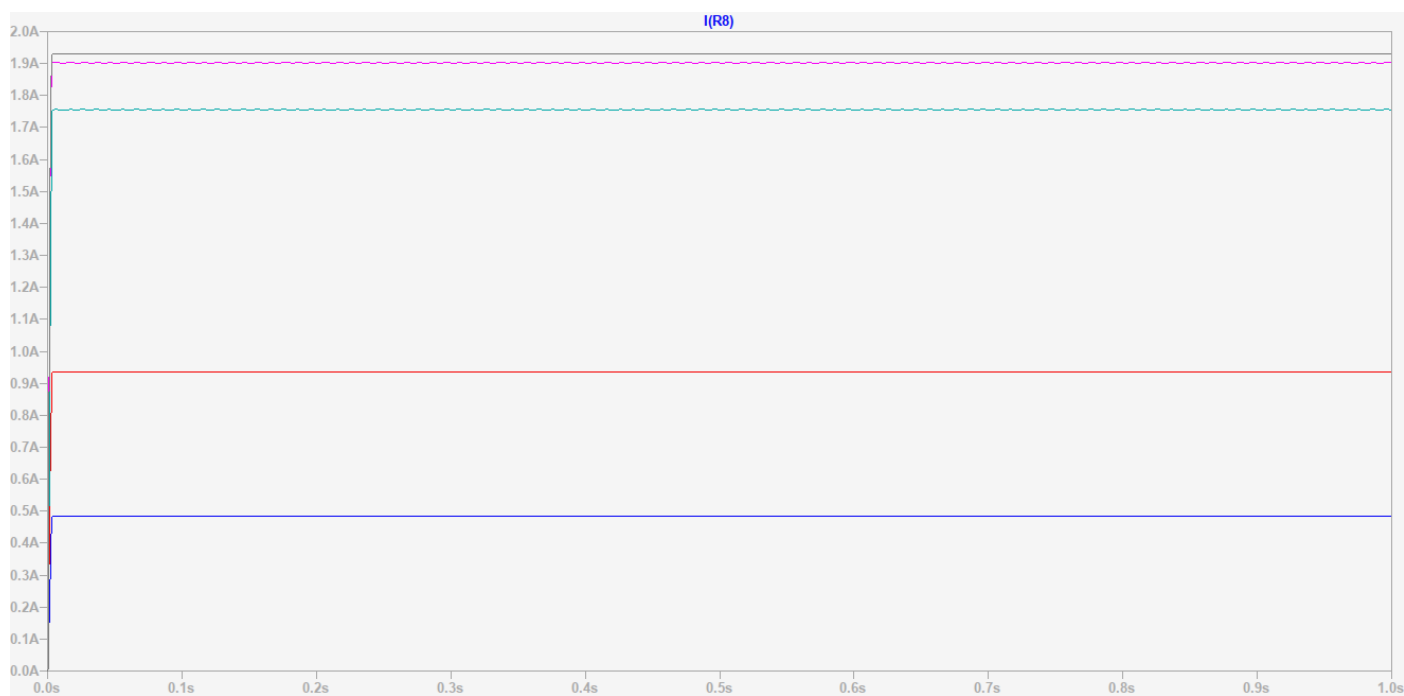


Рис. 3.9: Струм навантаження зі схемою обмеження струму

Логічно, що чим більший струм на графіку – тим менший опір навантаження. З цих графіків чітко видно, що схема працює і там, де без неї блок живлення вийшов би з ладу(а можливо і саме навантаження також), з її використанням все буде безпечніше.

Я все оформив у вигляді таблиці:

| Р <sub>нав</sub> , Ом | І <sub>нав</sub> без обмеж, А | І <sub>нав</sub> обмеж, А |
|-----------------------|-------------------------------|---------------------------|
| 20                    | 0,5                           | 0,48                      |
| 10                    | 0,98                          | 0,94                      |
| 5                     | 1,91                          | 1,75                      |
| 2                     | 4,23                          | 1,86                      |
| 0,1                   | 9                             | 1,92                      |

Таблиця 3.1: Порівняння струмів навантаження

На цій таблиці чітко видно, що схема обмежує струм на позначці трохи менше 2 А, тому схема чудово працює.

### 3.7. Порівняння значень, розрахованих у Розділі 2 із отриманими у симуляції

У Розділі 2 я розраховував такі напруги і струми:

, , , , , , , ,

Щоб не вставляти 11 скріншотів, я організую вивід цих значень у .log файл LTspice за допомогою директиви .meas. Тоді схема симуляції набуде вигляду:

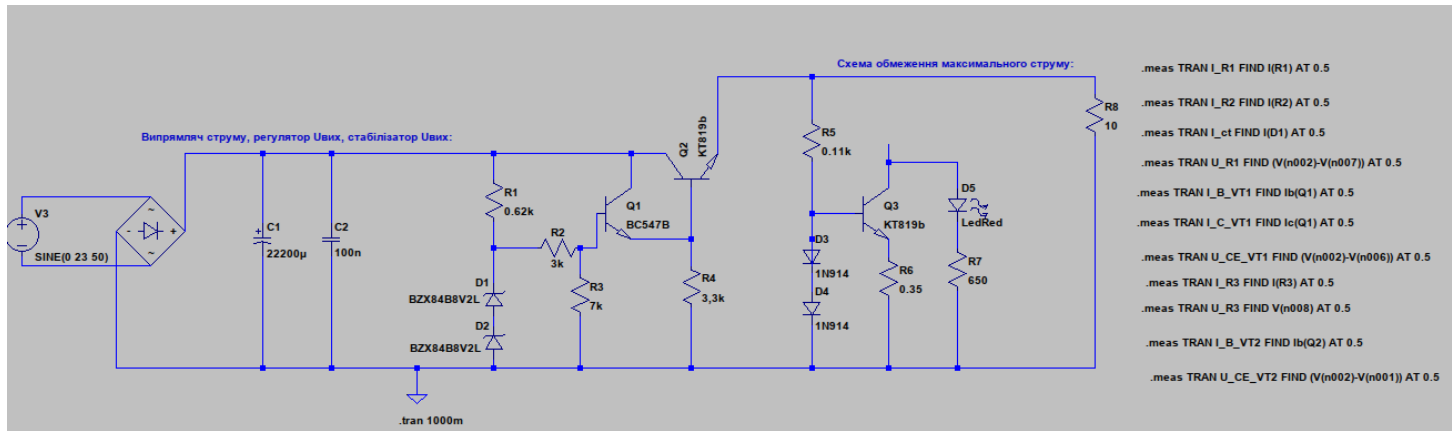


Рис. 3.10: Схема симуляції із використанням директиви .meas

Після симуляції, у .log файлі з'являться такі рядки:

```

i_r1: i(r1)=0.00856845 at 0.5
i_r2: i(r2)=0.00168433 at 0.5
i_ct: i(d1)=-0.00688412 at 0.5
i_b_vt1: ib(q1)=6.26851e-005 at 0.5
i_c_vt1: ic(q1)=0.0186375 at 0.5
i_r3: i(r3)=0.00162164 at 0.5
i_b_vt2: ib(q2)=0.0151572 at 0.5
u_r1: (v(n002)-v(n007))=5.31244 at 0.5
u_ce_vt1: (v(n002)-v(n006))=11.0878 at 0.5
u_r3: v(n008)=11.3515 at 0.5
u_ce_vt2: (v(n002)-v(n001))=11.8944 at 0.5

```

Рис. 3.11: log файл симуляції

Значення приблизно співпали із розрахованими у Розділі 2. У Висновках ці результати будуть оформлені у вигляді зручної таблиці.

## РОЗДІЛ 4

### Створення та дослідження робочого прототипу пристрою

#### 4.1 Створення макету

Для початку я вирішив створити прототип пристрою на макетній платі, якою виступив шматок картону, в який я вставляв елементи та спаював їх виводи. Це дозволило мені зрозуміти, що схема працює не лише на папері та в комп'ютері, а і у реальному світі. Фото макету приведені нижче.

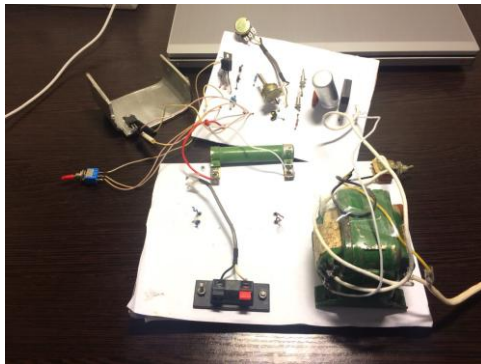


Рис. 4.1.1 Макет приладу

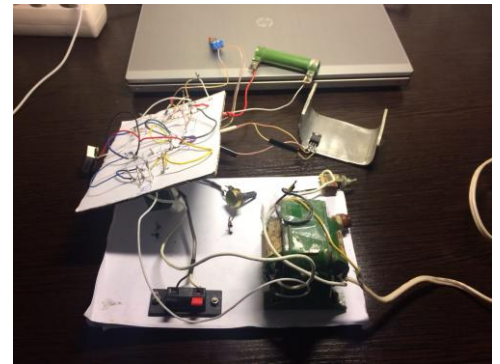


Рис. 4.1.2 Макет приладу

#### 4.2 Створення друкованої плати

Друковану плату я розвів у програмі Sprint-Layout. Це програмне забезпечення для ручного проектування і розводки друкованих плат простого і середнього рівня складності. Я обрав саме цю програму, бо вона має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та не захащена великою кількістю непотрібних функцій.



Розведена друкована плата має такий вигляд:

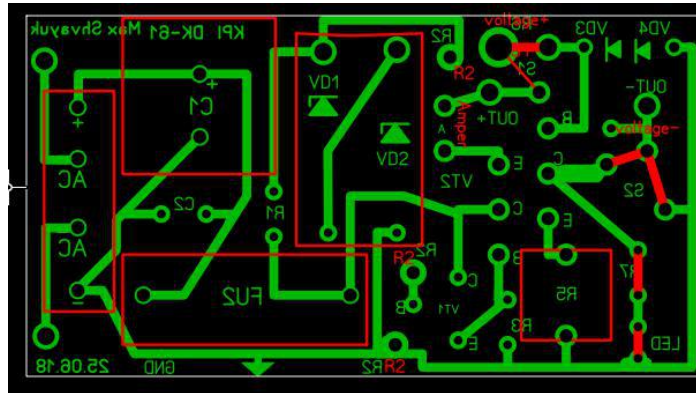


Рис. 4.2: Розведена плата у програмі Sprint-Layout

Переносити малюнок на склотекстоліт я вирішив методом «лазерної праски». Був обраний саме цей спосіб, бо він поєднує у собі відносну простоту і високу якість отриманої плати. Сам метод містить в собі кілька кроків:

- Друк розведеної плати обов'язково на лазерному принтері та на глянцевому фотопапері.
- Переніс малюнку на текстоліт за допомогою праски.
- Травлення плати у хімічно - активному розчині. Це суміш лимонної кислоти, солі та перекису водню.

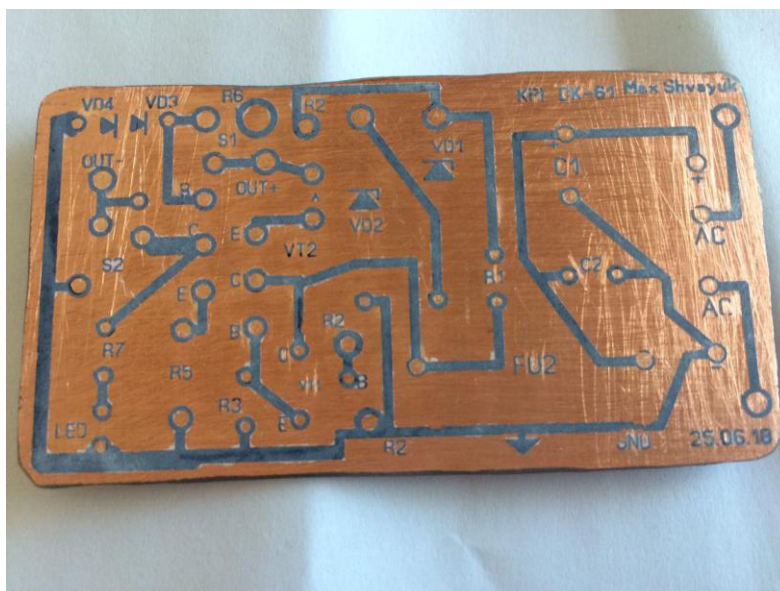


Рис. 4.3: Перенесена літографічна маска

Тепер у хімічно – активному розчині незахищена мідна фольга стравиться, а доріжки, захищені фарбою – залишаться.

Після завершення травлення я отримав готову друковану плату.



Рис. 4.4: Процес травлення у розпалі

У результаті, після змивання фарби розчинником, залишилися лише гарні мідні доріжки:

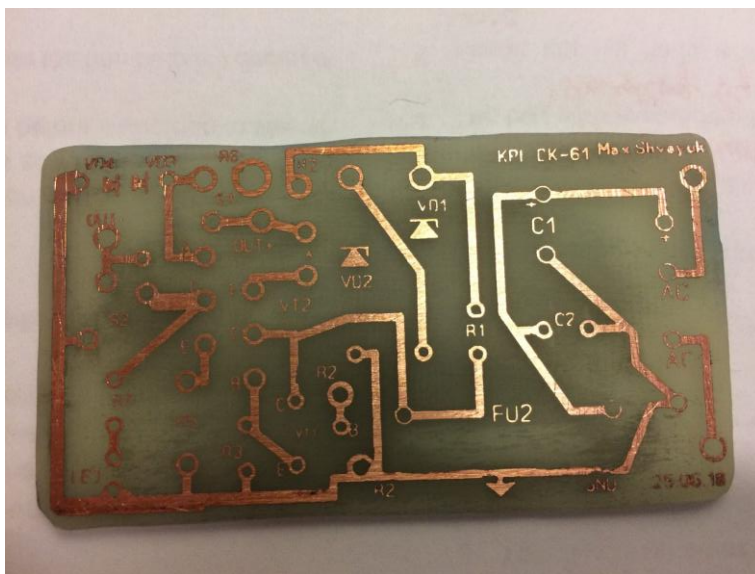


Рис. 4.5: Вигляд після травлення

Потім я впаяв у плату всі деталі і ось, що в мене отрималося:

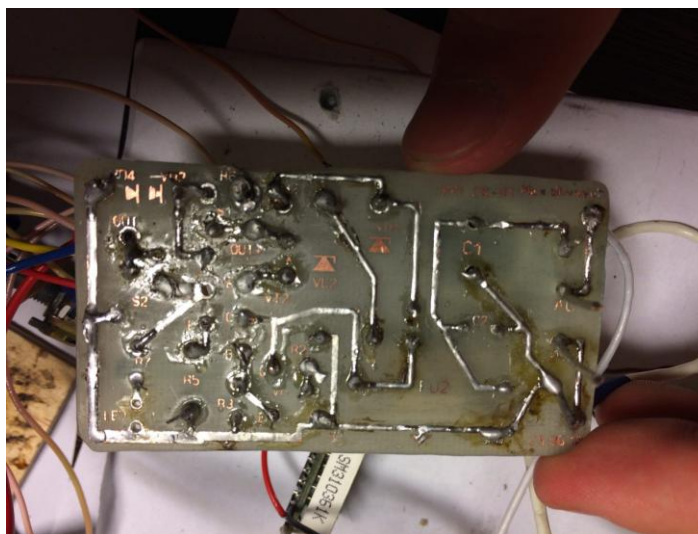


Рис. 4.6.1: Фінальний вигляд з тильного боку

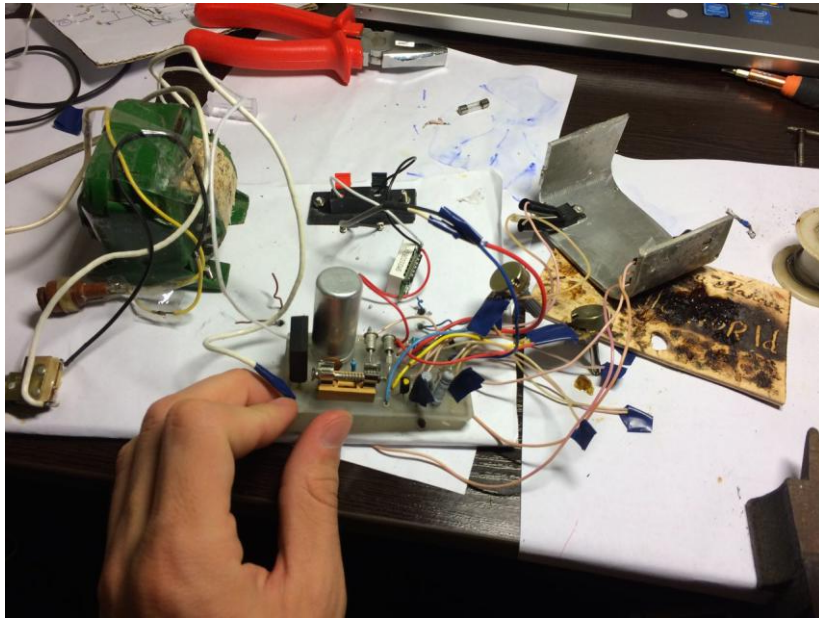


Рис. 4.6.2: Фінальний вигляд з лицьового боку

Так як під навантаженням блок живлення буде грітися – я закріпив силові транзистори на радіатор і тепер можна не боятися тестувати його.

#### 4.3      Перевірка значень із Розділу 2 на реальному приладі

Я заміряв всі струми і напруги, які мені необхідно було розрахувати і всі отримані значення я заніс у таблицю, яка наведена у Висновку.

## ВИСНОВКИ

Мною була спроектована, розрахована, просимульована та зібрана схема лінійного лабораторного блоку живлення. Мій прилад складається із дешевих та доступних кожному радіолюбителю, або студенту компонентів, а його простота слугує головною запорукою високої надійності.

Правильність розрахунків та симуляції можна перевірити, порівнявши напруги та струми у ключових вузлах схеми, отримані різним чином, що було зроблено у наступній таблиці:

| Величина             | Розрахунок | Симуляція | Реальна<br>схема | Відносна похибка, % |
|----------------------|------------|-----------|------------------|---------------------|
| IR1, мА              | 6,7        | 8,6       | 8,3              | 25,8                |
| IR2_1, мА            | 1,7        | 1,7       | 1,5              | 5,9                 |
| IR2_2, мА            | 1,65       | 1,637     | 1,2              | 14,0                |
| IR3, мА              | 4,6        | 1,6       | 4,0              | 39,1                |
| I <sub>ст</sub> , мА | 5,0        | 6,8       | 7,3              | 41,0                |
| IB_VT1, мА           | 0,05       | 0,063     | 0,3              | 263,0               |
| IK_VT1, мА           | 17,1       | 18,6      | 18,7             | 9,1                 |
| IB_VT2, мА           | 12,5       | 15,2      | 14,7             | 19,6                |
| UR1, В               | 4,2        | 5,3       | 6,6              | 43,4                |
| UKE_VT1, В           | 7,7        | 11,1      | 15,0             | 69,4                |
| UR3, В               | 15,3       | 11,4      | 12,5             | 22,1                |
| UKE_VT2, В           | 8,0        | 11,9      | 8,7              | 28,8                |

За точне значення бралось число, отримане в результаті розрахунків, відносна похибка інших значень рахувалася відносно нього, а потім записувалося її середнє арифметичне.

Як ми бачимо, десь похибки виявилися досить малими (в основному у лінійних елементів, але також у транзистора  $VT2$ , що вказує на якісну SPICE - модель KT819Б у симуляторі), а десь дуже великими. Це абсолютно нормально для аналогової електроніки любительського рівня, тим паче, що деяких елементів у симуляторі не було і довелося брати їх аналоги.

В цілому, прилад вийшов компактним (друкована плата всього 7.5 \*4 см), простим у реалізації і зрозумілим для новачків, а також у нього хороші характеристики:

, чого досить для більшості цілей радіолюбителів, а цю роботу можна вважати докладною інструкцією, де пояснюється як його виготовити та принцип його роботи.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Даташит на транзистор КТ819Б/[Електронний ресурс] – Режим доступу:  
<https://eandc.ru/pdf/tranzistor/kt819.pdf> (дата звернення 29.05.2018)
2. Даташит на транзистор КТ3102БМ/[Електронний ресурс] – Режим доступу:  
<https://eandc.ru/pdf/tranzistor/kt3102.pdf> (дата звернення 29.05.2018)
3. LTspice XVIII / Linear Technology/Analog Devices / [Електронний ресурс] –  
Режим доступу: <http://www.linear.com/designtools/software/#LTspice> (дата  
звернення 29.05.2018)
4. Технологія ЛУТ/[Електронний ресурс] – Режим доступу:  
<http://cxem.net/master/45.php> (дата звернення 29.05.2018)
5. Sprint Layout/ [Електронний ресурс] – Режим доступу обмежений:  
<https://www.electronic-software-shop.com/sprint-layout-60.html?language=en>  
(дата звернення 29.05.2018)
6. Курс «Аналогова електроніка» / [Електронний ресурс] – Режим доступу:  
[https://www.youtube.com/playlist?list=PL4WQQHlheqfxlBAVy\\_BCNDcU\\_NoHczyjk](https://www.youtube.com/playlist?list=PL4WQQHlheqfxlBAVy_BCNDcU_NoHczyjk)  
(дата звернення 29.05.2018)