МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

І.М. Кирпатенко
Н.О. Лащевська
Р. В. Антипенко

ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ

Лабораторний практикум

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки»
«Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»
«Радіотехнічні комп'ютеризовані системи»
спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка
Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2023

Рецензент *Шпилька О.О.*, кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Відповідальний редактор *Шульга А.В.*, кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 8 від 02.06.2023 р.)
за поданням Вченої ради радіотехнічного факультету
(протокол № 05/2023 від 28.04.2023р.)

Лащевська Наталія Олександрівна, доцент кафедри прикладної радіоелектроніки
Кирпатенко Ілля Миколайович, доцент кафедри прикладної радіоелектроніки
Антипенко Руслан Володимирович, доцент кафедри прикладної радіоелектроніки

Електроживлення радіоелектронної апаратури: лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» / Н.О. Лащевська, І.М. Кирпатенко, Р. В. Антипенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл 705 Кбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 37 с.

Посібник містить теоретичний та практичний матеріал з дисципліни Електроживлення радіоелектронної апататури, вивчаються теорія лінійних стабілізаторів напруги, основи теорії імпульсних перетворювачів напруги, основні різновиди імпульсних DC/DC, AC/DC, DC/AC перетворювачів напруги, елементна база імпульсних перетворювачів напруги.

© Н.О. Лащевська, І.М. Кирпатенко, Р. В. Антипенко
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023

Вступ 4
Мета та основні завдання лабораторних робіт 5
Опис програми Tina-TI 6
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 9
ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНИХ СТАБІЛІЗАТОРІВ НАПРУГИ 9
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 13
ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЕНСАЙНИХ СТАБІЛІЗАТОРІВ НАПРУГИ 13
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 17
ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НАПРУГИ ПЕРШОГО (ППН-1) ТА ДРУГОГО (ППН-2) РОДУ (ПОНИЖУЮЧОГО ТА ПІДВИЩУЧОГО) 17
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4 20
ДОСЛІДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ НА ОСНОВІ ППН-1. ЧАСТИНА 1 20
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 25
ДОСЛІДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ НА ОСНОВІ ППН-1. ЧАСТИНА 2 25
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6 30
ДОСЛІДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ НА ОСНОВІ ППН-1. ЧАСТИНА 3 30
Перелік літератури 34
Додатки 35

Вступ

Навчальний посібник до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Електроживлення радіоелектронної апаратури» призначений для студентів радіотехнічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського очної та заочної форми навчання.

Матеріал навчального посібника включає в себе:

- опис симулятора Tina-TI розробки фірми Texas Instruments;
- програми виконання робіт;
- роз’яснення та завдання до виконання робіт;
- перелік теоретичного матеріалу, який має бути засвоєний для успішного виконання лабораторних робіт;
- базові теоретичні відомості з деяких розділів аналогової та цифрової схемотехніки лінійних стабілізаторів напруги та імпульсних перетворювачів напруги;
- список необхідної літератури;
- контрольні питання.

МЕТА ТА ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Мета лабораторних робіт – набуття студентами навичок з аналізу та синтезу лінійних стабілізаторів напруги та імпульсних перетворювачів напруги.

Кожна з лабораторних робіт включає етапи:

- побудови в програмі Tina-TI схеми електричної принципової пристрою;
- дослідження заданих в завданні до роботи характеристик пристрою засобами, наявними в симуляторі Tina-TI;
- корегування, в разі необхідності, схеми електричної принципової пристрою з метою отримання заданих в завданні до лабораторної роботи характеристик.

При оформленні звіту з лабораторної роботи згідно встановленої форми (див. додаток 1), мають бути наведені:

- схема електрична принципова пристрою;
- розрахунки номіналів елементів схеми електричної принципової, які забезпечують отримання заданих характеристик;
- показання відповідних вимірювальних пристроїв, що підтверджують відповідність характеристик пристрою заданим;
- відповіді на контрольні питання;
- висновки, в яких слід навести результати випробувань пристрою на предмет відповідності його технічному завданню.

Для успішного виконання лабораторних робіт необхідним є засвоєння здобувачем відповідного теоретичного матеріалу. Обсяг необхідного теоретичного матеріалу (у вигляді контрольних питань) з посиланнями на джерела відповідної інформації вказується при описі кожної лабораторної роботи.

ОПИС ПРОГРАМИ TINA-TI

Tina-TI є звичайним SPICE-симулятором з простим, інтуїтивно зрозумілим графічним інтерфейсом, що дозволяє освоїти програму в найкоротші терміни [1]. Цей софт не має обмежень на кількість використовуваних пристроїв та вузлів, компоненти, представлені в Tina-TI, розподілені по шести групах: основні пасивні радіодеталі, ключі, напівпровідники, вимірювальні прилади, макромоделі складних пристроїв та джерела. (рис. 1.)

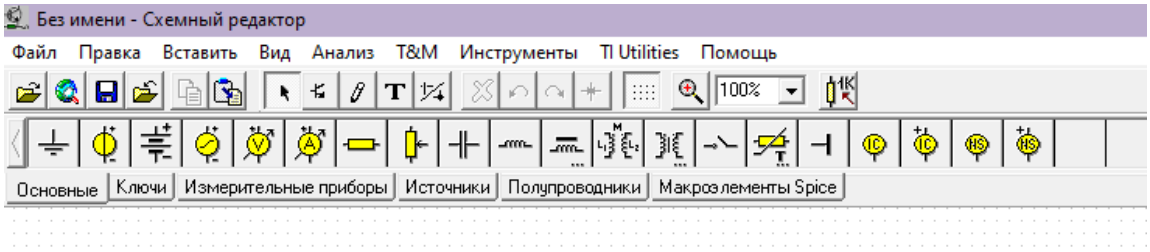


Рисунок 1 – Розподіл компонентів, представлених в Tina-TI

Tina-TI надає широкі можливості для створення, редагування та симуляції електронних схем. Є такі види аналізів: за постійним і змінним струмом (сюди входить: обчислення вузлових напруг, створення таблиці результатів, побудова перехідних показників і температурний аналіз), перехідних процесів, шумів, перетворення Фур'є та інших. (рис.2)

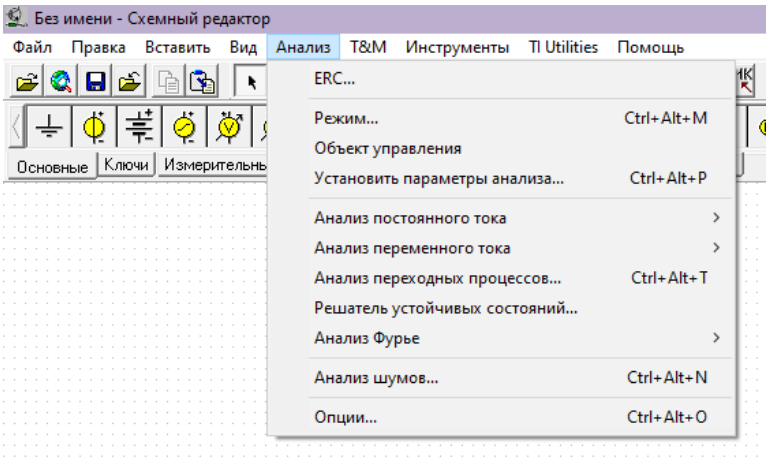


Рисунок 2 – Засоби аналізу електронних схем в Tina-TI

У програмі Tina-TI також доступні можливості тестування та вимірювання сигналів. Для цього існують наступні віртуальні прилади: осцилограф, аналізатор сигналів, цифровий тестер (з вимірювачем частоти), генератор функцій та пристрій для запису (рис.3).

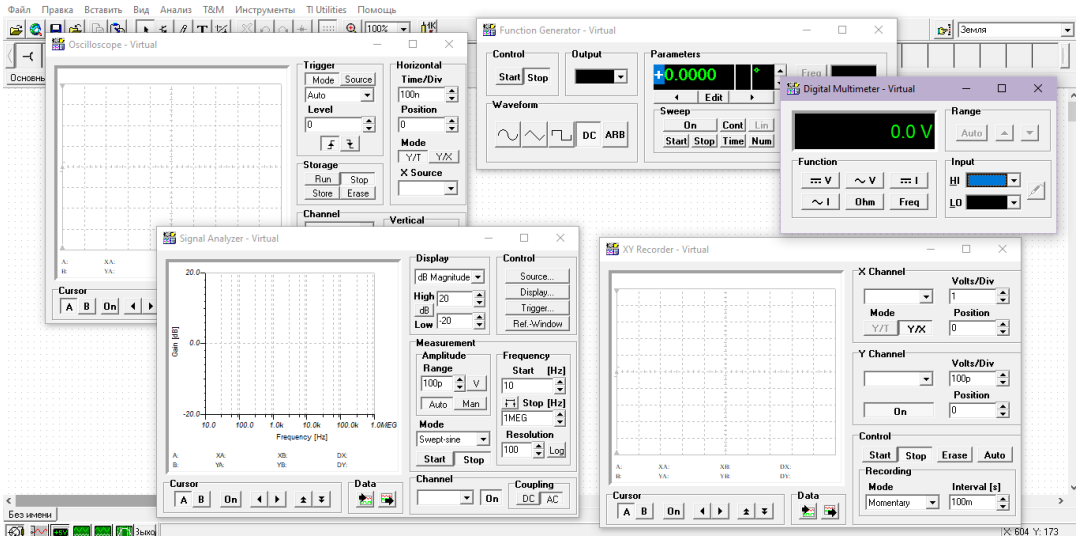


Рисунок 3 – Віртуальні прилади TINA-TI

Віртуальні прилади програмного комплексу максимально наближені до реальних пристроїв. «Підключити» їх можна до будь-якої точки схеми, що розглядається. Уся інформація, знята віртуальними приладами, може зберігатися у пам'яті комп'ютера. Підтримується псевдо-реальний режим роботи, в якому дані пристрої можуть використовуватися для спостереження прямо під час функціонування схеми.

Моделі транзисторів, як польових, так і біполярних також знаходяться у вкладці “Напівпровідники” (рис. 4).

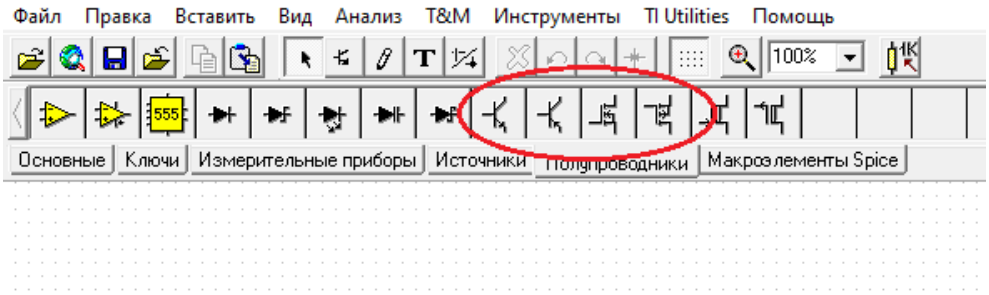


Рисунок 4 – Моделі транзисторів

Не менш важливим, особливо для дослідження імпульсних перетворювачів, є присутність моделей індуктивностей, зокрема з феромагнітним осердям (рис.5). Вони знаходяться у вкладці “Основні”

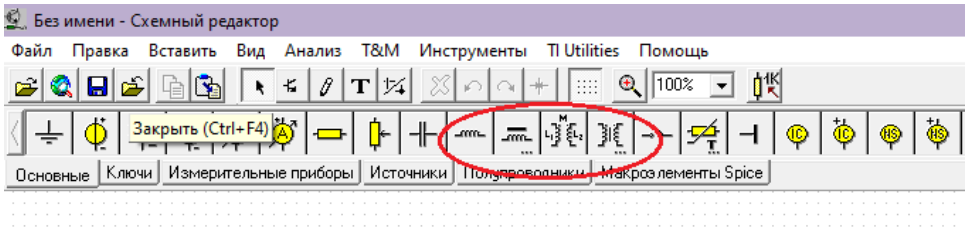


Рисунок 5 – Моделі індуктивних елементів

Для підключення віртуальних вимірювальних пристроїв необхідно до вузлів схеми, в яких планується проводити вимірювання, підключити «зовнішній вивід для виміру напруги», який знаходиться в закладці «Вимірювальні пристрої» (рис.6, VF1, VF2).

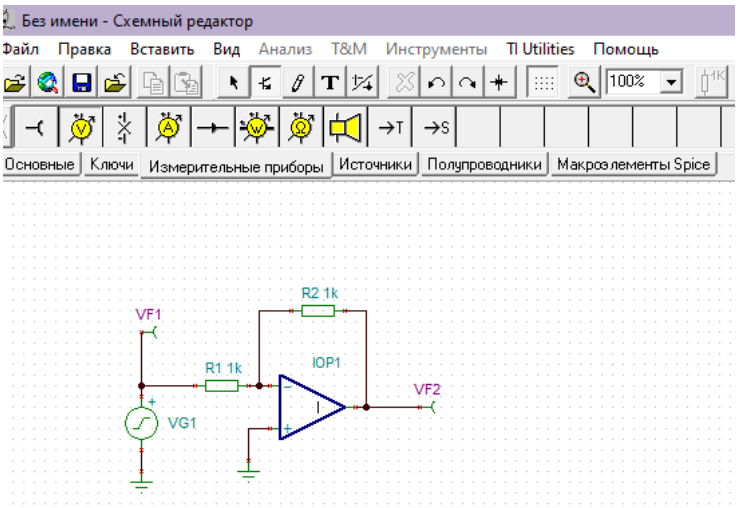


Рисунок 6 – Інвертуючий підсилювач з виводами для підключення віртуальних вимірювальних пристроїв

Більш детальний опис функцій програми Tina-TI, за потреби, дається в лабораторних роботах. Програму TINA-TI можна безкоштовно завантажити на сайті Texas Instruments за посиланням: https://www.ti.com/tool/TINA-TI

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1
ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНИХ СТАБІЛІЗАТОРІВ НАПРУГИ

Мета роботи: дослідження характеристик параметричного стабілізатора напруги на базі стабілітрона.

Постановка задачі: Реалізувати у вигляді моделі в симуляторі Tina-TI параметричний стабілізатор на основі стабілітрона. Використовуючи відповідні засоби стимулятора, дослідити задані характеристики стабілізатора.

Короткі теоретичні відомості

Параметричний стабілізатор – це пристрій, в якому стабілізація вихідного параметру досягається за рахунок нелінійності вольт-амперної характеристики електронних компонентів, які використані для побудови стабілізатора, тобто такі стабілізатори використовують внутрішні властивості електронних компонентів, без побудови спеціальної системи регулювання напруги або струму (рис.1.1).

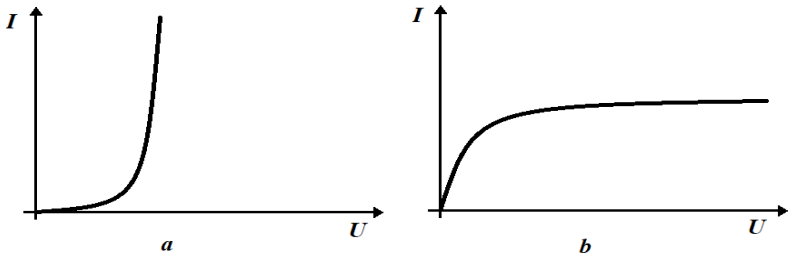


Рисунок 1.1 – Нелінійні характеристики електронних компонентів. *a* – стабілітрона (стабілізація напруги), *b* – колекторна характеристика транзистора (залежність струму колектора від напруги колектор-емітер за постійного струму бази – стабілізація струму)

Основні параметри стабілізаторів:

1.Коефіцієнт стабілізації

$$K_{st} = \frac{\frac{\Delta U_{in}}{U_{in}}}{\frac{\Delta U_{out}}{U_{out}}} = \frac{\Delta U_{in} \cdot U_{out}}{\Delta U_{out} \cdot U_{in}}$$

2. Коефіцієнт нестабільності за напругою

$$K_{nU} = \frac{\Delta U_{out}}{\Delta U_{in}} \cdot \frac{1}{U_{out}}$$

3. Коефіцієнт нестабільності за струмом

$$K_{nI} = \frac{\Delta U_{out}}{U_{out}} \cdot 100\%\{\Delta I_{out}\}$$

Визначається як відносна зміна вихідної напруги при зміні вихідного струму в заданому інтервалі.

4. Вихідний опір

$$R_{out} = \frac{\Delta U_{out}}{\Delta I_{out}}$$

5. Коефіцієнт згладжування пульсацій. Відношення напруги пульсацій на вході стабілізатора до напруги пульсацій на його виході.

6. Коефіцієнт корисної дії. Відношення потужності, яку віддає стабілізатор в навантаження до потужності, яку споживає стабілізатор.

Розрахунок параметричного стабілізатора

Схема стабілізатора представлена на рис.1.2. Струм через стабілітрон i_{st} доцільно вибрати посередині діапазону допустимих значень струму стабілізації (довідкове значення, зазвичай лежить в межах 10 – 100 mA.) Струм навантаження визначається як $i_l = \frac{U_{out}}{R_l}$. Струм через баластний резистор $i = i_l + i_{st}$. Звідси можна визначити опір баластного резистора $R_b = \frac{U_{in} - U_{out}}{i}$

Порядок виконання роботи:

1. В симуляторі Tina-TI зібрати схему параметричного стабілізатора, як показано на рис.1.2. Напруга джерела живлення, вихідна напруга і опір навантаження задаються викладачем. Опір баластного резистора розрахувати самостійно. Самостійно також вибрати тип стабілітрона.

2. За допомогою віртуального мультіметра виміряти вхідну (U_{in}) та вихідну (Uout) напруги стабілізатора. У разі невідповідності вихідної напруги заданій провести аналіз і корегування схеми.
3. Визначити коефіцієнт стабілізації: для цього збільшити вхідну напругу на 20% і за допомогою віртуального мультіметра виміряти вихідну напругу.
4. Визначити коефіцієнт нестабільності за напругою.
5. Порівняти з теоретичним значенням, розрахованим по формулі:

$$K_{st} = \left(1 + \frac{R_b}{R_d}\right)\frac{U_{st}}{U_{in}},$$

де R_d - диференціальний опір стабілітрона.

6. Визначити коефіцієнт згладжування пульсацій, для цього зібрати схему рис. 1.2. В джерелі сигналу U_{ac} обрати синусоїдальний сигнал, амплітула 1В. За допомогою віртуального осилографа визначити амплітуду пульсацій напруги на виході стабілізатора.
7. Розрахувати ККД стабілізатора.

-

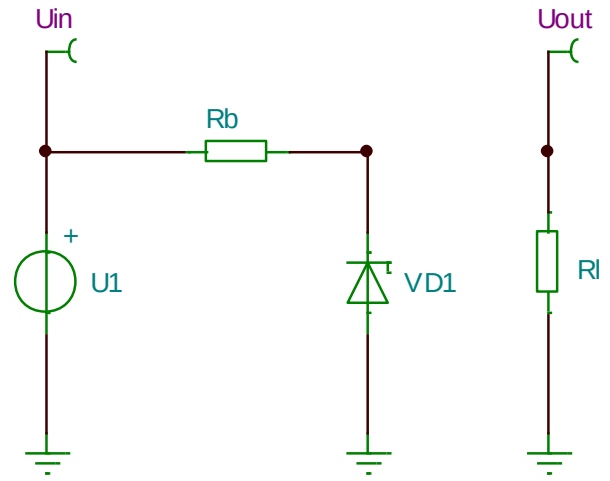


Рисунок 1.2 – Схема параметричного стабілізатора

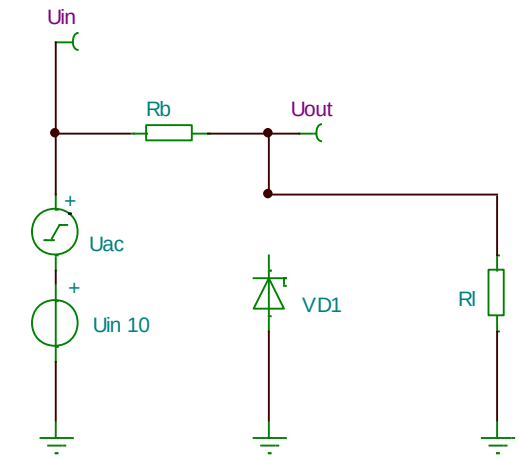


Рисунок 1.3 Схема для визначення коефіцієнту подавлення пульсацій

Варіанти завдань: Вхідна напруга: 10+n, де n – останні дві цифри номеру залікової книжки. Напруга стабілізації: для n<10 Uout=5…6В (будь-яка в цьому діапазоні), для n>10 Uout=10…12В(будь-яка в цьому діапазоні), Опір навантаження для n<10 Rl=1kОм, для n>10 Rl=3kОм.

Контрольні питання:

1. Опишіть принцип роботи параметричного стабілізатора.
2. Що таке диференціальний опір стабілітрона?
3. Як залежить ККД параметричного стабілізатора від різниці вхідної і вихідної напруги.
4. З яких міркувань обирається струм стабілітрона в параметричному стабілізаторі?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2
ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЕНСАЙНИХ СТАБІЛІЗАТОРІВ НАПРУГИ

Мета роботи: дослідження характеристик компенсаційного стабілізатора напруги на базі стабілітрона.

Постановка задачі: Реалізувати у вигляді моделі в симуляторі Tina-TI компенсаійний стабілізатор. Використовуючи відповідні засоби стимулятора, дослідити задані характеристики стабілізатора.

Короткі теоретичні відомості

Компенсаційний стабілізатор – це стабілізатор, який має негативний зворотний зв'язок, за рахунок якого вихідний параметр підтримується на заданому рівні (рис.2.1).

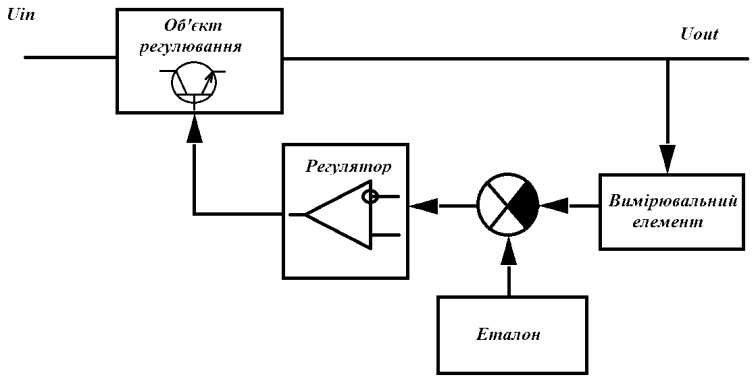


Рисунок 2.1 – Функціональна схема компенсаційного стабілізатора

Робота компенсаційного стабілізатора відбувається наступним чином: вимірювальний елемент вимірює вихідний параметр (напругу або струм), в пристрої порівняння виміряне значення порівнюється з еталонним і, і разі їх відмінності, виробляється сигнал неузгодження, який подається на вхід регулятора. Регулятор, у відповідності з необхідним законом регулювання, виробляє регулюючу дію на об'єкт регулювання, який змінює свій стан так, щоби вихідний параметр прийняв задане значення.

На рис. 2.2 зображена схема найпростішого компенсаційного стабілізатора послідовного типу.

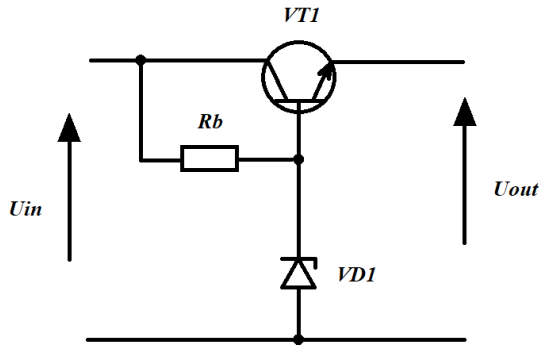


Рисунок 2.2 – Стабілізатор послідовного типу

R_b та $VD1$ складають параметричний стабілізатор, який є джерелом еталонної напруги для компенсаційного стабілізатора, компенсаційним опором якого є опір колектор-емітер R_{ce} транзистора $VT1$. Транзистор включено по схемі зі спільним коллектором, базовою напругою якого є напруга стабілітрона $VD1$. Вихідною напругою стабілізатора є напруга $U_{out} = U_{vd1} - U_{be}$, тобто є на 0,7 В меншою за напругу стабілізації стабілітрона. Включення транзистора зі спільним колектором в схему стабілізатора призводить до значного зменшення вихідного опору стабілізатора. При цьому також значно зменшується, в порівнянні з параметричним стабілізатором на стабілітроні і резисторі, коефіцієнт нестабільності вихідної напруги. Це відбувається внаслідок того, що на струм стабілізації стабілітрона впливає не струм навантаження, а в β разів менший базовий струм транзистора, що призводить до значно меншої зміни напруги стабілізації стабілітрону. Коефіцієнт стабілізації такого стабілізатора приблизно такий самий, як у параметричного стабілізатора, але трохи нижчий через вплив напруги база – емітер, яка також незначно, але змінюється при зміні струму бази транзистора.

Порядок виконання роботи:

1. В симуляторі Tina-TI зібрати схему параметричного та компенсаційного стабілізаторів стабілізатора, як показано на рис.2.3.

Напруга джерела живлення, вихідна напруга і опір навантаження задаються викладачем. Опір баластного резистора розрахувати самостійно. Самостійно також вибрати тип стабілітрона та транзистора.

2. За допомогою віртуального мультіметра виміряти вхідну (U_{in}) та вихідну (U_{out}) напруги стабілізаторів. У разі невідповідності вихідної напруги заданій провести аналіз і корегування схеми.
3. Визначити коефіцієнт стабілізації: Для цього збільшити вхідну напругу на 20% і за допомогою віртуального мультіметра виміряти вихідну напругу.
4. Визначити коефіцієнт нестабільності за напругою.
5. Визначити коефіцієнт нестабільності за струмом для параметричного і компенсаційного стабілізаторів при зміні опору навантаження на 50% вниз від заданого.
6. Порівняти значення виміряних коефіцієнтів для параметричного і компенсаційного стабілізаторів.
7. Розрахувати ККД параметричного і компенсаційного стабілізаторів.

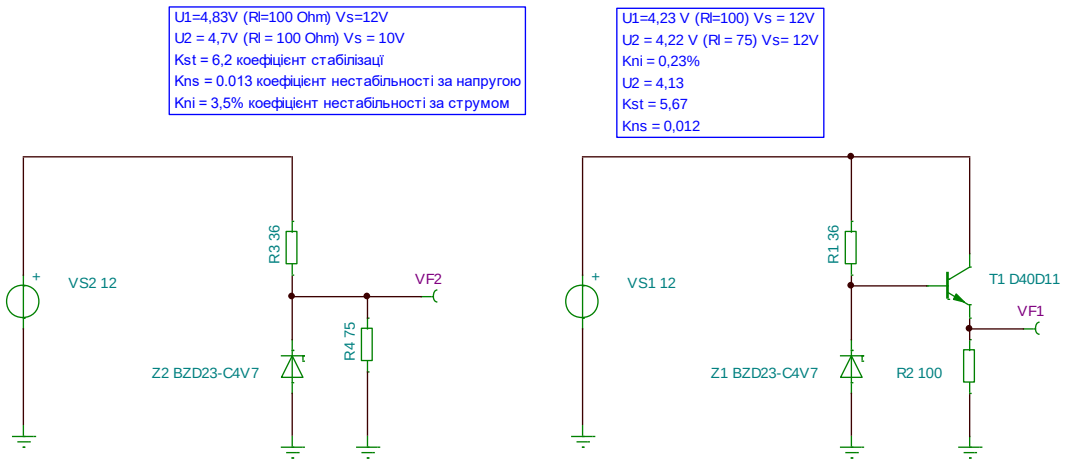


Рисунок 2.3 – Параметричний і компенсаційний стабілізатори

Варіанти завдань: Вхідна напруга: 10+n, де n – останні дві цифри номеру залікової книжки. Напруга стабілізації: для n<10 Uout=5…6В (будь-

яка в цьому діапазоні), для n>10 Uout=10…12В(будь-яка в цьому діапазоні), Опір навантаження для n<10 Rl=100 Ом, для n>10 Rl=150 Ом.

Контрольні питання:

1. Опишіть принцип роботи компенсаційного стабілізатора.
2. Чому коефіцієнт стабілізації напруги параметричного стабілізатора вище за коефіцієнт стабілізації напруги досліджуваного компенсаційного стабілізатора?
3. Чому коефіцієнт нестабільності за струмом компенсаційного стабілізатора є значно нижчим за коефіцієнт нестабільності за струмом параметричного стабілізатора.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3
ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НАПРУГИ ПЕРШОГО (ППН-1) ТА ДРУГОГО (ППН-2) РОДУ (ПОНИЖУЮЧОГО ТА ПІДВИЩУЧОГО)

Мета роботи: дослідження властивостей перетворювачів напруги першого та другого роду (ППН-1, ППН-2)

Постановка задачі: Реалізувати у вигляді моделі в симуляторі Tina-TI ППН-1 і ППН-2 з параметрами, заданими викладачем. Визначити вихідні напругі перетворювачів. Розрахувати граничне значення індуктивності дроселя (для переходу з режиму безперервного струму дроселя в режим переривчастого струму дроселя). Переконатися на моделі, що розраховане значення дійсно є критичним.

Короткі теоретичні відомості

Існує два режими роботи ППН – режим безперервного магнітного потоку дроселя і режим переривчастого магнітного потоку дроселя [2]. Режим роботи залежить від співвідношення таких параметрів перетворювача, як – індуктивність дроселя, частота комутації ключа, струм навантаження, коефіцієнт заповнення імпульсів управління. Для ППН-1 граничне значення індуктивності дроселя [2]:

$$L_{kr} = R_{lmax}\frac{1-d}{2f}$$

Для ППН-2

$$L_{kr} = R_{lmax}\frac{d(1-d)^2}{2f}$$

Де L_{kr} - критичне значення індуктивності дроселя, за якого відбувається перехід від режиму неперервного струму дроселя, в режим переривчастого струму дроселя.

R_{lmax} - максимальне значення опору навантаження, d - коефіцієнт заповнення імпульсів управління, f - частота комутації. При переході з одного

режиму в інший змінюється регулювальна характеристика перетворювачів, а також малосигнальна передатна характеристика. Це слід брати до уваги при проектуванні джерел живлення на основі ППН, тобто узгоджувати індуктивність дроселя з діапазоном змін опору навантаження при заданій частоті комутації і в заданому діапазоні змін коефіцієнту імпульсів управління.

Порядок виконання роботи:

1. В симуляторі Tina-TI зібрати схему ППН-1 та ППН-2, як показано на рис.3.1.

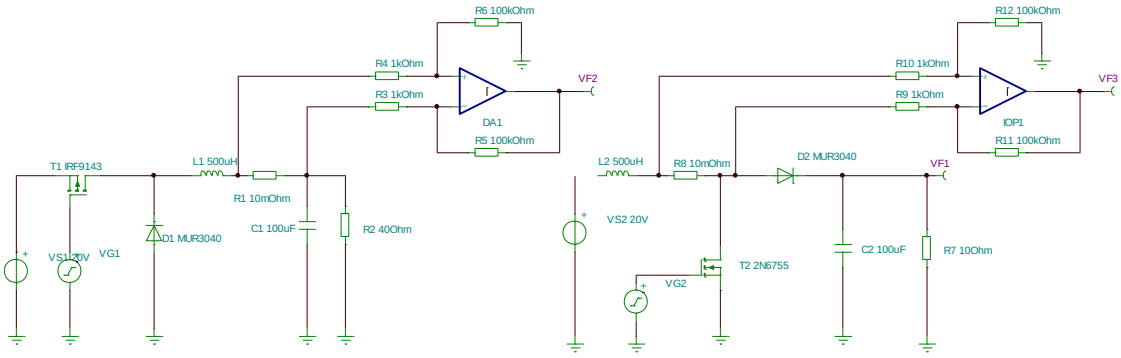


Рисунок 3.1 – Схеми ППН-1 та ППН-2

2. В генераторі сигналів управління вибрати прямокутний сигнал, встановити амплітуду 20 В і частоту, відповідно свого варіанту.
3. Напругу вхідного джерела напруги встановити рівною 20В. Ємність конденсатора фільтру встановити 100мкФ.
4. Опір навантаження встановити згідно свого варіанту.
5. Розрахувати критичне значення індуктивності дроселя і встановити його як номінальне значення індуктивності дроселя ППН.
6. Підключити осцилограф, виміряти вихідну напругу. На виході вимірювальної схеми спостерігати напругу, пропорційну струму дроселя. Переконатися, що схема дійсно працює в критичному режимі. Тобто, струм дроселя в момент комутації досягає нуля. Збільшуючи опір навантаження, спостерігати перехід схеми в режим переривчастих струмів дроселя. Як при цьому змінюється вихідна напруга?

7. Повернути початкове значення опору навантаження і змінювати його у напрямку зменшення. Спостерігати перехід схеми в режим безперервних струмів дроселя. Як при цьому змінюватиметься вихідна напруга?

Варіанти завдань: Частота комутації – 10+n*2кГц., де n – дві останні цифри номеру залікової книжки. Опір навантаження – 10+3* n Ом.

Контрольні питання:

1. Що таке критичне значення індуктивності дроселя. Як воно залежить від частоти комутації і опору навантаження?
2. Як критичне значення індуктивності дроселя залежить від співвідношення вхідної і вихідної напруг ППН?
3. Назвіть, які відомі вам параметри ППН змінюються при переході з режиму неперервних струмів дроселя в переривчастий? Як вони змінюються?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4
ДОСЛІДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ НА ОСНОВІ ППН-1. ЧАСТИНА 1

Мета роботи: дослідження елементів системи управління джерела живлення на основі ППН-1: ШИМ модулятора і драйвера Р – канального МДН транзистора.

Постановка задачі: Реалізувати у вигляді моделі в симуляторі Tina-TI ШИМ – модулятор з параметрами, заданими викладачем. Шляхом моделювання пересвідчитись в коректній роботі ШИМ-модулятора. Реалізувати в стимуляторі драйвер силового транзистора. Пересвідчитись в його коректній роботі.

Короткі теоретичні відомості

Повноцінне стабілізоване джерело електроживлення неможливо реалізувати, базуючись лише на ППН, оскільки вхідна напруга ППН може змінюватись, і наявність неідеальностей (активний опір дроселя, еквівалентний послідовний опір конденсатора) спричиняє залежність вихідної напруги від навантаження. Для компенсації впливу цих факторів необхідна система автоматичного регулювання, яка би змінювала коефіцієнт заповнення імпульсів управління таким чином, щоб нейтралізувати вплив на вихідну напругу різних дестабілізуючих факторів.

Типова система автоматичного управління ключовим елементом ППН складається з таких функціональних частин:

1. Джерела опорної напруги;
2. Підсилювача сигналу неузгодження, з можливістю підключення елементів для формування бажаної АЧХ;
3. ШИМ – модулятора, який в свою чергу, складається з генератора сигналів з напругою, що лінійно змінюється від мінімального до максимального значення за період (це можуть бути генератори

пилоподібної напруги та генератори трикутних коливань) і компаратора, один з входів якого подається сигнал з генератора, а на другий – сигнал з входу підсилювача сигналу неузгодження;

4. Драйверу силового ключа ППН.

Зазвичай, всі вищевказані вузли виконуються на одному кристалі у складі інтегральних контролерів джерел живлення. Структурна схема типового контролера приведена на рис. 4.1.

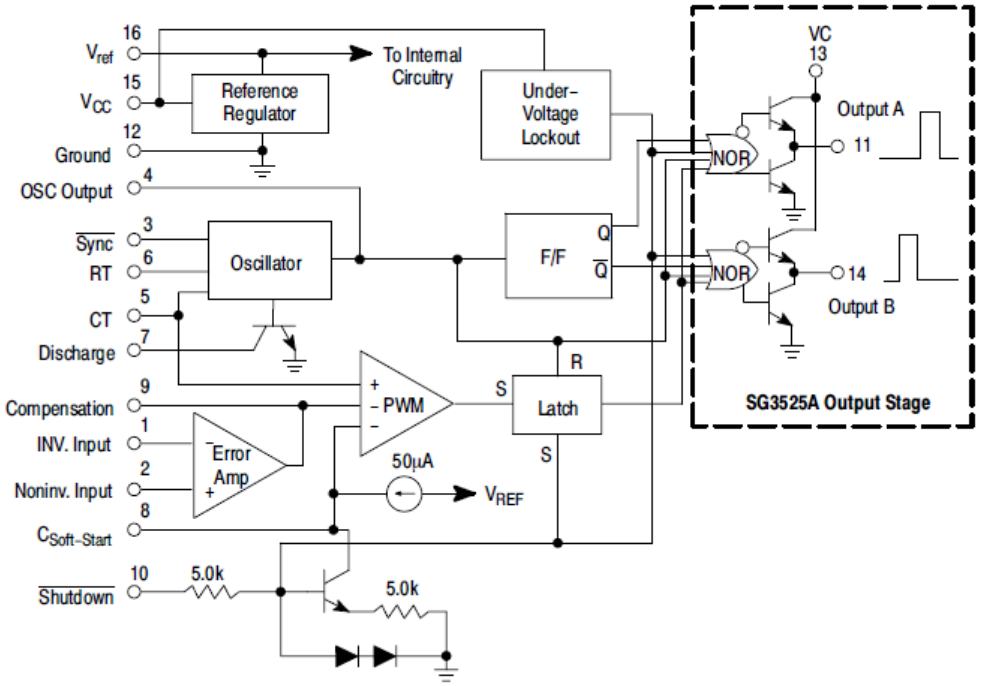


Рисунок 4.1 – Структурна схема контролеру SG355A

На цій структурній схемі наявні всі вище перелічені функціональні вузли, а також інші допоміжні кола. Так, Reference Regulator – це джерело опорної напруги, з якою буде порівнюватись вихідна напруга джерела живлення, Error Amp – підсилювач сигналу неузгодження, його входи та вихід виведені назовні для підключення елементів корекції, Блоки Oscillator і PWM складають ШИМ модулятор, причому блок Oscillator є генератором пилоподібного сигналу, блок PWM – компаратором. Мультивібратор F/F, RS тригер Latch та блок SG355A Output Stage складають драйвер вихідних ключів.

(цей контролер розрахований також для використання в двотактних схемах, тому драйвер двотактний, з протифазними сигналами на виході). До допоміжних, але не менш важливих блоків контролера відносяться; блок Under Voltage Lockout – який не дозволяє контролеру працювати при напрузі живлення, меншою за певну величину, блок з виводом Shutdown (транзистор і джерело струму 50uA) – захист від перевантаження. Метою цієї частини лабораторної роботи є дослідження властивостей ШИМ модулятора.

Складовою частиною будь-якого ШИМ – модулятора є генератор пилоподібних або трикутних коливань, який визначає частоту роботи ШИМ – одного з основних параметрів імпульсного джерела живлення. В даній роботі пропонується дослідити роботу генератора трикутних коливань, схема якого приведена на рис. 4.2.

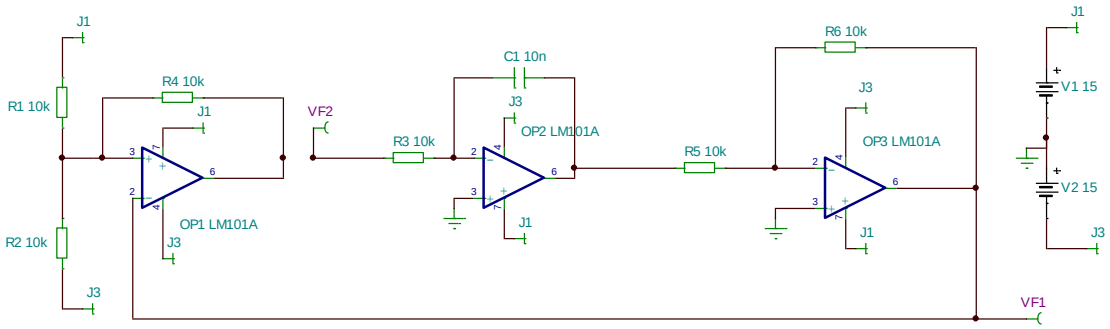


Рисунок 4.2 – Схема генератора трикутних коливань

Схема містить: компаратор з гістерезисом на ОП OP1, інтегратор на ОП OP2, інвертор на ОП OP3. Робота схеми полягає в наступному: через наявність позитивного зворотного зв’язку вихід компаратора в початковий момент встановлюється або в максимум, або в мінімум напруги. (Максимальна напруга на виході компаратора досягає майже рівня позитивної напруги живлення, мінімальна напруга досягає рівня негативної напруги живлення). Таким чином, на вході інтегратора з’являється постійна напруга тої ти іншої полярності. Припустимо, що на вході інтегратора є позитивна постійна напруга. На виході інтегратора буде присутній інвертований інтеграл по часу

від цієї напруги, тобто, лінійно спадаюча напруга. На виході інвертора буде лінійно-наростаюча напруга. Коли рівень цієї напруги досягне рівня напруги на неінвертуючому вході компаратора, напруга на виході компаратора поміняє знак, і процес повториться, тільки там, де напруга спадала, вона буде наростати, і навпаки. Таким чином, на виході інвертора сформується напруга трикутної форми. Амплітуду трикутної напруги для цього генератора можна обчислити по формулі:

$$U_{triangl} = \frac{R^2}{RR_{fb} + R(R + R_{fb})} U_s, \quad (4.1)$$

де $R = R1 = R2$, $R_f = R_4$ (згідно рис. 4.2) U_s напруга живлення операційних підсилювачів.

Період трикутних коливань визначається по формулі:

$$T = \frac{4R^2}{RR_f + R(R + R_f)} R_i C_i \quad (4.2)$$

Порядок виконання роботи:

1. В стимуляторі Tina-TI зібрати генератор трикутних коливань, як показано на рис.1 з тими самими номіналами елементів.
2. За допомогою віртуального осцилографа дослідити форму сигналів на виході компаратора і виході генератора.
3. Використовуючи формулу (4.1) визначити номінали відповідних резисторів, щоб отримати амплітуду трикутних коливань, яка визначається вашим варіантом.
4. Використовуючи формулу (4.2) визначити номінали відповідних елементів для отримання частоти трикутних коливань, яка визначається вашим варіантом.
5. Скорегувати модель генератора трикутних коливань, підставивши в неї розраховані номінали елементів і пересвідчитись в правильності розрахунків.

Варіанти завдань: Частота коливань генератора f=10+n кГц , де n- дві останні цифри номеру залікової книжки. Амплітуда коливань для n<10 5В, для n>10 10В.

Контрольні питання:

1. Що таке коефіцієнт заповнення імпульсів управління?
2. Чи залежить вихідна напруга ППН від величини навантаження при ідеальних елементах ППН?
3. Чи залежить вихідна напруга ППН від вхідної напруги при ідеальних елементах ППН?
4. Поясніть принцип роботи ШИМ – модулятора.
5. Виведіть формули (4.1) і (4.2).
6. Запропонуйте свій варіант схеми генератора трикутних коливань.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5
ДОСЛІДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ НА ОСНОВІ ППН-1. ЧАСТИНА 2

Мета роботи: дослідження елементів системи управління джерела живлення на основі ППН-1: ШИМ модулятора і драйвера Р – канального МДН транзистора.

Постановка задачі: Реалізувати у вигляді моделі в симуляторі Tina-TI ШИМ – модулятор з параметрами, заданими викладачем. Шляхом моделювання пересвідчитись в коректній роботі ШИМ-модулятора. Реалізувати в стимуляторі драйвер силового транзистора. Пересвідчитись в його коректній роботі.

Короткі теоретичні відомості

Для отримання ШИМ – модулятора генератор трикутних коливань слід доповнити компаратором, на один з входів якого подаватиметься трикутний сигнал з генератора, синтезованого в 1 частині лабораторної роботи, на другий вхід подаватиметься сигнал з виходу підсилювача сигналу неузгодження. Крім того, той вхід, на який подається сигнал з виходу підсилювача сигналу неузгодження, необхідно забезпечити схемою обмеження рівня сигналу для обмеження діапазону зміни коефіцієнту заповнення імпульсів управління. Наприклад такою, як показано на рис. 5.1.

Схема на рис.5.1 складається з регульованого джерела опорної напруги на мікросхемі TL431 (основні параметри приведені в додатку 2), інвертуючого підсилювача з коефіцієнтом підсилення 1 на OP1 для отримання негативної опорної напруги, двох нелінійних підсилювачів (логарифмічних) на OP7 і OP8.

Місцезнаходження моделі мікросхеми TL431 в симуляторі показано на рис.5.2.

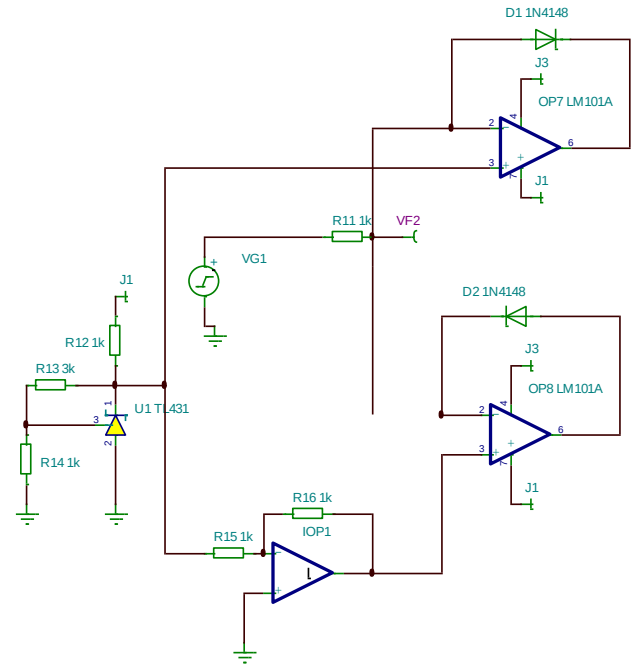


Рисунок 5.1 – Схема обмеження рівня сигналу

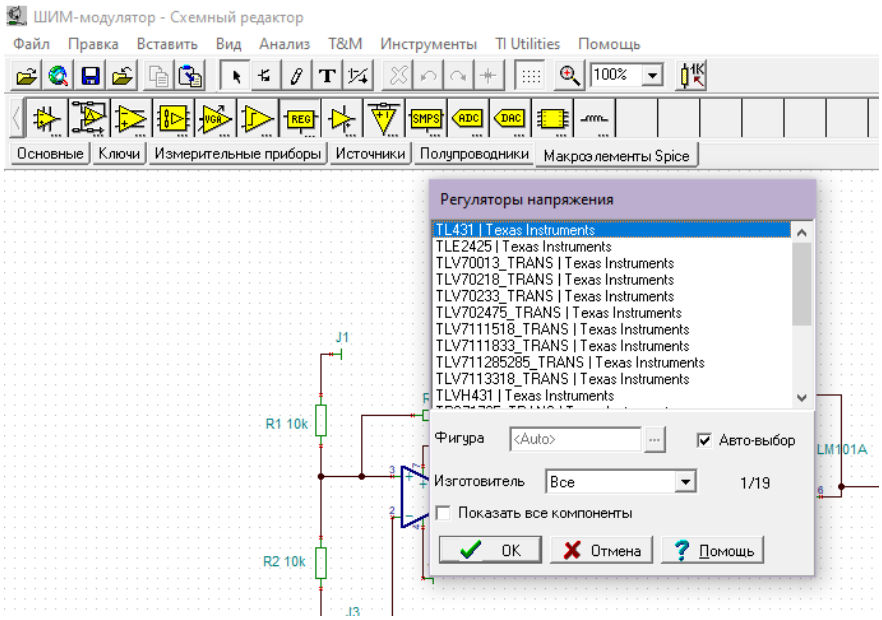


Рисунок 5.2 – Місцезнаходження моделі TL431: вкладка Макроэлементы Spice.

Функціонує схема наступним чином: вхідний сигнал (VG1) через резистор R11 подається на інвертуючі входи OP7 і OP8. На неінвертуючий вхід OP7 подається позитивна опорна напруга з TL431, на неінвертуючий вхід OP8

подається негативна опорна напруга з виходу IOP1. Поки вхідний сигнал знаходиться в межах:

$$-U_{ref} < U_{in} < U_{ref}, \quad (5.1)$$

де U_{in} - вхідний сигнал, U_{ref} - опорна напруга, він передається на вихід схеми обмеження без змін. Як тільки рівень вхідного сигналу виходить за межі (5.1), відкриваються або діод D1, або діод D2, в залежності від полярності вхідного сигналу. Це спричиняє обмеження вихідного сигналу (точка VF2) на рівні $\pm U_{ref}$. Вид вихідного та вхідного сигналів схеми обмеження рівня показано на рис.5.3.

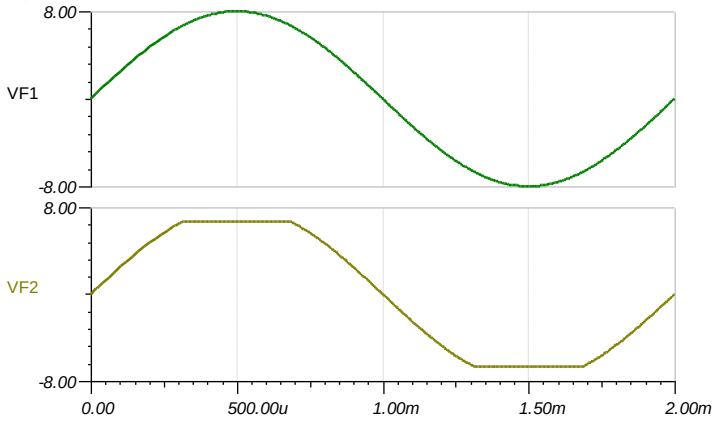


Рисунок 5.3 – Сигнали на вході (верхня крива) та на виході (нижня крива) схеми обмеження рівня

Повна схема ШИМ модулятора приведена на рис.5.4.

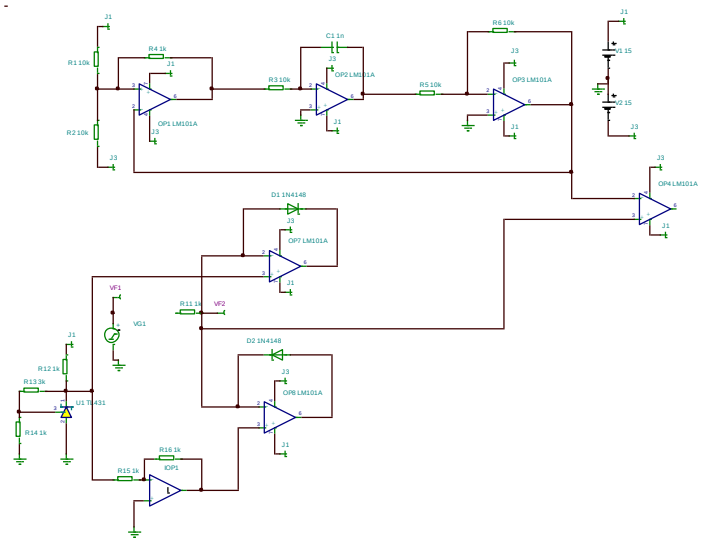


Рисунок 5.4 – ШИМ модулятор

Залежність коефіцієнту заповнення імпульсів управління від вхідного сигналу дається формулою:

$$D = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{U_{signal}}{U_{triangl}}\right) \qquad (5.1)$$

Де U_{signal} - напруга вхідного сигналу;

$U_{triangl}$ - амплітуда пилоподібного сигналу.

Сигнали ШИМ модулятора приведені на рис.5.5.

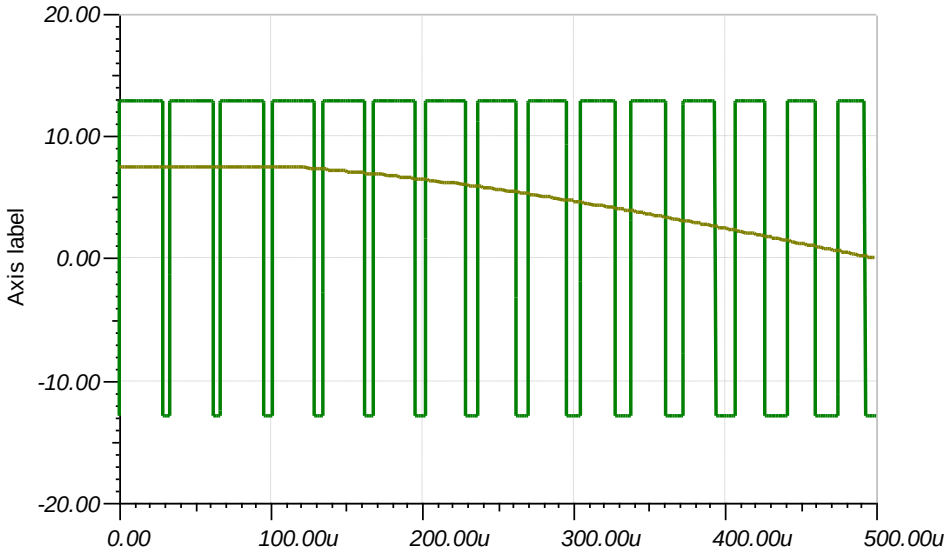


Рисунок 5.5 – Сигнали ШИМ-модулятора

Порядок виконання роботи:

1. В симуляторі Tina-TI зібрати схему обмеження рівня сигналу.
2. За допомогою резисторів зворотного зв'язку мікросхеми TL431 (R13, R14 рис.5.1, $U_{refTL431} = 2{,}5\text{В}$, струмом I_{ref} знехтувати. (Додаток 2.) і використовуючи формулу (5.1) настроїти схему обмеження рівня сигналу таким чином, щоб ШИМ – модулятор забезпечував зміну коефіцієнту заповнення імпульсів управління в діапазоні $(0{,}1 < D < 0{,}9)$. Необхідні для розрахунку параметри генератора трикутних коливань взяти з попередньої роботи.

3. Зібрати в симуляторі Tina-TI ШИМ модулятор по схемі рис. 5.3. Номінали елементів генератора трикутних коливань повинні відповідати вашому варіанту з лабораторної роботи №4.
4. Подаючи на вхід схеми обмеження рівня постійну напругу величиною $\pm U_{triangl}$ пересвідчитися, що схема обмеження рівня забезпечує діапазон зміни коефіцієнту заповнення імпульсів управління $(0{,}1 < D < 0{,}9)$.

Контрольні питання:

1. Яким чином забезпечується негативна опорна напруга в схемі обмеження рівня на рис.5.1?
2. Пояснити принцип роботи схеми обмеження рівня на рис.5.1.
3. Вивести формулу (5.1).

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6
ДОСЛІДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ НА ОСНОВІ ППН-1. ЧАСТИНА 3

Мета роботи: дослідження елементів системи управління джерела живлення на основі ППН-1: ШИМ модулятора і драйвера Р – канального МДН транзистора.

Постановка задачі: Реалізувати у вигляді моделі в симуляторі Tina-TI драйвер р-канального МДН транзистора. Дослідити вплив драйвера на процес комутації МДН транзистора, порівнявши його з комутацією транзистора безпосередньо від компаратора ШИМ модулятора.

Короткі теоретичні відомості

Безпосереднє управління затвором потужного транзистора (біполярного або польового) від компаратора ШИМ модулятора є небажаним, оскільки вхід транзистора (база у випадку біполярного або затвор у випадку польового транзисторів) для забезпечення процесів комутації потребує певного рівня потужності, який, зазвичай, компаратор ШИМ модулятора забезпечити не в змозі. Тому, для забезпечення комутації силових ключів з мінімальними втратами використовуються спеціальні схеми – драйвери силових ключів. Для біполярних і польових ключів ці схеми принципово відрізняються через те, що процеси комутації біполярного і польового транзисторів є різними. Оскільки останнім часом перевага надається саме польовим транзисторам, в подальшому будемо розглядати драйвери польових транзисторів.

Якщо вхідна напруга джерела живлення на основі ППН-1 є меншою 20 В, є смисл в якості силового ключа застосувати Р – канальний МДН транзистор, оскільки в цьому випадку виток транзистора можна підключити до джерела вхідної напруги і для відкриття транзистора необхідно буде затвор транзистора підключити на «землю», як це показано на рис.6.1.

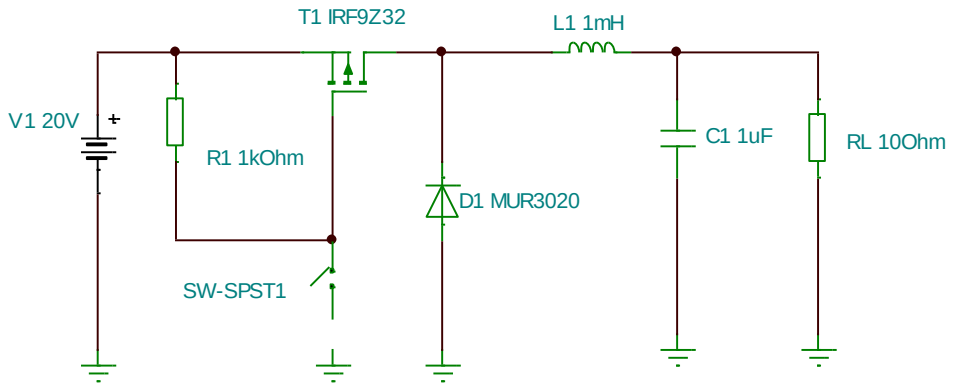


Рисунок 6.1 – ППН-1 з Р-канальним МДН транзистором в якості ключа

Найпростіший варіант драйвера Р-канального МДН-транзистора складається з npn біполярного транзистора і резистора, який включено між затвором і витоком МДН-транзистора (рис.6.2).

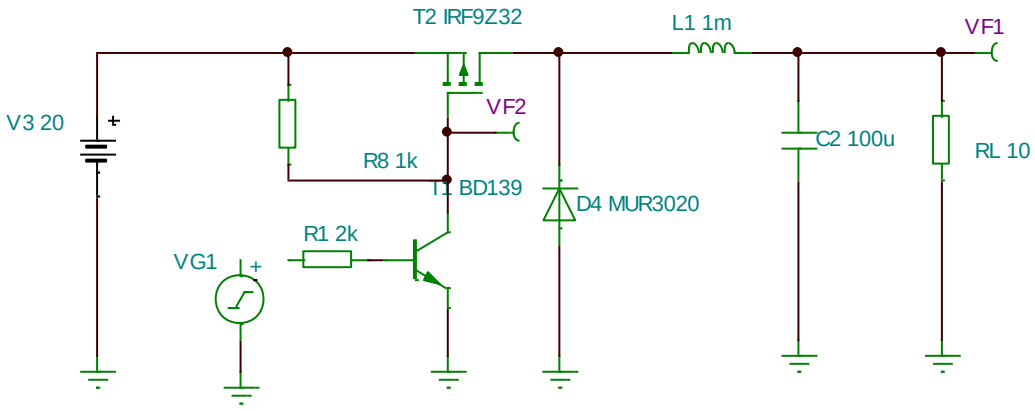


Рисунок 6.2 – Найпростіший варіант драйвера Р-канального МДН-транзистора

Цей драйвер має певні недоліки. Для якомога скорішого розряду ємності затвору МДН – транзистора, що потрібно для швидкого закриття транзистора, номінал затворного резистора має бути якнайменшим (резистор R8 на рис.6.2). З іншого боку, при малій величині цього резистора значно виросте розсіювана потужність при відкритому транзисторі драйвера. Причому, як в самому резисторі, так і в транзисторі.

На практиці використовується вдосконалена схема драйвера (рис.6.3) [3].

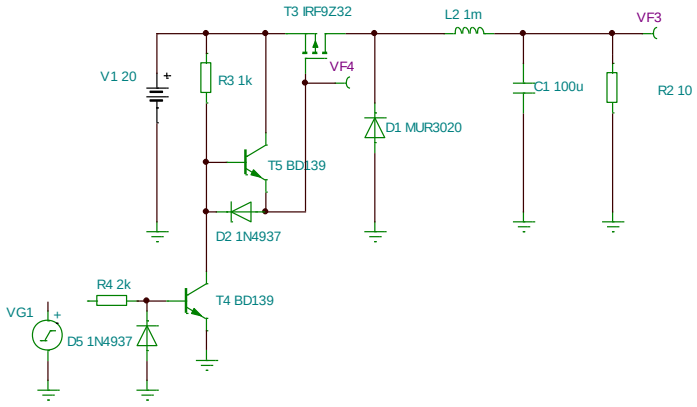


Рисунок 6.3 – Схема вдосконаленого драйвера

Принцип роботи схеми полягає у наступному: при подачі позитивної напруги на базу транзистора Т4 він відкривається і через нього і діод D2 починає протікати струм заряду ємності затвора. При цьому на діоді D2 з'являється напруга, полярність якої закриває транзистор Т5. Після того, як напруга на базі транзистора Т4 зникає, або змінює знак на протилежний, транзистор Т4 закривається, і відкривається транзистор Т5. Через відкритий транзистор Т5 ємність затвора МДН транзистора швидко розряджається, що сприяє швидкому закриттю транзистора.

Порядок виконання роботи:

1. В симуляторі Tina-TI зібрати схему драйвера за рис.2. Частоту прямокутного сигналу встановити відповідно свого варіанту, амплітуду сигналу встановити $U_s = 10B$. Номінали решти елементів встановити такими, як показано на рис.6.1.
2. Підключити віртуальний осцилограф, спостерігати і пояснити форму сигналу на затворі транзистора, за допомогою курсору виміряти вихідну напругу U_{out}.
3. По формулі

$$t_{close} = T\left(\frac{U_{out}}{U_{in}} - 0{,}5\right) \qquad (6.1)$$

визначити час запирання ключа. $U_{in} = 20\text{В}$.

4. З інтервалом 100Ом збільшувати номінал резистора R8. На кожному кроці визначати t_{close}. Збільшення номіналу резистора R8 проводити до втрати керованості МДН транзистором. Визначити, при якому номіналі резистора R8 драйвер не забезпечує перемикання МДН транзистора.
5. В симуляторі Tina-TI зібрати схему драйвера за рис.6.2. За допомогою віртуального осцилографа спостерігати форму сигналу на затворі МДН транзистора. Пояснити різницю між формами сигналу драйверу на рис.6.2 і рис.6.3

Варіанти завдань: Частота генератора прямокутних коливань f=10+n кГц , де n- дві останні цифри номеру залікової книжки.

Контрольні питання:

1. Виведіть формулу (6.1).
2. Який фронт імпульсу з пп.2,5 відповідає за відкриття, а який за закриття МДН транзистора.
3. Чому зменшення номіналу резистора R8 на рис.6.2 спричиняє зменшення часу закривання МДН транзистора?

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дизайн цифрових та аналогових схем. Частина 1: лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» / Н.О. Лащевська, І.М. Кирпатенко, А.В. Мовчанюк, В.О. Адаменко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл 705 Кбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 47 с.
2. Severns R., Bloom G. Modern DC-to-DC swithmode converter circuits. Van Nostrand Reinhold Co. Springer; Softcover reprint of the original 1st ed. 1985 edition (April 21, 2014)
3. Marty Brown Power Supply Coocbook. Second edition. Elsevier Science. 200 Wheeler Road, Burlington, MA 01803, 2005 –p. 178.

Додатки

Додаток 1

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Кафедра назва кафедри

ЗВІТ

про виконання лабораторної роботи № __

«ТЕМА ЛАБОРОТОРНОЇ РОБОТИ»

Зараховано
_____
Посада

_____ _____
П.І.Б Підпис

"___" _____202_ р.

Виконав(ла)
студент(ка) групи _____:

_____ _____
П.І.Б Підпис

"___" _____202_ р.

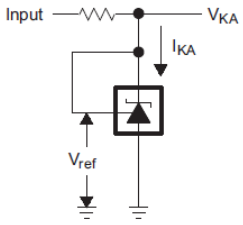
TL431, TL432 Precision Programmable Reference

1 Features

- Reference voltage tolerance at 25°C
  - 0.5% (B grade)
  - 1% (A grade)
  - 2% (Standard grade)
- Adjustable output voltage: V_{ref} to 36 V
- Operation from −40°C to 125°C
- Typical temperature drift (TL43xB)
  - 6 mV (C temp)
  - 14 mV (I temp, Q temp)
- Low Output Noise
- 0.2-Ω Typical output impedance
- Sink-current capability: 1 mA to 100 mA

2 Applications

- Adjustable voltage and current referencing
- Secondary side regulation in flyback SMPSs
- Zener replacement
- Voltage monitoring
- Comparator with integrated reference



Simplified Schematic

3 Description

The TL431LI / TL432LI are pin-to-pin alternatives to TL431 / TL432. TL43xLI offers better stability, lower temperature drift ($V_{I(dev)}$), and lower reference current (I_{ref}) for improved system accuracy.

The TL431 and TL432 devices are three-terminal adjustable shunt regulators, with specified thermal stability over applicable automotive, commercial, and military temperature ranges. The output voltage can be set to any value between V_{ref} (approximately 2.5 V) and 36 V, with two external resistors. These devices have a typical output impedance of 0.2 Ω. Active output circuitry provides a very sharp turn-on characteristic, making these devices excellent replacements for Zener diodes in many applications, such as onboard regulation, adjustable power supplies, and switching power supplies. The TL432 device has exactly the same functionality and electrical specifications as the TL431 device, but has different pinouts for the DBV, DBZ, and PK packages.

Both the TL431 and TL432 devices are offered in three grades, with initial tolerances (at 25°C) of 0.5%, 1%, and 2%, for the B, A, and standard grade, respectively. In addition, low output drift versus temperature ensures good stability over the entire temperature range.

The TL43xxC devices are characterized for operation from 0°C to 70°C, the TL43xxI devices are characterized for operation from –40°C to 85°C, and the TL43xxQ devices are characterized for operation from –40°C to 125°C.

Device Information

PART NUMBER (1)	PACKAGE (PIN)	BODY SIZE (NOM)
TL43x	SOT-23-3 (3)	2.90 mm × 1.30 mm
	SOT-23-5 (5)	2.90 mm × 1.60 mm
	SOIC (8)	4.90 mm × 3.90 mm
	PDIP (8)	9.50 mm × 6.35 mm
	SOP (8)	6.20 mm × 5.30 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

8 Parameter Measurement Information

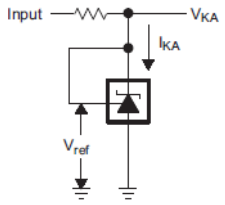


Figure 8-1. Test Circuit for $V_{KA} = V_{ref}$

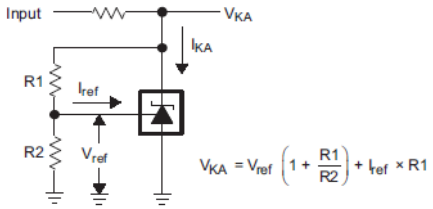


Figure 8-2. Test Circuit for $V_{KA} > V_{ref}$

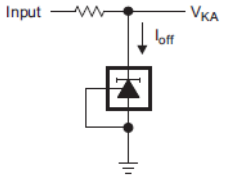


Figure 8-3. Test Circuit for I_{off}

Copyright © 2022 Texas Instruments Incorporated