

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до дипломного проектування за темою «Автоматизоване проектування перетворювачів постійної напруги» за освітніми програмами «Електричні та електронні апарати, Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв» для студентів спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка всіх форм навчання

Методичні вказівки до дипломного проектування за темою «Автоматизоване проектування перетворювачів постійної напруги» за освітніми програмами «Електричні та електронні апарати, Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв» для студентів спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка всіх форм навчання. /Укл.: М.О. Поляков, – Запоріжжя: Національний університет «Запорізька політехніка», 2022.– 16 с.

Укладач: М.О. Поляков, доцент, д. т. н.

Рецензент: В.В. Василевський, ст. викл., к. т. н.

Відповідальний

за випуск: М.О. Поляков, доцент, д. т. н.

Затверджено  
на засіданні кафедри  
«Електричні та  
електронні апарати»  
Протокол № 7  
від «30» березня 2022

Затверджено НМК ЕТФ  
Протокол № 6  
Від 02.06. 2022 р.

**ЗМІСТ**

Вступ.....	4
1. Топології перетворювачів постійної напруги.....	5
2. Засоби автоматизованого проектування .....	7
3. Порядок проектування.....	9
Рекомендована література.....	16

## ВСТУП

У більшості випадків перетворювачі постійного струму в постійний використовуються як регулятори постійного струму, будучи основою багатьох видів вторинних джерел живлення (ВДЖ).

З розвитком силової електроніки стали використовуватися імпульсні перетворювачі, у яких електронні прилади працюють у ключовому режимі, що суттєво покращує їх енергетичні показники. Відомий [1, 2] ряд типових схем (топологій) імпульсних перетворювачів. Проектування імпульсних перетворювачів ручним способом досить трудомісткий процес. Водночас багато вузлів імпульсних перетворювачів випускаються світовими виробниками у вигляді інтегральних мікросхем. Багато фірм, як засоби підтримки процесу проектування, пропонують пакети автоматизованого проектування імпульсних перетворювачів на своїй елементній базі. Один з таких пакетів вивчається в методичних вказівках.

Компанія Monolithic Power Systems (MPS) [3] є виробником електронних елементів для побудови перетворювачів та розробником інструментів для проектування. Сайт компанії: [monolithicpower.com](http://monolithicpower.com). Номенклатура продукції включає понад 700 перетворювачів постійного струму на постійний. Список пакетів для проектування включає DC DC Designer Online/Windows, AC DC Designer Tool та інші.

Завданням проектанта є формування вхідних даних до перетворювача. На підставі цих даних пакет проектування формує електричну принципову схему, перелік елементів, складальне креслення друкованого вузла, креслення друкованої плати та залежність електричних втрат у перетворювачі від режиму його роботи. Всі ці результати можуть бути використані в пояснювальній записці та графічній частині проекту. Вони дозволяють істотно зменшити трудомісткість проектування перетворювача.

## 1. ТОПОЛОГІЇ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ.

Відомі [1] наступні різновиди (топології) імпульсних перетворювачів:

a. buck — [Понижувальний перетворювач напруги](#)

[https://uk.wikipedia.org/wiki/Понижувальний\\_перетворювач\\_напруги](https://uk.wikipedia.org/wiki/Понижувальний_перетворювач_напруги);

b. boost — [Підвищувальний широтно-імпульсний перетворювач](#)

[https://uk.wikipedia.org/wiki/Підвищувальний\\_широтньо-імпульсний\\_перетворювач](https://uk.wikipedia.org/wiki/Підвищувальний_широтньо-імпульсний_перетворювач);

c. buck-boost — [Інвертуючий широтно-імпульсний перетворювач](#)

[.wikipedia.org/wiki/Інвертуючий\\_широтньо\\_імпульсний\\_перетворювач](https://uk.wikipedia.org/wiki/Інвертуючий_широтньо-імпульсний_перетворювач);

d. cuk — [Перетворювач Cuk](#)

[https://uk.wikipedia.org/wiki/Перетворювач\\_Cuk](https://uk.wikipedia.org/wiki/Перетворювач_Cuk);

e. zeta — [Перетворювач Zeta](#);

f. SEPIC — [Перетворювач SEPIC](#)

[https://uk.wikipedia.org/wiki/Перетворювач\\_SEPIC](https://uk.wikipedia.org/wiki/Перетворювач_SEPIC).

Після назви перетворювача у списку наведена WEB сторінка зі статтею з описом роботи перетворювача.

Розглянемо наприклад понижувальний перетворювач напруги. Це перетворювач, призначений для перетворення високої напруги в більш низьку стабілізовану напругу. Містить ключовий транзистор, діод, фільтр і навантаження. Схеми перетворювача наведені на рис. 1.1 та 1.2. Перетворювач передає енергію невеликими порціями від джерела живлення в навантаження. Незважаючи на збільшені, в порівнянні з лінійними стабілізаторами, габарити і порівняно великий рівень пульсацій, ці перетворювачі мають істотну перевагу - високий ККД. Тому вони знаходять широке застосування в електронній апаратурі. Напруга  $U_n(t)$  на виході регулюючого елемента є імпульсною. Для отримання на навантаженні постійної напруги, яка дорівнює середньому значенню вихідної напруги  $U_n$ , між

регулюючим елементом і навантаженням включають згладжуючий фільтр. Найчастіше в імпульсних регуляторах використовують індуктивний фільтр.

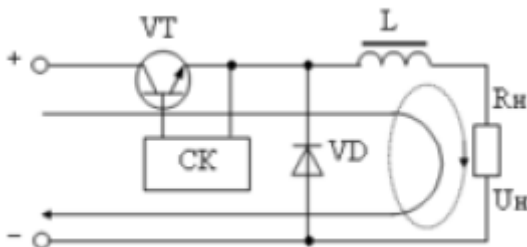


Рисунок 1.1 – Понижуючий перетворювач напруги з L фільтром

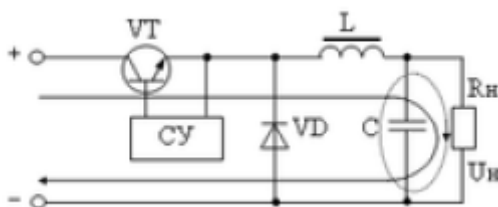


Рисунок 1.2 – Понижуючий перетворювач напруги з LC фільтром

На відміну від звичайного L- чи LC-фільтра, в даному випадку фільтр обов'язково доповнюється діодом VD, який називають зворотнім діодом. Цей діод пропускає струм дроселя L в ті інтервали часу, коли транзистор VT закритий (ключ розімкнутий). Коли система керування СК відкриває транзистор VT (ключ замикається), від джерела живлення  $U_d$  в навантаження  $R_n$  протікає струм по ланцюгу, позначеному безперервною стрілкою. У цей інтервал часу  $0 \dots t_i$  діод VD закритий, струм зростає і в елементах фільтра L і C накопичується енергія. При закриванні транзистора (розмиканні

ключа ) навантаження  $R_n$  від'єднується від джерела живлення  $U_d$  і струм в ньому підтримується за рахунок енергії, яка була накопичена в елементах фільтра. У цей інтервал часу  $t_1...T$  конденсатор  $C$  розряджається через навантаження  $R_n$ . Струм дроселя  $L$  протікає через навантаження  $R_n$  і замикається через діод  $VD$ , який в цей час відкритий. Внаслідок цього енергія, яка була накопичена в дроселі, передається до навантаження. Коло протікання струму дроселя в інтервалі часу  $t_1...T$  показано перервною стрілкою.

## 2. ЗАСОБИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

MPS DC-DC Designer — це інструмент моделювання, який допомагає зручно створювати та аналізувати рішення для живлення за допомогою мікросхем MPS DC-DC.

З MPS DC-DC Designer ви можете:

- a. знайдіть і виберіть мікросхему MPS DC-DC;
- b. спроектуйте перетворювач живлення для вибраної мікросхеми;
- c. аналіз ефективності проектування; стаціонарний режим, перехідний процес навантаження, аналіз циклу, ефективність тощо;
- d. автоматично або вручну надайте повне рішення для живлення за допомогою вибраного чіпа. MPS DC-DC Designer може надати вам рекомендований дизайн автоматично з вибраним чіпом або дозволити редагувати компоненти та параметри вручну.

MPS також пропонує онлайн-версію DC-DC Designer.

Вимоги до програмного забезпечення:

- лише для Windows (Win XP, Win7, Win8 або Win10);
- NET Framework 2.0 або вище.

Пакет DC-DC Designer має вбудований посібник із проектування, зміст якого збережено у файлі MPS Designer Help for Web Version.docx.

Вигляд початкового екрану програми DC-DC Designer наведено на рис.2.1.

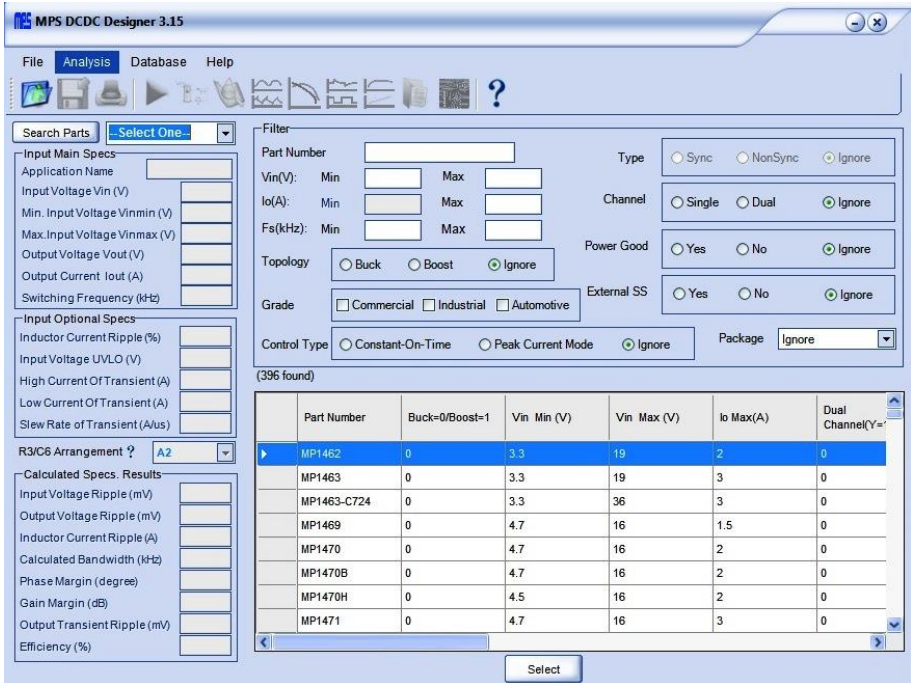


Рисунок 2.1 – Вигляд початкового екрану програми DC DC Designer

Завдання проєктанта вибрати мікросхему конвертора зі списку. Кількість варіантів можна зменшити застосувавши фільтр правої частини екрану.

Вікно програми DC DC Designer має функціональне та піктографічне меню, панелі специфікації головних і додаткових початкових параметрів, панель специфікації розрахованих результатів, панель фільтра параметрів основної інтегральної мікросхеми та панель зі списком доступних мікросхем.

У функціональному меню є традиційні опції File и Help. Опція Analysis визначає головні результати процесу



проектування: електричної схеми (Schematic), параметри перетворювача (Spec Analysis), типові часові діаграми (Waveform), амплітудне - та фазочастотні характеристики (Small Signal Analysis), перехідні пульсації на виході (Transient Output Ripple), коефіцієнт корисної дії (Efficiency Power Loss Analysis), перелік елементів (Bill of Materials), складальне креслення та шари друкованої плати (Layout Info). В опції Database наведені бази даних за доступними елементами перетворювача.

Піктографічне меню дає швидкий доступ до головних опцій меню Analysis. Приклади екранів пакета наведені у наступному розділі.

### 3. ПОРЯДОК ПРОЕКТУВАННЯ

У процесі проектування використовуються наступні позначення параметрів:

$V_{in}$  – номінальна вхідна напруга, В;

$V_{inmin}$  – мінімальна вхідна напруга, В;

$V_{inmax}$  – максимальна вхідна напруга, В;

$V_{out}$  – номінальна вихідна напруга, В;

$I_{out}$  – номінальний вихідний струм, А;

$F$  – частота перемикавання, кГц;

$I_r$  – пульсація струму індуктора, %;

$V_{inr}$  – напруга пульсації на вході, мВ;

$V_{outr}$  – напруга пульсації на виході, мВ;

$I_r$  – струм пульсації в індукторі А;

$G_m$  – прибуток коефіцієнта підсилення, dB;

$\Phi_m$  – прибуток фази, град.;

$\Delta\phi$  – розрахована смуга пропускання;

$V_{outt}$  - напруга перехідних пульсацій на виході, мВ

ККД – коефіцієнт корисної дії, %.

Процес проектування починається з установки параметрів фільтру мікросхем MPS. Якщо не застосовувати ніяких обмежень, то список складається із 396 мікросхем (на час

створення цих вказівок). У якості приклада спроекуємо перетворювач 12/3,3 В, 1А. Тобто понижуючий (buck) перетворювач. Вхідна напруга змінюється у діапазоні від 10 до 14 В. Перетворювач повинен бути спроекувано у промислового виконання. Інші вимоги ми ігноруємо. Панель фільтра, що відповідає цим вимогам та панель зі списком доступних мікросхем наведено на рис. 3.1.

Filter

Part Number

Vin(V): Min  Max

Io(A): Min  Max

Fs(kHz): Min  Max

Topology  Buck  Boost  Ignore

Grade  Commercial  Industrial  Automotive

Control Type  Constant-On-Time  Peak Current Mode  Ignore

Type  Sync  NonSync  Ignore

Channel  Single  Dual  Ignore

Power Good  Yes  No  Ignore

External SS  Yes  No  Ignore

Package

(13 found)

	Part Number	Buck=0/Boost=1	Vin Min (V)	Vin Max (V)	Io Max(A)	Dual Channel(Y='
	MPM3530	0	4.5	55	3	0
	MPQ28261	0	4.5	21	3	0
▶	MPQ4420	0	4	30	2	0
	MPQ4420A	0	4	36	2	0
	MPQ4420H	0	4	36	2	0
	MPQ4423	0	4	30	3	0
	MPQ4423A	0	4	36	3	0
	MPQ4423H	0	4	36	3	0

Select

Рисунок 3.1 – Панель фільтра параметрів основної інтегральної мікросхеми та панель зі списком доступних мікросхем.

Як бачимо у списку залишилось 13 мікросхем. Обираємо, наприклад, MPQ4420 та натиснемо кнопку Select. Результати проектування наведено на рис. 3.2.

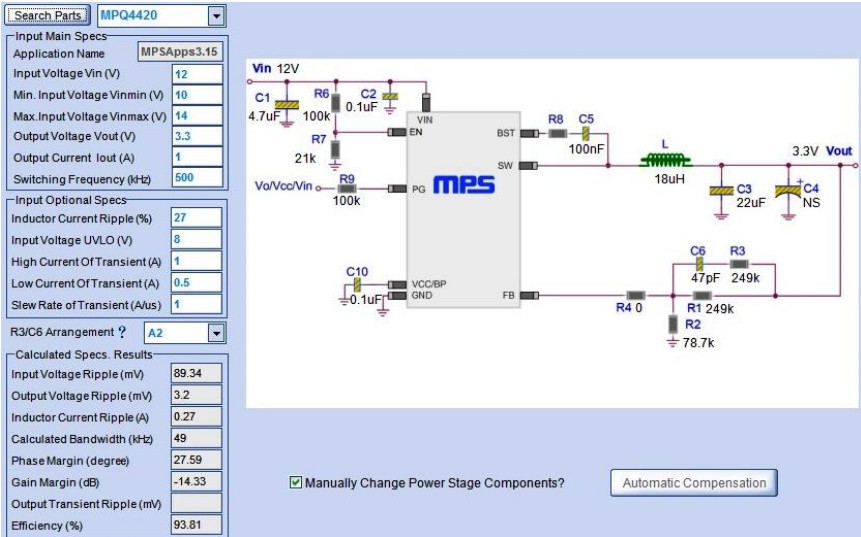


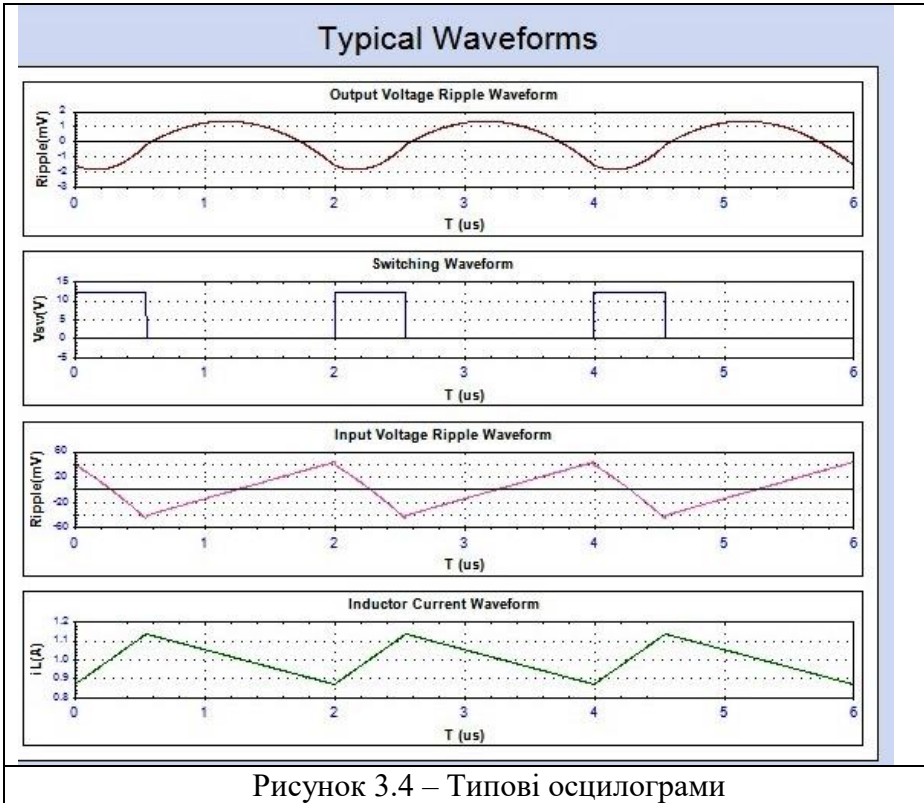
Рисунок 3.2 – Специфікації параметрів та електрична схема перетворювача

В іншій формі (див. рис 3.3) специфікації параметрів перетворювача можна отримати якщо обрати опцію Analysis/SpecAnalysis.

Parameter	Result	Minimum	Maximum
Synchronizable(Y/N)	Y		
Input Voltage(V)	12		
Min. Input Voltage(V)	10		
Max. Input Voltage(V)	14		
Output Voltage(V)	3.3		
Output Current(A)	1		
Frequency(kHz)	500		
Vin UVLO(V)	8		
Input Voltage Ripple(mV)	89.34		
Output Voltage Ripple(mV)	3.2		
Inductor Peak-Peak current(A)	0.27	0.87	1.13
High Current of Transient(A)	1		
Low Current of Transient(A)	0.5		
Slew Rate of Transient(A/us)	1		
Output Transient Ripple(mV)	N/A	N/A	N/A
Bandwidth(kHz)	49		
Phase Margin(deg)	27.59		
Gain Margin(dB)	-14.33		
Efficiency(%)	93.81		

Рисунок 3.3 – Специфікації параметрів перетворювача

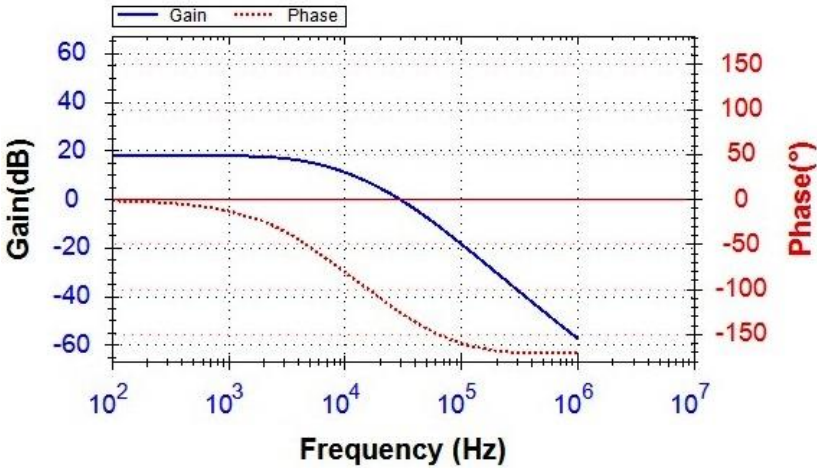
Типові осцилограми сигналів у перетворювачі наведені на рис. 3.4. Вони отримані за допомогою опції Analysis/Waveform.



Амплітудно- та фазочастотну характеристики потужного каскаду, компенсаційної ланки та замкненого контуру отримуємо за допомогою опції Analysis/Small Signal Analysis. Приклад наведено на рис. 3.5.

Залежності ККД та потужності витрат від струму наведено на рис. 3.6. Ці залежності отримані за допомогою опції Analysis/Efficiency and Power Loss/–

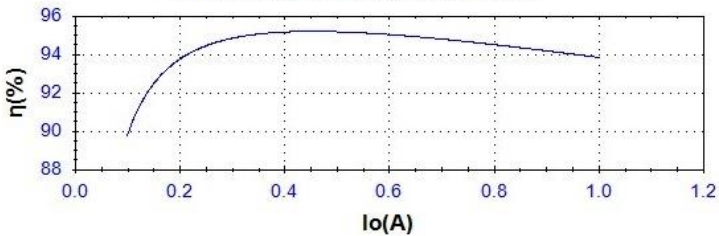
### Small Signal Bode Plot



Power Stage  Compensation  Loop Gain

Рисунок 3.5 – Частотні характеристики потужного каскаду

### Efficiency vs Output Current



### Power Loss vs Output Current

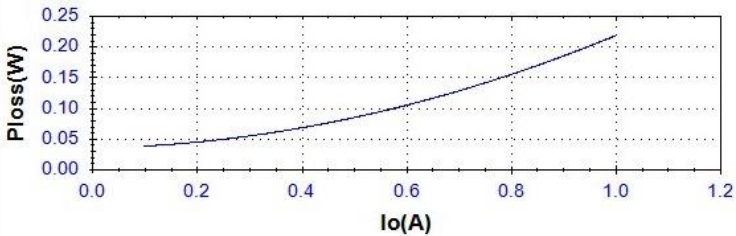


Рисунок 3.6 – Залежності ККД та потужності витрат від струму

Перелік елементів до електричної схеми перетворювача отримано за допомогою опції Analysis/Bill of Materials та наведено на рис. 3.7.

Export to XLS						
Quantity	Parameter	Value	Description	Package	Vendor	Part Number
1	C1	4.7uF	16V, X5R, Ceramic	0805	Wurth EI...	885012107...
1	C2	0.1uF	50V, Ceramic	0805	Any	
1	C3	22uF	6.3V, X5R, Cera...	0805	muRata	GRM21BR6..
	C4		NS			
1	C5	100nF	50V, Ceramic	0603	Any	
1	C6	47pF	50V, Ceramic	0603	Any	
1	C10	0.1uF	50V, Ceramic	0603	Any	
1	R1	249k	1%	0603	Any	
1	R2	78.7k	1%	0603	Any	
1	R3	249k	5%	0603	Any	
1	R4	0	5%	0603	Any	
1	R6	100k	5%	0603	Any	
1	R7	21k	5%	0603	Any	
1	R8		5%	0603	Any	
1	R9	100k	5%	0603	Any	
1	L	18uH	103mOhm, 1.8A	SMT	Coilcraft	SD54-183M..
1	U1	-	Buck, 450kHz, 3...	TSOT2...	MPS	MPQ4420

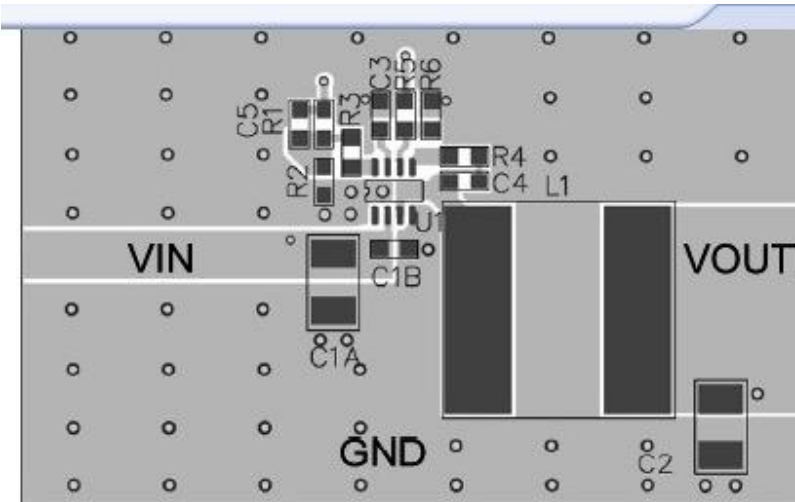
Note:  
 1) More details information please reference the device datasheets and/or application notes.  
 2) Please note too large output capacitance may lead to startup problems.

Рисунок 3.7 – Перелік елементів до схеми перетворювача

Друкована плата перетворювача із розташуванням елементів його схеми наведена на рис 3.8. Вона відкривається за допомогою опції Analysis/Layout Info.

Таким чином, до використання у дипломній роботі бакалаврського рівня отримані наступні матеріали:

- схема електрична принципова з переліком елементів;
- складальне креслення вузла перетворювача на друкованій платі;
- креслення друкованої плати вузла перетворювача;
- рисунки з осцилограмами струмів і напруг у перетворювачі.



Top Layer

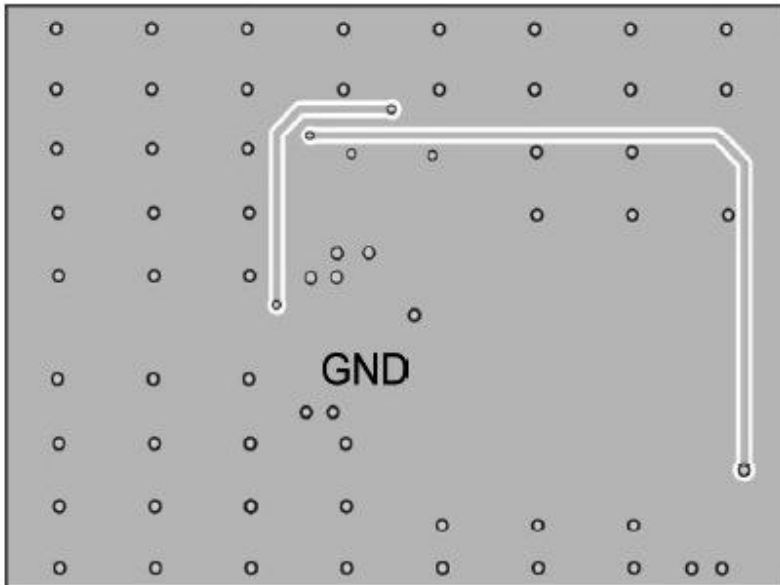


Рисунок 3.8 – Друкована плата перетворювача

У дипломній роботі магістрівського рівня додатково використовують наступні матеріали:

- залежність коефіцієнта корисної дії від вихідного струму;
- розрахунок витрат у перетворювачі;
- додаткові функції перетворювача, що описані у наукових статтях на сайті компанії MPS [4].

## **РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА**

### **Основна**

1. Електроніка і мікросхема техніка: У 4-х т. Том 4. Книга 1. Силова електроніка: Навч. посібник /За ред.. В. І. Сенька. – К.: Каравела, 2012 – 640 с.

### **Допоміжна**

2. Розанов Ю. К. Силовая электроника: Учебник для вузов / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк. 2-е изд. стереотипное. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 632 с.: ил. (рос. мовою).

### **Інформаційні ресурси**

3. Офіційний сайт компанії Monolithic Power Systems [ Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.monolithicpower.com>

4. Офіційний сайт компанії Monolithic Power Systems. Articles [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.monolithicpower.com/en/support/industry-information.html>