

УДК 621.314.1

## АНАЛІЗ ОБМЕЖЕНЬ ЛІНЕАРИЗАЦІЇ ТА АВТОМАТИЗОВАНИЙ СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ВИХІДНОЇ НАПРУГИ ПОНИЖУЮЧОГО ІМПУЛЬСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З ШІМ В MATLAB/SIMULINK

ПЛАХТІЙ О.А.

д-р. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту, Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1535-8991>, e-mail: [a.plakhtiy1989@gmail.com](mailto:a.plakhtiy1989@gmail.com);

ДОМНІН І.Ф.

д-р техн. наук, професор, провідний науковий співробітник Інституту іоносфери Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9824-4403>, e-mail: [domninpro@ukr.net](mailto:domninpro@ukr.net);

БАГАЧ Р.В.

канд. техн. наук, доцент кафедри автомобільної електроніки Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0157-5933>, e-mail: [bagach.ruslan@gmail.com](mailto:bagach.ruslan@gmail.com)

ЛАТВИНСЬКИЙ  
В.Д.

асистент кафедри автомобільної електроніки Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4891-2925>, e-mail: [latvin2000@gmail.com](mailto:latvin2000@gmail.com)

**Мета роботи.** Визначення передавальної функції регулювання вихідної напруги биск-перетворювачів в функції коефіцієнта заповнення ШІМ, визначення обмежень та умов збіжності перехідних процесів в лінеаризованій та імпульсній моделі биск-перетворювача, а також представлення методу автоматизованого розрахунку параметрів ПІ та ПД регулятора шляхом використання інструменту Matlab/Simulink.

**Методи дослідження.** Теорія електричних, теорія автоматичного керування, аналітичні розрахунки в програмі MathCad, імітаційне моделювання в програмі Matlab.

**Отримані результати.** Представлено результати дослідження лінеаризації та визначення передавальної функції регулювання вихідної напруги понижуючого імпульсного перетворювача (биск-перетворювача) в функції коефіцієнта заповнення імпульсів в широтно-імпульсній модуляції. Визначено передавальну функцію биск-перетворювача з ШІМ та визначено обмеження даної лінеаризації, а саме умовою адекватності лінеаризованої моделі биск-перетворювача є обмеження значення вхідного сигналу, тобто коефіцієнта заповнення імпульсів в ШІМ, менше 1. Представлено методику автоматичного розрахунку параметрів ПІ, ПІ, ПД та ПД регуляторів за критерієм формування перехідного процесу задовільної форми шляхом використання блоку «PID controller» в Matlab/Simulink. Представлена методика автоматичного розрахунку коефіцієнтів регуляторів в структурах системи автоматичного регулювання (САР) працює виключно з лінеаризованими моделями, і не дозволяє виконати розрахунки для імпульсних і нелінійних моделей. Для визначеної лінеаризованої моделі і відповідної передавальної функції биск-перетворювача визначено коефіцієнти ПІ регулятора вихідної напруги. Представлено результати аналітичного розрахунку миттєвої функції вихідної напруги биск-перетворювача в складі системи автоматизованого регулювання вихідної напруги, яка отримана шляхом зворотного перетворення Лапласа зверненої функції системи автоматичного регулювання. Також представлено результати моделювання вихідної напруги биск-перетворювача, на лінеаризованій моделі (передавальної функції) та імітаційній моделі в Matlab/Simulink. Результати аналітичного розрахунку та двох методів комп'ютерного моделювання дали ідентичні результати, що свідчить про адекватність проведеної лінеаризації та задовільність методу автоматичного розрахунку параметрів регулятора за критерієм формування перехідного процесу задовільної форми за параметрами часу перехідного процесу та значення перерегулювання.

**Наукова новизна.** Визначено умови збіжності перехідних процесів регулювання вихідної напруги биск-перетворювача в структурах систем автоматичного регулювання для лінеаризованих та імпульсних моделей, що дозволяє отримати реальний перехідний процес бажаної форми, який відповідає попередньому аналітичному розрахунку.

**Практична цінність.** Представлені передавальні функції та метод автоматичного синтезу параметрів ПД регулятора вихідної напруги биск-перетворювача в Matlab/Simulink може бути використаний при розробці силових напівпровідникових перетворювачів та дозволяє спростити процес синтезу регуляторів в системах автоматичного керування.

© Плахтій О.А., Домнін І.Ф., Багач Р.В., Латвинський В.Д. 2025

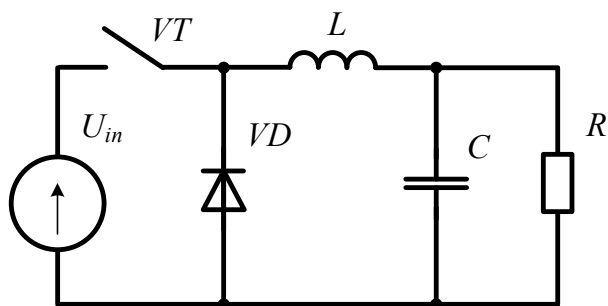
Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC-BY-SA 4.0)

DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2025-4-6>

**Ключові слова:** *buck converter; перетворювачі сонячних електростанцій; автоматизований синтез регулятора; передавальні функції перетворювача; MATLAB/Simulink.*

## I. ВСТУП

Понижуючі імпульсні перетворювачі постійної напруги, відомі як buck-перетворювачі, силова схема яких наведена на рис.1, відіграють суттєву роль в сучасній перетворювальній техніці і широко застосовуються в сонячній енергетиці [1]-[3], як перетворювачі, що забезпечують відбір максимальної потужності сонячних панелей, в системах заряду/розряду акумуляторів [4], [5], системах керування двигунами постійного струму [6], [7] та багатьох інших застосуваннях [8]-[10].



**Рисунок 1.** Схема понижуючого імпульсного перетворювача

При розробці buck-перетворювачів важливою задачею є синтез регуляторів вихідної напруги від яких залежить час перехідного процесу, величина перерегулювання вихідної напруги та загальна стійкість структури системи автоматичного регулювання (САР).

Одним з методів регулювання вихідної напруги buck-перетворювачів є застосування ковзних режимів комутації (sliding-mode-control) струму дроселя. Проте даний режим модуляції зумовлює змінну частоту комутації і в даній роботі не розглядається [11], [12].

В даній роботі розглянуто режим регулювання вихідної напруги buck-перетворювачів з широтно-імпульсною модуляцією [8]. При цьому регулювання вихідної напруги перетворювача забезпечується зміною коефіцієнта заповнення ШІМ  $\gamma$ , який приймає значення від 0 до 1 згідно виразу

$$\gamma = \frac{t_{on}}{T_{pwm}}, \quad (1)$$

де  $t_{on}$  – час увімкненого стану ключа;  $T_{pwm}$  – період слідування імпульсів ШІМ.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В літературі представлено досить багато методик розрахунку параметрів елементів силової схеми buck-перетворювачів [13], [14], крім того існує багато он-

лайн калькуляторів, що дозволяють автоматизовано провести розрахунок силових елементів схеми [15], [16]. В роботах [17]-[19] представлено результати досліджень заходів щодо підвищення енергетичної ефективності понижуючих імпульсних перетворювачів в усталених режимах роботи, проте вони не містять даних щодо динамічних властивостей та рекомендацій щодо синтезу систем автоматичного регулювання. У той же час питання синтезу регуляторів вихідної напруги, оцінки якості перехідного процесу та стійкості САР з імпульсними перетворювачами представлено суттєво менше уваги.

В роботах [20], [21] наведено результати дослідження перехідного процесу регулювання вихідної напруги buck-перетворювача при використанні ПІ регулятора. Задовільний перехідний процес отримано експериментальним шляхом, а саме ітеративним методом підбору параметрів регулятора, що не є задовільним методом. Недоліком даних робіт є відсутність опису методу визначення коефіцієнтів регулятора та відсутність опису buck-перетворювача, як об'єкта системи автоматичного керування з визначеною передавальною функцією.

Одним з методів є побудова системи автоматичного регулювання вихідної напруги buck-перетворювачів за умовами реалізації процесу кінцевої тривалості (ПКТ) при якому перехідний процес регулювання триває час, що відповідає добутку порядку системи на період ШІМ модуляції [22], [23]. В роботі [24] представлено аналіз дослідження синтезу регулятора вихідної напруги понижуючого імпульсного перетворювача за умовою реалізації процесу кінцевої тривалості. Недоліком роботи є те, що аналіз роботи схеми та синтез регулятора виконано при частоті ШІМ 1 кГц, хоча в сучасних buck-перетворювачах застосовуються частоти комутації порядку декількох сотень кілогерц і вище, що робить синтез регулятора за умовами ПКТ практично неможливим.

В роботі [25] представлено результати дослідження робастного регулятора вихідної напруги понижуючого імпульсного перетворювача. Проте в роботі не визначено обмеження даної лінеаризації, не представлено аналізу збіжності лінеаризованої та імітаційної моделі перетворювача та не представлено методу синтезу регулятора. Крім цього недоліком представленого регулювання можна вважати досить суттєве перерегулювання, яке складає більше 30%, що для багатьох застосувань може бути критичним.

## III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є визначення передавальної функції регулювання вихідної напруги buck-перетворювачів в функції коефіцієнта заповнення ШІМ, визначення обмежень та умов збіжності перехідних процесів в лінеаризованій та імпульсній моделі

busk-перетворювача, а також представлення методу автоматизованого розрахунку параметрів ПІ та ПІД регулятора шляхом використання інструменту Matlab/Simulink

#### IV. ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ ПОНИЖУЮЧОГО ІМПУЛЬСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Аналіз передавальної функції понижуючого імпульсного перетворювача можна реалізувати шляхом побудови еквівалентної схеми заміщення, яка наведена на рис.2.

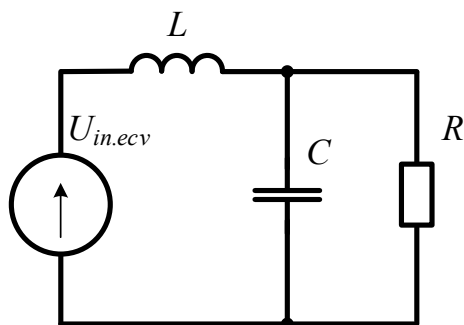


Рисунок 2. Схема заміщення понижуючого імпульсного перетворювача

В режимі ШІМ модуляції вхідна напруга  $LC$  фільтра понижуючого  $dc/dc$  перетворювача є імпульсною напругою, яка містить постійну складову  $U_{in.ecv}$ , яка залежить від коефіцієнта модуляції  $\gamma$ , та змінну складову, яка відповідає частоті ШІМ модуляції, а змінна складову містить гармоніки кратні частоті ШІМ. При цьому значення постійної складової можна представити як

$$U_{in.ecv} = U_{in} \cdot \gamma \quad (2)$$

де  $U_{in}$  – вхідна напруга реальної схеми.

Як було сказано раніше, вхідним сигналом при керуванні вихідної напруги є  $\gamma$ . Таким чином передавальна функція регулювання вихідної напруги визначається як

$$H_{dc}(p) = \frac{U_{out}(p)}{\gamma(p)} \quad (3)$$

де  $U_{out}$  – вихідна напруга понижуючого імпульсного перетворювача.

Для визначення передавальної функції визначимо змінні комплексних опорів

$$z_1(p) = pL \quad (4)$$

$$z_2(p) = 1/pC \quad (5)$$

$$z_3(p) = R \quad (6)$$

При цьому вихідну напругу можна визначити за виразом

$$U_{out}(p) = \frac{U_{in} \cdot \gamma}{z_1(p) + \frac{z_2(p) \cdot z_3(p)}{z_2(p) + z_3(p)}} \cdot \frac{z_2(p)}{z_2(p) + z_3(p)} \cdot z_3(p) \quad (7)$$

Таким чином передавальна функція понижуючого імпульсного перетворювача при регулюванні вихідної напруги буде визначатись як

$$H_{dc}(p) = \frac{U_{out}}{\gamma} = \frac{U_{in} \cdot z_3(p)}{z_1(p) + \frac{z_2(p) \cdot z_3(p)}{z_2(p) + z_3(p)}} \cdot \frac{z_2(p)}{z_2(p) + z_3(p)} \quad (8)$$

Виконавши остаточні перетворення отримаємо передавальну функцію понижуючого  $dc/dc$  перетворювача

$$H_{dc}(p) = \frac{U_{in} \cdot R}{LCRp^2 + Lp + R} \quad (9)$$

або

$$H_{dc}(p) = \frac{U_{in}}{LCp^2 + \frac{L}{R}p + 1} \quad (10)$$

Таким чином при резистивному навантаженні передавальна функція  $busk$ -перетворювача визначається як коливальна ланка другого порядку. Частота зрізу даної передавальної функції визначається як

$$f_{zp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (11)$$

При цьому для зменшення пульсаційної складової у вихідній напрузі  $busk$ -перетворювача має бути виконана умова

$$f_{zp} \ll f_{pwm} \quad (12)$$

Умовою аперіодичного перехідного процесу і відсутності коливальних в регулюванні вихідної напруги лінеаризованої моделі  $busk$ -перетворювача при  $\gamma = const$  є умова

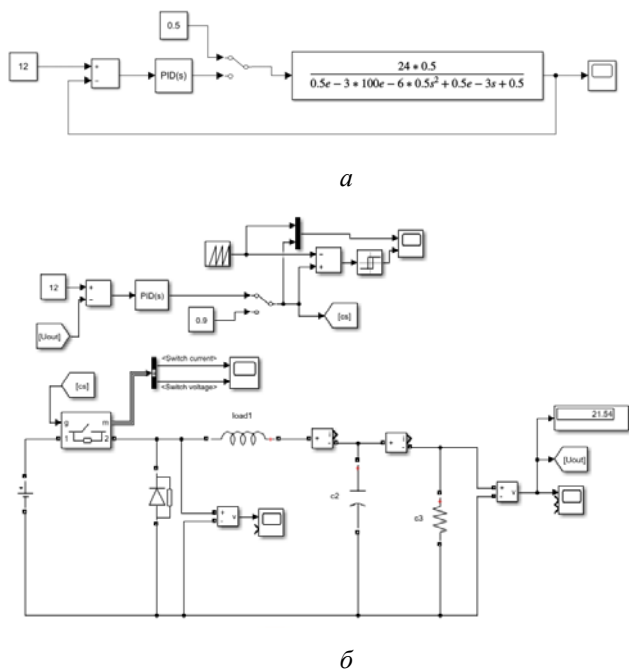
$$R < \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (13)$$

При визначенні параметрах передавальної функції  $busk$ -перетворювача можливим є синтез регулятора вихідної напруги шляхом частотних методів теорії автоматичного керування, таких як модальний, або симетричний оптимум.

Проте суттєве спрощення процесу синтезу регулятора вихідної напруги може бути виконано шляхом застосування інструменту автоматизованого розрахунку параметрів ПІ чи ПІД регулятора блоку “PID Controller” в Matlab Simulink.

### V. АВТОМАТИЗОВАНІЙ СИНТЕЗ КОЕФІЦІЄНТІВ ПІД РЕГУЛЯТОРА ВИХІДНОЇ НАПРУГИ BUCK- ПЕРЕТВОРЮВАЧА В MATLAB/SIMULINK

Для автоматичного визначення коефіцієнтів П, І, Д, чи ПІД регулятора у необхідно створити модель замкнутої лінеаризованої системи автоматичного регулювання зі зворотнім зв'язком та додання в канал зворотного зв'язку блоку "PID Controller" в системі Matlab/Simulink. На рис.3 представлено САР вихідної напруги понижуючого імпульсного перетворювача, а саме лінеаризовану та імітаційну моделі понижуючого імпульсного перетворювача.



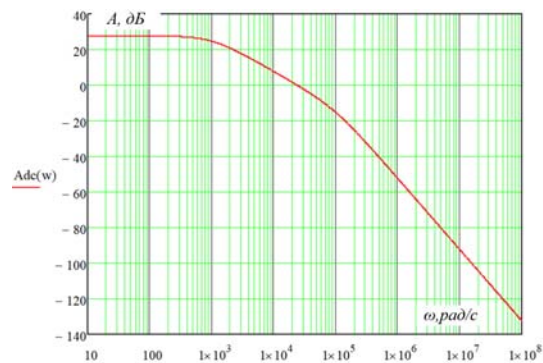
**Рисунок 3.** Моделі понижуючого імпульсного перетворювача: а – лінеаризована передавальна функція; б – імітаційна імпульсна модель.

Параметри моделі buck-перетворювача представлені в таблиці 1.

**Таблиця 1.** Параметри buck-перетворювача

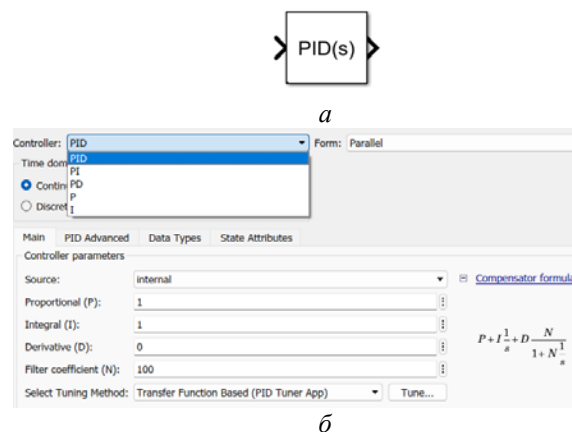
| Параметр          | Значення |
|-------------------|----------|
| Вхідна напруга    | 24В      |
| Індуктивність     | 2мГн     |
| Ємність           | 20 мкФ   |
| Опір навантаження | 0,5 Ом   |
| Частота ШІМ, кГц  | 10       |

Амплітудно - частотна характеристика лінеаризованої моделі понижуючого імпульсного dc-dc перетворювача з представленими параметрами представлена на рис.4.



**Рисунок 4.** АЧХ лінеаризованої моделі buck-перетворювача

При роботі з лінеаризованими передавальними функціями об'єктів керування в Simulink блок "PID Controller" дозволяє автоматизовано визначати параметри коефіцієнтів П, І, ПІ, ПД та ПІД регуляторів на основі бажаної форми вихідного процесу. Зовнішній вигляд блоку та інтерфейс його налаштування представлено на рис.6.



**Рисунок 5.** Інтерфейс параметрів блоку "PID Controller" в Matlab/Simulink: а – вигляд блоку в Simulink; б – інтерфейс налаштування блоку

Для запуску автоматичного налаштування, а саме визначення коефіцієнтів регулятора блок "PID Controller" має бути підключений в замкнену систему автоматичного регулювання з негативним зворотнім зв'язком, як це наведено на рис.4, а. Після підключення необхідно відкрити блок "PID Controller" та обрати тип регулятора: PID, PI, PD, P, I. Для початку автоматичного розрахунку коефіцієнтів обраного типу регулятора для отримання бажаної форми перехідного процесу необхідно натиснути на віртуальну кнопку «Tune...» в інтерфейсі його налаштування (рис.6, б). Після цього блок "PID Controller" виконує аналіз динамічних властивостей лінійної замкнутої системи. Інтерфейс налаштування бажаної форми перехідного процесу регулювання вихідного параметру САР представлена на рис.6.

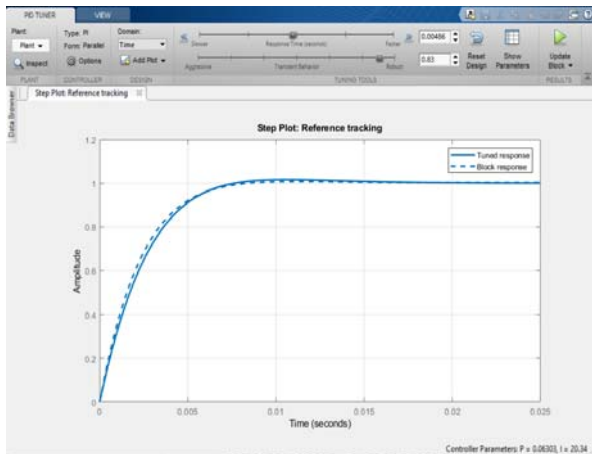


Рисунок 6. Інтерфейс налаштування бажаного перехідного процесу в блоку “PID Controller”

Інтерфейс налаштування бажаного перехідного процесу в блоку “PID Controller” дозволяє регулювати час перехідного процесу шляхом регулювання параметру «Response time» та величини перерегулювання вихідного параметру САР за параметром «Transient behavior».

При підключенні блоку “PID Controller” до імпульсної імітаційної моделі (рис.3, б) функція автоматичного налаштування коефіцієнтів регулятора не працює, оскільки даний блок призначено для аналізу виключно лінеаризованих моделей.

Після налаштування бажаної форми перехідного процесу при натисканні кнопки «Show parameters» в інтерфейсі налаштування блоку “PID Controller” отримуємо чисельне визначення необхідні значення коефіцієнтів регулятора, що забезпечують задану форму перехідного процесу та результати розрахунку параметрів стабільності САР, значення запасу по амплітуді, запасу по фазі та значення максимального перерегулювання, як це наведено на рис.7.

| Controller Parameters      |                    |                    |
|----------------------------|--------------------|--------------------|
|                            | Tuned              | Block              |
| P                          | 0.063034           | 0.07214            |
| I                          | 20.3441            | 20.9703            |
| D                          | n/a                | n/a                |
| N                          | n/a                | n/a                |
| Performance and Robustness |                    |                    |
|                            | Tuned              | Block              |
| Rise time                  | 0.00454 seconds    | 0.00439 seconds    |
| Settling time              | 0.00667 seconds    | 0.00684 seconds    |
| Overshoot                  | 1.67 %             | 0.782 %            |
| Peak                       | 1.02               | 1.01               |
| Gain margin                | Inf dB @ Inf rad/s | Inf dB @ Inf rad/s |
| Phase margin               | 83 deg @ 412 rad/s | 86 deg @ 451 rad/s |
| Closed-loop stability      | Stable             | Stable             |

Рисунок 7. Інтерфейс чисельної оцінки якості перехідного процесу в блоку “PID Controller”

## VI. УМОВА ЗБІЖНОСТІ ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ РЕГУЛЮВАННЯ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ В ЛІНЕАРИЗОВАНІЙ ТА ІМПУЛЬСНІ МОДЕЛІ ТА

В розглянутій САР вихідним параметром регулятора є коефіцієнт заповнення ШІМ  $\gamma$ , яка в реальній системі змінюється від 0 до 1.

При цьому для забезпечення збіжності перехідних процесів регулюванні вихідної напруги лінеаризованій моделі та імітаційній моделі необхідно пересвідчитись, що налаштований перехідний процес реалізується при значенні вихідного параметру регулятора менше 1. Блок “PID Controller” дозволяє визначити миттєве значення вихідного параметру регулятора шляхом натискання на інтерфейсі налаштування бажаного перехідного процесу кнопок “Add Plot” та «Controller Effort».

Інтерфейс блоку “PID Controller” визначення вихідного сигналу регулятора у часі представлено на рис.8.

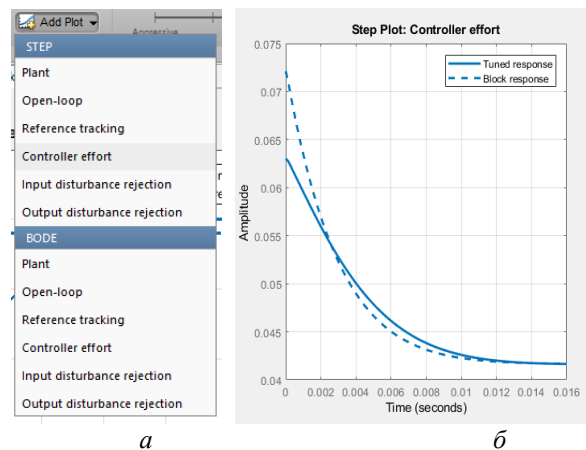


Рисунок 8. Інтерфейс “PID Controller” визначення вихідного сигналу регулятора у часі

Пересвідчившись, що перехідний процес має задовільну форму і тривалість, а також що вихідна дія регулятора, а саме коефіцієнт заповнення  $\gamma$  не перевищує максимальне можливе значення 1, необхідно зберегти налаштовані зміни в блоку “PID Controller” шляхом натискання кнопки «Update block» в інтерфейсі налаштування (рис.7). Після чого даний блок може бути скопійований та доданий за замкненої САР в імітаційній моделі (рис.3, а).

Умовою адекватної лінеаризації перетворювача є збіжність перехідних процесів регулювання вихідної напруги при аналітичному розрахунку, в лінеаризованій моделі Matlab (рис.3, а) та імітаційній моделі (рис.3, б) при застосуванні одного типу регулятора з тими самими параметрами.

Подальший розрахунок виконано для параметрів понижуючого імпульсного перетворювача параметри якого наведено в таблиці 1, та при використанні ПІ регулятора параметри якого отримано в Matlab

(рис.7), а саме  $K_n=0,063034$  та  $K_i=20,344$ . Дані коефіцієнти отримані при налаштуванні бажаної форми перехідного процесу, як це наведено на рис.7.

Передавальна функція ПІ регулятора вихідної напруги визначається як

$$H_{reg}(p) = K_{II} + \frac{K_I}{p} \quad (14)$$

Таким чином передавальна функція замкнутого контуру автоматичного регулювання визначається як

$$H_{total}(p) = \frac{H_{reg}(p) \cdot H_{dc}(p)}{H_{reg}(p) \cdot H_{dc}(p) + 1} \quad (15)$$

При подачі на систему автоматичного регулювання сигналу завдання вихідної напруги 12 В, який відповідає значенню в операторній формі виразу

$$Step(p) = \frac{12}{p} \quad (16)$$

аналітичне визначення миттєвої функції вихідної напруги в розглянутій системі автоматичного регулювання може бути отримано шляхом зворотнього перетворення Лапласа функції замкненої системи автоматичного регулювання системи  $F(s)$ , яка визначається виразом

$$F(p) = Step(p) \cdot \frac{H_{reg}(p) \cdot H_{dc}(p)}{H_{reg}(p) \cdot H_{dc}(p) + 1} \quad (17)$$

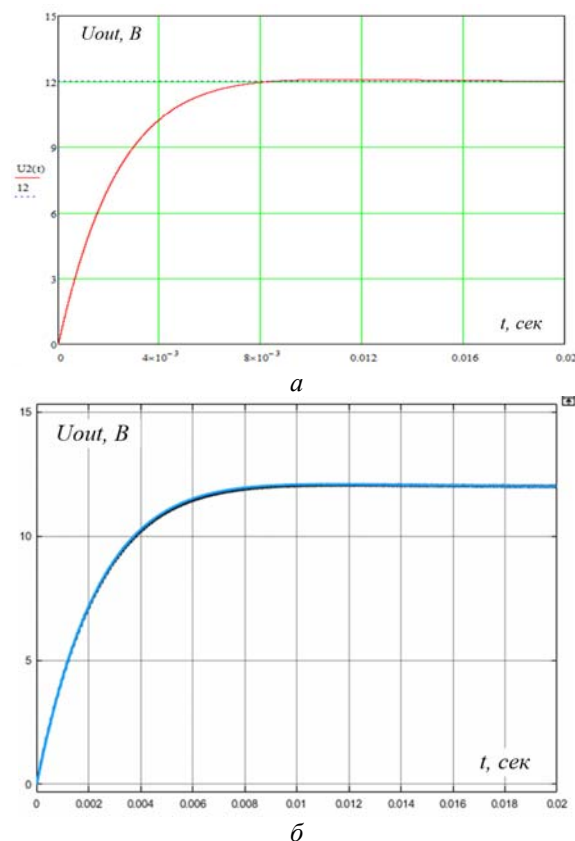
Таким чином, аналітична функція перехідного процесу буде визначатись як

$$U_{out}(t) = L^{-1}[F(p)] = \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma_1 - i\infty}^{\sigma_1 + i\infty} e^{px} [F(p)] \cdot dp \quad (18)$$

Виконавши відповідне зворотнє перетворення Лапласу виразу (17) отримуємо аналітичний вираз функції вихідної напруги понижуючого імпульсного перетворювача у часі

$$U_{out}(t) = 0.052841 \cdot e^{-99313.96 \cdot 0.4 \cdot t} - 2.88615 \cdot e^{-99749.318 \cdot t} - 4.2852 \cdot e^{-250.62814 \cdot t} - 12.0528 \cdot \cos(95.017 \cdot t) \cdot e^{-343.1979 \cdot t} + 11.7197 \cdot \sin(95.017 \cdot t) \cdot e^{-343.1979 \cdot t} + 12 \quad (19)$$

Результат аналітичного розрахунку та результати імітаційного моделювання вихідної напруги понижуючого імпульсного перетворювача в системі



**Рисунок 9.** Перехідні процеси регулювання вихідної напруги : а – аналітичний розрахунок; б – результат імітаційної моделі

Як видно з рис.9 результати аналітичного розрахунку перехідного процесу (19) та результати моделювання лінеаризованої та імітаційної моделі дали ідентичні результати, що свідчить про адекватність проведеної лінеаризації, визначеної передавальної функції понижуючого імпульсного перетворювача та розглянутого методу автоматизованого розрахунку параметрів регуляторів за критерієм задовільної форми перехідного процесу.

## ВІСНОВКИ

У статті представлено результати лінеаризації та визначено передавальну функцію регулювання вихідної напруги понижуючого імпульсного перетворювача (buck-перетворювача) в функції коефіцієнта заповнення імпульсів в широтно-імпульсній модуляції. Визначено, що умовою адекватності лінеаризації buck-перетворювача, тобто перехід від імпульсної системи до безперервної, є обмеження значення вхідного сигналу, тобто коефіцієнта заповнення імпульсів в ШІМ, яка має бути менше 1.

Представлено методику автоматичного розрахунку параметрів П, ПІ, ПД та ПІД регуляторів за критерієм формування перехідного процесу задовільної форми шляхом використання блоку «PID controller» в Matlab/Simulink. Показано, що представлена методика

автоматичного розрахунку коефіцієнтів регуляторів в структурах системи автоматичного регулювання (САР) працює виключно з лінеаризованими моделями, і не дозволяє виконати розрахунки коефіцієнтів регуляторів для імпульсних і нелінійних моделей. Для визначеної лінеаризованої моделі і відповідної передавальної функції buck-перетворювача визначено коефіцієнти ПІ регулятора вихідної напруги.

Представлено результати аналітичного розрахунку миттєвої функції вихідної напруги buck-перетворювача в складі системи автоматизованого регулювання вихідної напруги, яка отримана шляхом зворотного перетворення Лапласу зверненої функції системи автоматичного регулювання. Також представлено результати моделювання вихідної напруги buck-перетворювача на лінеаризованій моделі (передавальної функції) та імітаційній моделі в Matlab/Simulink.

Результати аналітичного розрахунку функції вихідної напруги понижуючого імпульсного перетворювача та двох методів комп'ютерного моделювання дали ідентичні результати, що свідчить про адекватність проведеної лінеаризації та задовільність методики автоматичного розрахунку параметрів регулятора за критерієм формування перехідного процесу задовільної форми за параметрами часу перехідного процесу та значення величини перерегулювання.

Даний метод визначення коефіцієнтів регуляторів на основі критерію бажаної форми перехідного процесу може бути застосований для створення будь-яких лінеаризованих систем автоматичного регулювання. Проте, для його застосування необхідно розуміти, які обмеження мають лінеаризовані моделі, такі як: обмеження значення вхідного сигналу об'єкту керування - коефіцієнту заповнення ШІМ, обмеження реальної потужності мережі, реальний діапазон струмів навантаження та інші.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] S. Potturi, B. Bairwa, M. K and M. C, "Development of Solar Coupled Synchronous Buck Converter," 2022 Fourth International Conference on Emerging Research in Electronics, Computer Science and Technology (ICERECT), Mandya, India, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICERECT56837.2022.10060197.
- [2] L. Vite, "Stabilization of a DC-DC buck converter for photovoltaic MPPT applications," 2023 20th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE), Mexico City, Mexico, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/CCE60043.2023.10332856.
- [3] Blinov A., Vinnikov D., Ivakhno V. "Full soft-switching high step-up dc-dc converter for photovoltaic applications" Proceedings of the 16th Conference on Power Electronics and Applications, EPE'14-ECCE Europe, 26-28.08.2014, Lappeenranta, Finland. — Lappeenranta, 2014. — P. 1–7.
- [4] E. N. Mammeri, O. Lopez-Santos, A. El Aroudi and L. Martinez-Salamero, "Constant-Power Constant-Voltage Charging Protocol Based on a Four-Phase Interleaved Buck Converter for Electric Vehicle Batteries," 2025 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), London, United Kingdom, 2025, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISCAS56072.2025.11043167.
- [5] K. K. Patel, L. K. Sahu and A. K. Sahu, "Integrated Design of MPPT and DC-DC Buck Converter for Efficient Battery Charging," 2025 Fourth International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T), Raipur, India, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICPC2T63847.2025.10958676.
- [6] R. Dhanasekar, S. G. Kumar and M. Rivera, "Third Order Sliding Mode Control of Buck Converter Fed Permanent Magnet DC Motor," 2018 IEEE International Conference on Automation/XXIII Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA), Concepcion, Chile, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICA-ACCA.2018.8609812.
- [7] J. M. Alba-Martínez, R. Silva-Ortigoza, H. Taud, J. Alvarez-Cedillo, I. Rivera-Zárate and R. Bautista-Quintero, "DC Motor Speed Control via a DC to DC Buck Power Converter," 2012 IEEE Ninth Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, Cuernavaca, Mexico, 2012, pp. 288-293, doi: 10.1109/CERMA.2012.54.
- [8] V. Nerubatskyi, O. Plakhtii and D. Hordiienko, "Efficiency Analysis of DC-DC Converter with Pulse-Width and Pulse-Frequency Modulation," 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2022, pp. 571-575, doi: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926762.
- [9] V. Nerubatskyi, O. Plakhtii, D. Hordiienko, H. Khoruzhevskiy. Study of energy parameters in alternative power source microgrid systems with multilevel inverters. INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL "INDUSTRY 4.0". 2020. P.118-121.
- [10] Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Syniavskiy A. V., Philipjeva M. V. Use of modern technologies in the problems of automation of data collection in intellectual power supply systems. Modern engineering and innovative technologies. 2022. Issue 19. Part 1. P. 38–51. DOI: 10.30890/2567-5273.2022-19-01-058.
- [11] L. Du, P. Huang and W. Tong, "Research on full-order sliding mode control method for Buck converter," 2019 3rd International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering (EITCE), Xiamen, China, 2019, pp. 1171-1175, doi: 10.1109/EITCE47263.2019.9094884.

- [12] C. Kumar and A. K. Ray, "Adaptive Sliding Mode Control for DC-DC Buck Converter," 2025 International Conference on Power Electronics Converters for Transportation and Energy Applications (PECTEA), Jatni, India, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/PECTEA61788.2025.11076305.
- [13] Power electronics handbook: devices, circuits, and applications handbook / edited by. Muhammad H. Rashid. – 3rd ed. p. cm. ISBN 978-0-12-382036-5. 1.
- [14] Abraham I. Pressman, Keith Billings, Taylor Morey. Switching Power Supply Design, Third Edition. ISBN 978-0-07-148272-1. P.1-831
- [15] Texas instruments, buck convertor on-line calculator: <https://www.ti.com/tool/BUCK-CONVCALC>
- [16] Schmidt buck convertor on-line calculator: [http://schmidt-walter-schaltzetteile.de/smps\\_e/abw\\_smps\\_e.html](http://schmidt-walter-schaltzetteile.de/smps_e/abw_smps_e.html)
- [17] A. Singh, K. Bharti and N. Kumar, "Comparative study between DC-DC buck converter and Zero Voltage switching buck converter," 2024 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), Bhopal, India, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/SCEECS61402.2024.10482318.
- [18] M. M. Kareem, F. A. Harbi, A. B. Ibrahim, A. S. Al-Hiti and Y. A. Mashhadany, "Design and Analysis of Synchronous and Asynchronous Buck Converters in Electrical Applications," 2024 17th International Conference on Development in eSystem Engineering (DeSE), Khorfakkan, United Arab Emirates, 2024, pp. 462-467, doi: 10.1109/DeSE63988.2024.10912037.
- [19] S. Wu, Z. Ran, Z. Tong, T. Liu and Y. Lu, "A Monolithic Integrated E-Mode GaN 48V-to-1V DC-DC Buck Converter with PWM Control," 2023 IEEE International Conference on Integrated Circuits, Technologies and Applications (ICTA), Hefei, China, 2023, pp. 130-131, doi: 10.1109/ICTA60488.2023.10364290.
- [20] Abhijeet Bhattacharya, Sandeep Banerjee, Saksham Girotra, Hridesh Shukla, Gaurang Bhardwaj, Sidharth Talia. Simulation and Design of PI-Controller for the Control of Buck Converter. Journal of Microelectronics and Solid State Devices ISSN: 2455-3336 Volume 7, Issue 1. P.26-32. DOI: 10.37591/jomds.v7i1.3979
- [21] S. Kumari, M. M. Rayguru and S. Upadhyaya, "Analysis of Model Predictive Controller versus Linear Quadratic Regulator for DC-DC Buck Converter Systems," 2023 7th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), Madurai, India, 2023, pp. 1764-1768, doi: 10.1109/ICICCS56967.2023.10142519.
- [22] M. Saoudi, A. El-Sayed and H. Metwally, "Design and implementation of closed-loop control system for buck converter using different techniques," in IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 32, no. 3, pp. 30-39, March 2017, doi: 10.1109/MAES.2017.150261
- [23] Y. Liu, H. Li, R. Lu, Z. Zuo and X. Li, "An Overview of Finite/Fixed-Time Control and Its Application in Engineering Systems," in IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, vol. 9, no. 12, pp. 2106-2120, December 2022, doi: 10.1109/JAS.2022.105413
- [24] Shcherbak Y. V. Dynamics of a pulse-width converter using the theory of generalized functions / Y. V. Shcherbak, K. Y. Ivakina, V. P. Nerubatskyi // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2025. – Вип. 212. – С. 315-330.
- [25] K. Han, P. Jiang, S. Huang, Y. Jiang, and X. Wang, "Estimator based robust dual-mode predictive output regulation in DC-DC Buck converters," in 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), IEEE, Jun. 2019, pp. 2158–2163. doi: 10.1109/isie.2019.8781172.

Надійшла (Received) 14.10.2025;

Прийнята (Accepted) 08.11.2025;

Опублікована (Published) 26.12.2025;

## ANALYSIS OF LINEARIZATION LIMIT CONDITIONS AND AUTOMATED SYNTHESIS OF THE OUTPUT VOLTAGE REGULATOR OF A PWM-BUCK CONVERTER IN MATLAB/SIMULINK

PLAKHTII O.A.

Doctor of technical sciences, associate professor of the electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics department, Ukrainian state university of railway transport, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1535-8991>, e-mail: [a.plakhtiy1989@gmail.com](mailto:a.plakhtiy1989@gmail.com);

DOMNIN I.F.

Doctor of technical sciences, professor, leading researcher, Institute of Ionosphere, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9824-4403>, e-mail: [domninpro@ukr.net](mailto:domninpro@ukr.net)

BAHACH R.V.

PhD, associate professor of the automotive electronics department, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000->

0003-0157-5933, e-mail: [bagach.ruslan@gmail.com](mailto:bagach.ruslan@gmail.com)

LATVYNSKYI  
V.D.

assistant of the automotive electronics department, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4891-2925>,  
e-mail: [latvin2000@gmail.com](mailto:latvin2000@gmail.com)

**Purpose.** Determination of the transfer function of the output voltage regulation of buck converters as a function of the PWM duty cycle, determination of the constraints and conditions for convergence of transient processes in the linearized and pulsed model of the buck converter, as well as presentation of a method for automated calculation of PI and PID controller parameters using the Matlab/Simulink tool.

**Methodology.** Electrical theory, automatic control theory, analytical calculations in MathCad and simulation modeling in Matlab.

**Findings.** The results of the study of linearization and determination of the transfer function of the output voltage regulation of a step-down pulse converter (buck converter) as a function of the pulse duty cycle in pulse-width modulation are presented. The transfer function of a buck converter with PWM is determined and the limitations of this linearization are determined, namely, the condition for the adequacy of the linearized model of the buck converter is the limitation of the input signal value, i.e. the pulse duty cycle in PWM, less than 1. The method of automatic calculation of the parameters of P, PI, PD and PID controllers is presented according to the criterion of forming a transient process of a satisfactory form by using the "PID controller" block in Matlab/Simulink. The presented method of automatic calculation of the coefficients of controllers in the automatic control system (ACS) structures works exclusively with linearized models, and does not allow calculations for pulse and nonlinear models. For the defined linearized model and the corresponding transfer function of the buck converter, the PI coefficients of the output voltage regulator are determined. The results of the analytical calculation of the instantaneous function of the buck converter output voltage as part of the automated output voltage control system, which is obtained by inverse Laplace transformation of the inverse function of the automatic control system, are presented. The results of the modeling of the buck converter output voltage on the linearized model (transfer function) and the simulation model in Matlab/Simulink are also presented. The results of the analytical calculation and the two methods of computer modeling gave identical results, which indicates the adequacy of the linearization performed and the satisfaction of the method of automatic calculation of the regulator parameters according to the criterion of forming a transient process of a satisfactory form according to the parameters of the transient process time and the value of overshoot.

**Originality** The conditions for convergence of transient processes of the buck converter output voltage regulation in the structures of automatic control systems for linearized and pulsed models have been determined, which allows obtaining a real transient process of the desired form, which corresponds to the previous analytical calculation.

**Practical value.** The presented transfer functions and the method of automatic synthesis of PID parameters of the output voltage regulator of the buck converter in Matlab/Simulink can be used in the development of power semiconductor converters and allows to simplify the synthesis process of regulators in automatic control systems.

**Keywords:** buck converter; solar power plant converters; automated controller synthesis; converter transfer functions; MATLAB/Simulink.

## REFERENCES

- [1] S. Potturi, B. Bairwa, M. K and M. C, "Development of Solar Coupled Synchronous Buck Converter," 2022 Fourth International Conference on Emerging Research in Electronics, Computer Science and Technology (ICERECT), Mandya, India, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICERECT56837.2022.10060197.
- [2] L. Vite, "Stabilization of a DC-DC buck converter for photovoltaic MPPT applications," 2023 20th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE), Mexico City, Mexico, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/CCE60043.2023.10332856.
- [3] Blinov A., Vinnikov D., Ivakhno V. "Full soft-switching high step-up dc-dc converter for photovoltaic applications" Proceedings of the 16th Conference on Power Electronics and Applications, EPE'14-ECCE Europe, 26-28.08.2014,
- Lappeenranta, Finland. — Lappeenranta, 2014. — P. 1–7.
- [4] E. N. Mammeri, O. Lopez-Santos, A. El Aroudi and L. Martinez-Salamero, "Constant-Power Constant-Voltage Charging Protocol Based on a Four-Phase Interleaved Buck Converter for Electric Vehicle Batteries," 2025 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), London, United Kingdom, 2025, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISCAS56072.2025.11043167.
- [5] K. K. Patel, L. K. Sahu and A. K. Sahu, "Integrated Design of MPPT and DC-DC Buck Converter for Efficient Battery Charging," 2025 Fourth International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T), Raipur, India, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICPC2T63847.2025.10958676.
- [6] R. Dhanasekar, S. G. Kumar and M. Rivera, "Third

- Order Sliding Mode Control of Buck Converter Fed Permanent Magnet DC Motor," 2018 IEEE International Conference on Automation/XXIII Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA), Concepcion, Chile, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICA-ACCA.2018.8609812.
- [7] J. M. Alba-Martínez, R. Silva-Ortigoza, H. Taud, J. Alvarez-Cedillo, I. Rivera-Zárate and R. Bautista-Quintero, "DC Motor Speed Control via a DC to DC Buck Power Converter," 2012 IEEE Ninth Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, Cuernavaca, Mexico, 2012, pp. 288-293, doi: 10.1109/CERMA.2012.54.
- [8] V. Nerubatskyi, O. Plakhtii and D. Hordiienko, "Efficiency Analysis of DC-DC Converter with Pulse-Width and Pulse-Frequency Modulation," 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2022, pp. 571-575, doi: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926762.
- [9] V. Nerubatskyi, O. Plakhtii, D. Hordiienko, H. Khoruzhevskiy. Study of energy parameters in alternative power source microgrid systems with multilevel inverters. INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL "INDUSTRY 4.0". 2020. P.118-121.
- [10] Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Syniavskiy A. V., Philipjeva M. V. Use of modern technologies in the problems of automation of data collection in intellectual power supply systems. Modern engineering and innovative technologies. 2022. Issue 19. Part 1. P. 38–51. DOI: 10.30890/2567-5273.2022-19-01-058.
- [11] L. Du, P. Huang and W. Tong, "Research on full-order sliding mode control method for Buck converter," 2019 3rd International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering (EITCE), Xiamen, China, 2019, pp. 1171-1175, doi: 10.1109/EITCE47263.2019.9094884.
- [12] C. Kumar and A. K. Ray, "Adaptive Sliding Mode Control for DC-DC Buck Converter," 2025 International Conference on Power Electronics Converters for Transportation and Energy Applications (PECTEA), Jatni, India, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/PECTEA61788.2025.11076305.
- [13] Power electronics handbook: devices, circuits, and applications handbook / edited by. Muhammad H. Rashid. – 3rd ed. p. cm. ISBN 978-0-12-382036-5. 1.
- [14] Abraham I. Pressman, Keith Billings, Taylor Morey. Switching Power Supply Design, Third Edition. ISBN 978-0-07-148272-1. P.1-831
- [15] Texas instruments, buck convertor on-line calculator: <https://www.ti.com/tool/BUCK-CONVCALC>
- [16] Schmidt buck convertor on-line calculator: [http://schmidt-walter-schaltnetzteile.de/smps\\_e/abw\\_smps\\_e.html](http://schmidt-walter-schaltnetzteile.de/smps_e/abw_smps_e.html)
- [17] A. Singh, K. Bharti and N. Kumar, "Comparative study between DC-DC buck converter and Zero Voltage switching buck converter," 2024 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), Bhopal, India, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/SCEECS61402.2024.10482318.
- [18] M. M. Kareem, F. A. Harbi, A. B. Ibrahim, A. S. Al-Hiti and Y. A. Mashhadany, "Design and Analysis of Synchronous and Asynchronous Buck Converters in Electrical Applications," 2024 17th International Conference on Development in eSystem Engineering (DeSE), Khorfakkan, United Arab Emirates, 2024, pp. 462-467, doi: 10.1109/DeSE63988.2024.10912037.
- [19] S. Wu, Z. Ran, Z. Tong, T. Liu and Y. Lu, "A Monolithic Integrated E-Mode GaN 48V-to-1V DC-DC Buck Converter with PWM Control," 2023 IEEE International Conference on Integrated Circuits, Technologies and Applications (ICTA), Hefei, China, 2023, pp. 130-131, doi: 10.1109/ICTA60488.2023.10364290.
- [20] Abhijeet Bhattacharya, Sandeep Banerjee, Saksham Girotra, Hridesh Shukla, Gaurang Bhardwaj, Sidharth Talia. Simulation and Design of PI-Controller for the Control of Buck Converter. Journal of Microelectronics and Solid State Devices ISSN: 2455-3336 Volume 7, Issue 1. P.26-32. DOI: 10.37591/jomsd.v7i1.3979
- [21] S. Kumari, M. M. Rayguru and S. Upadhyaya, "Analysis of Model Predictive Controller versus Linear Quadratic Regulator for DC-DC Buck Converter Systems," 2023 7th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), Madurai, India, 2023, pp. 1764-1768, doi: 10.1109/ICICCS56967.2023.10142519.
- [22] M. Saoudi, A. El-Sayed and H. Metwally, "Design and implementation of closed-loop control system for buck converter using different techniques," in IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 32, no. 3, pp. 30-39, March 2017, doi: 10.1109/MAES.2017.150261
- [23] Y. Liu, H. Li, R. Lu, Z. Zuo and X. Li, "An Overview of Finite/Fixed-Time Control and Its Application in Engineering Systems," in IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, vol. 9, no. 12, pp. 2106-2120, December 2022, doi: 10.1109/JAS.2022.105413
- [24] Shcherbak Y. V. Dynamics of a pulse-width converter using the theory of generalized functions / Y. V. Shcherbak, K. Y. Ivakina, V. P. Nerubatskyi // Zbirnyk naukovykh prats' Ukrayins'koho derzhavnogo universytetu zaliznychnoho transportu. – 2025. – Vol. 212. – p. 315-330.
- [25] K. Han, P. Jiang, S. Huang, Y. Jiang, and X. Wang, "Estimator based robust dual-mode predictive output regulation in DC-DC Buck converters," in 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), IEEE, Jun. 2019, pp. 2158–2163. doi: 10.1109/isie.2019.8781172.