

КЕРУВАННЯ СТАБІЛІЗАЦІЄЮ НАПРУГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В ДЖЕРЕЛАХ АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Анотація: У роботі розроблено структурні та функціональні схеми конструювання цифрового контуру керування стабілізацією напруги постійного струму, що може визначати та регулювати рівні напруги для забезпечення достатньо стабільного виходу, а також контролювати вихідну напругу за допомогою зворотного зв'язку, що дозволяє усунути температурний і часовий дрейф параметрів, характерний для аналогових схем і є предметом сучасних досліджень. Проведено імітаційне моделювання впливу параметрів ЦАП зі струмовим виходом на роботу запропонованих схем цифрового контуру управління стабілізації напруги постійного струму у середовищі Multisim. Технічні рішення, що представлені у роботі дозволяють відмовитися від підсилювача напруги в схемах перетворювачів за рахунок використання ЦАП із струмовим виходом та суматором струму.

Ключові слова: АЦП, ЦАП, цифровий контур управління, регулюючий елемент, напруга керування, бінарний код, матриця $R-2R$, вагові резистори.

Постановка проблеми. З розвитком джерел альтернативної енергетики великого розширення набули системи стабілізації напруги постійного струму, що використовуються в різних силових електронних пристроях і надають низку переваг, таких як зменшення розміру та ваги, можливість забезпечувати високу гнучкість, адаптивність та ефективність у використанні. При динамічному перемиканні різних перетворювачів постійного струму в більшості призводить до зміни лінійних характеристик мереж постійного струму. Отже при регулюванні вихідної напруги перетворювачів постійного струму велика увага приділяється вибору методів контролю та керування.

В свою чергу перетворювачі постійного струму, в залежності від принципу дії, поділяються на імпульсні та лінійні. В конструюванні подібних джерел розробники віддають перевагу імпульсним перетворювачам напруги, оскільки в порівнянні з лінійними, мають незаперечні і дуже вагомі переваги – це високий ККД, і, як наслідок, низьке тепловиділення, а також малу вагу і невеликі габарити. [1, 9]. Проте перетворювачі з лінійним керуванням мають простішу схему і менший рівень нелінійних спотворень та немає необхідності використовувати фільтри з великою вибірністю. [1, 9]. З технічних міркувань при поєднанні лінійного та імпульсного способу стабілізації напруги з використанням цифрового контуру керування можна досягти значно кращих характеристик за інші схеми стабілізації постійної напруги.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні імпульсні джерела живлення являють собою досить складні і ретельно розраховані системи стабілізації із зворотними зв'язками. В роботах [1, 2, 12] розглядаються різні методи керування імпульсними перетворювачами постійної напруги, зокрема керування за напругою VMC, керування за струмом СМС, пропорційно-інтегрально-диференціальне керування PID, ковзне керування SM та керування з нечіткою логікою FLC.

Зміни напруги призводять до тимчасового або постійного виходу з ладу навантаження. Через неконтрольовану низьку або високу напругу скорочується термін служби приладів електронних систем та мереж. Коливання напруги виникають через непередбачені зміни навантаження або проблеми в енергосистемі. Використання технології стабілізації напруги постійного струму з цифровою схемою керування та силовими електронними пристроями при проектуванні інтелектуальних перетворювачів призводить до забезпечення стабільної напруги на постійному навантаженні [4].

Класичні лінійні перетворювачі зазвичай використовуються в контролерах перетворювачів постійного струму [9]. Однак через нелінійну особливість систем, методи лінійного керування можуть гарантувати лише стабільність сигналу, а при великих збуреннях неефективні для змін навантаження. У [9], [10] адаптивне зворотне керування використовується для оцінки невизначених змін постійного навантаження потужності при швидкій динамічній реакції, що призводить до швидкого та точного відстеження напруги постійного струму при високих змінах навантаження. Основними перевагами зворотного керування є систематична структура для проектування перетворювача, легкість розуміння, проста продуктивність, невідповідності лінійних параметрів, невідповідності та успішне виключення невизначеності. Адаптивне зворотне керування є одним з найефективніших методів нелінійного синхронного керування для вирішення проблем стабільності та відстеження [3, 9].

Величина пульсацій вихідної напруги визначає електромагнітну сумісність джерел живлення з навантаженням. Електронні системи на основі цифрових елементів потребують менш стабільних параметрів живлення. Наприклад, цифрові мікросхеми потребують постійної напруги живлення з пульсаціями не більше 1%. Концепція стабілізації постійної напруги за допомогою цифрового контуру керування дозволяє усунути періодичні збурення, що множать частоту мережі. Пульсації напруги переносяться на вищі частоти, які визначаються зовнішнім генератором. Такі пульсації можна легко згладити за допомогою звичайного керамічного конденсатора [7].

Мета дослідження: Побудувати систему стабілізації напруги постійного струму з цифровим контуром управління з використанням струмового ЦАП.

Провести дослідження та моделювання запропонованих схем. Визначити вплив параметрів ЦАП зі струмовим виходом на роботу цифрового контуру стабілізації напруги постійного струму

Виклад основного матеріалу дослідження. Розробка цифрового контуру стабілізації напруги постійного струму передбачає перехід до дискретних значень, що визначаються розрядністю лічильника та ЦАП зі струмовим виходом. Тому якість

вихідної напруги залежить не тільки від рівня вхідних пульсацій, але й від розрядності лічильника, ЦАП зі струмовим виходом та швидкодії АЦП.

В роботі [5] попередньо представлено приклад структурної схеми системи стабілізації постійної напруги з цифровим контуром керування. Структурна схема складається з цифрового контуру керування та елемента регулювання потужності. У такому контурі керуючий сигнал регулюючого елемента формується у вигляді двійкового коду, який перетворюється на аналоговий сигнал за допомогою ЦАП зі струмовим виходом, а для керування вихідною напругою використовується АЦП. Значення постійної напруги на навантаженні оцінюється цифровим контуром керування, порівнюється з заданим значенням та модифікує керуючий двійковий код таким чином, щоб за допомогою регулюючого елемента мінімізувати можливе відхилення вихідної напруги [10].

Практична реалізація такої системи стабілізації постійної напруги, у переважній більшості випадків, передбачає використання ЦАП на основі R-2R-матриці з вихідним сигналом у вигляді напруги, рівень якої визначається формулою 1:

$$V_{out} = \frac{V_{ref}}{2^n} D \quad (1)$$

де V_{ref} – величина опорної напруги; n -розрядність ЦАП; D – коефіцієнт який визначається від 0 до $2^n - 1$ в залежності від вхідного двійкового коду.

При практичній реалізація такої системи стабілізації напруги, в даному випадку використовується ЦАП на основі двійково-зважених резисторів із вихідним сигналом у вигляді струму, рівень якого визначається формулою 2

$$\Sigma I = \frac{V_{ref}}{R} x_0 + \frac{V_{ref}}{2R} x_1 + \frac{V_{ref}}{4R} x_2 + \frac{V_{ref}}{8R} x_3 + \dots + \frac{V_{ref}}{2^n R} x_n \quad (2)$$

де V_{ref} – величина опорної напруги; n -розрядність ЦАП; x_n – значення двійкового коду, може набувати значень 0 або 1; R – опір першого розряду ЦАП.

Значення кроку квантування дорівнює градації вихідної напруги від наймолодшого розряду та визначається за формулою 3:

$$h = V_{ref} \frac{R_0}{2^n R} \quad (3)$$

Таким чином, рівень вихідного сигналу ЦАП не перевищує опорну напругу, що не є критичним, якщо вихідна напруга системи стабілізації постійної напруги не перевищує напругу живлення ЦАП (показано на рисунку 1а). В іншому випадку вихідного рівня ЦАП недостатньо для керування регулюючим елементом і необхідно використовувати додатковий підсилювач постійного струму (показано на рисунку 1б).

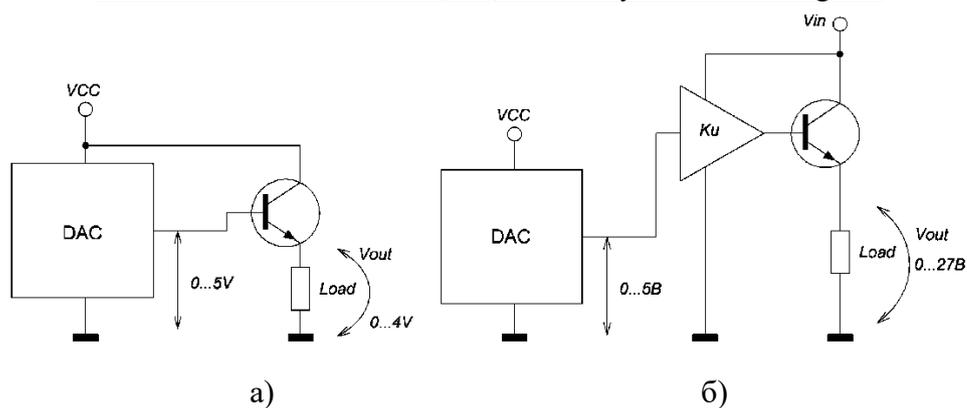


Рисунок 1 – Підключення ЦАП до регулюючого елемента:
а) без підсилювача; б) з підсилювачем

Такий підсилювач постійного струму повинен мати високу температурну стабільність та можливість лінійного підсилення вхідного сигналу з рівнем у кілька мілівольт, що зужує можливості вибору спеціалізованих мікросхем і, відповідно, збільшує їх вартість. У свою чергу, недоліком структури ЦАП зі зваженими резисторами є широкий діапазон значень опору резисторів, що служать для формування струмів розряду. Крім того, для забезпечення точності перетворення номінали резисторів повинні дотримуватися з прецизійною точністю.

Застосування у складі цифрової системи стабілізації напруги ЦАП із струмовим виходом на зважених резисторах дає можливість конструювати перетворювачі з вихідною напругою значно вищою ніж напруга живлення цифрової частини. На рисунку 2 наведена функціональна схема можливого варіанту такої системи стабілізації.

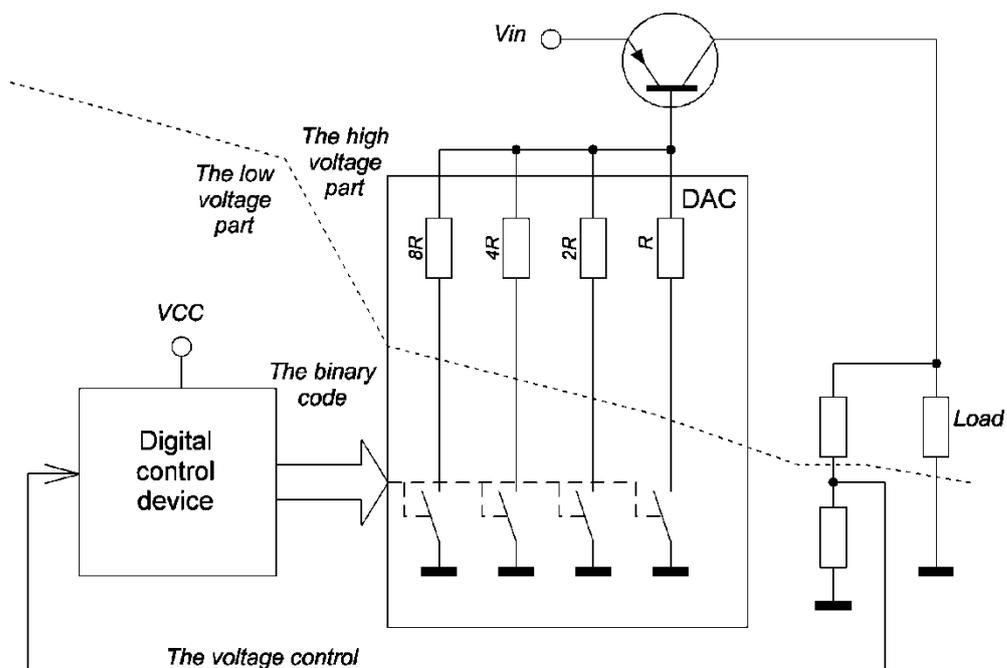


Рисунок 2 – Функціональна схема цифрового контуру стабілізації напруги на основі ЦАП із струмовим виходом

Схема працює таким чином. Цифровий пристрій керування (Digital control device) формує керуючий бінарний код (binary code), згідно з яким підключаються відповідні вагові резистори (DAC) і на виході ЦАП формується сигнал керування регулюючим транзистором – базовий струм, який підсилюється транзистором в h_{21E} раз, протікає через навантаження і створює відповідне падіння напруги. Контроль поточного значення напруги (voltage control) на навантаженні здійснюється через подільник, що знижує високу вихідну напругу до рівня безпечного для цифрової частини перетворювача. Вихідний струм такого ЦАП описується формулою 4:

$$\Sigma I = \frac{V_{ref}}{2R} x_0 + \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{ref}}{2R} x_1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{V_{ref}}{2R} x_2 + \frac{1}{8} \cdot \frac{V_{ref}}{2R} x_3 + \dots + \frac{1}{2^{n-1}} \cdot \frac{V_{ref}}{2^n R} x_n = \frac{V_{ref}}{2^n R} D. \quad (4)$$

Значення кроку квантування дорівнює градації вихідної напруги від наймолодшого розряду та визначається за формулою 5:

$$h = \frac{1}{2^{n-1}} V_{ref} \frac{R_0}{2R}. \quad (5)$$

Для даної схемної реалізації ЦАП опорна напруга рівна напрузі живлення за мінусом падіння напруги на переході база-емітер регулюючого транзистора.

Таким чином з'являється можливість будувати стабілізатори з вихідною напругою, яка обмежується зверху лише напругою пробною транзисторних ключів ЦАП.

На основі запропонованої концепції побудови цифрового контуру стабілізації напруги постійного струму розроблена схема пристрою, результати дослідження якої в середовищі Multisim наведені на рисунку 3 [5]. В якості цифрового пристрою керування використаний ТТЛ реверсивний двійковий чотири розрядний лічильник 74193N із схемою реверсування підрахунку на логічних елементах [5]. ЦАП реалізований на польових транзисторних з ваговими резисторами, що працюють в ключовому режимі.

Однорозрядний АЦП побудований на операційному підсилювачі і стабілітроні для обмеження вихідного рівня до значення логічної одиниці ТТЛ логіки. Регулюючий елемент – біполярний транзистор структури р-п-р. Для контролю керуючого бінарного коду з виходу цифрового пристрою керування застосований HEX індикатор. Регулювання вихідного сигналу забезпечується зміною порогового рівня на вході операційного підсилювача потенціометром, який заживлюється від джерела стабільної опорної напруги.

На рисунку 4 наведена осцилограма вихідної напруги пристрою [10]. З осцилограми видно, що напруга на навантаженні після вмикання живлення ступінчасто (без викидів) зростає від нуля до визначеного значення і в подальшому відслідковується з певною пульсацією.

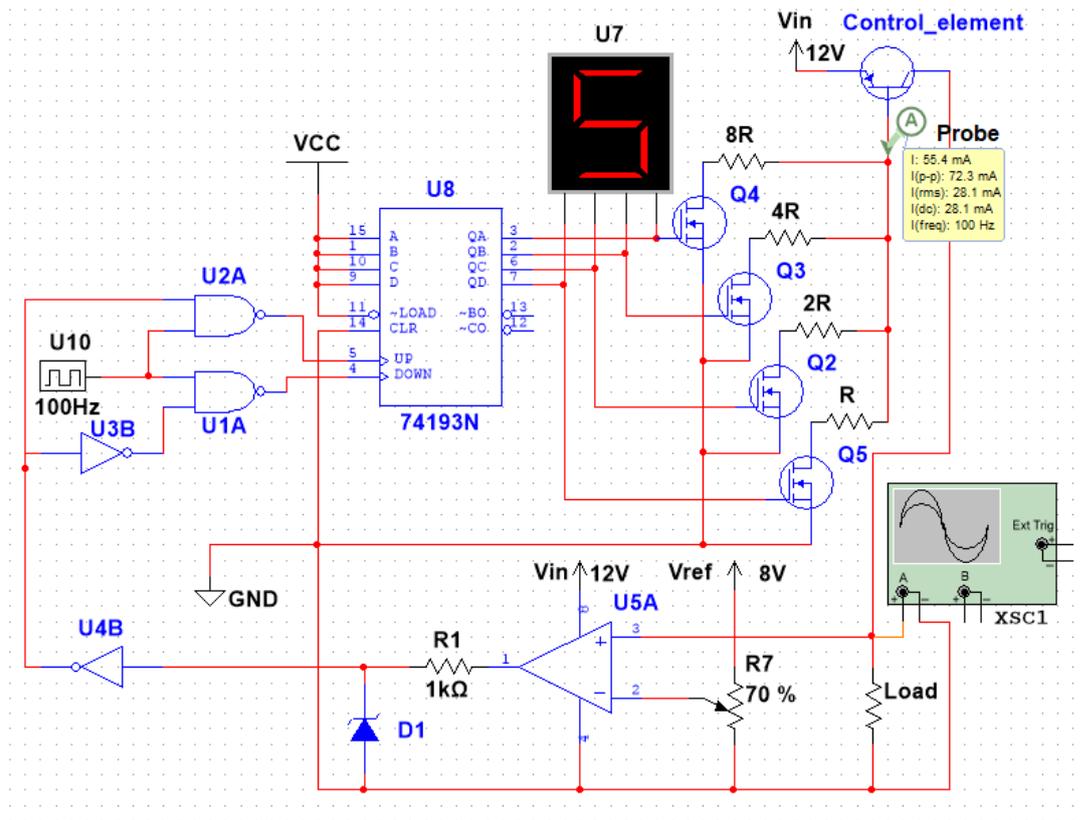


Рисунок 3 – Цифровий контур стабілізації напруги постійного струму на основі реверсивного лічильника

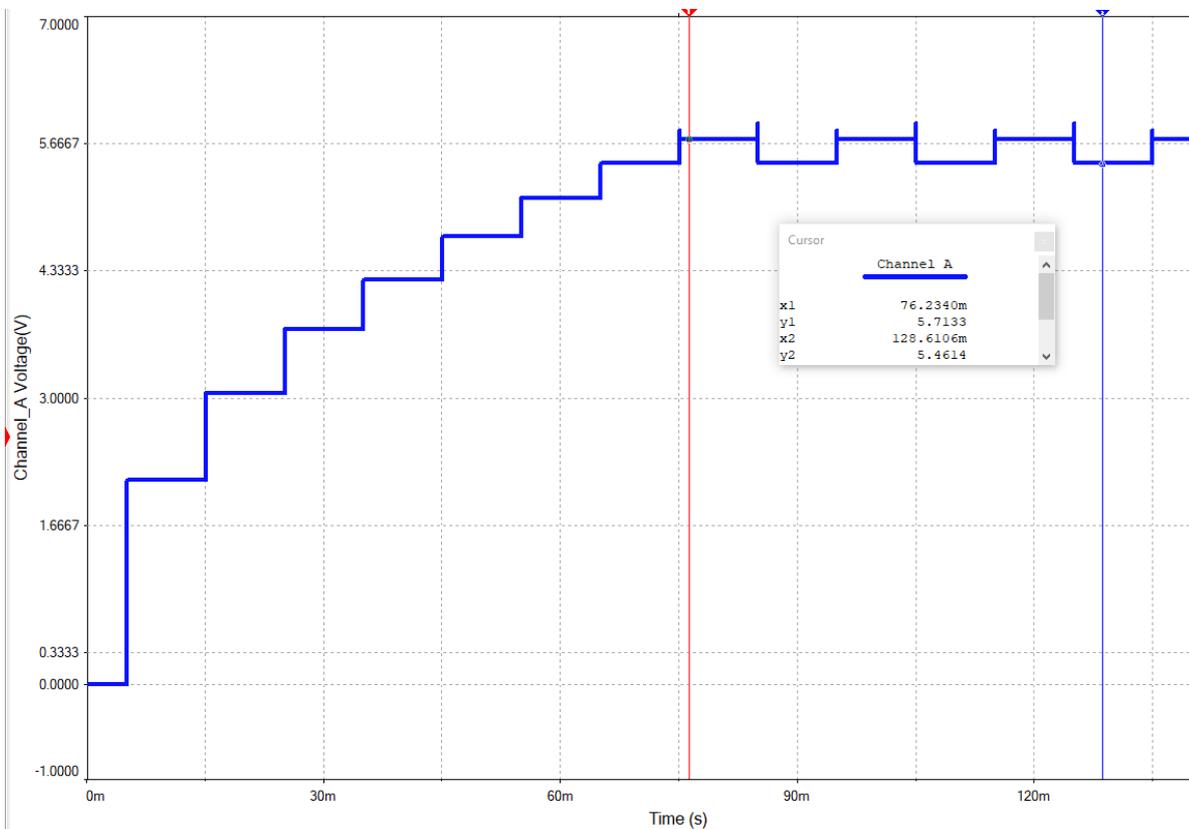


Рисунок 4 – Осцилограми напруги на навантаженні

Якщо обмежити напругу живлення системи стабілізації V_{in} рівнем 30В з'являється можливість в якості транзисторних ключів ЦАП використати буферні елементи ТТЛ 7406N – інвертори з відкритим колектором, максимальною робочою напругою 30В і вихідним струмом до 40мА [8].

На рисунку 5 наведені результати дослідження в середовищі Multisim модифікованої схеми цифрового контуру стабілізації напруги постійного струму, де використані два реверсивних лічильники 74193N та вісім буферних елементів 7406N.

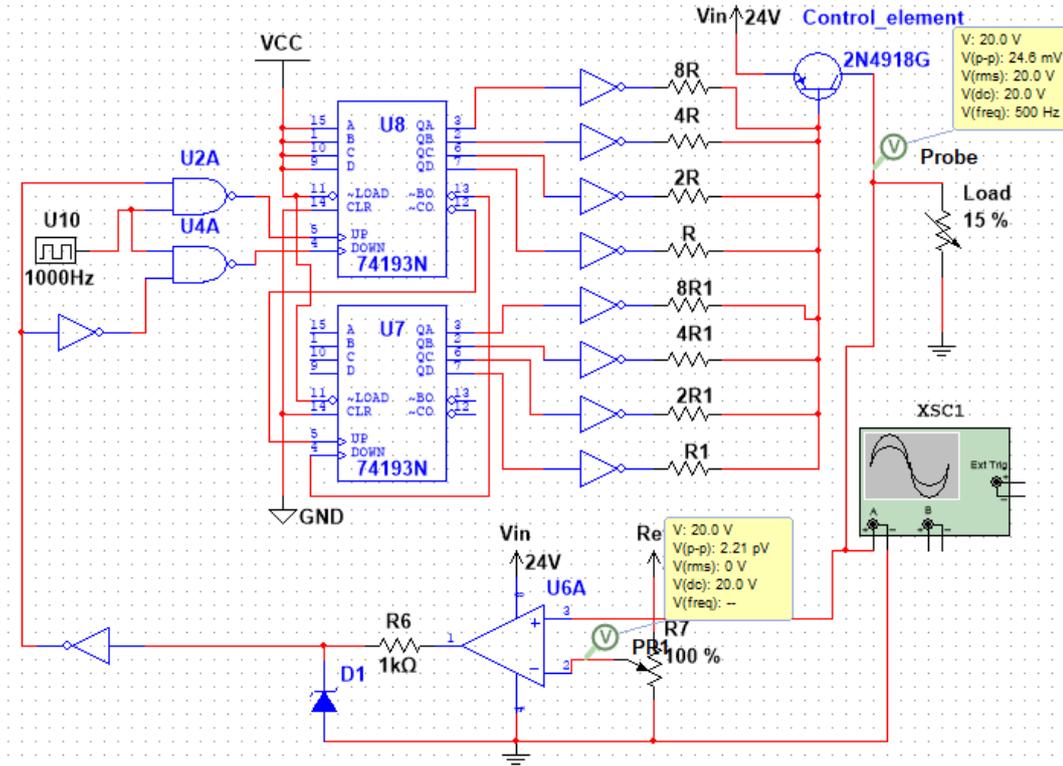


Рисунок 5 – Модифікована схема цифрового контуру стабілізації напруги постійного струму на основі двох реверсивних лічильників

На рисунку 6 наведені осцилограми роботи модифікованої схеми цифрового контуру стабілізації напруги постійного струму на фіксоване навантаження 15 Ом при різних значеннях вихідної напруги: 20 В, 16 В, 12 В, 4 В, 8 В.

Аналіз осцилограм вказує на явну не лінійність залежності «керуючий код-вихідна напруга», що обумовлено залежністю коефіцієнту підсилення базового струму регулюючого транзистора 2N4918G від струму колектору. Як видно із залежності при зростанні струму колектору від 15 мА до 1500 мА коефіцієнт передачі h_{FE} знижується від 150 до 18. [14].

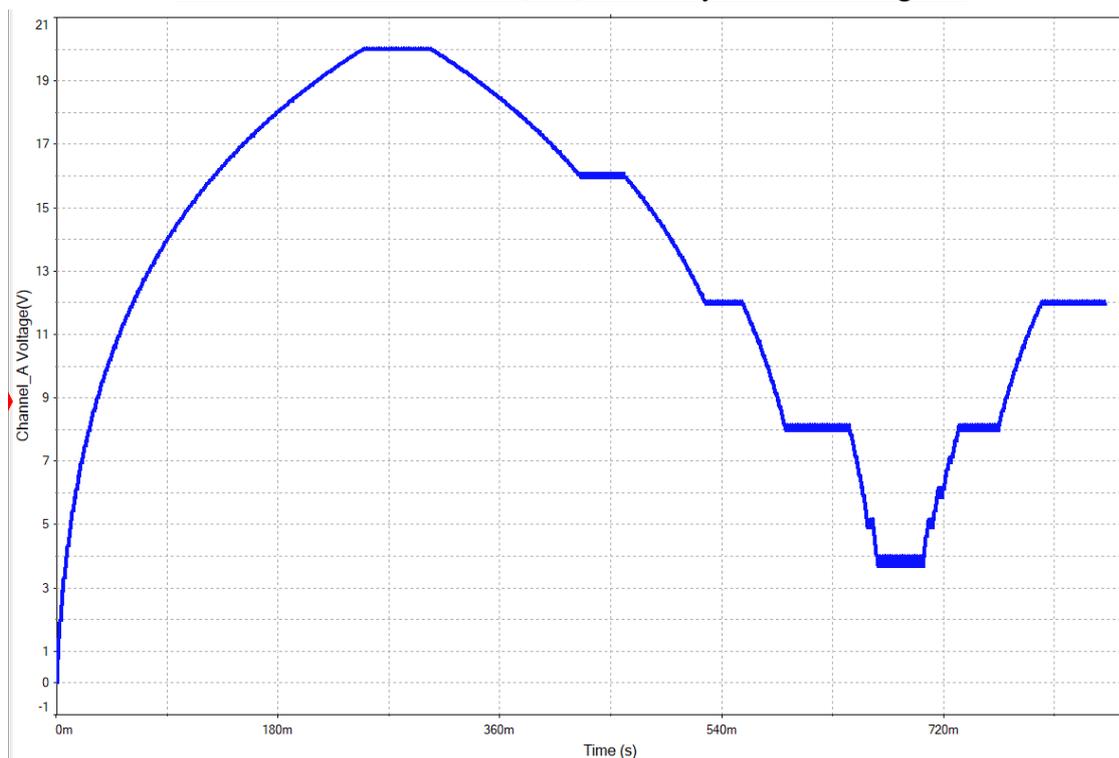


Рисунок 6 – Осцилограми вихідної напруги модифікованої схеми цифрового контуру стабілізації напруги постійного струму

Продемонстрована на рисунках 3 та 5 реалізація функціональної схеми цифрового контуру стабілізації напруги постійного струму на основі ЦАП із струмовим виходом використовує напругу живлення V_{in} за мінусом падіння напруги на переході баз-емітер регулюючого транзистора в якості опорної напруги. Таким чином, при коливанні (пульсаціях) напруги живлення V_{in} і зафіксованому коді на виході цифрового контуру керування відбувається модуляція вихідного струму ЦАП, що є керуючим сигналом для регулюючого транзистора та проявляється у вигляді додаткових пульсацій напруги на навантаженні.

На рисунку 7 наведена схема моделювання впливу коливання напруги живлення на пульсації вихідної напруги.

Умови моделювання: напруга живлення $V_{in}=24$ В, форма пульсації синусоїдальна (Рисунок 8), амплітуда пульсацій 2 В, частота 50 Гц, частота тактового генератора 1000 Гц і 100 кГц (відношення частоти пульсацій на навантаженні до частоти пульсацій напруги живлення 1:10, 1:100 і 1:1000), вихідна напруга стабілізатора 12 В. На рисунках 8-10 наведені осцилограми напруги на навантаженні при різному відношенні тактової частоти генератора до частоти пульсацій напруги живлення.

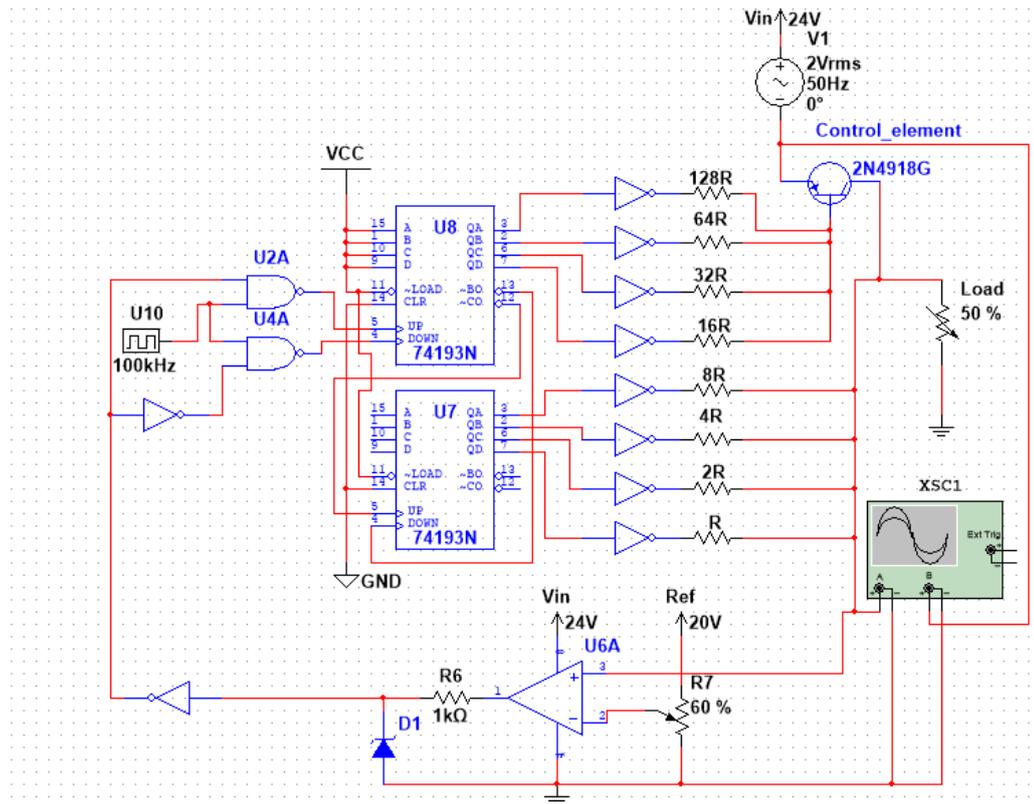


Рисунок 7 - Схема моделювання впливу пульсації напруги живлення на вихідну напругу

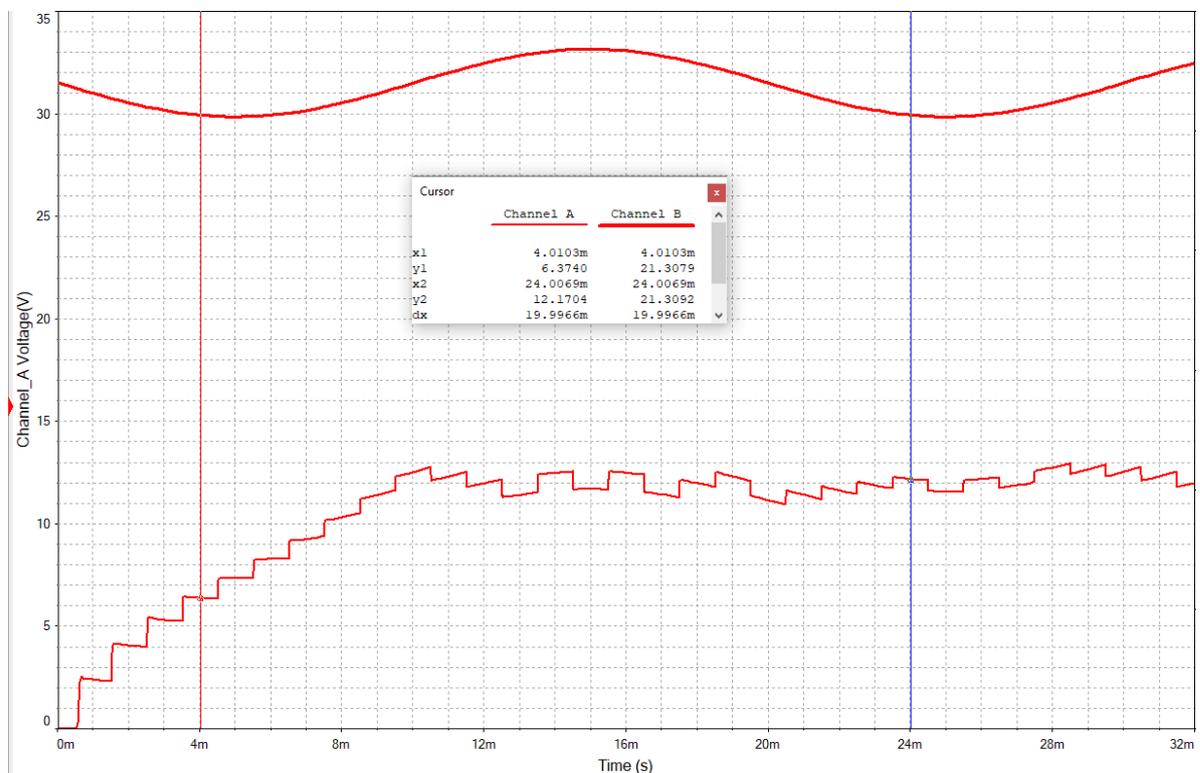


Рисунок 8 – Результати дослідження впливу пульсацій вхідної напруги на напругу навантаження (V_{in} з пульсаціями 2 В; $V_{load}=12$ В; $F_{in}:F_{ul0}=1:10$)

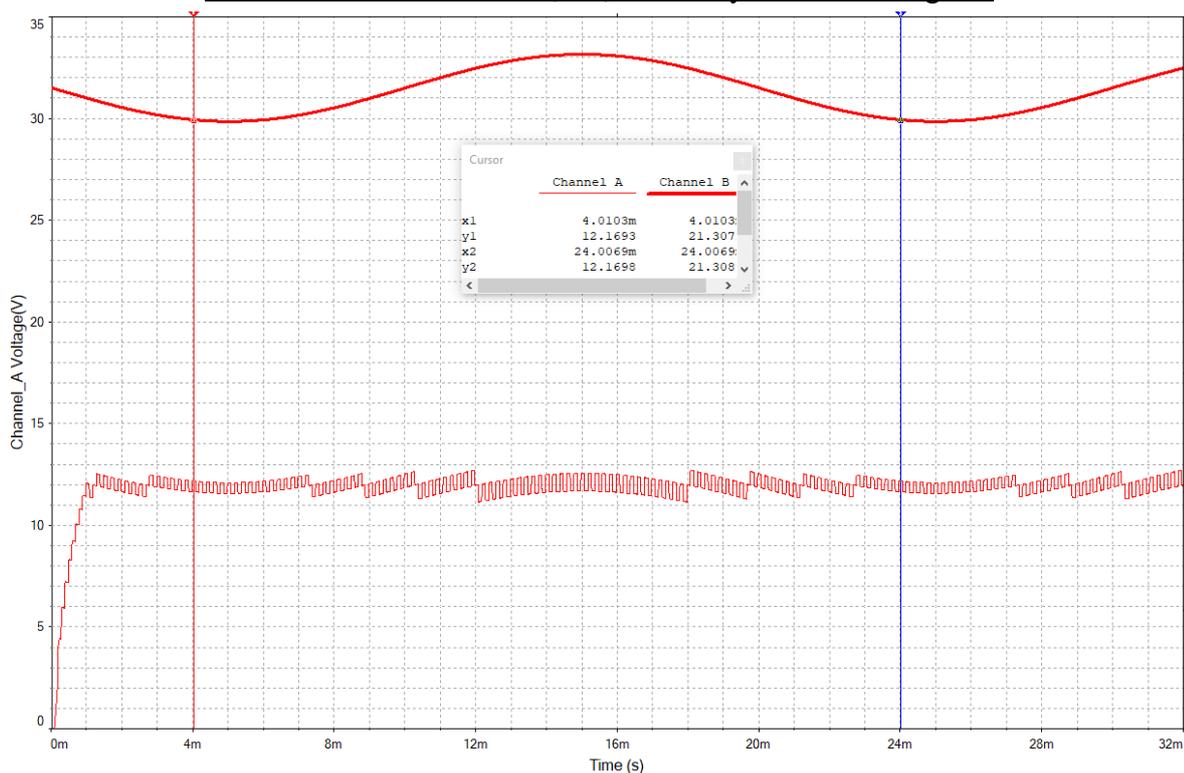


Рисунок 9 – Результати дослідження впливу пульсацій вхідної напруги на напругу навантаження (V_{in} з пульсаціями 2 В; $V_{load} = 12$ В; $F_{in}:F_{u100} = 1:100$)

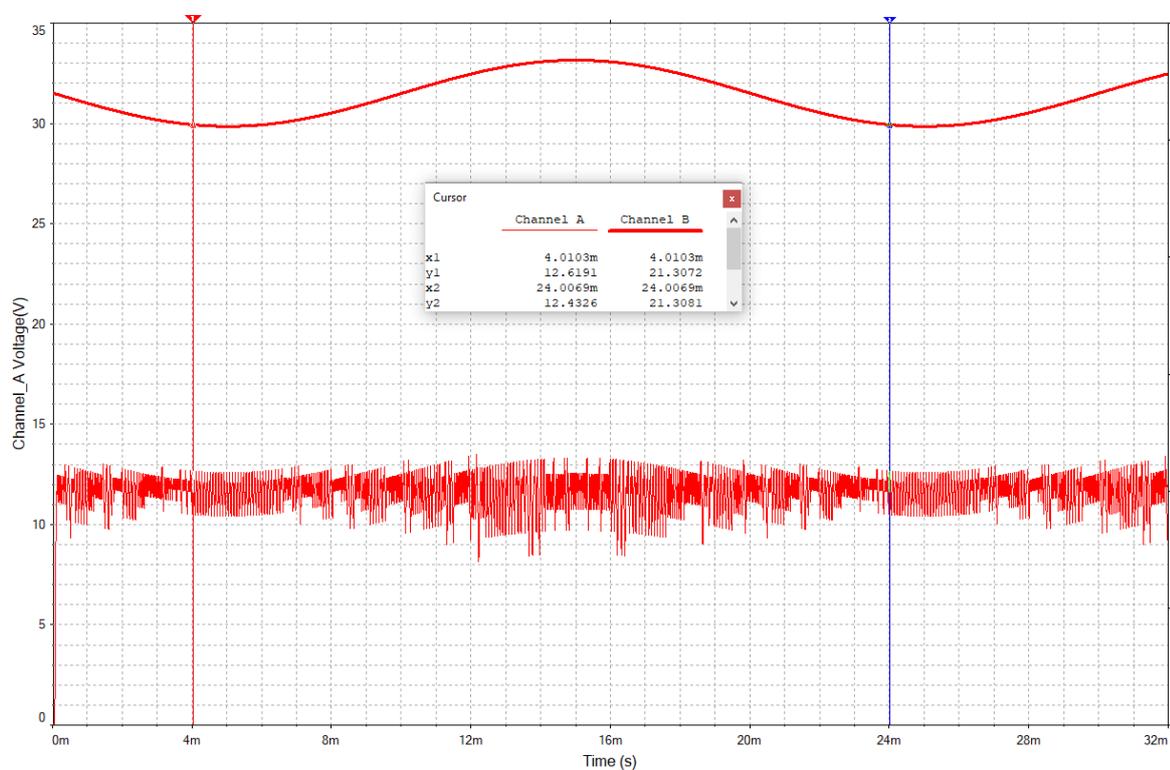


Рисунок 10 – Результати дослідження впливу пульсацій вхідної напруги на напругу навантаження (V_{in} з пульсаціями 2 В; $V_{load} = 12$ В; $F_{in}:F_{u10} = 1:1000$)

Висновки. Аналіз результатів моделювання впливу пульсації напруги живлення на вихідну напругу цифрового контуру стабілізації при різних частотах тактового генератора показує, що рівень пульсацій при коливаннях в межах $\pm 16,7\%$ і співвідношенні між частотою пульсації на навантаженні 1:10 становить 1,58 В (рисунок 8), а при співвідношенні 1:100 (Рисунок 9) та 1:1000 (Рисунок 10) амплітуда пульсації становить 1,53 В і 220 мВ.

Відповідно, відношення вихідної напруги до амплітуди пульсацій при різних частотах тактового генератора 1:10, 1:100 та 1:1000 становлять 7,6, 7,8, 54 рази.

Отже, використання ЦАП із струмовим виходом з метою підвищення напруги на навантаженні вище напруги живлення цифрової частини контуру стабілізації напруги постійного струму, що побудований за функціональною схемою наведеною на рисунку 2 в реальних умовах функціонування, забезпечує плавний запуск при регулюванні вихідної напруги постійного струму з низьким рівнем пульсацій без використання додаткових фільтрів.

ЛІТЕРАТУРА

1. An Introduction to Flyback Converters: Parameters, Topology, and Controllers. *Monolithic Power Systems*. 2023. 7 p. URL: <https://www.monolithicpower.com/en/an-introduction-to-flyback-convertersparameters-topology-and-controllers>.
2. Betten J. Flyback converter design considerations. Dallas: Texas Instruments, 2024. 4 p.
3. Fernandez-Serantes L.A., Casteleiro-Roca J.L., Berger H., Calvo-Rolle J.L. Hybrid intelligent system for a synchronous rectifier converter control and soft switching ensurement. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2022. Vol. 35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2022.101189>.
4. Holovaty A., Łukaszewicz A., Teslyuk V., Ripak N. Development of AC Voltage Stabilizer with Microcontroller-Based Control System. *2022 IEEE 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, Lviv, Ukraine. IEEE, 2022. P. 527–530. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSIT56902.2022.10000461>.
5. Метелиця А.О. Впровадження цифрового контура управління стабілізації напруги постійного струму в системах відновлювальної енергетики. *Молода наука 2024: зб. наук. пр. студентів, аспірантів і молодих вчених*. Запоріжжя: ЗНУ, 2024. Т. 5. С. 98.
6. Patel J., Naik A. A Low Voltage High-Speed Segmented Current Steering DAC for Neural Stimulation Application. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2020. Vol. 8(5). P. 4270–4274.
7. Singh D.K., Singh J., Ravela R.R. Design and Performance Study of Cost-Effective Smart Servo Controlled Automatic Voltage Stabilizer. *2020 International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICE3)*, Gorakhpur, India. IEEE, 2020. P. 211–215. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICE348803.2020.9122815>.
8. SN7406N Datasheet. Texas Instruments. 2001. URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/27354/TI/SN7406N.html>.
9. Sorouri H., Sedighzadeh M., Oshnoei A., Khezri R. An intelligent adaptive control of DC-DC power buck converters. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022. Vol. 141. P. 108099. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.108099>.

10. Tsyurulnyk S., Tromsiuk V., Borodai Y., Metelytsya A., Nepiyvoda M. An Intelligent Adaptive DC Voltage Stabilization with a Digital Control Contour. *CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org)*. 2023. Vol. 3403. P. 248–262. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3403/paper20.pdf>.
11. Туровський О.Л., Лисенко Д.О. Динамічна модель комбінованого імпульсного стабілізатора напруги живлення телекомунікаційного обладнання з астатизмом другого порядку. *Наукові записки Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій*. 2024. № 1(5). С. 120–129. DOI: <https://doi.org/10.31673/2786-8362.2024.011515>.
12. Юрко О.О., Мосьпан Д.В., Кухаренко Д.В. Блок живлення з програмним керуванням. *Виклики та проблеми сучасної науки: зб. наук. пр.* 2023. Т. 1. С. 294–298. DOI: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.22886720>.
13. Яндутьський О.С., Труніна Г.О., Нестерко А.Б. Регулювання напруги в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії: монографія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.
14. 2N4918G Datasheet. ON Semiconductor. 2004.
URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/549965/ONSEMI/2N4918G.html>.

REFERNECEC

1. An Introduction to Flyback Converters: Parameters, Topology, and Controllers. *Monolithic Power Systems*. 2023. 7 p. URL: <https://www.monolithicpower.com/en/an-introduction-to-flyback-convertersparameters-topology-and-controllers>.
2. Betten J. Flyback converter design considerations. Dallas: Texas Instruments, 2024. 4 p.
3. Fernandez-Serantes L.A., Casteleiro-Roca J.L., Berger H., Calvo-Rolle J.L. Hybrid intelligent system for a synchronous rectifier converter control and soft switching ensurement. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2022. Vol. 35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2022.101189>.
4. Holovatyy A., Łukaszewicz A., Teslyuk V., Ripak N. Development of AC Voltage Stabilizer with Microcontroller-Based Control System. 2022 *IEEE 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, Lviv, Ukraine. IEEE, 2022. P. 527–530. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSIT56902.2022.10000461>.
5. Metelytsia A.O. Vprovadzhennia tsyfrovoho kontura upravlinnia stabilizatsii napruhy postiinoho strumu v systemakh vidnovliuvanoi enerhetyky. *Moloda nauka 2024: zb. nauk. pr. studentiv, aspirantiv i molodykh vchenykh*. Zaporizhzhia: ZNU, 2024. Т. 5. S. 98
6. Patel J., Naik A. A Low Voltage High-Speed Segmented Current Steering DAC for Neural Stimulation Application. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2020. Vol. 8(5). P. 4270–4274.
7. Singh D.K., Singh J., Ravela R.R. Design and Performance Study of Cost-Effective Smart Servo Controlled Automatic Voltage Stabilizer. 2020 *International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICE3)*, Gorakhpur, India. IEEE, 2020. P. 211–215. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICE348803.2020.9122815>.
8. SN7406N Datasheet. Texas Instruments. 2001.

URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/27354/TI/SN7406N.html>.

9. Sorouri H., Sedighzadeh M., Oshnoei A., Khezri R. An intelligent adaptive control of DC-DC power buck converters. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022. Vol. 141. P. 108099. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.108099>.

10. Tsyrlunyk S., Tromsiuk V., Borodai Y., Metelytsya A., Nepiyvoda M. An Intelligent Adaptive DC Voltage Stabilization with a Digital Control Contour. *CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org)*. 2023. Vol. 3403. P. 248–262. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3403/paper20.pdf>

11. Turovskiy O.L., Lysenko D.O. Dynamichna model kombinovanoho impulsnoho stabilizatora napruhy zhyvlennia telekomunikatsiinoho obladdannia z astatyzmom druhoho poriadku. *Naukovi zapysky Derzhavnoho universytetu informatsiino-komunikatsiinykh tekhnolohii*. 2024. № 1(5). S. 120–129. DOI: <https://doi.org/10.31673/2786-8362.2024.011515>.

12. Iurko O.O., Mospan D.V., Kukharenko D.V. Blok zhyvlennia z prohramnym keruvanniam. *Vykylyky ta problemy suchasnoi nauky: zb. nauk. pr.* 2023. T. 1. S. 294–298. DOI: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.22886720>.

13. Iandulskiy O.S., Trunina H.O., Nesterko A.B. Rehuliuвання napruhy v rozpodilnykh elektrychnykh merezhakh z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii: monohrafiia. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2021.

14. 2N4918G Datasheet. ON Semiconductor. 2004.

URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/549965/ONSEMI/2N4918G.html>

Received 10.10.2025.

Accepted 16.10.2025.

Digital control circuit for stabilizing DC voltage

The article presents an analysis of the operation of a digital control loop for stabilizing DC voltage, which utilizes a linear relationship between the duration of the pulse opening of the power-regulating element and the deviation of the output voltage from the nominal value. The design features and technical parameters of linear and pulse sequential DC voltage converters are analyzed. The study is based on the principle of operation of a step-down linear DC voltage stabilization system with pulse control. The work provides structural and functional diagrams of the development of the digital control loop for voltage stabilization. Simulation modeling of the proposed circuits was conducted in the Multisim software environment.

The digital control loop for DC voltage stabilization can be used in DC networks to ensure a stable DC voltage for components involved in energy generation and storage. Changes in load conditions affect the voltage quality in the DC voltage stabilization system. Under such conditions, an effective digital control loop for DC voltage stabilization is necessary to ensure proper operation of voltage converters and automatic regulation of battery charging.

The research is based on the development of structural and functional diagrams of the digital control loop for DC voltage stabilization using a 4-bit or 8-bit digital-to-analog converter with current control and a reference voltage $V_{ref} = V_{in}$.

Analysis of the simulation results of the impact of power supply voltage ripple on the output voltage of the digital DC voltage stabilization loop at various clock generator frequencies shows that, under ideal conditions ($V_{in} = const$), the ripple level is 332 mV. When the power supply voltage fluctuates within $\pm 11.7\%$ and the ratio of the ripple frequency at the

load to the power supply voltage fluctuation frequency is 10:1, the ripple amplitude at the load is 1.24 V. Similarly, when the ratio of the ripple frequency at the load to the power supply voltage fluctuation frequency is 100:1, the ripple amplitude is 945 mV. Consequently, compared to ideal conditions, the ripple increases by a factor of 3.7 (1.24 V / 332 mV) at a frequency ratio of 10:1 and by a factor of 2.8 (945 mV / 332 mV) at a frequency ratio of 100:1.

Simulation modeling of the developed circuits demonstrated the expected results of voltage stabilization using the digital control loop. Specifically, a smooth startup was observed during the regulation of the output DC voltage with a low ripple level without the use of additional filters. Additionally, through feedback, the output voltage is controlled, which eliminates the temperature and time drift of parameters typical of analog circuits.

Keywords: ADC, DAC, digital control loop, regulating element, control voltage, binary code, R-2R matrix, weighted resistors.

Метелиця Артем Олександрович – викладач Вінницького технічного фахового коледжу, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем, Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9383-7752>

Metelitsa Artem Oleksandrovych – teacher at Vinnytsia Technical Vocational College, postgraduate student at the Department of Electrical Engineering and Cyberphysical Systems, Yu. M. Potebnia Engineering Educational and Scientific Institute of Zaporizhia National University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9383-7752>