
ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

УДК 621.314

В. І. ЯСЬКІВ, А. В. ЯСЬКІВ

РЕГУЛЬОВАНИЙ ПОМНОЖУВАЧ НАПРУГИ НА ОСНОВІ ВИСОКОЧАСТОТНИХ МАГНІТНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
вул. Руська, 56, Тернопіль, Україна. E-mail: yaskiv@yahoo.com
Західноукраїнський національний університет
вул. Львівська, 11, м. Тернопіль, Україна. E-mail: annyaskiv@gmail.com*

Анотація. В статті описано запропонований метод побудови помножувачів напруги, який базується на використанні регуляторів напруги на основі високочастотних магнітних підсилювачів. Описано принцип роботи регулятора. Приведено топологію стабілізованого помножувача напруги.

Ключові слова: високочастотний магнітний підсилювач, прямокутна петля гістерезису, помножувач напруги, стабілізатор напруги.

Abstract. The proposed method of designing of voltage multipliers, which is based on the use of voltage regulators based on high-frequency magnetic amplifiers is describes in the article . The principle of operation of the regulator is described. The topology of the stabilized voltage multiplier is given.

Keywords: high-frequency magnetic amplifier, rectangular hysteresis loop, voltage multiplier, voltage stabilizer.

DOI: 10.31649/1681-7893-2023-45-1-121-127

ВСТУП

Часто споживач вимагає високочастотної змінної напруги, яка своєю амплітудою в рази перевищує амплітуду високочастотної змінної напруги уже наявного джерела. В цьому випадку використовують кратні помножувачі напруги, які дозволяють отримати таку напругу. За необхідності використання постійної напруги такий помножувач доповнюється вихідним фільтром. Однак, такі помножувачі мають ряд обмежень і не можуть мати широкого застосування. В першу чергу такі топології не можуть забезпечити стабілізацію вихідної напруги. Тому, як правило, помножувачі напруги використовують у випадку живлення споживачів, що мають незмінний опір навантаження, і при невисоких значеннях струму навантаження.

В статті розглянуто запропоновані способи реалізації помножувачів напруги на основі регуляторів напруги, в яких в ролі регулюючих елементів використовуються високочастотні магнітні підсилювачі. В цьому випадку забезпечується стабілізація вихідної напруги.

ПРИНЦИП РОБОТИ РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ НА ОСНОВІ ВИСОКОЧАСТОТНОГО МАГНІТНОГО ПІДСИЛЮВАЧА

Базова схема імпульсного стабілізатора напруги (ІСПН) на основі високочастотного магнітного підсилювача (ВМП) і часові діаграми, які пояснюють роботу схеми, наведені на рисунках 1 і 2 відповідно [1-10].

Ключ на основі високочастотного магнітного підсилювача складається з дроселя насичення TS, діод випрямляча VD2, розмагнічуючого діода VD1. Дросель насичення TS виконаний на високочастотному аморфному сплаві з прямокутною петлею гістерезису.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Для організації циклу перемагнічування дросель насичення TS використовує дві напруги: напругу високочастотного силового трансформатора та вихідну напругу стабілізатора. ВМП виділений пунктирною лінією і містить: дросель насичення TS , робочий діод $VD2$ (діод випрямляча), керуючий діод $VD1$ (розмагнічуючий діод) та підсилювач сигналу розузгодження ПР.

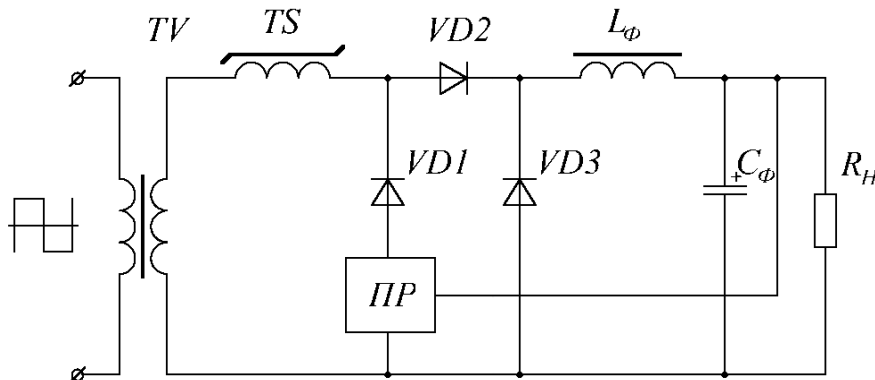


Рисунок 1 – Базова схема ІСПН на основі ВМП

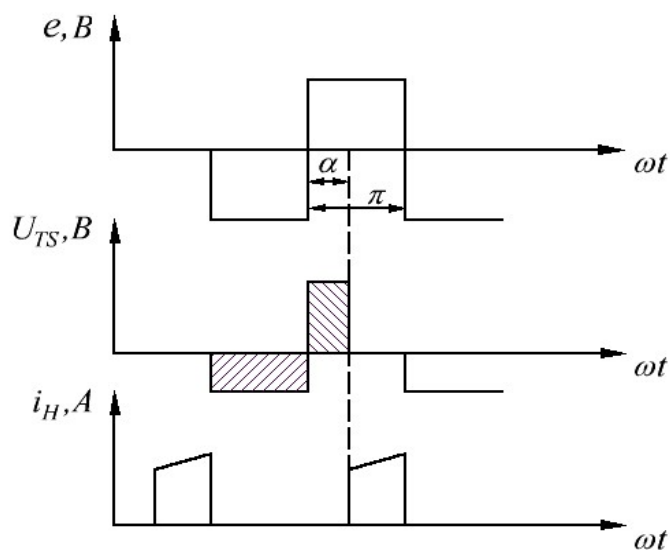


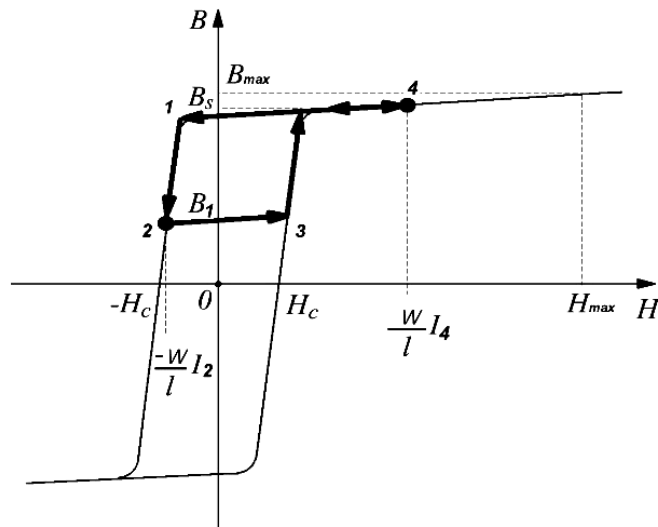
Рисунок 2 – Осцилограми, що ілюструють роботу регулятора на базі ВМП (e – е.р.с. вторинної обмотки високочастотного силового трансформатора; U_{TS} – напруга на дроселі насичення магнітного ключа; I_H – струм в навантаженні)

Робочий цикл цього високочастотного магнітного підсилювача забезпечується за рахунок рознесення в часі керуючого та робочого півперіодів випрямним $VD2$ та розмагнічуючим $VD1$ діодами. Півперіод напруги живлення, який відповідає непровідному стану діода $VD2$, називається півперіодом керування, а провідному стану – робочим. Протягом півперіоду керування під впливом сигналу керування від підсилювача сигналу розузгодження (ПР) відбувається розмагнічування дроселя насичення ВМП (TS) в режимі або джерела струму, або джерела е.р.с. (в залежності від типу регулюючого елемента в колі керування) із стану насичення B_s до певного рівня індукції B_1 по петлі гістерезису (рис. 3).

При зміні полярності вхідної високочастотної напруги починається робочий півперіод, який складається з двох інтервалів ($\alpha, \pi - \alpha$). На першому інтервалі під впливом джерела е.р.с. відбувається намагнічування магнітопроводу ДН від початкового рівня індукції B_1 до рівня індукції насичення B_s – у цьому випадку дросель насичення TS ВМП перебуває в ненасиченому стані, що відповідає

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

розімкнутому стану ключа. На другому інтервалі дросель насичення TS досягає свого насичення, ключ переходить в замкнутий стан і джерело е.р.с. (вторинна півобмотка трансформатора) приєднано до навантаження. Створюється коло для протікання силового струму. У випадку побудови ІСПН на ВМП стабілізація напруги на навантаженні забезпечується зміною еквівалентного опору дроселя насичення ВМП у кожній частині робочого півперіоду. Таким чином, змінюючи глибину розмагнічення в півперіод керування у функції вихідної напруги з врахуванням змін у вхідній напрузі, отримуємо широтно-імпульсну модуляцію в робочий півперіод, що обумовлює зміну співвідношення часів насиченого та



ненасиченого станів дроселя насичення ВМП в межах одного періоду.

Рисунок 3 – Прямокутна петля гістерезису аморфного сплаву дроселя насичення ВМП

На рис. 4 наведено зовнішню характеристику ІСПН з вихідними параметрами 5 В, 10 А на основі ВМП із зазначенням відповідності процесів перемагнічування високочастотного аморфного сплаву дроселя насичення TS з прямокутною петлею гістерезису при різних значеннях струму навантаження.

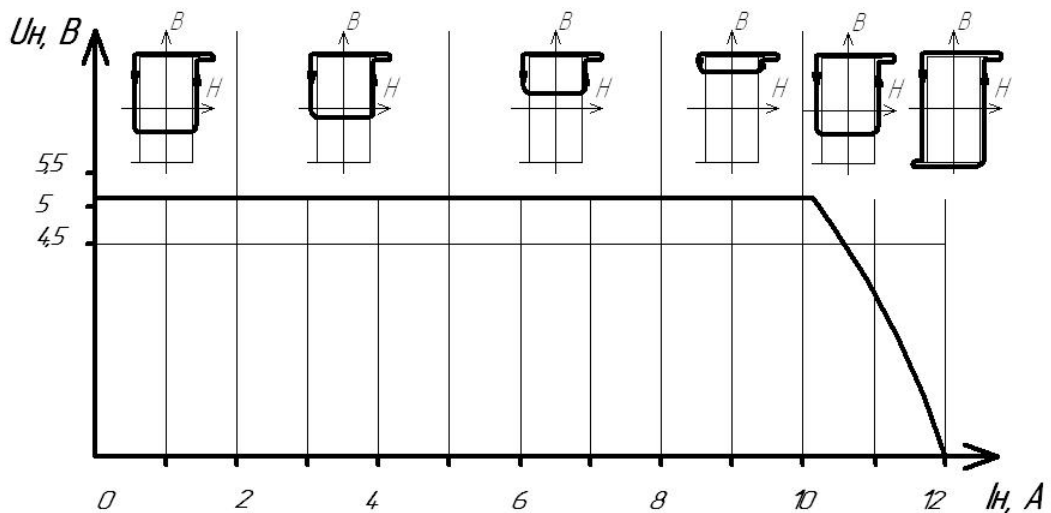


Рисунок 4 – Зовнішня характеристика ІСПН на основі ВМП

В ролі регулюючого елементу можуть бути використані різні елементи – стабілітрон, транзистор, фотоприймальні елементи та інші. Якщо використовуємо стабілітрон з напругою стабілізації $U_{ст}$, то для миттєвих значень можна записати:

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

- для керуючого півперіоду

$$e = u_{TS} + u_{CT}; \quad (1)$$

- для робочого півперіоду

$$e = u_{TS} + u_H \quad (2)$$

де u_{TS} – напруга на ДН;

u_H – напруга на навантаженні;

u_{CT} – напруга на стабілітроні.

Переходячи від миттєвих значень до середніх за період, маємо:

$$E = U_{TS} + U_{CT}; \quad (3)$$

$$E = U_{TS} + U_H.$$

Оскільки напруги на ДН для обох півперіодів рівні, так як $\Delta V_p = V_s - V = \Delta V_k$, то напруга на навантаженні визначається лише напругою стабілізації стабілітрона

$$U_H = U_{CT} / 2 \quad (4)$$

і не залежить від зміни вхідної напруги.

РЕАЛІЗАЦІЯ ПОМНОЖУВАЧІВ НАПРУГИ НА ОСНОВІ ВИСОКОЧАСТОТНИХ МАГНІТНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ

Відомий пристрій [9], який містить високочастотний інвертор напруги з силовим трансформатором, вторинна обмотка якого через однопівперіодний випрямляч і вихідний фільтр під'єднана до навантаження. Керований дросель насичення ввімкнений між вторинною обмоткою трансформатора і анодом випрямного діода. Коло зворотного зв'язку за вихідною напругою під'єднане через розмагнічуючий діод до анода випрямного діода. Таким чином, він являє собою однопівперіодний стабілізатор напруги на високочастотному магнітному підсилювачі.

Йому властиві такі недоліки, як асиметрія вихідної напруги інвертора та великий рівень пульсацій вихідної напруги, обумовлений однопівперіодним випрямленням; обмежена вихідна потужність внаслідок підмагнічування силового трансформатора; відносна складність виготовлення дроселя насичення. Така схемотехнічна реалізація дозволяє отримати регульовану вихідну напругу, яка однак не може перевищувати вхідну.

Відоме стабілізоване джерело постійної напруги [10], яке містить високочастотний інвертор напруги з силовим трансформатором, двопівперіодний випрямляч по схемі з середньою точкою, керовані дроселі насичення, ввімкнені між виводами вторинних півобмоток силового трансформатора і анодами випрямних діодів, вихідний фільтр, навантаження, коло зворотного зв'язку за вихідною напругою, яке під'єднане через розмагнічуючі діоди до анодів випрямних діодів.

Дана схема має наступні переваги – вищу якість вихідної напруги, симетричне навантаження силового трансформатора, меншу ємність вихідного фільтру, кращі динамічні показники. Однак, як і в попередньому випадку, не є можливим отримати вихідну напругу, вищу за вхідну.

Найбільш близьким до пропонованого є помножувач напруги на два [11], що містить джерело змінної напруги, одна клемка якого під'єднана до анода діода, катод якого з'єднаний з верхньою точкою ємнісного подільника, нижня точка якого під'єднана до анода іншого діода, катод якого з'єднаний з анодом попереднього діода, середня точка ємнісного подільника під'єднана до другої клемки джерела змінної напруги, а до верхньої та нижньої точок ємнісного подільника під'єднане навантаження. Фактично це класична схема помножувача на два. Однак він не володіє здатністю регулювати вихідну напругу в 100 % діапазоні зміни струму навантаження (можливий частковий випадок стабілізації вихідної напруги при незмінному навантаженні за рахунок введення зовнішніх кіл стабілізації струму навантаження).

Пропонується реалізація регульованого помножувача напруги на два на основі використання ВМП, а також можливість стабілізації вихідної напруги в ньому [12].

На рисунку 5 подана функціональна схема регульованого помножувача напруги на основі ВМП.

Регульований помножувач напруги складається з керованих дроселів насичення TS1, TS2, обмотки яких одним кінцем з'єднані між собою і під'єднані до клемки 1 вхідного джерела змінної

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

напруги, а іншими кінцями приєднані відповідно до анода діода VD3 та катода діода VD4. Катод діода VD3 з'єднаний з верхньою точкою ємнісного подільника, реалізованого на конденсаторах C1, C2, а анод діода VD4 з'єднаний відповідно з нижньою точкою ємнісного подільника, середня точка якого під'єднана до вхідної клеми 2 вхідного джерела змінної напруги. На вихід ємнісного подільника ввімкнене навантаження R_L . Розмагнічуючі діоди VD1, VD2 під'єднано до обмоток дроселів насичення TS1, TS2 як показано на рисунку 3 через спарені резистори R1, R2.

Регульований помножувач напруги працює наступним чином: у від'ємний півперіод вхідної змінної напруги для дроселя насичення TS1 має місце півперіод керування. В цей проміжок часу діод VD3 закритий, діод VD1 відкритий і створюється коло для протікання струму через резистор R1, розмагнічуючий діод VD1 і дросель насичення TS1. Під дією цього струму відбувається розмагнічення матеріалу дроселя насичення TS1 від максимального рівня індукції насичення B_{max} до якогось рівня B_1 . Глибина розмагнічення регулюється резистором R1. При зміні полярності вхідної напруги перемагнічування починається із запам'ятованого рівня індукції B_1 .

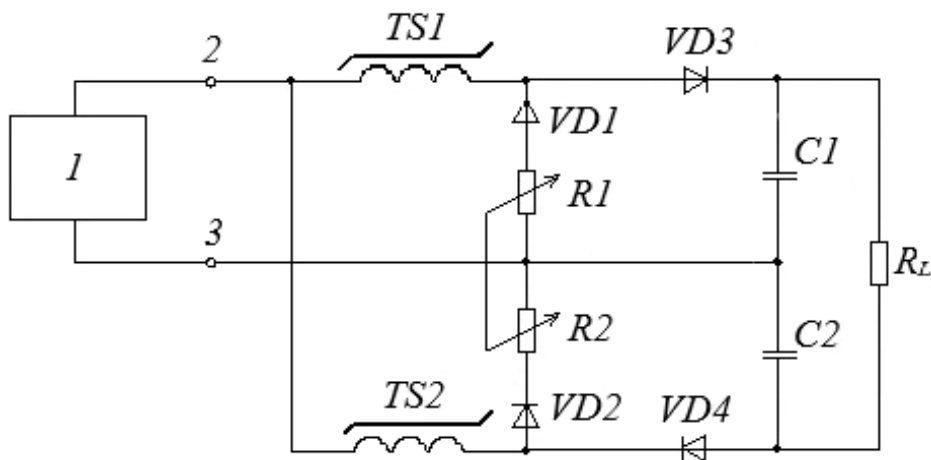


Рисунок 5 - Функціональна схема регульованого помножувача напруги на основі ВМП

Коли для дроселя насичення TS1 має місце півперіод керування, для дроселя насичення TS2 має місце інший режим – робочий півперіод. У цьому випадку розмагнічуючий діод VD2 закритий, діод VD4 відкритий і джерело вхідної змінної напруги через дросель насичення TS2 та діод VD4 під'єднане до навантаження R_L . Робочий півперіод складається з двох етапів. На першому етапі відбувається перемагнічування дроселя насичення TS2 від якогось запам'ятованого значення індукції B_2 до індукції насичення B_s . Час цього перемагнічування є значно менший, ніж час розмагнічування у півперіод керування за рахунок відсутності обмеження швидкості перемагнічування (опір навантаження R_L на порядки менший за опір керування – спарений резистор R1, R2). Тому насичення дроселя досягається в межах півперіоду частоти вхідної змінної напруги. Після досягнення насичення дросель має практично нульовий опір і струм в колі обмежується лише опором навантаження. Правильний вибір регулюючих елементів (R1, R2) і дроселів насичення (TS1, TS2) дозволяє регулювати напругу в межах $0-2U_{вх}$.

Таким чином, регулювання вихідної напруги помножувача напруги в межах $0-2U_{вх}$ забезпечується за рахунок введення керованих дроселів насичення, розмагнічуючих діодів та регулюючих елементів.

Можливе таке виконання регульованого помножувача напруги, коли регулюючий елемент в колі розмагнічування дроселя насичення працює у функції зміни вихідної напруги. В цьому випадку ми отримуємо подвоєну вихідну стабілізовану напругу. Схема електрична принципова стабілізатора напруги на основі запропонованого регульованого помножувача напруги, яка дозволяє отримати вихідну напругу в 1-2 рази вищу за вхідну або двополярне стабілізоване джерело електроживлення подана на рисунку 6.

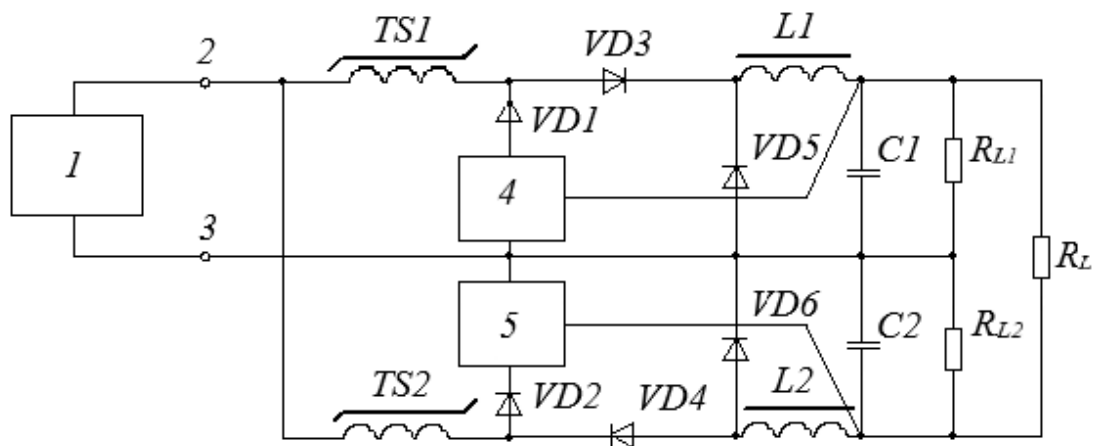


Рисунок 6 – Функціональна схема стабілізатора напруги з регульованим помножувачем напруги на основі ВМП

В цьому випадку в схему вводяться дроселі $L1$, $L2$ і зворотні діоди $VD5$, $VD6$, які разом із ємностями $C1$, $C2$ утворюють класичні схеми LCD-фільтрів, а зворотні зв'язки за вихідною напругою заводяться з виходів дроселів $L1$, $L2$ через відповідні схеми керування 4, 5 (замість регулюючих резисторів $R1$, $R2$). Це дає змогу отримати стабілізатор напруги з вихідною напругою вищою в 1-2 рази за вхідну у всьому діапазоні зміни струму навантаження. У випадку під'єднання замість навантаження R_L окремих навантажень R_{L1} , R_{L2} паралельно ємностям $C1$, $C2$ отримуємо двополярне стабілізоване джерело живлення.

Запропоноване рішення дає можливість забезпечити регулювання вихідної напруги у вказаних межах, як частковий випадок – стабілізацію будь-якого рівня вихідної напруги із вказаного діапазону при зміні струму навантаження від 0 до $I_{ном}$ (у випадку введення зворотних зв'язків за вихідною напругою).

ВИСНОВОК

Запропоновано реалізацію регульованого помножувача напруги на основі високочастотних магнітних підсилювачів, яка дозволяє отримати вихідну напругу в 1-2 рази вищу за вхідну з можливою стабілізацією вихідної напруги у всьому діапазоні зміни струму навантаження. Як частковий випадок запропонована реалізація двополярного стабілізованого джерела електроживлення при мінімальній кількості регулюючих елементів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES:

1. K. Harada, T. Nabeshima, "Applications of magnetic amplifiers to high-frequency dc-to-dc converters," Proc. IEEE, vol. 76, no. 4, April 1988, pp. 355-361.
2. V. Yaskiv. Using of High-Frequency Magnetic Amplifier in Switch Mode DC Power Supplies / V. Yaskiv // Proceedings of the 35th Annual IEEE Power Electronic Specialists Conference (PESC'04), Aachen, 2004, — p. 1658–1662.
3. V. Yaskiv. Design Methods of Switch Mode Power Supplies / V. Yaskiv // Tutorial 10 on 26-th International Energy Conference (INTELEC), Chicago, USA, 2004, — 39 p.
4. C. C. Wen, C. L. Chen, W. Chen, and J. Jiang, "Magamp post regulation for flyback converter," in Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf., 2001, pp. 333–338.
5. Volodymyr Yaskiv, Alexander Abramovitz, Keyue Smedley, Anna Yaskiv. MagAmp Regulated Isolated AC-DC Converter with High Power Factor // Special issue of journal COMMUNICATIONS - Scientific Letters of the University of Zilina, ISSN 1335-4205, No. 1A/2015, p. 28-34.
6. V. Yaskiv, "MagApm Post-Regulator Small Signal Modeling," Optoelectronic Information-Power Technologies, 2020, no1 (39), pp. 5–13.
7. V. Yaskiv, A. Yaskiv, O. Yurchenko, "Synchronous rectification in High-Frequency MagAmp Power Converters", [Electronic resource], Advanced Computer Information Technologies Proceedings of the International Conference Advanced Computer Information Technologies, Ceske Budejovice, Czech Republic, June 1-3, 2018. (ACIT 2018), Ceske Budejovice, Czech Republic : CEUR, 2018, vol. 2300, pp. 128–131. — URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2300/>

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

8. V. Yaskiv, O. Yurchenko, A. Martseniuk, A. Yaskiv, "Synchronous Rectifier in High-Frequency 24V/15A MagAmp Power Converter", 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Istanbul, Turkey, 2020, pp. 113–117.
9. Pat. 4451876 (USA). Switching regulator / Y. Ogata – Publ. 29.05.1984.
10. Pat. 4217632 (USA). Regulated power supply system including saturable reactor means / P. A. Bardos, J. E. Grove, - Publ. 1978.
11. Robert J. Traister, Jonathan L. Mayo. 44 Power Supplies for Your Electronic. Projects First Edition, 1987, 244.
12. Vasylyuk V. Kukharchuk, Sergii V. Pavlov, Volodymyr S. Holodiuk, Valery E. Kryvonosov, Krzysztof Skorupski, Assel Mussabekova, and Gaini Karnakova. 2022. "Information Conversion in Measuring Channels with Optoelectronic Sensors" *Sensors* 22, no. 1: 271.

Надійшла до редакції 15.04.2023р.

ЯСЬКІВ ВОЛОДИМИР ІВАНОВИЧ – д.т.н., доцент, професор кафедри радіотехнічних систем Тернопільського національного технічного університету імені Іван Пулюя, ***e-mail: yaskiv@yahoo.com***
Наукові інтереси: силова електроніка, напівпровідникові перетворювачі електроенергії на основі високочастотних магнітних підсилювачів, паралельна робота перетворювачів напруги постійного струму, високочастотні перетворювачі з високим рівнем струму навантаження, резонансні перетворювачі, інвертори, теорія систем.

ЯСЬКІВ АННА ВОЛОДИМИРІВНА – к.т.н., старший викладач кафедри комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету, ***e-mail: annyaskiv@gmail.com***
Наукові інтереси: силова електроніка, напівпровідникові перетворювачі електроенергії на основі високочастотних магнітних підсилювачів, математичне моделювання та автоматизоване проектування засобів силової електроніки

Volodymyr YASKIV, Anna YASKIV

ADJUSTABLE VOLTAGE MULTIPLIER BASED ON HIGH-FREQUENCY MAGNETIC AMPLIFIERS

Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu, St. Ruska, 56, Ternopil, Ukraine
Western Ukrainian National University, St. Lvivska, 11, Ternopil, Ukraine