

Яськів Володимир Іванович, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри радіотехнічних систем. Тел.: +038 (099) 1 24 75 17. E-mail: yaskiv@yahoo.com. ORCID: 0000-0003-0043-3909.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, вул. Руська, 56 м. Тернопіль, Україна, 46001.

АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ СТАБІЛІЗАТОРА НАПРУГИ НА ВИСОКОЧАСТОТНИХ МАГНІТНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ З ВРАХУВАННЯМ ІНТЕРВАЛЬНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ПАРАМЕТРІВ ЇХ ОСЕРДЬ

Анотація. Для забезпечення функціонування радіоелектронної апаратури (РЕА) використовують напівпровідникові перетворювачі електроенергії (НПЕ), які виконують функції перетворення та погодження параметрів електричної енергії. Сучасний споживач потребує НПЕ з жорстким набором експлуатаційних характеристик – забезпеченням функціональних параметрів в широкому діапазоні зміни всіх збурюючих факторів. Існуючі принципи побудови НПЕ не завжди дозволяють реалізувати такий набір характеристик. В статті проведено аналіз стійкості імпульсного стабілізатора напруги на основі високочастотних магнітних підсилювачів з врахуванням технологічного розкиду параметрів їх осердь. Приведено схему стабілізатора напруги, зроблено опис її роботи, розкрито принцип роботи високочастотного магнітного підсилювача, знайдено передатну його функцію в частотній області. Дослідження базується на використанні теорії інтервального аналізу. Проведений аналіз стійкості НПЕ з врахуванням інтервальної невизначеності параметрів осердь високочастотних магнітних підсилювачів підтвердив їх роботоздатність як при технологічному розкиді параметрів осердь, так і при широкому діапазоні зміни всіх збурюючих факторів, в тому числі і при паралельній роботі стабілізаторів напруги на спільне навантаження.

Ключові слова: стабілізатор напруги, високочастотний магнітний підсилювач, прямокутна петля гістерезису, стійкість, інтервальна невизначеність, паралельна робота.

Yaskiv Volodymyr I., Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of the Radiotechnical Systems Department, Phone.: +038(099)1 24 75 17. E-mail: yaskiv@yahoo.com. ORCID: 0000-0003-0043-3909.

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, 56, Ruska str., Ternopil, Ukraine, 46001.

ANALYSIS OF THE MAGAMP POWER CONVERTER STABILITY TAKING INTO ACCOUNT OF THE INTERVAL UNCERTAINTY OF THE MAGAMP CORES PARAMETERS

Abstract. To ensure the functioning of radio electronic equipment (RAE), semiconductor power converters (NPEs) are used, which perform the functions of converting and adjusting the parameters of electrical energy. The modern consumer needs NPEs with a rigid set of operational characteristics - ensuring functional parameters in a wide range of changes in all disturbing factors. The existing principles of NPE construction do not always allow such a set of characteristics to be realized. The article analyzes the stability of the pulse voltage stabilizer based on high-frequency magnetic amplifiers, taking into account the technological spread of their core parameters. The circuit of the voltage stabilizer is presented, its operation is

described, the principle of operation of the high-frequency magnetic amplifier is disclosed, and its transfer function in the frequency domain is found. The study is based on the use of interval analysis theory. The conducted analysis of the stability of the NPE, taking into account the interval uncertainty of the parameters of the cores of high-frequency magnetic amplifiers, confirmed their performance both with technological dispersion of the parameters of the cores and with a wide range of changes in all disturbing factors, including the parallel operation of voltage stabilizers on a common load.

Keywords: *voltage stabilizer, high-frequency magnetic amplifier, rectangular hysteresis loop, stability, interval uncertainty, parallel operation*

Постановка проблеми. Для забезпечення функціонування радіоелектронної апаратури (РЕА) використовують напівпровідникові перетворювачі електроенергії (НПЕ), які виконують функції перетворення та погодження параметрів електричної енергії. Кожен споживач висуває свій набір вимог до перетворювача. Тому часто системи електроживлення будуються за розподіленою схемою – кожному споживачу – свій перетворювач. Проте такий підхід призводить до дублювання однакових функціональних вузлів в системі. Тому висуваються жорсткі вимоги як до ефективності таких перетворювачів, так і до рівня їх питомої потужності та уніфікації.

Сучасний споживач потребує НПЕ з жорстким набором експлуатаційних характеристик – забезпеченням функціональних параметрів в широкому діапазоні зміни всіх збурюючих факторів, 100% діапазоном зміни струму навантаження, високою якістю вихідних напруг, високим ККД, високим рівнем надійності та питомої потужності, низьким рівнем електромагнітних завад, високим рівнем динамічних характеристик, низькою собівартістю, високим рівнем механічної та радіаційної стійкості, а також багатоканальних НПЕ з рівноцінними та незалежними вихідними каналами. Існуючі принципи побудови НПЕ не завжди дозволяють реалізувати такий набір характеристик.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. З появою високочастотних магнітних матеріалів з прямокутною петлею гістерезису (ППГ) набуває подальшого розвитку техніка магнітного перетворення параметрів електроенергії. Сучасні магнітом'які аморфні сплави характеризуються

високим коефіцієнтом прямокутності, малою коерцетивною силою, високим рівнем індукції насичення. Завдяки високому рівню радіаційної та механічної стійкості, надійності, ефективності, електромагнітної сумісності, а також простоті реалізації схемних рішень вони використовуються в ролі осердь високочастотних магнітних підсилювачів (ВМП), які виконують функції силових ключів в регуляторах та стабілізаторах постійної напруги.

Такі переваги НПЕ на ВМП як низький рівень електромагнітних завад, висока якість вихідних напруг, простота схемотехнічних рішень, високий рівень надійності та радіаційної стійкості, ефективності, можливість реалізації багатоканальних джерел живлення з рівноцінними та незалежними вихідними каналами, а також простота реалізації керованих НПЕ у функції будь-яких параметрів чи за заданим алгоритмом, обумовлюють їх використання для живлення радіопередавальних та приймальних пристроїв систем зв'язку, бортової та наземної апаратури космічного призначення, засобів інформаційних технологій, в атомній енергетиці, медичній техніці, електрозварюванні, системах освітлення тощо [1-8]. Визначальною особливістю роботи ВМП є наявність високочастотної вхідної змінної напруги. Саме це, а також нечутливість його до форми цієї напруги, робить перспективним використання регуляторів на основі ВМП в сучасних системах безпроводної передачі електроенергії.

Мета дослідження. Провести аналіз стійкості імпульсного стабілізатора постійної напруги на основі високочастотних магнітних підсилювачів, а також оцінити стійкість системи при паралельній роботі кількох стабілізаторів на спільне навантаження.

Виклад основного матеріалу дослідження. *Принцип роботи регулятора напруги на основі високочастотного магнітного підсилювача.* Базова схема регулятора з ІСПН на основі ВМП і часові діаграми, які пояснюють роботу схеми, наведені на рисунках 1 і 2 відповідно [1-8]. Ключ на основі високочастотного магнітного підсилювача складається з дроселя

насичення (ДН) TS , діода випрямляча $VD1$, розмагнічуючого діода $VD2$. Дросель насичення TS виконаний на високочастотному аморфному сплаві з прямокутною петлею гістерезису (рис.1).

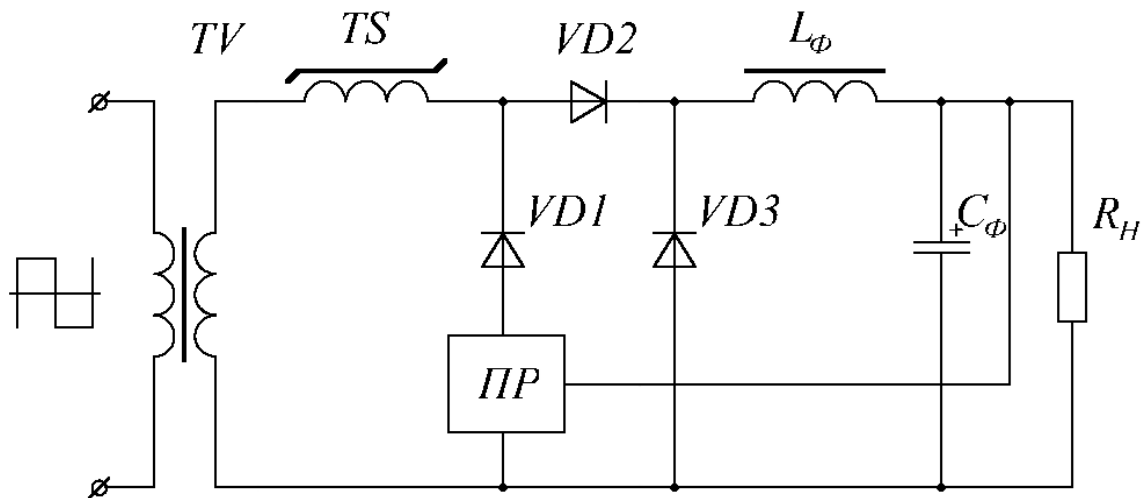


Рис.1. Базова схема ІСПН на основі ВМП.

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 $VD1$ (діод випрямляча), керуючий діод $VD2$ (роздільний діод) та підсилювач сигналу розузгодження.

Робочий цикл цього високочастотного магнітного підсилювача забезпечується за рахунок рознесення в часі керуючого та робочого півперіодів випрямним та розмагнічуючим діодами. Півперіод напруги живлення, який відповідає непровідному стану діода $VD1$, називається півперіодом керування, а провідному стану – робочим. На протязі півперіоду керування під впливом сигналу керування від підсилювача сигналу розузгодження (ПП) відбувається розмагнічування ДН (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 по петлі гістерезису. При зміні полярності вхідної високочастотної напруги

починається робочий півперіод, який складається з двох інтервалів (α , $\pi - \alpha$) (рис.2).

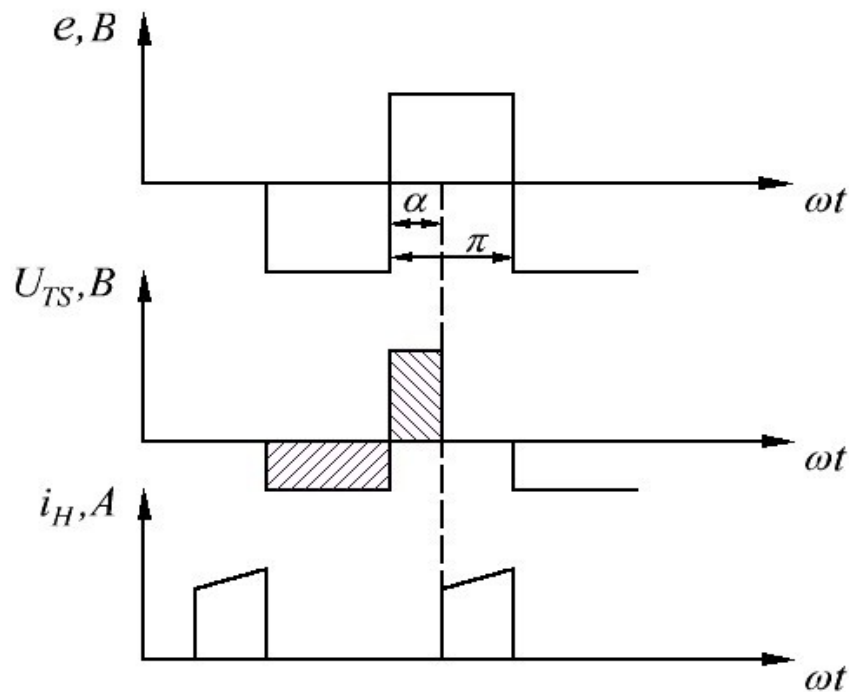


Рис. 2. Осцилограми, що ілюструють роботу регулятора на базі ВМП (e – е.р.с. вторинної обмотки високочастотного силового трансформатора; U_{TS} – закон зміни напруги на дроселі насичення магнітного ключа; i_n – струм в навантаженні).

На першому інтервалі під впливом джерела е.р.с. e відбувається намагнічування магнітопроводу ДН від початкового рівня індукції B до рівня індукції насичення B_s – у цьому випадку дросель насичення TS ВМП перебуває в ненасиченому стані, що відповідає 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.

Аналіз стійкості імпульсного стабілізатора на високочастотних магнітних підсилювачах з врахуванням інтервальної невизначеності параметрів їх осердь.

Відомо, що стійкість імпульсних стабілізаторів напруги визначається параметрами вихідного фільтра і загальним коефіцієнтом підсилення [9]. В ІСПН на ВМП використовуються LCD-фільтри. Методика розрахунку таких фільтрів наведена у літературі [9]. Індуктивність дроселя фільтра вибирається з умови забезпечення неперервності струму навантаження через дросель фільтра, а ємність – з умови забезпечення заданого рівня пульсацій вихідної напруги. ІСПН на ВМП являє собою імпульсну нелінійну систему. Для аналізу його стійкості класичними методами необхідно здійснити перехід до лінійної неперервної системи. Це не складає особливих проблем, оскільки лише один елемент стабілізатора, а саме дросель насичення, що реалізує широтно-імпульсну модуляцію, працює в імпульсному режимі. Причому вхідний сигнал ДН – струм його керування, є величиною лінійно пов'язаною з сигналом розузгодження і неперервною у часі.

Аналіз стійкості проводиться для ІСПН на ВМП з вихідними параметрами 5 В, 20 А. Принципова його електрична схема та структурна в частотній області наведені на рис. 3. Вона містить наступні позначення: β – коефіцієнт подільника напруги в колі зворотного зв'язку за вихідною напругою; K_1 – коефіцієнт підсилення вузла розузгодження на базі транзистора VT1; K_2 – коефіцієнт підсилення по струму транзистора VT2; $W_{TS}(p)$ – передатна функція дроселя насичення; $W_{\Phi}(p)$ – передатна функція вихідного фільтра.

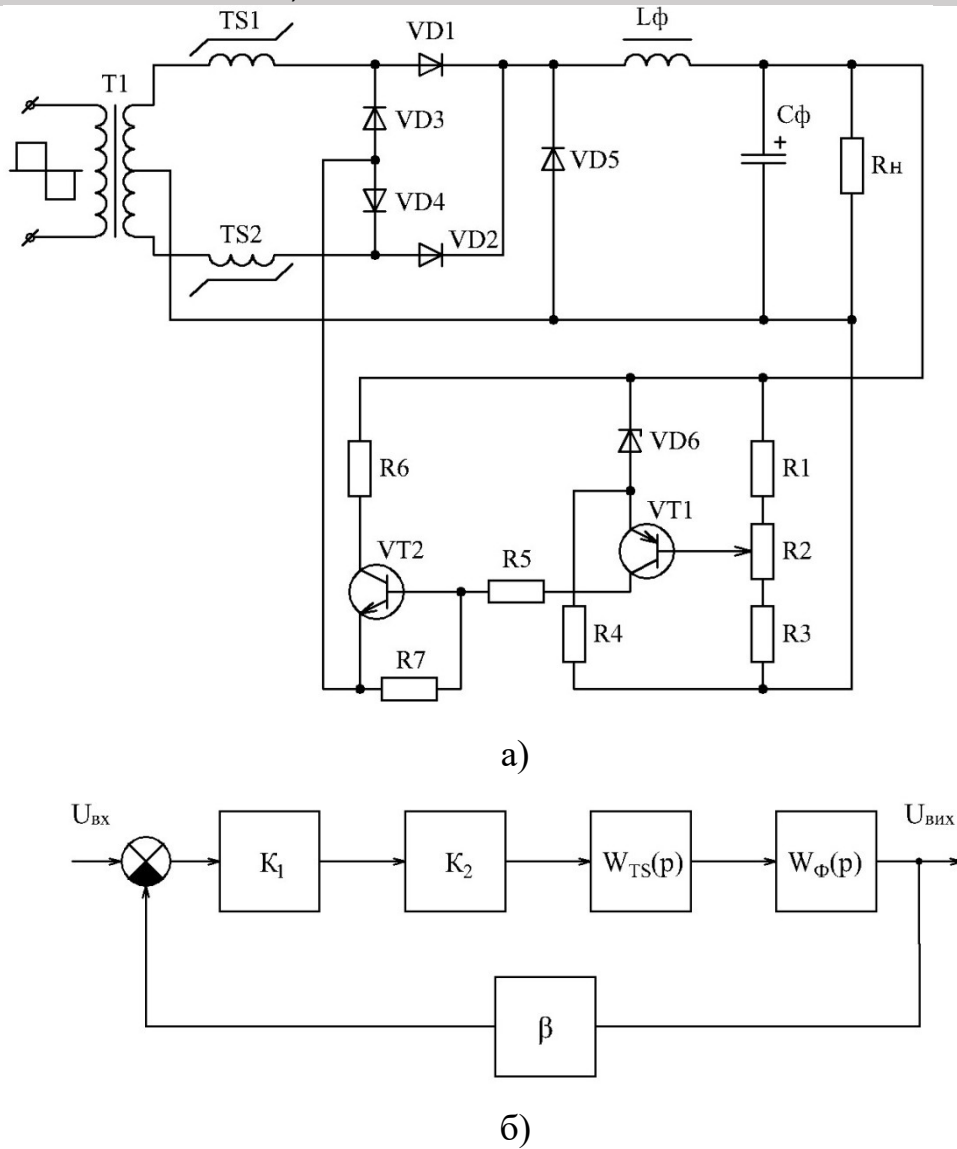


Рис. 3. Принципова електрична схема ІСПН на ВМП– а),
структурна схема ІСПН на ВМП в частотній області – б).

Для нашого випадку $W_{\Phi}(p)$ являє собою ланку другого порядку. Передатну функцію дроселя насичення (або ВМП) можна представити як

$$W_{TS} = \frac{\Delta U_{ВНХ}}{\Delta I_K}, \quad (1)$$

де ΔI_K – приріст струму керування; $\Delta U_{ВНХ}$ – відповідний приріст вихідної напруги магнітного підсилювача (напруги на навантаженні).

Відношення приросту вихідної напруги магнітного підсилювача до відповідного приросту струму керування являє собою т. з. передатний опір K_R , який виражається через основні параметри магнітного підсилювача наступним чином

$$K_R = \frac{2fW^2S \times \Delta(\Delta B_K)}{\Delta H_K l} = 2fW^2 \frac{S}{l} \mu_0 \mu_d, \quad (2)$$

де f – частота змінної напруги; W – кількість витків обмотки; S – активна площа поперечного перетину магнітопроводу; l – середня довжина магнітної лінії; μ_0 – абсолютна магнітна проникність; μ_d – проникність за динамічною кривою розмагнічування.

Динамічна крива розмагнічування для аморфного сплаву 84 КХСЗ 0,015 показана на рис.4.

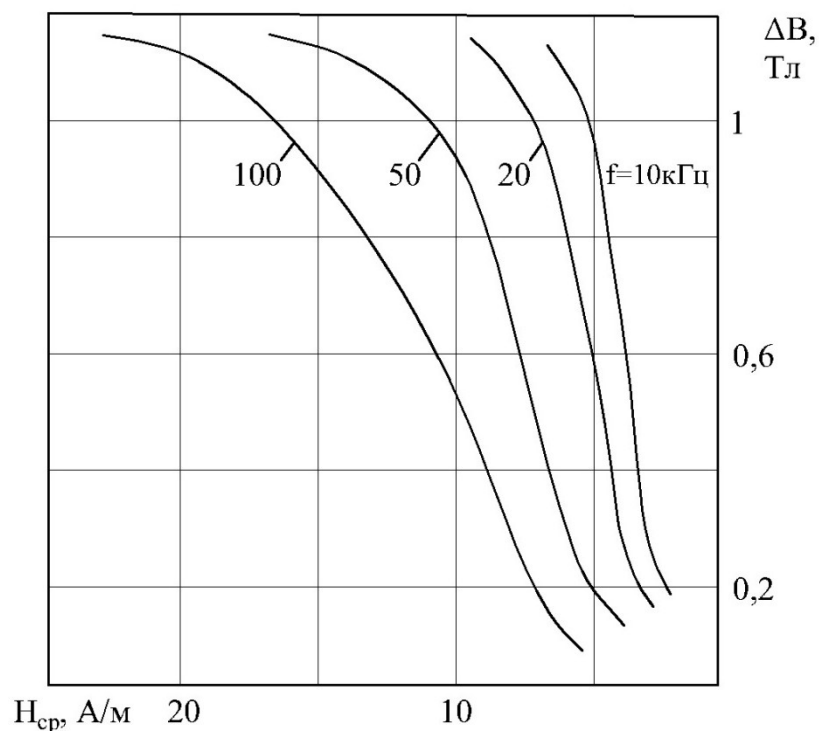


Рис. 4. Динамічні криві розмагнічування тороїдного стрічкового магнітопроводу з аморфного сплаву 84 КХСР 0,015 з розмірами 25/20-5.

Через параметри дроселя насичення ВМП K_R можна виразити наступним чином:

$$\kappa_R = \frac{U_1 W^2}{H_{\text{III}} l} = r_B W^2, \quad (3)$$

де r_B – опір одного витка; H_{III} – напруженість поля повного перемагнічування; U_1 – напруга на один виток на заданій частоті перемагнічування (приведене значення індукції).

Оскільки зміна вихідної напруги ВМП є функцією струму керування в попередній керуючий півперіод, його можна розглядати як ланку затримки [12]. Час затримки рівний півперіоду робочої частоти живлення. Передатна функція ВМП з врахуванням часу затримки має наступний вигляд:

$$W_{TS} = \kappa_R e^{-pT/2} \quad (4)$$

Параметри, через які виражається передатний опір, належать до кількох інтервалів. В теорії автоматичного управління активно розробляється напрямок, що пов'язаний з аналізом стійкості систем з інтервальною невизначеністю параметрів. Параметри таких систем задаються з точністю належності їх до деяких інтервалів, нижня і верхня межа яких задані. Основною роботою у цьому напрямі слід вважати роботу Харітонова [10], у якій аналізується асимптотична стійкість сімейства характеристик поліномів вигляду:

$$Q(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a^n, \quad a_j < a_j < \bar{a}_j, \quad j = \overline{1, n} \quad (5)$$

Відповідно до теореми Харітонова, для стійкості цього сімейства необхідно і достатньо, незалежно від ступеню поліному, виконати тестування стійкості лише чотирьох поліномів:

$$\begin{aligned}
 Q_1(p) &= \overline{a_0}p^n + \overline{a_1}p^{n-1} + \overline{a_2}p^{n-2} + \overline{a_3}p^{n-3} + \overline{a_4}p^{n-4} + \overline{a_5}p^{n-5} + \dots \\
 Q_1(p) &= \overline{a_0}p^n + \overline{a_1}p^{n-1} + \overline{a_2}p^{n-2} + \overline{a_3}p^{n-3} + \overline{a_4}p^{n-4} + \overline{a_5}p^{n-5} + \dots \\
 Q_1(p) &= \overline{a_0}p^n + \overline{a_1}p^{n-1} + \overline{a_2}p^{n-2} + \overline{a_3}p^{n-3} + \overline{a_4}p^{n-4} + \overline{a_5}p^{n-5} + \dots \\
 Q_1(p) &= \overline{a_0}p^n + \overline{a_1}p^{n-1} + \overline{a_2}p^{n-2} + \overline{a_3}p^{n-3} + \overline{a_4}p^{n-4} + \overline{a_5}p^{n-5} + \dots \quad (6)
 \end{aligned}$$

Стійкість поліномів $Q(p)$, $j = \overline{1, n}$ (вони ще називаються поліномами Харітонова) може бути проаналізована будь-яким з відомих способів. Оскільки вивчення стійкості системи з інтервальною невизначеністю по теоремі Харітонова вимагає щоби характеристичний поліном системи мав вигляд ступеневого полінома, ланка затримки апроксимувалась дробово-раціональною передатною функцією другого порядку:

$$e^{-p\tau} = \frac{p^2\tau^2 - 6p\tau + 12}{p^2\tau^2 + 6p\tau + 12} \quad (7)$$

Як показала перевірка стійкості за критерієм Гурвіца, точність такої апроксимації цілком задовільна.

Далі аналізувалась стійкість системи при варіації K_R . Відповідно до правил інтервальної арифметики інтервал на K_R перераховувався у інтервали на коефіцієнти характеристичного поліному замкнутої системи. З п'яти коефіцієнтів поліному три (a_2, a_3, a_4) виявились залежними від K_R . Згідно з характеристичним поліномом записуються чотири поліноми Харітонова. Оскільки характеристичний поліном низького порядку, згідно з [11] можна обмежитися тільки першими двома поліномами Харітонова: $Q_1(p)$, $Q_2(p)$ – тими, в яких використовується верхня межа інтервалу в ролі коефіцієнта при змінній у старшому степені. Решта два поліноми, як показано у [11] при цьому будуть виконані автоматично. При цьому має бути виконана умова, що нижні межі інтервалів усіх коефіцієнтів характеристичного поліному позитивні, що має місце у нашому випадку. Перевірка стійкості цих двох поліномів Харітонова показала, що сімейство поліномів $Q(p)$ асимптотично стійке. Ряд

розрахунків для різних величин інтервалів невизначеності на коефіцієнт K_R показав, що найбільший інтервал на K_R , при якому зберігається властивість стійкості системи, складає $\pm 33\%$ від номінального значення, що відповідає інтервалу на загальний коефіцієнт розімкнутої системи $59,8 < k < 118,8$.

Для забезпечення високого рівня струму навантаження використовують паралельну роботу стабілізаторів напруги. Відомі рішення забезпечення паралельної роботи стабілізаторів напруги на ВМП та дослідження їх режимів роботи описані в літературі [9,12,13]. Автором статті в свій час був запропонований метод ввімкнення на паралельну роботу стабілізаторів напруги на ВМП, який забезпечує рівномірний розподіл струму навантаження між окремими стабілізаторами у всьому діапазоні зміни струму навантаження при єдиному зворотному зв'язку за вихідною напругою для всієї системи [14,15]. Було проведено дослідження стійкості такої системи розглянутими методами.

Зокрема, аналіз системи з двома стабілізаторами напруги на основі ВМП, що працюють на спільне навантаження, проведений аналогічним чином показав, що найбільша допустима варіація K_R , при якій стійкість системи зберігається, складає $\pm 32\%$ від номінального значення. При цьому загальний коефіцієнт підсилення розімкнутої системи належить інтервалу $109,7 < k < 212,9$.

Цей аналіз проводився для стабілізаторів напруги, магнітопроводи ВМП яких виконані з аморфного сплаву 84 КХСР 0,015 з прямокутною петлею гістерезису.

Отримані результати добре узгоджуються зі значеннями граничних коефіцієнтів: 120 і 216 відповідно. Ці коефіцієнти знайдені за логарифмічними характеристиками системи (спочатку визначалась частота зрізу, при якій фаза розімкнутої системи рівна $-\pi$, а потім з урахуванням нахилу ЛАЧХ -40дБ/дек розраховувався граничний коефіцієнт підсилення розімкнутої системи).

Висновок. Розкрито принцип роботи імпульсних стабілізатора напруги на основі високочастотних магнітних підсилювачів. Наведено їх переваги в

порівнянні із традиційними перетворювачами. Проведений аналіз стійкості таких перетворювачів з врахуванням інтервальної невизначеності параметрів осердь високочастотних магнітних підсилювачів підтвердив їх роботоздатність як при технологічному розкиді параметрів осердь, так і при широкому діапазоні зміни всіх збурюючих факторів, в тому числі і при паралельній роботі стабілізаторів напруги на спільне навантаження.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Харада К., Набешіма Т. Застосування магнітних підсилювачів до високочастотних перетворювачів постійного струму в постійній. *Праці IEEE*. 1988. Вип. 76, вип. 4 квітня. С. 355–361. doi:10.1109/5.4422.
2. Яськів Володимир, Яськів Анна. Розробка системи живлення та керування гемодіалізічним апаратом. *Informatyka, Automatyka, Pomiaru w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2023. Вип. 13, № 3. С. 23–28. doi: 10.35784/iapgos.3745.
3. Yaskiv Volodymyr, Abramovitz Alexander, Smedley Keyue, Yaskiv Anna. MagAmp Regulated Isolated AC-DC Converter with High Power Factor. *Communications (Scientific Letters of the University of Zilina)*. Zilina, Slovakia: University of Zilina, 2015. No 1A. P. 28–34. doi: 10.26552/com.C.2015.1A.28-34.
4. Wen C. C., Chen C. L., Chen W., Jiang J. Magamp Post Regulation for Flyback Converter. *Proceedings of the IEEE Power Electron. Spec. Conf., PESC Record*, 2001 February 14. 2001. P. 333–338. doi: 10.1109/PESC.2001.954042.
5. Chen W., Han J., Wen C. C. Bi-directional resetting scheme of the magamp post-regulator. *Proceedings of the IEEE Applied Power Electronics Conference*. 2002. P. 838–842.
6. Chen C.-L., Wen C.-C. Magamp application and limitation for multiwinding flyback converter. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*. June 2005. Vol. 152(3). P. 517 – 525. doi: 10.1049/ip-epa:20040829.
7. Chen W., Hui S. Y. A Dimmable Light-Emitting Diode (LED) Driver with Mag-Amp Postregulators for Multistring Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2011. Vol. 26, No 6. P. 1714–1722.
8. Austrin L. *On Magnetic Amplifiers in Aircraft Applications*. Royal Institute of Technology. Sweden. 2007.
9. Gohil G. *Parallel operation of power converters and their filters*. In book: Control of Power Electronic Converters and Systems. January 2021.
10. Харитонов В. Л. Про асимптотичну стійкість положення рівноваги сімейства систем лінійних диференціальних рівнів. *Диференціальні рівняння*. 1978. т. 1, № 11. С. 14.
11. Anderson B. D. O., Yury E. I., Manson M. On robust Hurvitz polynomials. *IEEE, Trans. Automat. Conf.*, 1987, vol.AC-32. P. 909-913.
12. Chen Y. T., Liang J. M. Paralleling Magamp-Postregulator Modules with Sliding-Mode-Control Method. *Proceedings of the IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2006. Vol. 53, no. 3. P. 974–983.
13. Yao W.-X., Hong X.-Y., Lu Z.-Y. A novel current-sharing scheme based on magamp. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*. 2008. P. 1150–1156. doi: 10.1631/jzus.A0720112.
14. Яськів В. І., Юрченко М. М. Методи побудови напівпровідникових перетворювачів електроенергії з високим рівнем струму навантаження на основі високочастотних магнітних підсилювачів. *Технічна електродинаміка. Тема. вип.: Силова електроніка та енергоефективність*. 2006. С. 3–6.

15. Яськів В. І., Яськів А. В. Організація паралельної роботи імпульсних стабілізаторів постійної напруги на основі високочастотних магнітних підсилювачів. *Праці Інституту електродинаміки Нац. академії наук України* : зб. наук. пр. 2018. 51. С.81–85. doi: 10.15407/publishing2018.51.081.

REFERENCES:

1. Harada K., Nabeshima T. Applications of magnetic amplifiers to high-frequency DC-to-DC converters. *Proceedings of the IEEE*. 1988. Vol. 76, no. 4. P. 355–361. doi:10.1109/5.4422.
2. Yaskiv Volodymyr, Yaskiv Anna. Development of the Power Supply and Control System for the Hemodialysis Machine // *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2023. Vol. 13, № 3. P. 23-28. doi: 10.35784/iapgos.3745.
3. Yaskiv V., Abramovitz A., Smedley K., Yaskiv A. MagAmp Regulated Isolated AC-DC Converter with High Power Factor. *Communications (Scientific Letters of the University of Zilina)*. Zilina, Slovakia: University of Zilina, 2015. No 1A. P. 28–34. doi: 10.26552/com.C.2015.1A.28-34.
4. Wen C. C., Chen C. L., Chen W., Jiang J. Magamp Post Regulation for Flyback Converter. *Proceedings of the IEEE Power Electron. Spec. Conf., PESC Record*, 2001 February 14. 2001. P. 333–338. doi: 10.1109/PESC.2001.954042.
5. Chen W., Han J., Wen C. C. Bi-directional resetting scheme of the magamp post-regulator. *Proceedings of the IEEE Applied Power Electronics Conference*. 2002. P. 838–842.
6. Chen C.-L., Wen C.-C. Magamp application and limitation for multiwinding flyback converter. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*. 2005. Vol. 152(3). P. 517-525. doi: 10.1049/ip-epa:20040829
7. Chen W., Hui S. Y. A Dimmable Light-Emitting Diode (LED) Driver with Mag-Amp Postregulators for Multistring Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2011. Vol. 26, No 6. P. 1714–1722.
8. Austrin L. *On Magnetic Amplifiers in Aircraft Applications*. Royal Institute of Technology. Sweden. 2007.
9. Gohil G. *Parallel operation of power converters and their filters*. In book: Control of Power Electronic Converters and Systems. January 2021.
10. Kharytonov V. L. Pro asymptotychnu stikist polozhennia rivnovahy simeistva system liniinykh dyferentsiinykh rivnian. *Dyferentsiini rivniannia*. 1978. V. 14, 11.
11. Anderson B. D. O., Yury E. I., Manson M. On robust Hurvitz polynomials. *IEEE, Trans. Automat. Conf.* 1987. Vol. AC-32. P. 909-913.
12. Chen Y. T., Liang J. M. Paralleling Magamp-Postregulator Modules with Sliding-Mode-Control Method. *Proceedings of the IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2006. Vol. 53, no. 3. P. 974–983.
13. Yao W.-X., Hong X.-Y., Lu Z.-Y. A novel current-sharing scheme based on magamp. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*. 2008. P. 1150–1156. doi: 10.1631/jzus.A0720112.
14. Yaskiv V. I., Yurchenko M. M. Designing methods of power converters with a high level of the load current based on high-frequency magnetic amplifiers. *Technical electrodynamic. Subject. issue: Power electronics and energy efficiency*. 2006. P. 3–6.
15. Yaskiv V. I., Yaskiv A. V. Parallel work of the MagAmp power DC converters. *Proceedings of the National Institute of Electrodynamics. Academy of Sciences of Ukraine: coll. of science pr.* 2018. No. 51. P.81–85.

Надійшла до редакції 10.12.2023р.