

Яськів Володимир Іванович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри радіотехнічних систем, +038(067)730-11-49, yaskiv@yahoo.com, ORCID ID: 0000-0003-0043-3909.

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

Гурник Олександр Петрович, молодший науковий співробітник науково-дослідної частини, +038(067)787-14-57

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

Домнін Ігор Феліксович, доктор технічних наук, професор кафедри Радіоелектроніка, провідний науковий співробітник Інституту іоносфери НТУ «ХПІ», +038(050)915-11-11, domninpro@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-9824-4403

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002*

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ІМПУЛЬСНОГО СТАБІЛІЗАТОРА НАПРУГИ НА ОСНОВІ ВИСОКОЧАСТОТНИХ МАГНІТНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ

Анотація: В статті приведено результати експериментального дослідження електромагнітної сумісності імпульсного стабілізатора напруги на основі високочастотних магнітних підсилювачів на вихідні параметри 24 В, 8 А при його живленні від мережі промислової частоти. Зокрема результати вимірювання рівня випромінюваних електромагнітних завад, отримані в спеціалізованій лабораторії (м. Ірвін, США). Наведено результати гармонічного аналізу споживаного струму. Зроблено висновок про необхідність використання коректора коефіцієнта потужності в стабілізаторі напруги на основі високочастотних магнітних підсилювачів.

Ключові слова: стабілізатор напруги, високочастотний магнітний підсилювач, прямокутна петля гістерезису, електромагнітна завада, напівпровідниковий перетворювач електроенергії, коректор коефіцієнта потужності.

Yaskiv Volodymyr, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of the Radiotechnical Systems Department, +038(067)730-11-49, yaskiv@yahoo.com, ORCID ID: 0000-0003-0043-3909

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

Gurnik Olexandr, Junior Research Associate of the Research Department, +038(067)787-14-57

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

Domnin Ihor, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Leading Researcher, Institute of Ionosphere, NTU «KhPI», +038(050)915-11-11, domninpro@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-9824-4403

*National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
2, Kirpychova St., Kharkiv, Ukraine, 61002*

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF THE MAGAMP POWER CONVERTER

Abstract: The article presents the results of an experimental study of the electromagnetic compatibility of a switching voltage stabilizer based on high-frequency magnetic amplifiers with output parameters of 24 V, 8 A when powered from an industrial frequency network. In particular, it analyzes the results of measuring the level of radiated electromagnetic interference obtained in a specialized laboratory (Irvine, USA). The results of a harmonic analysis of the consumed current are presented. The conclusion is made about the need to use a power factor corrector in a voltage stabilizer based on high-frequency magnetic amplifiers.

Key words: voltage stabilizer, high-frequency magnetic amplifier, rectangular hysteresis loop, electromagnetic interference, semiconductor power converter, power factor corrector

Постановка проблеми. Сучасні напівпровідникові перетворювачі електроенергії (НПЕ) для погодження параметрів електричної енергії використовують принципи високочастотного її перетворення [1-4]. Робота силових комутуючих елементів НПЕ супроводжується появою високочастотних електромагнітних завад (ЕМЗ), які поширюються як кондуктивно, так і шляхом випромінювання. В першому випадку це призводить до погіршення якості як вихідної напруги перетворювача, що часто є критичним для споживача, так і до погіршення якості напруги первинної мережі, в другому – до електромагнітного забруднення довкілля. Використовують як пасивні, так і активні методи зменшення рівня ЕМЗ в НПЕ. До пасивних можна віднести різного роду фільтри, демпфуючі ланки, екранування. Активні передбачають використання спеціальних топологій перетворювачів та методів керування силовими ключами (н-д, «м'яка» комутація в резонансних перетворювачах) [3-5], використання методів активної фільтрації [6-8]. Однак реалізація цих методів потребує додаткових як інтелектуальних, так і фінансових затрат.

Важливо на етапі розробки НПЕ вибирати такі топології перетворювачів, схемотехнічні рішення, методи керування силовими ключами, які забезпечують мінімальний рівень створюваних ЕМЗ і, відповідно, не потребують додаткових заходів для зменшення їх рівня.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Відомі альтернативні методи побудови високочастотних перетворювачів електронергії, в яких в ролі силових комутуючих і регулюючих елементів використовуються напівпровідникові силові

прилади, а високочастотні магнітні підсилювачі (ВМП) [1, 2, 9-19]. Дроселі насичення ВМП виготовлені з високочастотного аморфного сплаву з прямокутною петлею гістерезису. До однієї з фундаментальних властивостей ВМП слід віднести функцію інтегрування, за рахунок якої він є фільтром кондуктивних ЕМЗ як в насиченому, так і в ненасиченому станах. При цьому робота ВМП в ключовому режимі не супроводжується появою високочастотної завади високого рівня. Однак дослідження електромагнітної сумісності напівпровідникових перетворювачів електроенергії на основі високочастотних магнітних підсилювачів ще ніким не проводились.

Мета дослідження. Провести експериментальне дослідження електромагнітної сумісності напівпровідникового перетворювача електроенергії на основі високочастотних магнітних підсилювачів.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Експериментальне дослідження електромагнітної сумісності НПЕ на ВМП.

Досліджуване джерело живлення реалізовано за структурною схемою, що представлена на рис. 1.

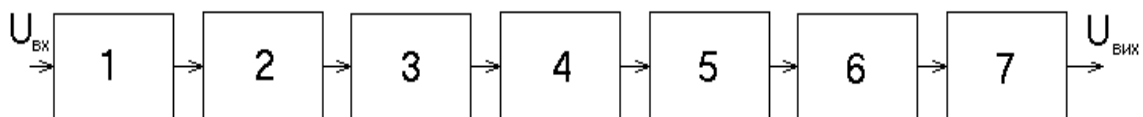


Рисунок 1 – Структурна схема досліджуваного джерела живлення
(1 – завадозахисний фільтр, 2 – мережевий випрямляч, 3 – пристрій заряду конденсатора, 4 – ємнісний фільтр, 5 – нерегульований високочастотний транзисторний інвертор, 6 – силовий високочастотний трансформатор, 7 – імпульсний стабілізатор постійної напруги на ВМП)

Основні технічні дані його наступні:

- | | |
|---|------------------|
| - вхідна напруга | 110 В + /- 10 %; |
| - вихідна напруга | 24 В; |
| - струм навантаження | 0...8 А; |
| - робоча частота | 50 кГц; |
| - ККД | 92 %; |
| - загальна нестабільність вихідної напруги | <0,2%; |
| - високочастотні пульсації вихідної напруги | <20 мВ; |

- подвійний розмах високочастотних піків < 40 мВ.

В ролі високочастотного транзисторного інвертора використано розроблений нерегульований силовий автогенератор по півмостовій схемі з додатними зворотними зв'язками за вихідною напругою інвертора і за струмом колектора [20].

Стабілізатор вихідної напруги виконано на ВМП по двотактній схемі з середньою точкою. Функціональна схема такого стабілізатора подана на рис. 2.

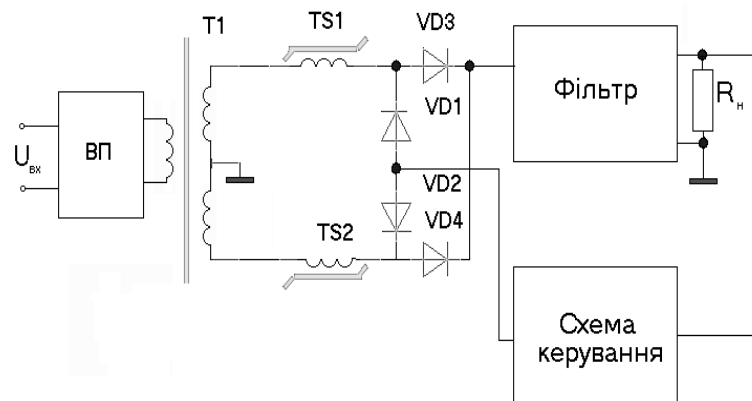


Рисунок 2 – Функціональна схема досліджуваного джерела живлення.

Принципову схему його реалізовано за структурою описаною в статті [18], яка ґрунтується на паралельній роботі окремих стабілізаторів постійної напруги при використанні спільного магнітопроводу ВМП і єдиної схеми керування для всіх стабілізаторів. Для даної вихідної потужності достатньо розбиття вихідного стабілізатора на два ідентичні. Фото дослідного зразка перетворювача на основі ВМП наведено на рис. 3.



а)



б)

Рисунок 3 – Внутрішній а) та зовнішній б) вигляд дослідного зразка НПЕ на ВМП для дослідження електромагнітної сумісності

Принцип роботи ІСПН на ВМП описано в літературі [1, 2, 9-19]. Стабілізація вихідної напруги здійснюється шляхом організації широтно-імпульсної модуляції на дроселі насичення ВМП, виконаному на осерді з прямокутною петлею гістерезису, за рахунок зміни співвідношення насиченого та ненасиченого станів дроселя насичення ВМП у функції вихідної напруги стабілізатора з врахуванням зміни напруги на силовому високочастотному трансформаторі. Форми напруги на дроселі насичення ВМП та силовому високочастотному трансформаторі при різних значеннях вихідного струму представлені на рис. 4.

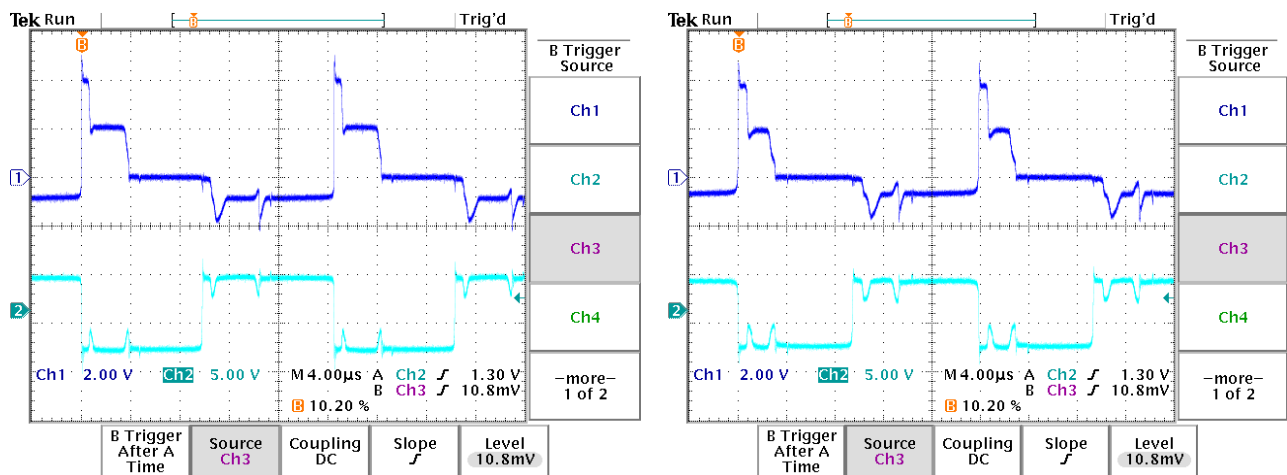


Рисунок 4 – Канал 1(Ch1) – форма напруги на ВМП, канал 2(Ch2) – форма напруги на силовому трансформаторі
а) при вихідному струмі 4.4А та б) при вихідному струмі 8А.

Дані для побудови зовнішньої характеристики перетворювача приведені в табл. 1. З даних таблиці випливає, що нестабільність вихідної напруги в точці заведення зворотного зв'язку менше 0,2 %, що дозволяє віднести цей пристрій до класу високоточної апаратури. Зазвичай цей показник вважається хорошим, якщо він не перевищує 1 %.

Таблиця 1

Вихідний струм, А Струм навантаження, А	0		3		4,8		8		Вхідна змінна напруга, В
	*	**	*	**	*	**	*	**	
Вихідна напруга, В	24,10		24,07	24,03	24,08	24,03	24,09	24,01	100
	24,09		24,07	24,03	24,08	24,03	24,09	24,01	110
	24,09		24,07	24,03	24,08	24,02	24,09	24,01	120

* - вимірювання вихідної напруги проводиться в точці під'єднання зворотного зв'язку по напрузі (на виході високочастотного фільтра).

** - вимірювання вихідної напруги проводиться на виході джерела живлення (після додаткового завадозахисного фільтра).

Опосередковано про рівень ЕМЗ в НПЕ можна судити за якістю вихідної напруги – рівнем високочастотних пульсацій, двійним розмахом високочастотних піків, рівнем стогерцової складової, а також за характером протікання перехідних процесів в динамічних режимах. На рис. 5. показано осцилограми високочастотних пульсацій на виході перетворювача при різних значеннях струму навантаження.

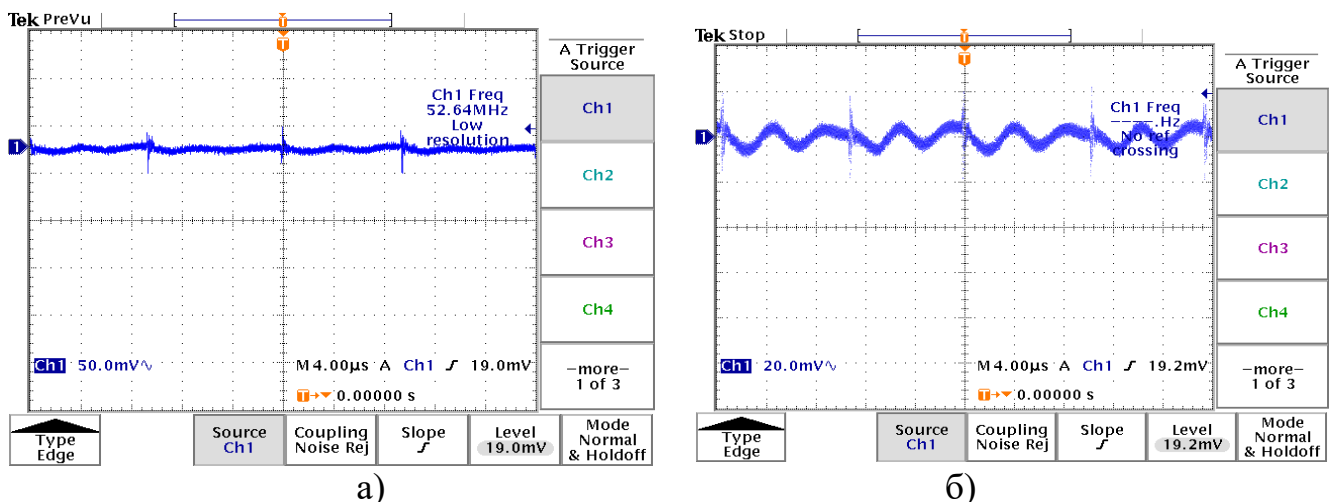


Рисунок 5 – Пульсації вихідної напруги а) при вихідному струмі 4,4 А та б) при вихідному струмі 8А

Як видно з отриманих осцилограм, у вихідній напрузі мінімізовані високочастотні пульсації, а також двійний розмах високочастотних піків. Стогерцова складова рівна нулю, оскільки вона відпрацьовується ВМП (може простежуватись на рівні кількох мВ за рахунок зовнішніх наводок). Що стосується якості перехідних процесів, то перехідний процес завершується в момент досягнення регульованою величиною (вихідною напругою) свого усталеного рівня. Тобто в системі відсутні будь-які перерегулювання, а час перехідного процесу скорочується на порядок.

Ще одним джерелом появи ЕМЗ в НПЕ, які призводять до погіршення якості первинної мережі, є несинусоїдна форма вхідного струму, обумовлена наявністю вхідних ємнісних фільтрів. Саме несинусоїдне споживання струму з мережі породжує вищі гармоніки, які поступають в мережу і призводять до появи ЕМЗ, що випромінюється в навколишнє середовище. На рис. 6 подано осцилограми вхідного змінного струму при різних вихідних струмах в НПЕ на ВМП.

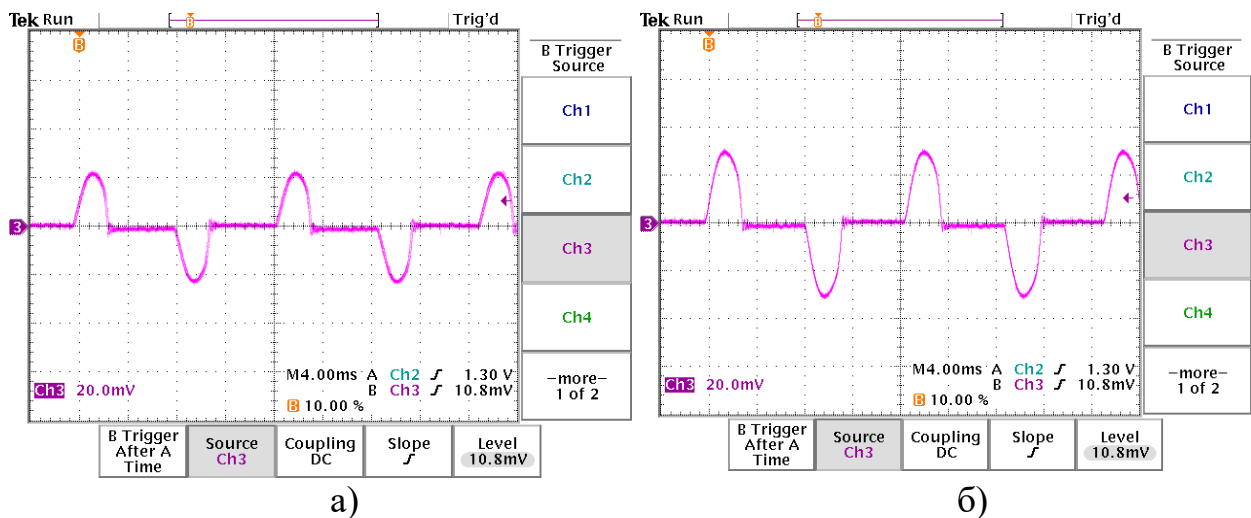
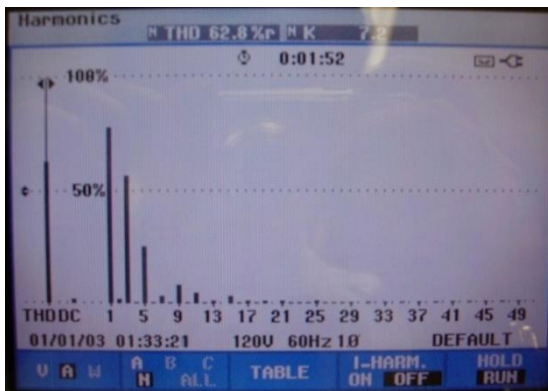


Рисунок 6 – Форма вхідного струму а) при вихідному струмі 3 А та б) при вихідному струмі 4,4 А

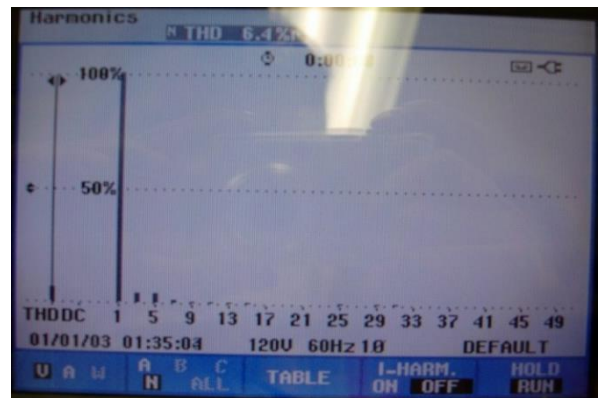
Рівень гармонік, виміряний в досліджуваному НПЕ на ВМП та в аналізі (США), представлено на рис. 7. Причому аналог був з коректором коефіцієнта потужності, за рахунок чого забезпечено синусоїдну форму споживаного струму (в аналізаторі гармонік чітко простежується перша гармоніка).

Експериментальне дослідження рівня випромінюваних електромагнітних завад НПЕ на ВМП проводилось на розробленому дослідному зразку перетворювача на вихідні параметри 24 В, 8 А, створеному в рамках виконання спільного наукового проекту “High-Reliability Switching Power Converters for Security of Information Technology” (IC S.NUKR.CLG 982639) (грант НАТО в рамках програми “Nato Programme Security Through Science”) в лабораторії силових електроніки Каліфорнійського університету, м.Ірвін, США

(Prof. K. Smedley). Тест на електромагнітне випромінювання проводився в спеціалізованій лабораторії (м. Ірвін, США).



а)



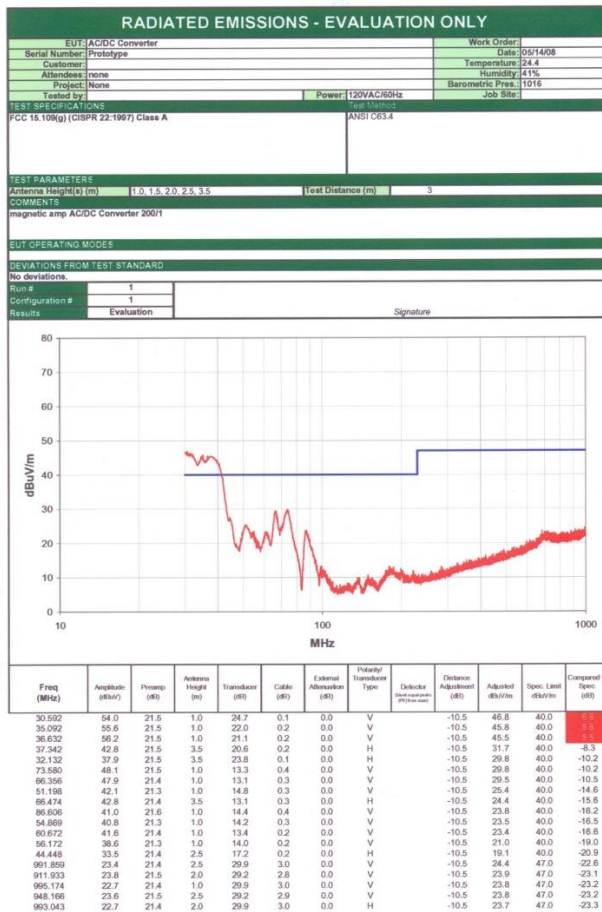
б)

Рисунок 7 – Рівень гармонік в а) джерелі живлення без ККП (НПЕ на ВМП) та б) джерелі живлення з ККП (аналог США)

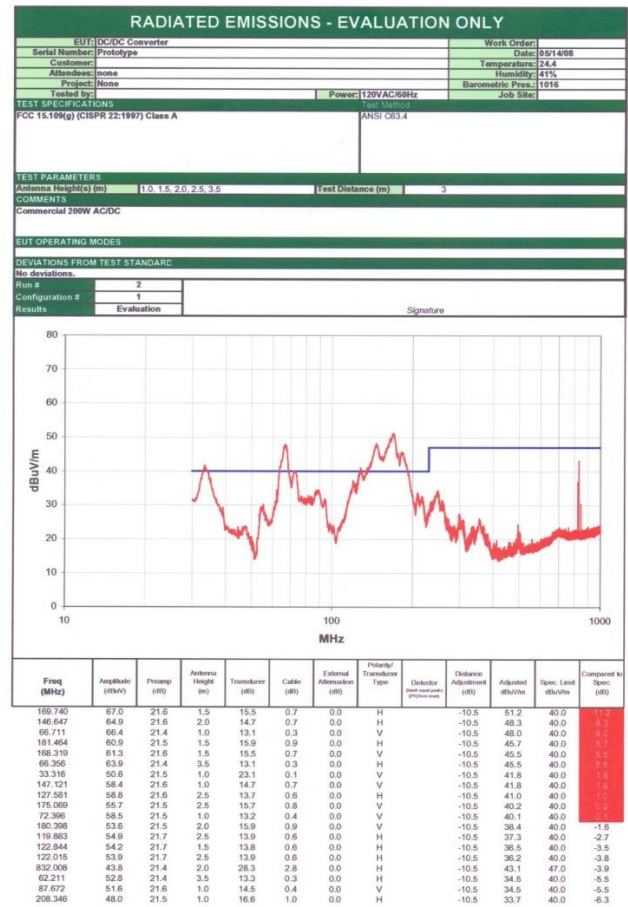
Вимірювання напруженості електромагнітного випромінювання проводилось на відстані 3 м для двох перетворювачів: вищеописаного і аналога (США) на ту ж вихідну потужність для живлення засобів телекомунікацій.

Вимірювання рівня електромагнітних завад випромінювання проводились у III частотному діапазоні (30–1000МГц) за методом ANSI C3.4 (специфікація FCC 15.109(g) (CISPR 22:97) Class A)).

На рис. 8 наведено результати вимірювань рівня випромінюваних електромагнітних завад розробленого дослідного зразка НПЕ на ВМП та аналога на вихідну потужність 200 Вт.



а)



б)

Рисунок 8 – Результати вимірювань рівня випромінюваних електромагнітних завад а) дослідного зразка НПЕ на ВМП та б) аналога (США) на вихідну потужність 200 Вт

Висновок. 1. В діапазоні частот від 42 МГц до 400 МГц рівень електромагнітних завад випромінювання розробленого НПЕ суттєво нижчий, ніж в американського аналога (зокрема, в діапазоні частот 130–200 МГц – в 4–5 разів). На частотах 400–1000 МГц завади випромінювання приблизно рівні (за винятком незначного перевищення для аналога на частотах 500 МГц і 810–850 МГц).

2. Нижчий рівень ЕМЗ досліджуваного перетворювача пояснюється специфікою його схемотехнічного виконання:

- використанням в ролі силових регулюючих елементів високочастотних магнітних підсилювачів, робота яких в ключовому режимі не супроводжується появою високочастотної завади високого рівня. Крім того, сам магнітний

підсилювач слугує фільтром кондуктивних ЕМЗ як в насиченому, так і в ненасиченому станах;

- використанням запропонованої структури імпульсного стабілізатора постійної напруги на ВМП, в основу якої покладено паралельну роботу окремих ІСН на ВМП із забезпеченням рівномірного розподілу струму навантаження між ними при використанні спільного магнітопроводу ВМП для всіх паралельно ввімкнених стабілізаторів. Таке виконання забезпечує не тільки високий рівень ККД, а й суттєво (в кілька разів) знижує рівень ЕМЗ від роботи силових діодів височастотного випрямляча;

- відкривання силового транзистора височастотного нерегульованого транзисторного інвертора відбувається при нульовому струмі навантаження за рахунок того, що на початку кожного півперіоду регулюючий силовий елемент (височастотний магнітний підсилювач) імпульсного стабілізатора постійної напруги перебуває в ненасиченому стані;

- для формування траєкторії закривання силового транзистора інвертора використано розроблений метод керування, який забезпечує його закривання при майже нульовому струмі колектора (режим подібний до режиму ключа в «квасірезонансному» перетворювачі, тільки при прямокутних формах напруги та струму, що забезпечує вищу ефективність ключа) і унеможливорює протікання наскрізних струмів в напівмостовій схемі;

- використанням вихідного заводозахисного фільтра (при невисоких рівнях струму навантаження);

- використанням у фільтрах височастотних конденсаторів;

- максимально короткими шляхами протікання силового струму;

- відсутністю традиційних демпфуючих ланок (snubber circuits), що також позитивно впливає на кінцеве значення ККД перетворювача.

3. Дослідження споживаного струму в розробленому НПЕ на ВМП аналізатором гармонік підкреслює необхідність використання в ньому коректора коефіцієнта потужності.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

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, April. P. 355–361. DOI:10.1109/5.4422
2. Volodymyr Yaskiv, Anna Yaskiv. Development of the Power Supply and Control System for the Hemodialysis Machine // *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. Vol. 13. № 3. 2023. P. 23–28. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.3745>
3. G. Pavlov, M. Pokrovskiy, I. Vinnichenko. Load Characteristics of the Serial-to-serial Resonant Converter with Pulse-number Regulation for Contactless Inductive Energy Transfer. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kharkiv. Ukraine, 2018. P. 133–138. doi: 10.1109/IEPS.2018.8559590
4. Volodymyr Yaskiv, Oleg Shabliy, Anatoliy Alpatov, Olexandr Gurnik Development of switch power supplies for radar applications // *2001 CIE International Conference on Radar*. Beijing, China, 2001. P. 851–855.
5. G. Pavlov, I. Vinnichenko, M. Pokrovskiy, N. Tarabanov. Electromagnetic Processes in Serial-To-Parallel Resonant Converter for Contactless Charging of Electric Vehicle Battery. *2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. Kyiv. Ukraine, 2019. P. 668–673. doi: 10.1109/ELNANO.2019.8783649.
6. Domnin I., Levon O., Kozlov S. Control system of the filter-compensating device with the second-order fuzzy regulation // *Technical Electrodynamics*, 2018. № 6. P. 30–33.
7. J. Wen, L. Zhou, K. Smedley. Reactive power compensation and harmonics elimination at Medium-Voltage using Hexagram converter. *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. Atlanta. GA. USA, 2010. pp. 136–144. doi: 10.1109/ECCE.2010.5618060.
8. I. Domnin, O. Levon. Active power filter for reactive power compensation for the powerful sounding pulses shapers // *Physics of the atmosphere and geospace*, 2020. № 6. P. 21–30.
9. 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. P. 333–338. DOI: 10.1109/PESC.2001.954042
10. 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.
11. 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
12. 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.
13. Austrin L. On Magnetic Amplifiers in Aircraft Applications. Royal Institute of Technology. Sweden, 2007.
14. 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
15. Yaskiv V. Design Methods of Switch Mode Power Supplies. Tutorial 10 on 26-th International Energy Conference (INTELEC), Hyatt Regency Chicago, Illinois, USA, 2004. 39 p.
16. Volodymyr Yaskiv, Anatoliy Martseniuk, Anna Yaskiv, Oleg Yurchenko, Bohdan Yavorsky. Modular High-Frequency MagAmp DC-DC Power Converter // *2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. Ceske Budejovice, Czech Republic, 2019. P. 213–216.
17. Volodymyr Yaskiv, Oleg Yurchenko, Anatoliy Martseniuk, Anna 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. P. 113–117.
18. Яськів Володимир. Аналіз стійкості стабілізатора напруги на високочастотних магнітних підсилювачах з врахуванням інтервальної невизначеності параметрів їх осердь.

Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит, 2023 № 11(189). С. 21–33.
DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2023.11.02>.

19. Volodymyr Yaskiv, Oleg Yurchenko. Unregulated Transistor Inverter for High-Frequency MagAmp Power Converters / Computational Problems of Electrical Engineering. Lviv : Polytechnic National University, 2020. Vol. 10, no 1. P. 45–50.

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, April. P. 355–361. DOI:10.1109/5.4422
2. Volodymyr Yaskiv, Anna Yaskiv. Development of the Power Supply and Control System for the Hemodialysis Machine // *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. Vol. 13. № 3. 2023. P. 23–28. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.3745>
3. G. Pavlov, M. Pokrovskiy, I. Vinnichenko. Load Characteristics of the Serial-to-serial Resonant Converter with Pulse-number Regulation for Contactless Inductive Energy Transfer. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kharkiv. Ukraine, 2018. P. 133–138. doi: 10.1109/IEPS.2018.8559590
4. Volodymyr Yaskiv, Oleg Shabliy, Anatoliy Alpatov, Olexandr Gurnik Development of switch power supplies for radar applications // *2001 CIE International Conference on Radar*. Beijing, China, 2001. P. 851–855.
5. G. Pavlov, I. Vinnichenko, M. Pokrovskiy, N. Tarabanov. Electromagnetic Processes in Serial-To-Parallel Resonant Converter for Contactless Charging of Electric Vehicle Battery. *2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. Kyiv. Ukraine, 2019. P. 668–673. doi: 10.1109/ELNANO.2019.8783649.
6. Domnin I., Levon O., Kozlov S. Control system of the filter-compensating device with the second-order fuzzy regulation // *Technical Electrodynamics*, 2018. № 6. P. 30–33.
7. J. Wen, L. Zhou, K. Smedley. Reactive power compensation and harmonics elimination at Medium-Voltage using Hexagram converter. *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. Atlanta. GA. USA, 2010. pp. 136–144. doi: 10.1109/ECCE.2010.5618060.
8. I. Domnin, O. Levon. Active power filter for reactive power compensation for the powerful sounding pulses shapers // *Physics of the atmosphere and geospace*, 2020. № 6. P. 21–30.
9. 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. P. 333–338. DOI: 10.1109/PESC.2001.954042
10. 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.
11. 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
12. 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.
13. Austrin L. On Magnetic Amplifiers in Aircraft Applications. Royal Institute of Technology. Sweden, 2007.
14. 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
15. Yaskiv V. Design Methods of Switch Mode Power Supplies. Tutorial 10 on 26-th International Energy Conference (INTELEC), Hyatt Regency Chicago, Illinois, USA, 2004. 39 p.
16. Volodymyr Yaskiv, Anatoliy Martseniuk, Anna Yaskiv, Oleg Yurchenko, Bohdan Yavorsky. Modular High-Frequency MagAmp DC-DC Power Converter // *2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. Ceske Budejovice, Czech Republic, 2019. P. 213–216.

17. Volodymyr Yaskiv, Oleg Yurchenko, Anatoliy Martseniuk, Anna 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. P. 113–117.
18. 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.
19. Iaskiv Volodymyr. Analiz stiikosti stabilizatora napruhy na vysokochastotnykh mahnitnykh pidsyliuvachakh z vrakhuvanniam intervalnoi nevyznachenosti parametriv yikh oserd. Enerhozberezhennia. Enerhetyka. Enerhoaudyt, № 11(189) (2023): P. 21–33. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2023.11.02>
20. Volodymyr Yaskiv, Oleg Yurchenko. Unregulated Transistor Inverter for High-Frequency MagAmp Power Converters / Computational Problems of Electrical Engineering. Lviv : Polytechnic National University, 2020. Vol. 10, no 1. P. 45–50.

*Стаття надійшла до редакції: 18.07.2025; рецензування: 28.07.2025;
прийнята до публікації 02.08.2025. Автори прочитали и дали згоду рукопису.
The article was submitted on 18.07.2025; revised on 28.07.2025; and accepted for publication
on 02.08.2025. The authors read and approved the final version of the manuscript.*