

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В КОЛІ «ОБМЕЖУВАЧ НАПРУГИ – ФІЛЬТР НИЖНІХ ЧАСТОТ» ЗА ДІЇ ВИСОКОВОЛЬТНОЇ ІМПУЛЬСНОЇ ЗАВАДИ З МЕРЕЖІ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

В.О. Павловський*, канд. техн. наук, **В.К. Гурін****, канд. техн. наук,
О.М. Юрченко***, докт. техн. наук
 Інститут електродинаміки НАН України,
 пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.
 E-mail: yuon@ied.org.ua

У роботі проведено теоретичний аналіз проходження високовольтної імпульсної завади (ВІЗ) з мережі електроживлення через тракт «обмежувач напруги – фільтр нижніх частот» з метою кількісної оцінки впливу фільтра на зменшення амплітуди залишкової ВІЗ на електромережному вході електротехнічної та/або радіоелектронної апаратури. За фільтр нижніх частот (ФНЧ) вибрано Г-подібну ланку ФНЧ типу k . Наведено типові засоби обмеження амплітуди ВІЗ (газонаповнені розрядники, варистори, супресори) та показано їхні недоліки. Дано обґрунтування еквівалентної схеми для проведення теоретичного аналізу. Проведений аналіз виявив прямий зв'язок між частотою зрізу ФНЧ, яка визначається номіналами його елементів, і амплітудою залишкової ВІЗ на електромережному вході апаратури, а також підтвердив ефективність увімкнення ФНЧ між виходом типового обмежувача напруги ВІЗ та електромережним входом згаданої апаратури задля подальшого зменшення амплітуди залишкової ВІЗ у разі необхідності. Бібл. 18, рис. 6.

Ключові слова: високовольтна імпульсна завада, розрядник, варистор, супресор.

Вступ. Стійкість електротехнічної та радіоелектронної апаратури до дії високовольтних імпульсних завад ВІЗ з мережі електроживлення є важливим показником надійності та якості згаданої апаратури. Крім того, цей показник регламентується низкою міжнародних і національних стандартів з електромагнітної сумісності [1–4].

Складність зменшення амплітуди ВІЗ до рівня, за якого апаратура «не відчуває» їхню дію, полягає в тому, що амплітуда ВІЗ може сягати 2-х кіловольт і більше, а тривалість фронтів знаходиться в межах від десятків наносекунд до декількох мікросекунд. Тому останні десятиліття фахівці приділяють цьому питанню серйозну увагу [5–13].

Так в роботах [10, 14, 15] показано, що ефективним засобом зменшення ВІЗ є двополюсники з нелінійною вольт-амперною характеристикою (ВАХ) – варистори, супресори та газонаповнені розрядники; їх включають на електромережному вході апаратури. Кожному з цих засобів притаманні ті чи інші недоліки: для газонаповнених розрядників це інерційність спрацьовування, для варисторів та супресорів – високий залишковий рівень напруги ВІЗ (500...800 В) на виході схеми її обмеження.

Щоб додатково зменшити амплітуду ВІЗ на електромережному вході апаратури, в роботі [15] запропоновано включати одну-дві ланки фільтра нижніх частот (ФНЧ) між обмежувачем амплітуди ВІЗ та електромережним входом апаратури. Разом з тим таке інженерне рішення не підкріплене аналізом проходження ВІЗ з мережі електроживлення через тракт «обмежувач напруги – фільтр нижніх частот», що зменшує ефективність та універсальність використання згаданого інженерного рішення.

Мета та постановка задачі. Провести аналіз проходження ВІЗ через тракт «обмежувач напруги – фільтр нижніх частот» з метою кількісної оцінки впливу ФНЧ на зменшення амплітуди залишкової ВІЗ на електромережному вході апаратури.

На рис. 1 показано електричну принципову схему досліджуваного кола.

Імпульс ВІЗ від джерела напруги $u_{ВІЗ}(t)$ з внутрішнім опором $R_{Г}$ поступає на обмежувач напруги VR і далі через Г-подібну ланку ФНЧ з елементами L_{ϕ} , C_{ϕ} на електромережний вхід апаратури (на рис. 1 цей вхід представлений резистором $R_{н}$).

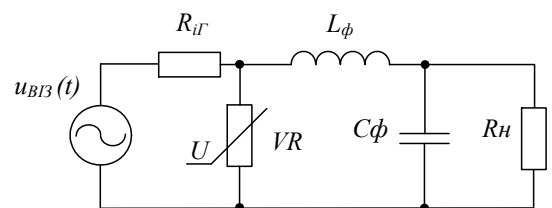


Рис.1

© Павловський В.О., Гурін В.К., Юрченко О.М., 2023
 ORCID ID: *<https://orcid.org/0000-0001-5768-101X>; ** <https://orcid.org/0000-0003-2541-216X>;
 *** <https://orcid.org/0000-0002-2107-2308>

Для спрощення аналізу прийнято, що ФНЧ є найпростішим фільтром типу k , причому параметр $k = \sqrt{L_\phi / C_\phi}$ [16].

Типову ВАХ обмежувача напруги показано на рис. 2.

Напруга ВІЗ являє собою імпульс з амплітудою від сотень вольт до декількох кіловольт та фронтом і зрізом експоненційної форми. Наприклад, ВІЗ мікросекундного діапазону тривалостей [1] має фронт $\tau_\phi = 1$ мкс, тривалість імпульсу на половині амплітуди $\tau_{\text{імп}} = 50$ мкс (рис. 3).

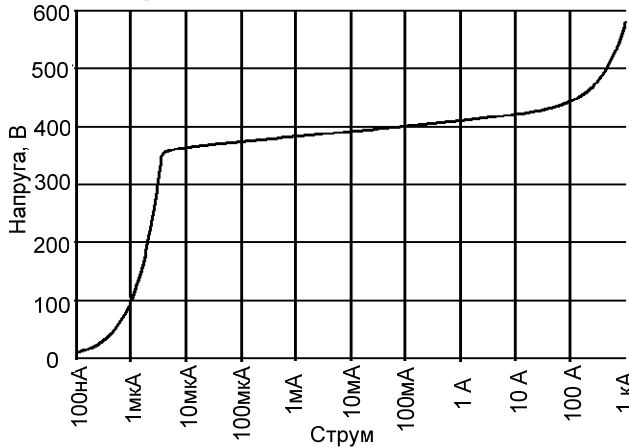


Рис. 2

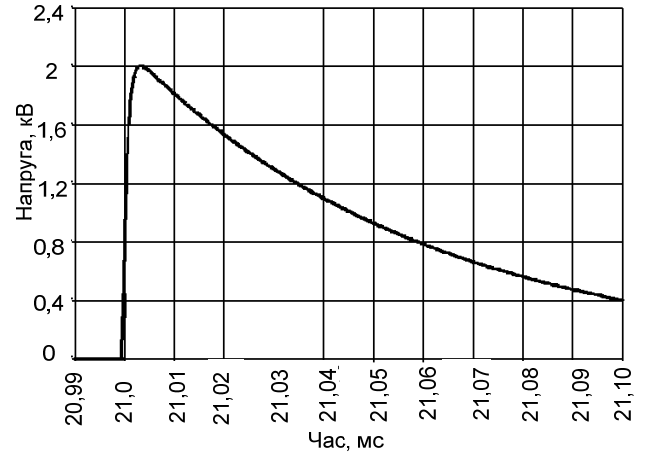


Рис. 3

Напругу $u_{\text{обм}}(t)$, що поступає з обмежувача напруги на вхід ФНЧ, наведено на рис. 4. Вона являє собою двополярне коливання форми, близької до прямокутної, з «хвостом» у вигляді загасаючої синусоїди. Амплітуди позитивної та негативної півхвилі приблизно однакові та дорівнюють напрузі обмеження. Це дає змогу спростити схему на рис. 1 і для проведення подальшого аналізу вважати, що на вході ФНЧ увімкнене джерело напруги $u_{\text{обм}}(t)$ (рис. 4). Таку схему показано на рис. 5.

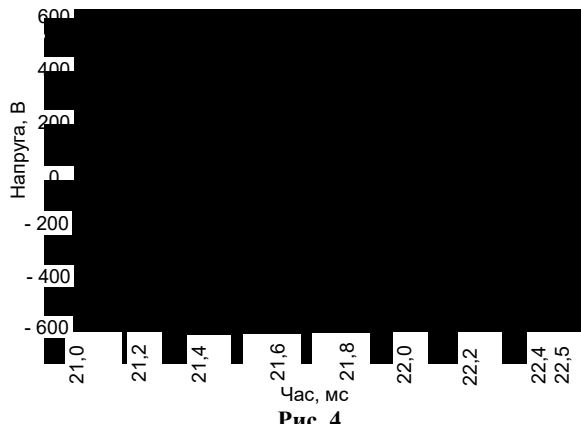


Рис. 4

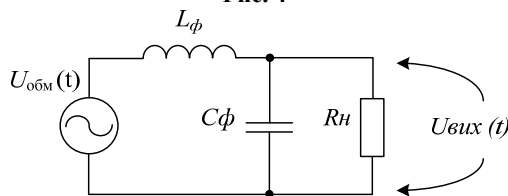


Рис. 5

L_ϕ , C_ϕ та R_H ; $u'(\tau)$ – перша похідна напруги $u_{\text{обм}}(t) = u_{\text{обм}}(\tau)$ на вході ФНЧ; $h(t-\tau)$ – перехідна функція за напругою $h(t)$, в якій аргумент t замінено на $(t-\tau)$.

В нашому випадку стрибка напруги $u(0)$ на вході ФНЧ немає, тому можемо записати

$$u_{\text{вих}}(t) = \int_0^t u'(\tau)h(t-\tau)d\tau. \quad (2)$$

Напругу на вході ФНЧ (рис. 4) можна апроксимувати кусково-ламанною лінією або, іншими словами, сукупністю лінійно зростаючих або лінійно спадних фрагментів напруги. Тоді на кожному

інтервалі лінійного зростання або спаду напруги $u_{обм}(t)$ її залежність від часу має вигляд $u_{обм}(t) = \pm At + b$, де A – коефіцієнт нахилу прямої $u_{обм}(t)$; b – коефіцієнт зміщення цієї прямої.

Знак перед коефіцієнтом нахилу A залежить від того, зростає напруга $u_{обм}(t)$ в даному інтервалі часу чи зменшується.

Перша похідна такої напруги дорівнює $[u_{обм}(t)]' = \pm A$. Підставивши цей вираз у (2), одержимо

$$u_{вих}(t) = \pm A \cdot \int_0^t h(t-\tau) dt. \quad (3)$$

З виразу (3) видно, що для того, щоб знайти напругу $u_{вих}(t)$ на виході ФНЧ, потрібно одержати вираз для перехідної функції за напругою $h(t-\tau)$ згаданого вище електричного кола і потім проінтегрувати його по змінній τ в інтервалі часу $(0, t)$.

У роботі [18] проведено аналіз реакції Г-подібної ланки ФНЧ, зображеної на рис. 5, за дії на його вході одиночного стрибка напруги та показано, що за умови, коли

$$R_n = k = \sqrt{L_\phi / C_\phi}, \quad (4)$$

перехідна функція за напругою $h(t)$, тобто напруга на виході згаданого електричного кола у разі дії на його вході одиночного стрибка напруги, дорівнює

$$h(t) = 1 - e^{-\frac{\Omega_3}{2}t} \left[\cos\left(\sqrt{3}\frac{\Omega_3}{2}t\right) + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin\left(\sqrt{3}\frac{\Omega_3}{2}t\right) \right] = 1 - e^{-\frac{\Omega_3}{2}t} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \sin\left[\frac{\pi}{3} + \left(\sqrt{3}\frac{\Omega_3}{2}t\right)\right], \quad (5)$$

де $\Omega_3 = (L_\phi \cdot C_\phi)^{-1/2}$.

Умова (4) легко виконується і не накладає додаткових обмежень ні на R_n , ні на L_ϕ та/або на C_ϕ . Тому для подальшого аналізу можемо скористатися виразом (5). Замінивши у ньому аргумент t на $(t - \tau)$, одержимо

$$h(t-\tau) = 1 - e^{-\frac{\Omega_3}{2}(t-\tau)} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \sin\left[\frac{\pi}{3} + \sqrt{3}\frac{\Omega_3}{2}(t-\tau)\right] \quad (6)$$

і підставимо (6) у (3)

$$u_{вих}(t) = \pm A \cdot \int_0^t \left\langle 1 - e^{-\frac{\Omega_3}{2}(t-\tau)} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \sin\left[\frac{\pi}{3} + \sqrt{3}\frac{\Omega_3}{2}(t-\tau)\right] \right\rangle d\tau.$$

Після проведення необхідних перетворень одержимо

$$u_{вих}(t) = \pm A \cdot \left\langle t - \frac{1}{\Omega_3} \cdot \left\{ 1 - e^{-\frac{\Omega_3}{2}t} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \sin\left[\frac{\pi}{3} - \sqrt{3}\frac{\Omega_3}{2}t\right] \right\} \right\rangle, \quad t \geq 0. \quad (7)$$

Якщо інтервал часу $(0, t)$ у виразі (7) розбитий на декілька підінтервалів $(0 \dots t_1, t_1 \dots t_2, t_2 \dots t_3$ тощо), то в загальному випадку

$$u_{вих}(t) = \pm A \cdot \left[\left[(t-\alpha) - \frac{1}{\Omega_3} \left\langle 1 - e^{-\frac{\Omega_3}{2}(t-\alpha)} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \sin\left[\frac{\pi}{3} - \sqrt{3}\frac{\Omega_3}{2}(t-\alpha)\right] \right\rangle \right] \right]. \quad (8)$$

Тут α – нижня границя кожного підінтервалу часу.

Вираз (8) справедливий для кожного відрізка часу, з яких складається загальний інтервал $(0, t)$ напруги $u_{обм}(t)$ (рис. 4). Він дає можливість визначити напругу $u_{вих}(t)$ для будь-якого моменту часу, що входить до заданого інтервалу, за відомим або заданим значенням параметра ФНЧ Ω_3 . З цього виразу видно, що параметр ФНЧ $\Omega_3 = (L_\phi \cdot C_\phi)^{-1/2}$ безпосередньо впливає на значення напруги $u_{вих}(t)$: чим більший параметр Ω_3 , (тобто чим менші значення L_ϕ і C_ϕ), тим менша різниця між вхідною та вихідною напругою ФНЧ, і навпаки. Якщо $\Omega_3 \rightarrow \infty$, то $u_{вих}(t) \rightarrow u_{обм}(t)$.

Для наочності на основі виразу (8) побудовано графіки напруги $u_{вих}(t)$ для трьох значень параметра Ω_3 (рис. 6) та наступних параметрів ВІЗ: амплітуда $U_m = 2$ кВ, тривалість ВІЗ на половині амплітуди $\tau_{имп} = 50$ мкс, час наростання напруги $\tau_\phi = 1$ мкс. На вході ФНЧ амплітуда ВІЗ обмежена значенням приблизно 500 В.

Параметр k у ФНЧ прийнятий рівним 75 Ом, опір резистора R_n згідно з умовою (4) дорівнює 75 Ом, що відповідає установленій потужності навантаження $P_n \approx 650$ ВА.

Значення параметра Ω_3 прийняті такими: $\Omega_{31} \approx 3,1$ кГц, $\Omega_{32} \approx 1,6$ кГц, $\Omega_{33} \approx 0,63$ кГц.

З кривих на рис. 6 видно, що найбільший сплеск напруги на виході ФНЧ, зумовлений реакцією ФНЧ на дію ВІЗ, приблизно пропорційний параметру Ω_3 : чим менший цей параметр, тим менша

амплітуда сплеску напруги на електромережному вході апаратури. Так, якщо, наприклад, $\Omega_3=0,63$ кГц, то найбільший сплеск напруги на виході ФНЧ не перевищує 80 В; при цьому амплітуда ВІЗ дорівнює 2 кВ, а амплітуда напруги на вході ФНЧ сягає 550 В (рис. 4). Це свідчить про те, що увімкнення навіть одної Г-подібної ланки ФНЧ між виходом обмежувача напруги та електромережним входом апаратури значно зменшує остаточний сплеск напруги на вході згаданої апаратури.

Разом з тим необхідно зазначити, що зменшення параметра Ω_3 означає збільшення значень L_ϕ і C_ϕ (рис. 1). Тому під час вибору цього параметра необхідно дотримуватися розумного компромісу.

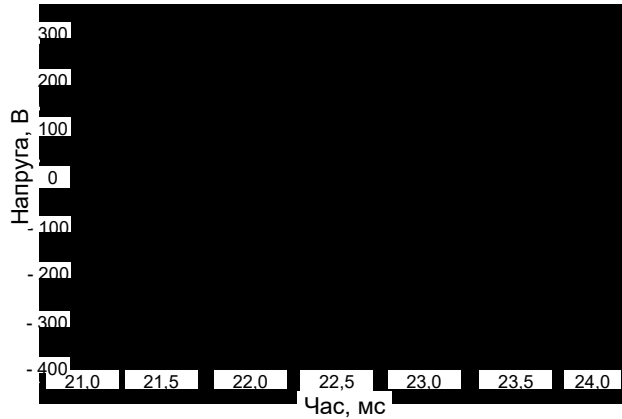


Рис.6

Висновок. Теоретичний аналіз процесу проходження високовольтної імпульсної завади з мережі електроживлення у вигляді одиночного імпульсу напруги заданих форми, амплітуди та тривалості, а також тривалостей його фронту і зрізу через тракт «обмежувач напруги – фільтр нижніх частот» дав можливість встановити кількісні співвідношення між параметрами вхідного імпульсу напруги з мережі електроживлення, параметрами елементів фільтра та миттєвими значеннями сплеску напруги на електромережному вході електротехнічної або радіо-

електронної апаратури. Це, в свою чергу, дало можливість кількісно оцінити вплив фільтра на зменшення амплітуди залишкової завади та встановити прямий зв'язок між елементами фільтра і найбільшим сплеском напруги на електромережному вході апаратури, а також об'єктивно оцінити шкідливу дію згаданого сплеску напруги та побудувати правильну стратегію задля зменшення амплітуди залишкової імпульсної завади до безпечного рівня.

Роботу виконано за бюджетною темою: «Розвиток теорії високочастотних транзисторних перетворювачів на основі резонансних інверторів для систем електроживлення технологічного обладнання (Частота-3)», КПКВК 6541030.

1. Електромагнітна сумісність. Частина 4-5. Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливості до сплесків напруги та струму. ДСТУ EN 61000-4-5:2019. Київ: ДП УкрНДНЦ, 2020.
2. Електромагнітна сумісність. Частина 4-4. Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливості до електричних швидких перехідних процесів/пакетів імпульсів (EN 61000-4-4:2012, IDT; IEC 61000-4-4:2012, IDT). ДСТУ EN 61000-4-4:2019. Київ: ДП УкрНДНЦ, 2020.
3. Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-5: Testing and measurement techniques - Surge immunity test. IEC/SC 77B - IEC_SC_77B. EN 61000-4-5:2014/A1:2017.
4. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-4: Testing and measurement techniques - Electrical fast transient/burst immunity test. IEC/SC 77B - IEC_SC_77B. EN 61000-4-4:2012.
5. Radasky W.A., Koepeke G. Considerations of high power electromagnetics (HPEM) transients with respect to Smart Grid. *US National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM)*. Boulder, CO, USA, 09-12 January 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/USNC-URSI-NRSM.2013.6525041>.
6. Tao Liang, Spadacini G., Grassi F., Pignari S.A. Coupling of Wideband Radiated IEMI to Wiring Harness: A Statistical Analysis of the Main Influencing Parameters. *IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal Integrity and Power Integrity (EMC, SI & PI)*. Long Beach, CA, USA, 30 July - 03 August 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/EMCSI.2018.8495256>.
7. Tao Liang, Yan-zhao Xie. Maximizing Radiated High-Power Electromagnetic Threat to Transmission Line System Under the Constraints of Bounded Bandwidth and Amplitude. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2021. Vol. 63. Issue 3. Pp. 840-847. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEMC.2020.3040271>.
8. Qiwei Li, Wen Cao, Jun Ding, Jinyong Fang, Jing Sun, Chenjiang Guo. Research on High-Power Electromagnetic Effect and Protective Technology of Electronic Equipments. *IEEE 9th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications (MAPE)*. Chengdu, China, 26-29 August 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/MAPE53743.2022.9935158>.
9. Marzieh Amirkhani, Abdollah Amirkhani, Alireza Karimian. Reducing the effect of high power electromagnetic waves on electrical equipment. *International Congress on Technology, Communication and Knowledge (ICTCK)*. Mashhad, Iran, 11-12 November 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICTCK.2015.7582721>.

10. Ott H.W. Electromagnetic Compatibility Engineering. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009. 843 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470508510>.
11. Radasky W.A., Hoad R. Recent Developments in High Power EM (HPEM) Standards With Emphasis on High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) and Intentional Electromagnetic Interference (IEMI). *IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications*. 2020. Vol. 2. Issue 3. Pp. 62-66. DOI: <https://doi.org/10.1109/LEMCPA.2020.3009236>
12. Lanzrath M., Suhrke M., Hirsch H. HPEM - Based Risk Assessment of Substations Enabled for the Smart Grid. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2020. Vol. 62. Issue 1. Pp. 173-185. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEMC.2019.2893937>.
13. Giri D.V., Hoad R., Sabath F. Implications of high-power electromagnetic (HPEM) environments on electronics. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*. 2020. Vol. 9. Issue 2. Pp. 37-44. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEMC.2020.9133238>.
14. Павловський В.О., Гурін В.К., Юрченко О.М. Підвищення ефективності захисту електротехнічної та радіоелектронної апаратури від високовольтних короткочасних сплесків напруги в мережі електроживлення. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 5. С. 34-37. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2022.05.034>.
15. Рикетс Л.У., Бриджес Дж.Э., Майлетта Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты. М.: Атомиздат, 1979. 328 с.
16. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Часть I: Линейные электрические цепи. М.-Л.: Энергия 1966, 320 с.
17. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Высшая школа, 1978. 528 с.
18. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Сов. Радио, 1964. 693 с.

ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN THE "VOLTAGE LIMITER - LOW-FREQUENCY FILTER" CIRCUIT DURING THE INFLUENCE OF HIGH-VOLTAGE SURGE FROM THE POWER SUPPLY NETWORK

V.O. Pavlovskiy, V.K. Gurin, O.M. Yurchenko
 Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
 pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.
 E-mail: yuon@ied.org.ua.

In the work, a theoretical analysis of high-voltage surge (HVS) passing from a power supply network through the path "voltage limiter - low-pass filter" is carried out, with the aim to evaluate the effectiveness of the filter on reducing the amplitude of the residual HVS at the input of electrical and/or radio-electronic equipment. As a low-pass filter (LPF), an L-shaped filter was chosen. Typical means of limiting the amplitude of the HVS (gas-filled arresters, varistors, and suppressors) are analyzed, and their shortcomings are shown. The justification of the equivalent scheme for theoretical analysis is given. The analysis revealed a direct relationship between the cut-off frequency of the LPF, which is determined by the nominal values of its elements, and the amplitude of the residual HVS at the mains input of the equipment, and also showed the effectiveness of inserting the LPF between the output of a typical HVS voltage limiter and the mains input of the mentioned equipment from the point of view of additional reduction of the residual HVS amplitude. References 18, figures 6.

Keywords: high-voltage surge, gas arrester, varistor, suppressor.

1. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and measurement techniques – Surge immunity test. State standard of Ukraine EN 61000-4-5:2019. Kyiv: DP UkrNDNTs, 2019. (Ukr)
2. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-4: Testing and measurement techniques – Electrical fast transient/burst immunity test. (EN 61000-4-4:2012, IDT; IEC 61000-4-4:2012, IDT). State standard of Ukraine EN 61000-4-4:2019. Kyiv: DP UkrNDNTs, 2020. (Ukr)
3. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and measurement techniques - Surge immunity test. IEC/SC 77B - IEC_SC_77B. EN 61000-4-5:2014/A1:2017.
4. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-4: Testing and measurement techniques - Electrical fast transient/burst immunity test. IEC/SC 77B - IEC_SC_77B. EN 61000-4-4:2012.
5. Radasky W.A., Koepke G. Considerations of high power electromagnetics (HPEM) transients with respect to Smart Grid. *US National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM)*. Boulder, CO, USA, 09-12 January 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/USNC-URSI-NRSM.2013.6525041>.
6. Tao Liang, Spadacini G., Grassi F., Pignari S.A. Coupling of Wideband Radiated IEMI to Wiring Harness: A Statistical Analysis of the Main Influencing Parameters. 2018 IEEE Symposium

on *Electromagnetic Compatibility, Signal Integrity and Power Integrity* (EMC, SI & PI). Long Beach, CA, USA, 30 July - 03 August 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/EMCSI.2018.8495256>.

7. Tao Liang, Yan-zhao Xie. Maximizing Radiated High-Power Electromagnetic Threat to Transmission Line System Under the Constraints of Bounded Bandwidth and Amplitude. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2021. Vol. 63. Issue 3. Pp. 840-847. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEMC.2020.3040271>.

8. Qiwei Li, Wen Cao, Jun Ding, Jinyong Fang, Jing Sun, Chenjiang Guo. Research on High-Power Electromagnetic Effect and Protective Technology of Electronic Equipments. IEEE 9th International Symposium on *Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications* (MAPE). Chengdu, China, 26-29 August 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/MAPE53743.2022.9935158>.

9. Marzieh Amirkhani, Abdollah Amirkhani, Alireza Karimian. Reducing the effect of high power electromagnetic waves on electrical equipment. International Congress on *Technology, Communication and Knowledge* (ICTCK). Mashhad, Iran, 11-12 November 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICTCK.2015.7582721>.

10. Ott H.W. *Electromagnetic Compatibility Engineering*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009. 843 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470508510>.

11. Radasky W.A., Hoad R. Recent Developments in High Power EM (HPEM) Standards With Emphasis on High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) and Intentional Electromagnetic Interference (IEMI). *IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications*. 2020. Vol. 2. Issue 3. Pp. 62-66. DOI: <https://doi.org/10.1109/LEMCPA.2020.3009236>.

12. Lanzrath M., Suhrke M., Hirsch H. HPEM - Based Risk Assessment of Substations Enabled for the Smart Grid. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2020. Vol. 62. Issue 1. Pp. 173-185. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEMC.2019.2893937>.

13. Giri D.V., Hoad R., Sabath F. Implications of high-power electromagnetic (HPEM) environments on electronics. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*. 2020. Vol. 9. Issue 2. Pp. 37-44. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEMC.2020.9133238>.

14. Pavlovskiy V.O., Gurin V.K., Yurchenko O.M.. Increasing of electrical and radioelectronic equipment's immunity against high voltage short-duration pulse disturbances in the mains. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 5. Pp. 34-37. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.05.034>. (Ukr)

15. Ricketts L.W., Bridges J.E., Myletta J. *Electromagnetic impulse and protection methods*. Moskva: Atomizdat, 1979. 328 p. (Rus)

16. Atabekov G.I. *Theoretical foundations of electrical engineering*. In three parts. Part I: Linear electrical circuits. Moskva-Leningrad: Energiia, 1966. 320 p. (Rus)

17. Bessonov L.A. *Theoretical foundations of electrical engineering*. Electrical circuits. Moskva: Vysshaia shkola, 1978. 528 p. (Rus)

18. Gonorovskiy I.S. *Radio engineering circuits and signals*. Moskva: Sov. Radio, 1964. 693 p. (Rus)

Надійшла 21.02.2023

Остаточний варіант 26.04.2023