

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ ТА РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ ВІД ВИСОКОВОЛЬТНИХ КОРОТКОЧАСНИХ СПЛЕСКІВ НАПРУГИ В 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

Розглянуто проблему стійкості електротехнічної та радіоелектронної апаратури до дії високовольтних короткочасних сплесків напруги в мережі електроживлення, зокрема мікросекундних імпульсних перешкод (МПП) великої енергії. Показано причини виникнення МПП, амплітуда яких може досягати 4 кВ і навіть вище. Проведено огляд різноманітних методів та засобів захисту апаратури від дії МПП і показано, що найбільш ефективним є використання двополюсників з різко нелінійною вольт-амперною характеристикою: варисторів, супресорів, газонаповнених розрядників. Проаналізовано принцип дії цих двополюсників і показано, що типове увімкнення двополюсника безпосередньо на електромережному вході апаратури є недостатньо ефективним у випадках, коли імпеданс мережі електроживлення на частотах, що відповідають тривалості МПП, є низьким. Запропоновано Г-подібну схему увімкнення двополюсника разом з LR-ланкою і наведено результати електронного моделювання з використанням програми PSPICE. Одержані результати показують, що така схема зменшує амплітуду МПП на електромережному вході апаратури в 1,5 рази більше, ніж одиночний двополюсник навіть за низького імпедансу електромережі на високих частотах. Додавання фільтра нижніх частот до LR-ланки дає змогу зменшити амплітуду МПП в 40 і більше разів порівняно з типовим увімкненням варистора або супресора. Бібл. 8, рис. 6.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, імпульсні завади, варистори, супресори.

Здатність радіоелектронної та електротехнічної апаратури нормально функціонувати в умовах електромережі, електромагнітно «забрудненої» високовольтними короткочасними сплесками напруги, є важливим показником надійності апаратури. Така завадостійкість особливо важлива для систем електроживлення з транзисторними перетворювачами, оскільки саме згадані перетворювачі першими приймають на себе удар з боку «брудної» в електромагнітному розумінні електромережі.

Ці сплески напруги виникають як результат аварій у мережі електроживлення або в результаті грозової діяльності [1]. Вони також можуть бути спричинені навмисними діями (так званий «електромагнітний тероризм») [2].

Завадостійкість апаратури регламентується низкою міжнародних та вітчизняних стандартів. Так у державному стандарті України [3] встановлено вимоги щодо стійкості електротехнічної та електронної апаратури до дії мікросекундних імпульсних перешкод (МПП) великої енергії з боку мережі електроживлення. Згідно з цим стандартом амплітуда таких сплесків перенапруги може сягати 4 кВ і навіть більше.

Огляд різноманітних методів та засобів захисту апаратури від дії МПП [1, 4-7] показав, що найбільш ефективним методом є використання двополюсників з різко нелінійною вольтамперною характеристикою (ВАХ) – варисторів, супресорів, газонаповнених розрядників, які включають на електромережному вході апаратури. Коли напруга електромережі близька до номінальної, тоді повний опір згаданого вище двополюсника є дуже великим (сотні-тисячі кілоом), і двополюсник практично не шунтує електромережний вхід апаратури. Якщо в електромережі виникає МПП, то напруга на вході апаратури та на двополюснику починає зростати, і це спричиняє швидке падіння його повного опору (до одиниць ом і навіть менше). В результаті більша частина напруги МПП діє на внутрішньому імпедансі джерела МПП і тільки її невелика частина – на електромережному вході апаратури.

У випадках, коли джерело МПП має низький внутрішній імпеданс на високих частотах, увімкнення варистора, супресора або розрядника на електромережному вході апаратури не спричиняє

© Павловський В.О., Гурін В.К., Юрченко О.М., 2022
ORCID ID: *<https://orcid.org/0000-0001-5768-101X>; ** <https://orcid.org/0000-0003-2541-216X>;
*** <https://orcid.org/0000-0002-2107-2308>

значного зменшення амплітуди МП, тому що згадане зменшення прямо залежить від співвідношення між вихідним опором R_{it} генератора МП і опором R_v варистора або супресора в момент дії імпульсу МП: чим більше R_{it} порівняно з R_v , тим ефективніше двополюсник з різко нелінійною ВАХ буде обмежувати напругу МП і навпаки.

Ситуація, коли джерело МП має низький внутрішній імпеданс на високих частотах, є важливою для розгляду та аналізу тому, що методика випробувань електротехнічної та радіоелектронної апаратури на стійкість проти дії МП, наведена у національному стандарті [3], вимагає подачу високовольтного імпульсу МП безпосередньо на електромережний вхід апаратури від генератора МП з $R_{it} \leq 2$ Ом. Разом з тим ВАХ типового варистора 20D361K, у якого напруга на його виводах складає близько 400 В у разі протікання через варистор струму 1 мА, показує, що за імпульсного струму силою 100 А через варистор його миттєвий опір R_v складає 6 Ом, а за імпульсного струму 1000 А – 0,9 Ом. Це означає, що співвідношення між R_{it} та R_v , про яке згадувалося вище, знаходиться в межах 0,3...2,2, і тому варистор або супресор на електромережному вході апаратури зменшить амплітуду МП не більше, ніж удвічі відносно вхідної напруги генератора МП. За значень $R_{it} < 2$ Ом ефективність дії таких двополюсників буде ще меншою.

Наші дослідження показали, що для таких випадків ефективність дії цих двополюсників зростає, якщо їх вмикати по Г-подібній схемі разом з LR-ланкою (рис. 1). Номінал резистора R складає декілька десятків ом, індуктивність L знаходиться в межах декількох сотень мікрогенрі. LR-ланка збільшує внутрішній імпеданс джерела МП на високих частотах, де індуктивний опір дроселя L перевищує опір резистора R , тому що цей резистор увімкнений послідовно з варистором або супресором відносно напруги МП. В той же час на промисловій частоті електромережі дросель L практично закорочує резистор R і напруга мережі електроживлення без втрат поступає на вхід споживача.

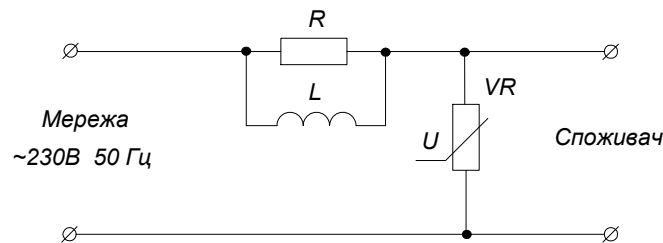


Рис. 1

На рис. 2 наведено типову напругу МП з амплітудою $U_m = 2$ кВ, тривалістю фронту $\tau_f = 1$ мкс і тривалістю імпульсу $\tau_{imp} = 50$ мкс, яка діє на фоні електромережної напруги 230 В, 50 Гц. На рис. 3 показано імпульси МП у збільшеному масштабі по шкалі часу: крива 1 – напруга на виході генератора МП; крива 2 – напруга на електромережному вході апаратури, зашунтованому варистором, коли $R_{it} = 2$ Ом; крива 3 – залишкова напруга МП на виході Г-подібної схеми на рис. 1.

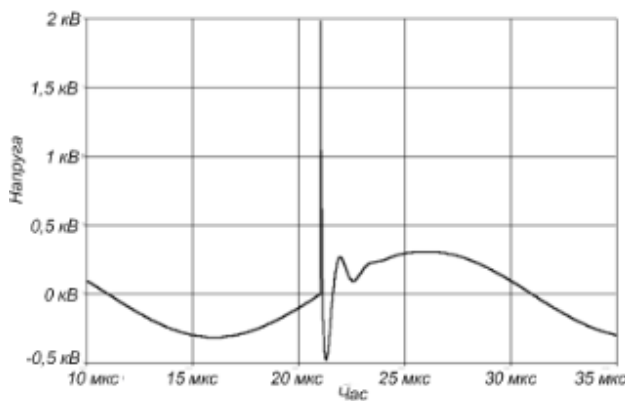


Рис. 2

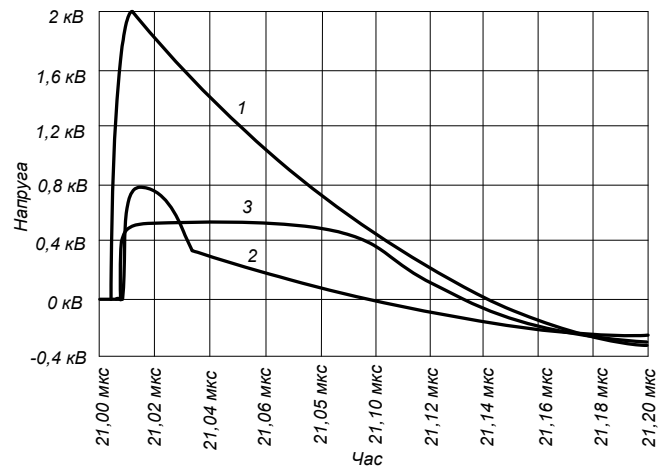


Рис. 3

Графіки на рис. 2 і 3 одержано за допомогою пакета програм PSPICE моделювання електронних пристроїв [8].

Як двополюсник з різко нелінійною ВАХ було використано розроблену авторами PSPICE модель варистора типу 20D361K. ВАХ макромоделі згаданого вище варистора зображено на рис. 4 суцільною лінією. На тому ж рисунку пунктирною лінією показано ВАХ реального варистора 20D361K, яку побудовано згідно з даними виробника варисторів цього типу.

З порівняння кривих на рис. 4 видно хороший збіг обох ВАХ у практично значимому діапазоні струмів через варистор від 1 мА до 1 кА.

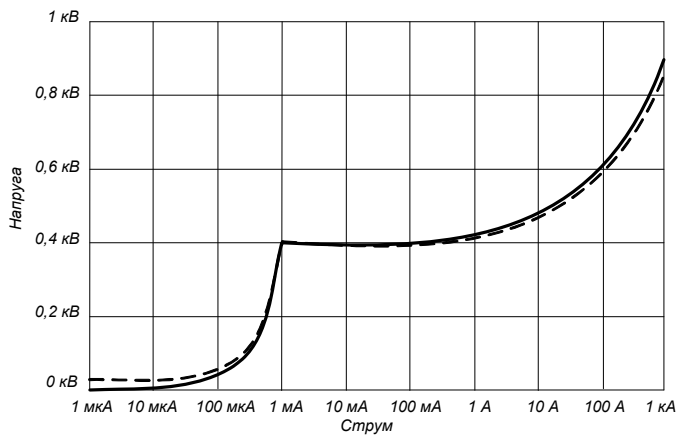


Рис. 4

варистор не перевищує 60 А, що значно менше гранично допустимого імпульсного струму через варистор.

Проведені дослідження також показали, що для подальшого зменшення залишкової амплітуди МПІ на електромережному вході апаратури перехід від однокаскадної схеми, зображеної на рис. 1, до дво- або навіть трикаскадної схеми виявляється мало ефективним, тому що нелінійність ВАХ (рис. 4) не дає можливості одержати напругу менше 400...450 В на виводах варистора або супресора навіть за відносно невеликих струмах через такий двополосник. У таких випадках можна досягти значно кращого результату, якщо доповнити схему на рис. 1 П-подібною ланкою фільтра нижніх частот (рис. 5), у якого частота зрізу має бути значно менша за частоти, що відповідає тривалості імпульсу МПІ.

На рис. 6 показано залишкову напругу МПІ на виході фільтра нижніх частот (ФНЧ) разом з напругою мережі електроживлення, коли амплітуда вхідної напруги МПІ складає 2 кВ, частота зрізу ФНЧ дорівнює 1 кГц ($C_{1\phi} = C_{2\phi} = 5$ мкФ, $L_{\phi} = 10$ мГ), а $R_{ir} = 2$ Ом.

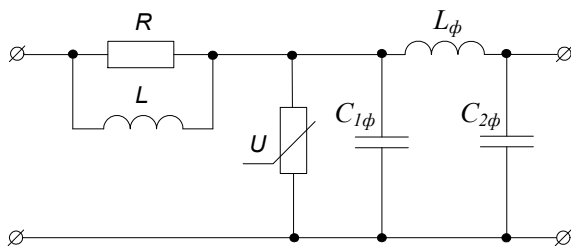


Рис. 5

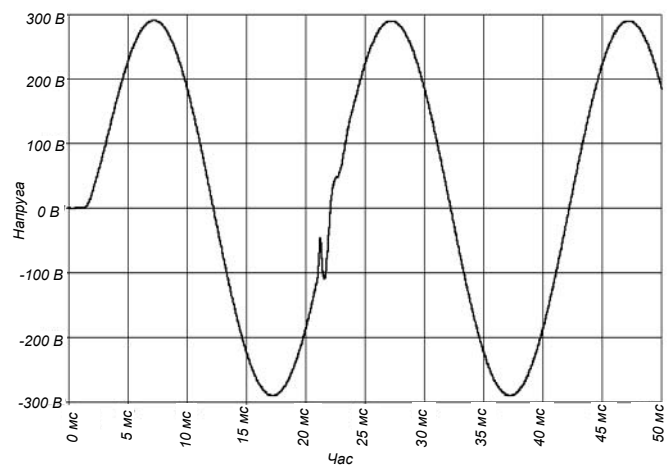


Рис. 6

З розгляду напруги на рис. 6 видно, що амплітуда залишкової напруги МПІ на електромережному вході апаратури складає приблизно 20 В. Така амплітуда МПІ у 40 разів менша, ніж у випадку застосування лише варистора чи супресора. За необхідності залишкову амплітуду МПІ можна додатково зменшити, якщо збільшити номінали L_{ϕ} і C_{ϕ} .

Таким чином, одержані результати показують, що можна суттєво підвищити ефективність захисту радіоелектронної та електротехнічної апаратури від високовольтичних короткочасних сплесків напруги в мережі електроживлення відносно простими схемотехнічними засобами.

Роботу виконано за держбюджетною теми «Розвиток теорії високочастотних транзисторних перетворювачів на основі резонансних інверторів для систем електроживлення технологічного обладнання (Частота-3)».

1. Рикетс Л.У., Бриджес Дж.Э., Майлетта Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты. М.: Атомиздат, 1979. 328 с.
2. Gurevich V. Electromagnetic Terrorism: New Hazards. *Electrical Engineering and Electromechanics*. 2005. No 4. Pp. 81-83.
3. Электромагнітна сумісність. Частина 4-5. Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливість до сплесків напруги та струму (EN 61000-4-5:2014/A1:2017, IDT; IEC 61000-4-5:2014/A1:2017, IDT). ДСТУ EN 61000-4-5:2019. Київ: ДП УкрНДНЦ, 2020.
4. Ott H.W. *Electromagnetic Compatibility Engineering*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009. 843 p.
5. Ozenbauch R.L., Pullen T.M. *EMI Filter Design*. CRC Press, 2001. 348 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203910313>.
6. Tihanyi L. *Electromagnetic Compatibility in Power Electronics*. IEEE Press, 1995. 403 p.
7. Kularatna N., Ross A.S., Fernando J., James S. *Design of Transient Protection Systems*. Elsevier Inc., 2018. 282 p.
8. Разевиг В.Д. Система сквозного проектирования электронных устройств Design Lab 8.0. М.: Солон, 1999. 698 с.

INCREASING OF ELECTRICAL AND RADIOELECTRONIC EQUIPMENT'S IMMUNITY AGAINST HIGH VOLTAGE SHORT-DURATION PULSE DISTURBANCES IN THE MAINS

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

A problem of electrical and radioelectronic equipment's high energy pulse disturbance immunity is considered in the paper, in particular against microsecond high voltage disturbances (MHVD) in the power mains. It is showed causes of MHVD with amplitude up to 4 kV and even higher. A review of various protection methods against MHVD is carried out and it is shown that the use of a two-terminal network (TTN) with a significantly nonlinear current-voltage characteristic: varistors, suppressors and gas arrestors is the most effective. The report analyzes the operation principle of these two-poles and shows that the typical inclusion of such a device directly at the equipment's input is not effective enough for cases where the high-frequency impedance of the mains is low. An L-circuit for connecting the TTN together with an LR link is proposed, and results of computer simulation with the aid of PSPICE showed that such a scheme reduces the MHVD amplitude on the network input of the equipment by 1.5 times comparing with the typical inclusion of such a device even under a low impedance of the mains Adding the low-pass filter to the L-circuit allows to reduce the MHVD amplitude by 40 and more times comparing with the typical inclusion of the TTN. References 8, figures 6.

Key words: electromagnetic compatibility, pulse disturbance, varistors, suppressors.

1. Ricketts L.W., Bridges J.E., Myletta J. *Electromagnetic pulse and protection methods*. Moskva: Atomizdat, 1979. 328 p. (Rus)
2. Gurevich V. *Electromagnetic Terrorism: New Hazards. Electrical Engineering and Electromechanics*. 2005. No 4. Pp. 81-83.
3. *Electromagnetic compatibility. Part 4 - 5. Test and measurement methods. Tests for immunity to surges of voltage and current (EN 61000-4-5:2014/A1:2017, IDT; IEC 61000-4-5:2014/A1:2017, IDT). State Standart of Ukraine EN 61000 – 4 – 5: 2019. Kyiv: DP UkrNDNTs, 2020. (Ukr)*
4. Ott H.W. *Electromagnetic Compatibility Engineering*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2009. 843 p.
5. Ozenbauch R.L., Pullen T.M. *EMI Filter Design*. CRC Press, 2001. 348 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203910313>.
6. Tihanyi L. *Electromagnetic Compatibility in Power Electronics*. IEEE Press, 1995. 403 p.
7. Kularatna N., Ross A.S., Fernando J., James S. *Design of Transient Protection Systems*. Elsevier Inc., 2018. 282 p.
8. Razevig V.D. *System of end-to-end design of electronic devices Design Lab 8.0*. Moskva: Solon, 1999. 698 p. (Rus)

Надійшла 12.05.2022
Остаточний варіант 22.06.2022