



Sebastian HAJDER¹

IDENTYFIKACJA I OGRANICZANIE PRZEPIĘĆ W CZASIE PRACY GENERATORA MARXA W OBWODACH ZASILAJĄCYCH UKŁADY POMIAROWE

W artykule przedstawiono charakterystykę przepięć i badań wytrzymałości udarowej urządzeń, jak również omówiono środki ochrony przeciwprzebiegowej. Przeprowadzono analizę wykonanych pomiarów przepięć występujących w laboratorium wysokich napięć Politechniki Rzeszowskiej powodujących częste uszkodzenia sprzętu pomiarowego podczas pracy generatora Marxa. Dokonano identyfikacji charakteru przepięć oraz zaproponowano metody ich ograniczenia z wykorzystaniem warystorowych ograniczników przepięć oraz diod lawinowych typu transil. Do pomiarów wykorzystano oscyloskop cyfrowy o dużej rozdzielczości oraz wysokonapięciowe sondy różnicowe.

Słowa kluczowe: generator Marxa, obwody pomiarowe, przebiegi, ograniczanie przepięć

1. Wprowadzenie

W laboratorium wysokich napięć Politechniki Rzeszowskiej prowadzone są zajęcia dydaktyczne z przedmiotu Technika Wysokich Napięć, na których studenci w ramach ćwiczeń wykonują próby z użyciem generatora Marxa. Generator

¹ Autor do korespondencji: Sebastian Hajder, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, e-mail: s.hajder@prz.edu.pl

zasilany jest na stałe z jednej fazy instalacji elektrycznej budynku przez auto-transformator i transformator probierczy. Podczas pomiarów 50-procentowego napięcia przeskoku obwody wejściowe, bądź też elementy obwodów zasilających elektronicznych multimetrów wykorzystywanych na innych stanowiskach pomiarowych ulegały uszkodzeniom, które eliminowały je z dalszej eksploatacji. Najczęstsze uszkodzenia występowały w miernikach zasilanych z tej samej fazy co generator. Uszkodzenia postawały w skutek przebiegów w czasie pracy generatora Marxa. Celem eliminacji tego zjawiska należało poznać jego charakter oraz zastosować odpowiednie urządzenia SPD. Proces identyfikacji przebiegów oraz doboru zabezpieczenia opisano w niniejszym artykule.

2. Przebiegia

Przebiegie to zwiększenie wartości napięcia w urządzeniu elektrycznym powyżej najwyższej dopuszczalnej wartości roboczej. Współczynnik przebiegów (1) wyraża stosunek wartości maksymalnej przebiegów do najwyższego napięcia roboczego i jest on miarą wartości przebiegów [1].

$$k_p' = \frac{U_{pm}}{U_{rm}'} \quad (1)$$

gdzie: k_p' – współczynnik przebiegów [-];

U_{rm}' – najwyższe napięcie robocze urządzenia [V];

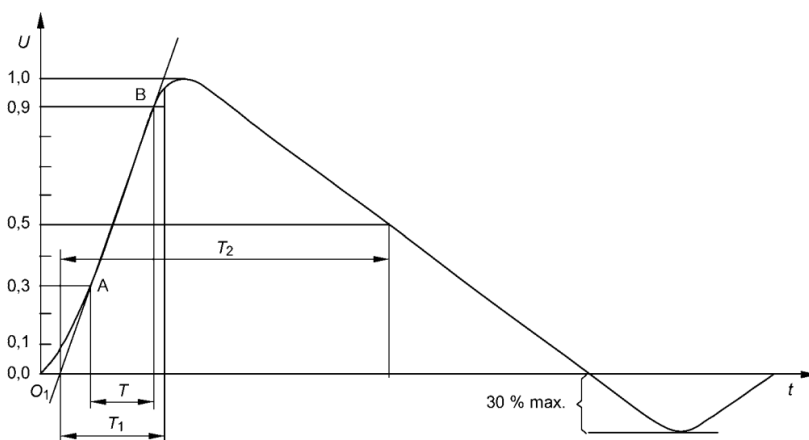
U_{pm} – wartość maksymalna przebiegów [V].

Przebiegia w sieciach i instalacjach dzieli się na dwie grupy: wewnętrzne i zewnętrzne. Przebiegia wewnętrzne powstają wskutek czynności łączeniowych, zwarć, nagłych zmian obciążenia i ferrozonansów. Przebiegia zewnętrzne powodowane są głównie przez wyładowania atmosferyczne. Charakteryzują się one dużymi wartościami szczytowymi prądów udarowych oraz krótkimi czasami trwania. Wartości maksymalne przebiegów w tym przypadku mogą przekraczać dziesiątki, a niekiedy nawet setki wielokrotności napięć znamionowych. Przebiegi czasowe w obydwu przypadkach są zazwyczaj nieregularne (za wyjątkiem przebiegów dynamicznych), a ich czasy trwania losowe, niemniej zawierające się w przedziałach typowych dla danych przebiegów.

Zarówno przebiegia wewnętrzne jak i zewnętrzne mogą być groźne dla wszelkiego rodzaju sprzętu użytkowego. Urządzenia z dużą ilością układów elektronicznych są szczególnie narażone na uszkodzenia nawet w przypadku krótkotrwałych udarów niosących niewielką energię, nie tyle z powodu uszkodzenia izolacji co struktury wewnętrznej wrażliwych układów elektronicznych.

2.1. Udary i ich wytwarzanie na potrzeby probiercze

Na potrzeby probiercze znormalizowano kształty przebiegów i określono czasy trwania dla określonych grup przepięć. Norma [2] dotycząca kompatybilności elektromagnetycznej określa w swoich częściach wymagania dla odporności sprzętu, metody probiercze oraz zakresy poziomów probierczych. Do wytwarzania takich przebiegów stosuje się generatory przebiegów złożonych działające na zasadzie rozładowania pojemności przez układy formujące. Generator przebiegu złożonego wytwarza udar napięciowy o kształcie 1,2/50 μs dla obwodu otwartego (rozwarne wyjście generatora) oraz prąd zwarciovowy o kształcie 8/20 μs . W przypadku konieczności uzyskania wysokich poziomów napięć stosuje się powielacze bądź generatory Marxa. Z uwagi na zastosowany w laboratorium generator udarów napięciowych piorunowych, spełniający jedynie warunki dla obwodu rozwartego skupiono się jedynie na części napięciowej udaru. Na rysunku 1. pokazano udar napięciowy określony przez normę[2].



Czas trwania czola: $T_1 = 1,67 \times T = 1,2 \mu\text{s} \pm 30 \%$
 Czas do półszczytu: $T_2 = 50 \mu\text{s} \pm 20 \%$

Rys. 1. Kształt udaru 1,2/50 μs stosowanego do badań wytrzymałości udarowej urządzeń wg PN-EN-61000-4-5:2010 [2]

Fig. 1. The shape of the 1,2/50 μs surge used for the surge withstand tests according to PN-EN-61000-4-5:2010 [2]

Podczas badania wytrzymałości udarowej EUT(ang. *Equipment Under Test* – urządzenie poddawane badaniu) jest zasilane napięciem znamionowym i dodatkowo do wejścia zasilania doprowadzane są napięcia lub prądy udarowe. Jeśli

urządzenie posiada wejścia/wyjścia sygnałowe, które mają być poddane testom, również należy do nich doprowadzić sygnały występujące podczas normalnej pracy. W związku z powyższym należy zastosować obwód sprzęgający generator przebiegu złożonego z EUT umożliwiający przekazanie energii z generatora do badanego urządzenia oraz układ odsprzęgający EUT i generatora podczas pracy z siecią zasilającą bądź urządzeniami dodatkowymi (np. generującymi sygnały podawane na wejścia sygnałowe EUT) [2][3]. Norma [2] zaleca rozwiązania urządzeń odsprzęgających jedynie dla układów, w których występują galwaniczne połączenia EUT z siecią. W rozpatrywanym tutaj przypadku, czyli badaniu wytrzymałości elektrycznej powietrza, nie jest możliwe ich zastosowanie.

2.2. Poziomy wytrzymałości udarowej urządzeń

Wymagane poziomy wytrzymałości udarowej przyłączy zasilania oraz wejść sygnałowych urządzeń elektrycznych są ściśle określone. W publikacji [3] sporządzono zestawienie poziomów według odpowiednich dla danego środowiska norm oraz z podziałem na grupy urządzeń w formie tabel. W tabeli 1. i 2. przedstawiono wybrane części tych zestawień.

Tabela 1. Poziomy odporności udarowej przyłączy wejściowych/wyjściowych zasilania urządzeń elektrycznych i elektronicznych przeznaczonych do użytku w środowisku mieszkalnym i lekko przemysłowym oraz przemysłowym [3]

Table 1. Impact resistance levels for power input/output connections for electrical and electronic equipment intended for use in residential and light industrial and industrial environments [3]

Środowisko i rodzaj zakłócenia	Mieszkalne i lekko przemysłowe	Środowisko przemysłowe	Jednostki
Wejściowe i wyjściowe przyłącza zasilania prądem zmiennym			
Serie szybkich elektrycznych zakłóceń	0,5 5/50 5	2 5/50 5	kV (wartość szczytowa) T ₁ /T ₂ ns (kształt impulsu) kHz (częstotliwość powtarzania)
Udary	1,2/50 (8/20)	1,2/50 (8/20)	T ₁ /T ₂ μs (kształt impulsu)
Przewód – ziemia	2	2	kV (wartość szczytowa)
Przewód – przewód	1	1	kV (wartość szczytowa)

W związku z powyższym zestawieniem tabelarycznym, obwody w laboratorium z uwagi na stosowanie w nim sprzętu pomiarowego powinny być tak zabezpieczone aby wartości przepięć nie przekraczały 1 kV wartości szczytowej między przewodem fazowym a ochronnym, neutralnym a ochronnym, oraz 500 V między przewodem fazowym a neutralnym. To warunki minimalne mając oczywiście na uwadze, iż sprzęt jest atestowany i spełnia wymogi wyżej wymienionych norm.

Tabela 2. Wymagane poziomy wytrzymałości udarowej przyłączy wejściowych zasilania urządzeń prądem przemiennym [3]

Table 2. Required levels of surge withstand for input connections of AC equipment power supply [3]

Badane urządzenia	Udary 1,2/50-8/20	Udary 5/50
Urządzenia powszechnego użytku, narzędzia elektryczne, podobne urządzenia elektryczne (PN-EN 55014-2)	2000 V (przewód fazowy – przewód ochronny, przewód neutralny – przewód ochronny)	1000 V
Urządzenia informatyczne (PN-EN 55024)	1000 V (przewód fazowy – przewód neutralny)	1000 V
Sprzęt pomiarowy, sterujący i laboratoryjny (PN-EN 61010-1)	1000 V (przewód fazowy – przewód ochronny, przewód neutralny – przewód ochronny) 500 V (przewód fazowy – przewód neutralny)	1000 V

3. Środki ochrony przeciwprzepięciowej

Chcąc ograniczyć destrukcyjne działanie przepięć stosuje się w instalacjach elektrycznych odpowiednie urządzenia lub zespoły urządzeń nazywane dalej ogranicznikami przepięć (SPD – ang. *Surge Protective Devices*).

3.1. Wymagania ochrony instalacji elektrycznych oraz sygnałowych

Instalacje wykonywane zgodnie obowiązującymi normami powinny spełniać wymagania dotyczące koordynacji izolacji [4]. Według norm [5] i [6] poszczególne części instalacji elektrycznej podzielono na 4 kategorie oraz określono wytrzymałość udarową ich izolacji i zainstalowanych tam urządzeń. Podział na kategorie przepięć oraz wymagane napięcia wytrzymywane przedstawia się następująco:

- kategoria IV – obejmuje część instalacji przy złączu, urządzenia tam instalowane powinny być dobierane tak, aby ich udarowe napięcia wytrzymywane były wyższe niż 6 kV, należy uwzględnić tu możliwość bezpośredniego oddziaływania przepięć atmosferycznych i łączeniowych;
- kategoria III – obejmuje urządzenia rozdzielcze i obwody odbiorcze, ich udarowe napięcia wytrzymywane określone nie powinny być niższe niż 4 kV;
- kategoria II – obejmuje odbiorniki, których udarowe napięcia wytrzymywane nie powinny być niższe niż 2,5 kV;

- kategoria I – obejmuje odbiorniki chronione specjalnie montowane w zamkniętych częściach instalacji chronionych specjalnie dobraćymi urządzeniami ochronnymi, w tym przypadku udarowe napięcia wytrzymywane nie powinny być niższe niż 1,5 kV.

Aby zapewnić odpowiednie poziomy napięć dla wymienionych wyżej części instalacji należy instalować SPD o różnych parametrach i właściwościach. Norma [7] dzieli ograniczniki przepięć na trzy następujące klasy zapewniające ochronę odpowiednią dla danej kategorii przepięć:

- klasa I – SPD zapewniające ochronę w IV kategorii przepięciowej, chroniące przed bezpośrednim oddziaływaniem części prądu piorunowego, przepięciami atmosferycznymi, przepięciami łączeniowymi; instalowane w złączu lub rozdzielnicy głównej budynku; zazwyczaj konstruowane są jako iskierniki;
- klasa II – SPD zapewniające ochronę w III kategorii przepięciowej, chroniące przed przepięciami atmosferycznymi indukowanymi, przepięciami łączeniowymi; instalowane w złączu lub rozdzielnicy głównej budynku jeśli nie stosuje się ochronników klasy I (np. zasilanie z sieci kablowej); konstrukcja opiera się o zastosowanie warystorów [8];
- klasa III – SPD zapewniające ochronę w II kategorii przepięciowej, jest to tzw. ochrona precyzyjna; konstruowane jako ograniczniki kombinowane (warystory i iskierniki, rzadziej diody lawinowe).

W przypadku budowy wielostopniowej instalacji przeciwprzepięciowej należy pamiętać o odpowiedniej koordynacji urządzeń SPD. Instalowanie SPD różnych klas powinno się przeprowadzić w taki sposób, była zachowana selektywność ich działania. W przeciwnym wypadku może dojść do sytuacji, w której zostanie przekroczona dopuszczalna energia udaru dla danego urządzenia.

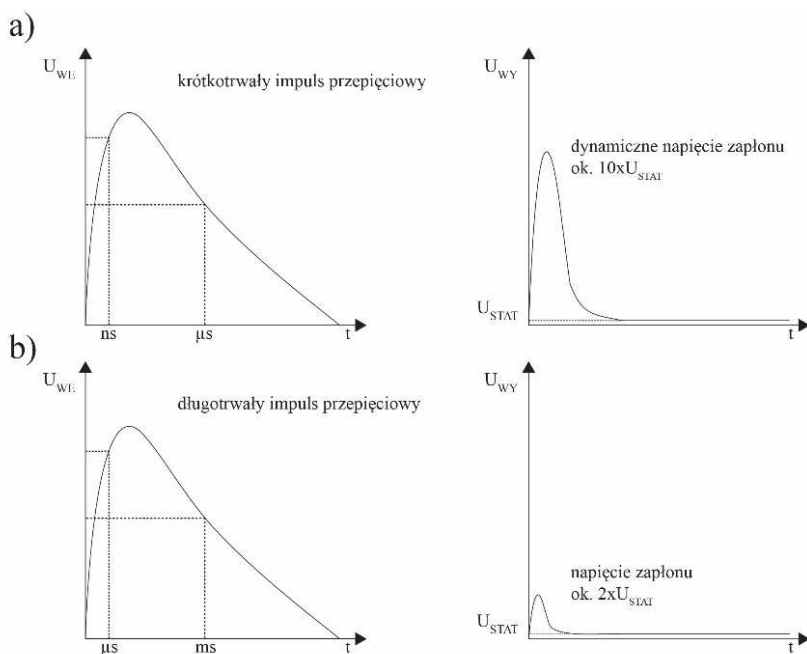
Obwody sygnałowe powinny także posiadać ochronę przeciwprzepięciową. Odpowiednie normy określają poziomy napięć dopuszczalnych dla sieci telekomunikacyjnych, antenowych itp. [9], natomiast w większości przypadków są to indywidualne zalecenia producentów danych urządzeń. Najczęściej urządzenia SPD są wyposażone w co najmniej jeden element nieliniowy i montowane bezpośrednio przed urządzeniem, bądź w jego wnętrzu.

3.2. Elementy i układy ochrony przed przepięciami

SPD będące w sprzedaży podzielone według wyżej wymienionych klas mają określone progi zadziałania, czasy zadziałania, możliwości absorpcji energii, wytrzymywane prądy udarowe oraz stałe obciążenie jakimi mogą być poddawane. Jak już wspomniano, każdy typ ogranicznika konstruowany jest w oparciu o różne elementy składowe. Niekiedy w przypadku ochrony obwodów sygnałowych stosuje się filtry, sęki ćwierćfalowe czy też szeroko rozumianą optoizolację.

3.2.1. Iskierniki

Iskierniki gazowe są podstawowym elementem konstrukcyjnym SPD. Spadek napięcia na iskierniku w momencie zapłonu sięga kilkadziesiąt woltów w zależności od konstrukcji, co wystarcza do zapewnienia odpowiedniej ochrony. Ponadto iskierniki charakteryzują się bardzo dużą obciążalnością co pozwala na wykorzystanie ich jako pierwszego elementu ochrony, na którym można rozproszyć dużą energię szkodliwego przepięcia, oraz niewielką pojemność, co pozwala stosować je praktycznie w każdym obwodzie, łącznie z sygnałowymi [10]. Wadami iskierników są przede wszystkim silna zależność napięcia zapłonu od stromości czoła impulsu przepięciowego, a co za tym idzie zmienność czasów zadziałania oraz możliwość niewyłączenia prądu następczego. Na rysunku 2. przedstawiono zależność napięcia zapłonu iskiernika od udaru przepięciowego.



gdzie:

U_{WE} - wejściowe napięcie udarowe

U_{WY} - napięcie na iskierniku podczas jego działania

U_{STAT} - napięcie statyczne zapłonu iskiernika

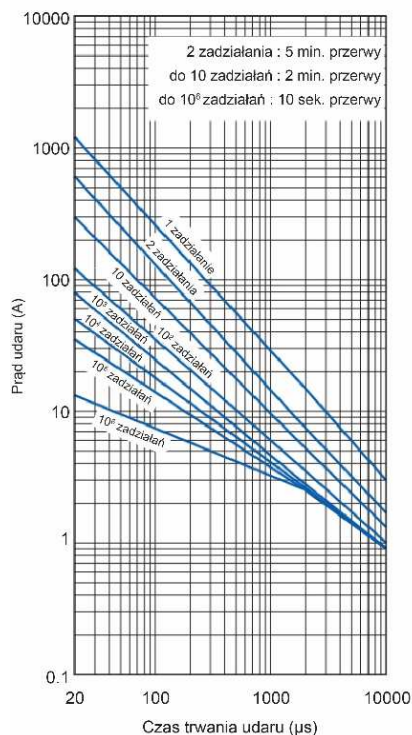
Rys. 2. Zależność napięcia zapłonu iskiernika od stromości impulsu przepięciowego dla: a) krótkotrwałych impulsów przepięciowych, b) udarów długotrwałych [3][10]

Fig. 2. Dependence of the ignitron spark gap voltage on the steepness of the surge pulse in case of: a) short term surge voltages, b) long term surge voltages [3][10]

W przypadku uderów szybkozmiennych, z dużymi stromościami du/dt dynamiczne napięcie zapłonu może sięgać nawet 10-krotnej wartości statycznego napięcia zapłonu [3][10]. Dużym problemem jest także wysokie napięcie zadziałania, zazwyczaj nie niższe niż 75 V (iskierniki telefoniczne), które dyskwalifikuje te SPD jako samodzielne środki ochrony dla obwodów sygnałowych lub niskonapięciowych urządzeń elektronicznych.

3.2.2. Warystory

Warystory czyli elementy o nieliniowej charakterystyce prądowo-napięciowej konstruowane są w oparciu o węgiel krzemu SiC lub tlenek cynku ZnO. Z uwagi na niski współczynnik nieliniowości charakterystyki prądowo-napięciowej i nietrwałość warystorów SiC nie stosuje się ich obecnie w konstrukcjach SPD. Warystory w przeciwieństwie do iskierników wykazują znacznie mniejszą zależność napięcia zadziałania od stromości zbocza uderu przepięciowego, charakteryzują się jednak kilkunasto-, a nawet kilkudziesięciokrotnie mniejszą obciążalnością i dużą pojemnością sięgającą niekiedy pojedynczych nanofaradów co dyskwalifikuje je jako elementy zabezpieczające niektórych obwodów sygnałowych. Czasy zadziałania są zazwyczaj krótsze niż 25 ns [3]. Dużą wadą warystorów jest ich starzenie się. Rysunek 3. przedstawia zdolność przewodzenia prądu



Rys. 3. Zależność wartości prądu uderowego przejmowanego przez warystor od długości trwania uderu oraz krotności zadziałania warystora, na podstawie noty katalogowej [11]

Fig. 3. Dependence of the possibility of a varistor to absorb surge current on the surge duration and on the number of times the varistor is tripped, based on catalog note [11]

udarowego grupy warystorów od ilości przyjętych udarów oraz długości ich trwania.

3.2.3. Diody lawinowe

Diody typu transil są wykorzystywane jako ostatni stopień ochrony przeciwprzepięciowej. Czasy zadziałania tego typu diod są zazwyczaj krótsze niż 10 ps [3], a napięcie zadziałania w przypadku krótkotrwałych udarów pomimo zależności od stromości narastania prądu di/dt zwykle nie przekracza wartości napięcia statycznego. Transile mają niewielkie możliwości pochłaniania energii, a wytrzymywane prądy udarowe nie przekraczają 1 kA. Wadą jest też znaczna pojemność pasożytnicza, uniemożliwiająca zastosowania w obwodach dużej częstotliwości. Uszkodzenie takich diod zawsze objawia się zwarcie, w związku z czym należy w szereg z nimi włączać bezpieczniki topikowe.

4. Instalacja elektryczna w laboratorium

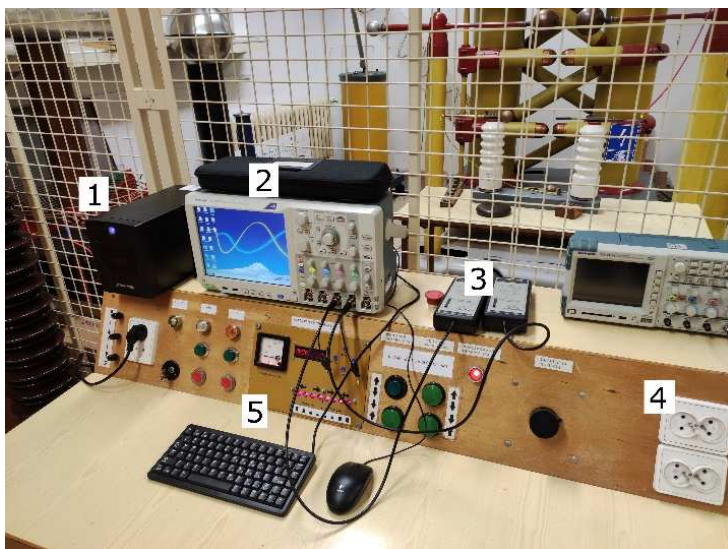
Instalacja w rozpatrywanym budynku to instalacja TN-S. Zabezpieczenie nadprądowe w rozdzielnicy głównej budynku stanowią bezpieczniki topikowe, natomiast obwód zasilający laboratorium chroniony jest zabezpieczeniem nadprądowym C50, nie ma zainstalowanych SPD klasy I. Budynek zasilany jest poprzez linię kablową z transformatora znajdującego się na terenie Wydziału. W związku z zasilaniem linią kablową norma [7] przewiduje możliwość pominięcia ograniczników klasy I i montaż urządzeń klasy II bezpośrednio w rozdzielnicach rozgałęźnych.

W laboratorium znajduje się 4 stanowiska probierczo-pomiarowe, każde z nich posiada zasilanie 3-fazowe zabezpieczone 3-fazowym wyłącznikiem różnicowoprądowym. W związku z tym, że na każdym stanowisku znajduje się transformator probierczy jednofazowy, zasilanie rozprowadzone jest w taki sposób aby zachować równomierne obciążenie sieci i każdy z nich zasilany jest z innej fazy. Transformator probierczy na pierwszym stanowisku i układ zasilania generatora Marxa na stanowisku czwartym podłączone są do tej samej fazy, gdyż podczas ćwiczeń nie ma konieczności wykorzystywania obydwu stanowisk w tym samym czasie. Na pulpitych sterowniczych zamontowane są gniazda 230 V do zasilania dodatkowych urządzeń pomiarowych takich jak oscyloskopy, miernik WNZ, multimetry itp. Zasilane są one z różnych faz dla równomiernego obciążenia sieci. Rozdział obwodów gniazdowych do pulpitych ma miejsce w rozdzielnicy laboratorium, przewód PE każdego z nich jest podłączony do szyny ochronnej w rozdzielnicy. W laboratorium zamontowana jest szyna wyrównawcza przekroju 120 mm², doprowadzona do każdego stanowiska probierczego. Szyna wyprowadzona jest przez ścianę budynku na zewnątrz i połączona z dodatkowym uziemem przed budynkiem. Zgodnie z obowiązującymi normami

szyna połączona jest z szyną ochronną w rozdzielniczy laboratorium przewodem 16 mm².

5. Pomiary przepięć podczas pracy Generатора Marxa

Pomiary przepięć w obwodach laboratorium podczas pracy generatora wykonano wykorzystując oscyloskop Tektronix DPO5204. W celu zabezpieczenia oscyloskopu przed przepięciami zasilono go z UPS, a rejestracji dokonano przy użyciu wysokonapięciowych izolowanych do 3 kV sond różnicowych Testec. Rysunek 4. przedstawia stanowisko pomiarowe. Zarejestrowano przebiegi napięć w gniazdach 230 V zamontowanych w pulpitych wszystkich stanowisk. Mierzono napięcia między przewodem fazowym a neutralnym, przewodem fazowym a ochronnym oraz przewodem neutralnym a ochronnym. Próby wykonywano w stabilnych warunkach, to znaczy jednego dnia, ze stałymi nastawami generatora, a badany obwód nie był obciążony. Z uwagi na losowość wystąpienia przepięć podczas pracy generatora (nie synchronizowany w żaden sposób z siecią) z zarejestrowanych przebiegów wybrano te, w których przepięcia wystąpiły w szczycie sinusoidy lub w jego pobliżu.

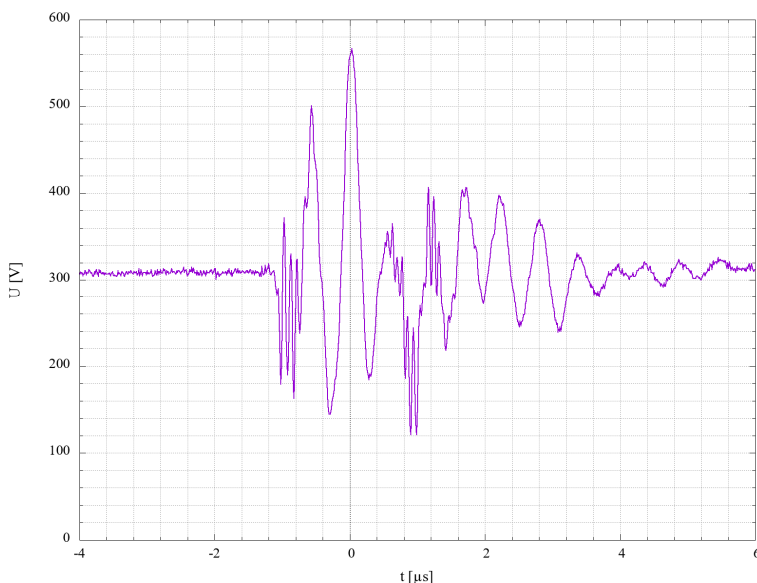


Rys. 4. Fotografia stanowiska pomiarowego: 1 – zasilacz UPS, 2 – oscyloskop, 3 – sondy różnicowe, 4 – gniazda 230 V, w których przeprowadzano pomiary (podłączenie sond wewnątrz pulpitu), 5 – panel sterowania generatorem Marxa

Fig. 4. Photo of measuring setup: 1 – UPS, 2 – oscilloscope, 3 – differential probes, 4 – 230 V sockets where the measurements was taken (probes connected inside control panel) 5 – Marx generator control panel

5.1. Identyfikacja przepięć w obwodach laboratorium

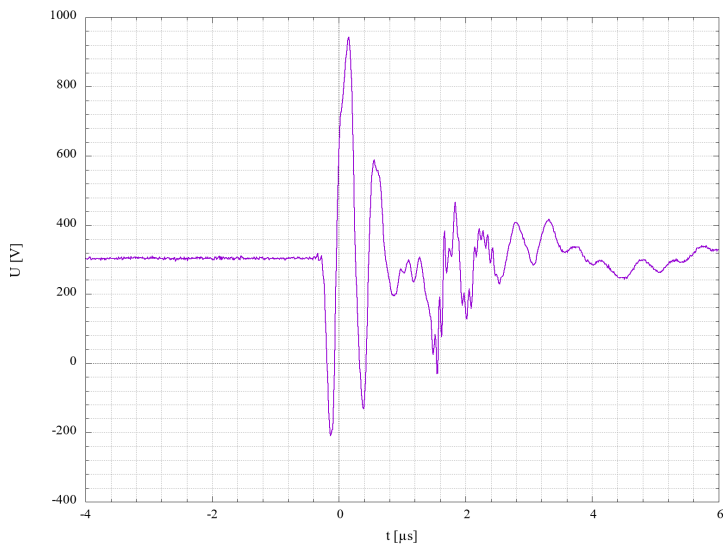
Rysunek 5. przedstawia przebieg napięcia między przewodem fazowym a neutralnym podczas pracy generatora. Wartość szczytowa dodatnia przepięcia jest mniejsza niż 600 V, co przy czasie trwania przepięcia mniejszym niż 5 μs nie powinno stanowić zagrożenia dla sprzętu podłączonego do tego obwodu. Podczas pomiarów w innych obwodach zasilanych z innych faz niż generator przepięcia miały mniejszą wartość, bądź w ogóle nie występowały. Przepięcia tego typu nazywane różnicowymi (ang. *differential mode*) nie są szczególnie groźne i można je ograniczyć stosując proste filtry przeciwzakłóceniami. W praktyce po podłączeniu do tego obwodu urządzenia z filtrem sieciowym wyposażonym w dławik skompensowany prądowo zabudowany w filtr typu II przepięcia, będące powodem zakłócania pracy urządzeń, zostały całkowicie wyeliminowane.



Rys. 5. Przebieg napięcia między przewodem fazowym a neutralnym w obwodzie gniazda 230V zasilanym z tej samej fazy co generator

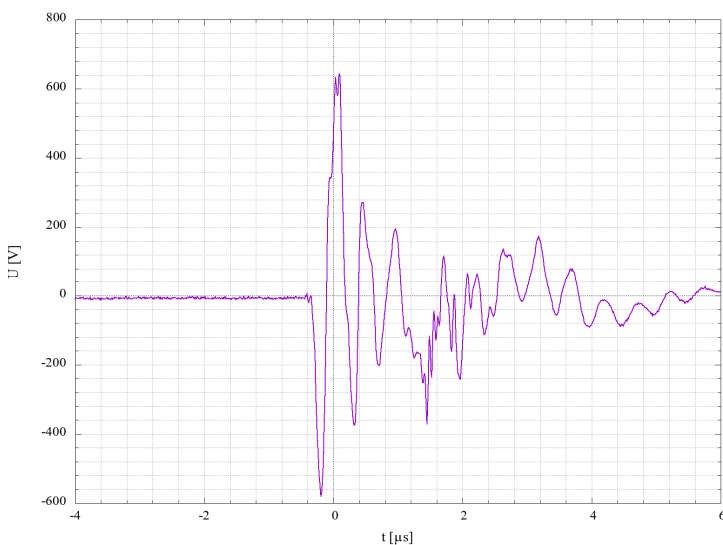
Fig. 5. Voltage waveform line wire to neutral wire in a 230 V socket circuit supplied from the same phase as the generator

Rysunki 6. i 7. przedstawiają zarejestrowane przebiegi między przewodami fazowym i neutralnym a przewodem ochronnym w obwodach gniazd zasilanych z tej samej fazy co generator. Wartości szczytowe przepięć sięgają prawie 1 kV w przypadku pomiaru między przewodem fazowym a ochronnym i ponad 600 V



Rys. 6. Przebieg napięcia między przewodem fazowym a ochronnym w obwodzie zasilającym gniazdo 230V zasilanym z tej samej fazy co generator

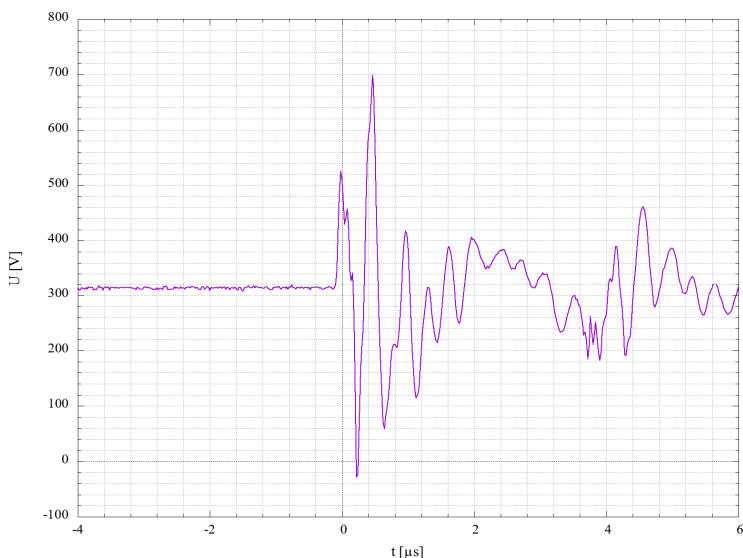
Fig. 6. Voltage waveform line wire to ground in a 230 V socket circuit supplied from the same phase as the generator



Rys. 7. Przebieg napięcia pomiędzy przewodem neutralnym a ochronnym w obwodzie zasilającym gniazdo 230V zasilanym z tej samej fazy co generator

Fig. 7. Voltage waveform neutral wire to ground in a 230 V socket circuit supplied from the same phase as the generator

w przypadku pomiaru między przewodem neutralnym a ochronnym. Jeśli odjąć wartość skuteczną napięcia fazowego przebiegi wydają się być bardzo podobne w obu przypadkach. Zakłócenia takie, zwane wspólnymi (ang. *common mode*) mogą być groźne dla urządzeń elektronicznych. Zamontowane w laboratorium SPD klasy II z uwagi na wartość przepięcia poniżej 4 kV nie zareagują, a co za tym idzie, wszystkie urządzenia zasilane z obwodu narażonego przyjmą całą energię przepięcia na siebie. Wysokiej klasy urządzenia pomiarowe powinny być fabrycznie wyposażone w odpowiednie filtry przeciwzakłóceń i urządzenia przeciwpięciowe. Jak pokazuje doświadczenie nie wszystkie takie filtry posiadają, lub ich konstrukcja nie pozwala wyłumić przepięć występujących w laboratorium. W obwodach zasilanych z pozostałych faz podczas pomiarów w takich konfiguracjach również zarejestrowano podobne przepięcia, jednakże ich wartość była mniejsza. Rysunek 8. przedstawia przebieg napięcia pomiędzy przewodem fazowym, z którego nie jest zasilany generator, a ochronnym. Widać wyraźnie przepięcie ma niższą wartość nadal jednak przekraczającą dwukrotność wartości napięcia znamionowego urządzeń.

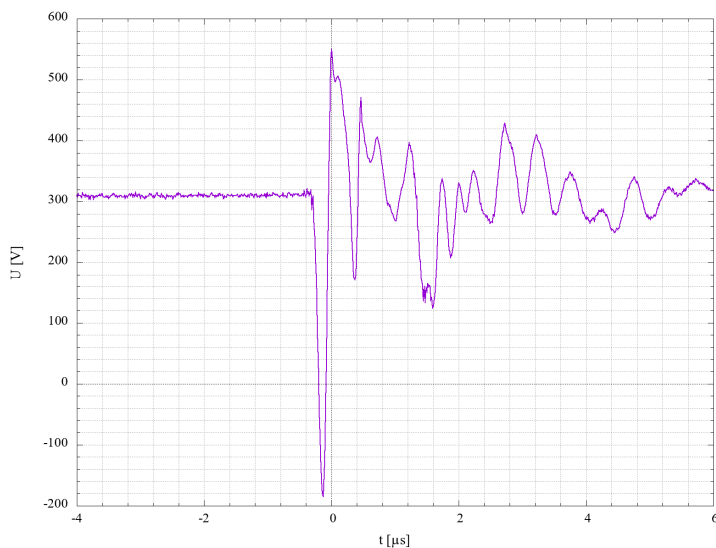


Rys. 8. Przebieg napięcia między przewodem fazowym a ochronnym w obwodzie zasilającym gniazdo 230V zasilanym z innej fazy niż generator

Fig. 8. Voltage waveform line wire to ground in a 230 V socket circuit supplied from the different phase than the generator

5.2. Ograniczenie przepięć w obwodach laboratorium

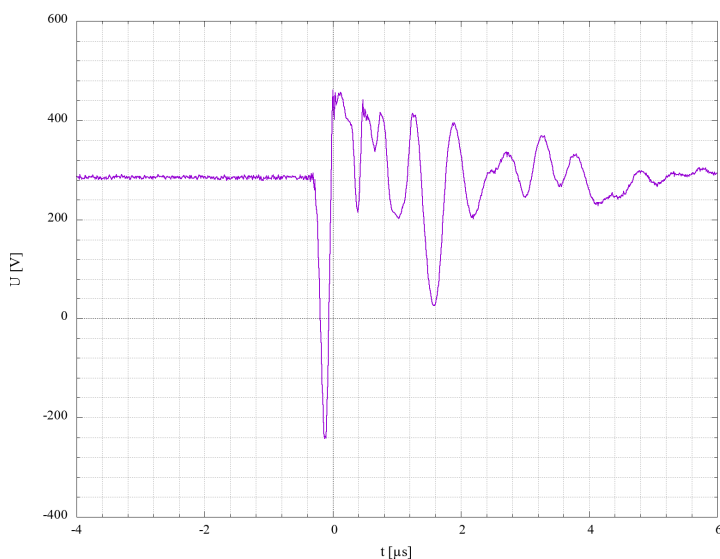
Z uwagi na to, że przepięcia powstają wewnątrz sieci za rozdzielnicą oraz ich wartości są niższe niż dopuszczalne dla klasy II ograniczników przepięć zainstalowanych w obwodzie zasilającym laboratorium, zdecydowano się zainstalować dodatkowo w gniazdach ochronniki oparte o technologię warystorową oraz diodę transil. Pomiędzy zainstalowanym w rozdzielniczy blokiem ograniczników, a gniazdami długość przewodów wynosi więcej niż 10 m w związku z czym po zamontowaniu w gniazdach dodatkowych SPD selektywność ich zadziałania w przypadku np. zewnętrznego przepięcia atmosferycznego będzie zachowana. Rysunek 9. przedstawia ograniczenie wartości przepięcia przy użyciu warystora ERZE10A361 firmy Panasonic. Zgodnie z notą [11] jego napięcie ograniczane powinno maksymalnie sięgać 595 V, jak widać na zarejestrowanym przebiegu jest ono nieco niższe, co świadczy o zgodności rzeczywistych parametrów z deklarowanymi. Na rysunku 10. przedstawiono przebieg napięcia przy zastosowaniu diody transil 1.5KE300A produkcji LITTELFUSE o napięciu zadziałania 414 V [12].



Rys. 9. Przebieg napięcia pomiędzy przewodem fazowym a ochronnym w obwodzie zasilającym gniazdo 230V zasilanym z tej samej fazy co generator, przy zastosowaniu warystora

Fig. 9. Voltage waveform line wire to ground in a 230 V socket circuit supplied from the same phase as the generator when waristor applied

Z zarejestrowanych przebiegów wynika, że zastosowana dodatkowa ochrona urządzeń pomiarowych w laboratorium wysokich napięć okazała się skuteczna. W dalszym ciągu trwają badania związane z identyfikacją przepięć w innych częściach instalacji wewnętrznej narażonej na zaburzenia elektromagnetyczne wywołane pracą generatorów impulsowych.



Rys. 10. Przebieg napięcia pomiędzy przewodem fazowym a ochronnym w obwodzie zasilającym gniazdo 230V zasilanym z tej samej fazy co generator, przy zastosowaniu diody transil

Fig. 10. Voltage waveform line wire to ground in a 230 V socket circuit supplied from the same phase as the generator, when TVS applied

6. Podsumowanie

Przebiecia w instalacji elektrycznej są groźne bez względu na to czy powstają w skutek oddziaływań piorunowych, czynności łączeniowych czy oddziaływań urządzeń zainstalowanych wewnątrz instalacji. W przypadku przedstawionym w artykule zagrożenie powoduje pracujący generator Marxa. Mimo zastosowania ograniczników przepięć zgodnie z obowiązującymi normami i przepisami konieczne okazało się zainstalowanie dodatkowych urządzeń SPD. Oprócz przepięć występujących w fazie zasilającej generator, zakłócenia pojawiają się także w dwóch pozostałych fazach na skutek sprzężeń między przewodami instalacji. Konieczne jest więc zastosowanie dodatkowej ochrony we wszystkich fazach. Zainstalowane SPD w postaci diod transil zabezpieczonych bezpiecznikami topikowymi spełniają swoje zadanie w obwodach dodatkowych gniazd 230 V.

Można wyposażyć je dodatkowo w filtr typu π i umieścić w pierwszym stopniu warystor, oraz dodatkowo zainstalować dławik sprzężony prądowo celem eliminacji zakłóceń różnicowych. W dalszych planowanych badaniach przeprowadzone zostaną dodatkowe pomiary w innych częściach instalacji budynku celem sprawdzenia czy przebiegi generowane w laboratorium nie zagrażają innym użytkownikom sieci, mając na uwadze występowanie przepięć w innych fazach niż zasilająca generator. Należy przeprowadzić badania czy podczas pracy generatora nie są narażone także obwody wejściowe multimetrów, do których podłączone są dzielniki wysokonapięciowe w laboratorium. Z uwagi na to, że dzielnik jest zawsze uziemiany do szyny wyrównawczej, mimo iż prąd wyładowania z generatora jest niewielki, może na tyle zmienić potencjał odniesienia, że uszkodzą się wrażliwe niskonapięciowe obwody mierników (wysokiej klasy sprzęt pomiarowy jest zazwyczaj wyposażony w diody ochronne ograniczające napięcia wejściowe).

Literatura

- [1] Flisowski Z.: Technika Wysokich Napięć. WNT, Warszawa 2015.
- [2] PN-EN-61000-4-5:2010 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-5: Metody badań i pomiarów – Badanie odporności na udary.
- [3] Markowska R., Sowa A.W.: Ograniczanie przepięć w instalacjach elektrycznych w obiektach budowlanych. Dom Wydawniczy MEDIUM, Warszawa 2011.
- [4] Markiewicz H.: Instalacje elektryczne. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2011.
- [5] PN-EN 60664-1:2011 Koordynacja izolacji urządzeń elektrycznych w układach niskiego napięcia – Część 1: Zasady, wymagania i badania.
- [6] PN-HD 60364-4-443:2016-03 Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część: 4-443: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa – Ochrona przed zaburzeniami napięciowymi i zaburzeniami elektromagnetycznymi – Ochrona przed przejściowymi przepięciami atmosferycznymi lub łączeniowymi.
- [7] PN-EN 61643-11:2013-06 Niskonapięciowe urządzenia ograniczające przepięcia - – Część 11: Urządzenia ograniczające przepięcia w sieciach elektroenergetycznych niskiego napięcia – Wymagania i metody badań.
- [8] Sowa A.W.: Ochrona urządzeń oraz systemów elektronicznych przed narażeniami piorunowymi. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2011.
- [9] PN-EN 60728-11:2017-09 Sieci kablowe służące do rozprowadzania sygnałów: telewizyjnych, radiofonicznych i usług interaktywnych – Część 11: Wymagania bezpieczeństwa.
- [10] Charoy A.: Zakłócenia w urządzeniach elektronicznych część 3, WNT, Warszawa 2000.
- [11] <https://www.tme.eu/Document/0f497508afc233a3430ef26cc8de3fb8/AWA0000-C18.pdf>; nota katalogowa warystora, dostęp: 09.09.2021

[12] https://www.tme.eu/Document/574f55cd54a0c134073ea930418e1e69/1_5KE_ser.pdf; nota katalogowa diody TVS, dostęp 09.09.2021

IDENTIFICATION AND MITIGATION OF OVERVOLTAGES DURING MARX GENERATOR OPERATION IN CIRCUITS SUPPLYING MEASUREMENT SYSTEMS

S u m m a r y

This paper presents the characteristics of overvoltages and surge testing of equipment, as well as discusses the means of surge protection. The analysis of surges occurring in the high-voltage laboratory of Rzeszow University of Technology causing frequent damage to the measuring equipment during operation of the Marx generator was carried out. The nature of the overvoltages was identified and methods of their reduction using varistor overvoltage limiters and transil diodes were proposed. A high-resolution digital oscilloscope and high-voltage differential probes were used for the measurements.

Keywords: Marx generator, measuring circuits, surges, surge protection

DOI: 10.7862/re.2022.3

Submitted/Tekst złożono w redakcji: październik 2021 r.

Accepted / Przyjęto do druku: month.year

Published/Tekst opublikowano: month.year

