

## Dobór elementów ograniczających amplitudy zaburzeń elektromagnetycznych w obwodach urządzeń elektronicznych

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono podstawowe rodzaje zagrożeń dla aparatury elektronicznej oraz podstawowe sposoby służące do ograniczenia ich skutków, w tym charakterystykę zewnętrznych elementów ograniczających poziom zaburzeń elektromagnetycznych. Zwrócono szczególną uwagę na właściwy dobór tych elementów do poszczególnych obwodów elektrycznych.

**Abstract.** The article presents the basic types risks to electronic equipment and basic methods used to limit their consequences, including the characteristics of the external components of reducing electromagnetic disturbances. Particular attention was paid for the right selection of these elements to the individual circuits. **(Selection of elements limiting the amplitude of the electromagnetic disturbances in electronic circuits)**

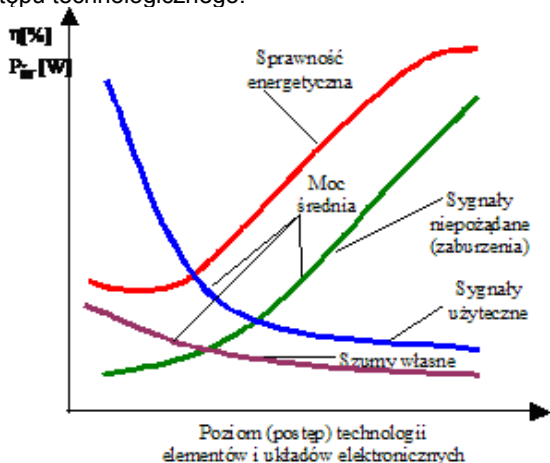
**Słowa Kluczowe:** Kompatybilność elektromagnetyczna, układy zabezpieczające, zaburzenia radioelektryczne.

**Keywords:** Electromagnetic compatibility, protection systems, radio disturbance.

doi:10.12915/pe.2014.07.33

### Wstęp

Wzrost liczby eksploatowanych urządzeń powoduje niebezpieczeństwo, że będą na siebie oddziaływać powodując konieczność stosowania coraz doskonalszych środków zapewniających ich poprawną pracę w środowisku elektromagnetycznym. Na rysunku 1 pokazane są zmiany podstawowych parametrów urządzeń w funkcji rozwoju postępu technologicznego.



Rys. 1 Zmiany średniej mocy sygnałów użytecznych i niepożądanych (zaburzeń) oraz sprawność energetyczna w układach, urządzeniach elektronicznych w zależności od postępów w technologii [4]

Urządzenia powinny być tak zaprojektowane, aby generowane przez nie zaburzenia miały maksymalnie niski poziom i jednocześnie powinny być odporne na zaburzenia docierające z zewnątrz.

### Rodzaje zaburzeń elektromagnetycznych i ich charakterystyka

Podstawowymi zaburzeniami, które mogą zakłócić pracę bądź przyczynić się do ich uszkodzenia są:

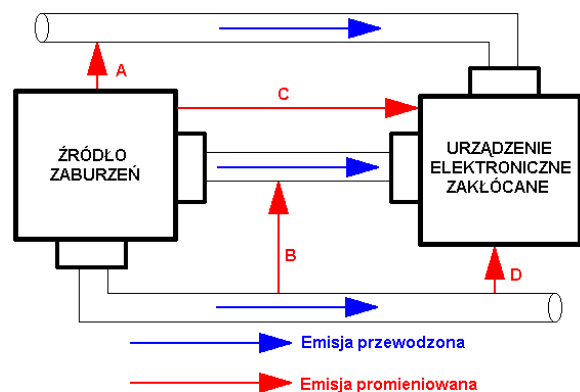
- zaburzenia radioelektryczne,
- wyładowania elektryczności statycznej,
- impulsowe zaburzenia elektromagnetyczne o dużej i małej energii.

Efekt ubocznym pracy niemal wszystkich urządzeń elektrycznych i elektronicznych są zaburzenia radioelektryczne zaliczane do grupy zaburzeń o małej energii.

Przenikanie zaburzeń do innych urządzeń odbywa się w wyniku promieniowania poszczególnych obwodów

urządzenia, istnienia sprzężeń między obwodami urządzeń sąsiednich lub wprowadzania tych zaburzeń do energetycznej sieci zasilającej.

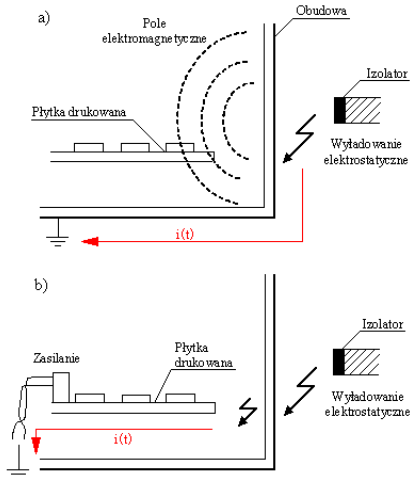
Powyższe zjawiska dotyczą urządzeń znajdujących się w danym środowisku elektromagnetycznym ale dotyczą złożonych systemów zawierających również potencjalne źródła zaburzeń. W przypadku oddziaływania poprzez pole elektromagnetyczne i sprzężenia pojemnościowe oraz indukcyjne - przenikanie energii następuje w wyniku niedoskonałego ekranowania. Zjawisko to ilustruje rysunek 2.



Rys.2. Drogi rozchodzenia się zaburzeń radioelektrycznych  
Linia A -sprężone bezpośrednio od źródła do odbiornika,  
Linia B - przewody połączeniowe stanowią źródło emisji zaburzeń,  
Linia C – emisja zaburzeń,  
Linia D - przenikanie zaburzeń drogą sprzężeń

Wyładowania elektryczności statycznej zaliczane są do zaburzeń elektromagnetycznych o niskiej energii, ale pomimo to w niektórych przypadkach mogą spowodować zaburzenie pracy urządzeń a nawet uszkodzenia wrażliwych elementów półprzewodnikowych. Na rysunku 3 pokazano podstawowe drogi przenikania energii w wyniku wyładowania elektryczności statycznej

Podstawowymi elementami służącymi do tłumienia w obwodach elektrycznych impulsowych zaburzeń pochodzących od wyładowania elektryczności statycznej są jedno lub dwukierunkowe diody lawinowe, warystory wielowarstwowe MLV, tłumiki polimerowe oraz diody TVS. Zastosowanie wspomnianych diod jest uzależnione od rodzaju zastosowanego rodzaju zasilania. W trakcie doboru parametrów diod do ochrony danego obwodu należy uwzględnić jego właściwości, w tym głównie impedancję obwodu zasilania i odbiornika energii.



Rys 3 Przenikanie zaburzeń w postaci wyładowania ESD do urządzenia elektronicznego; a) oddziaływanie drogą promieniowania (obudowa uziemiona), b) oddziaływanie drogą przewodzenia (obudowa nie uziemiona i przepływ prądu przez płytkę drukowaną) [4]

Wśród grupy zaburzeń elektromagnetycznych przenoszących dużą energię są wyładowania atmosferyczne i procesy komutacyjne w sieci energetycznej.

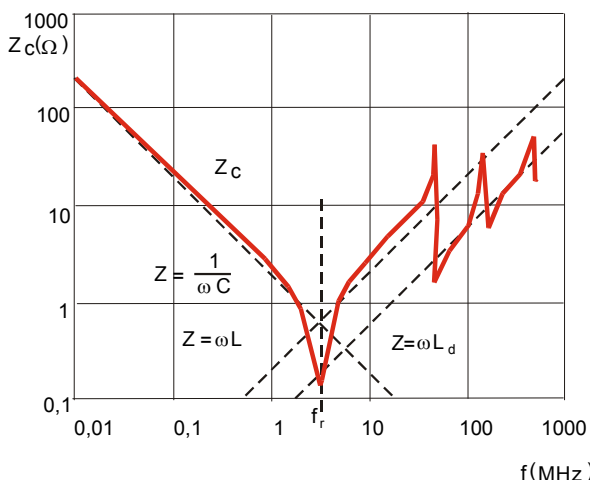
Efektom oddziaływań zaburzeń przenoszących dużą energię jest najczęściej trwała degradacja urządzeń. Sposób przenikania niepożądanego energii jest analogiczny jak dla zaburzeń wymienionych wcześniej.

### Sposoby zabezpieczenia urządzeń przed oddziaływaniem zaburzeń radioelektrycznych

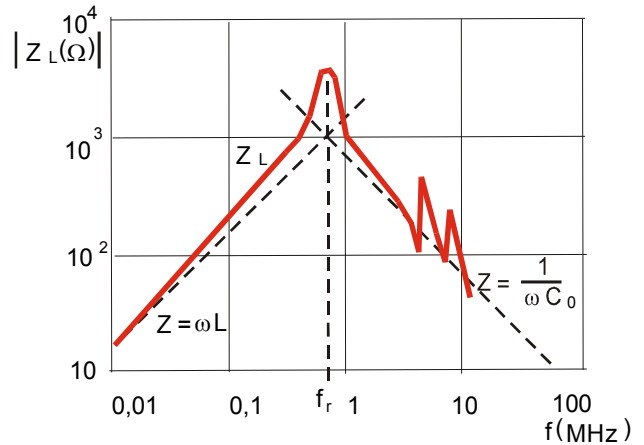
Celem zabezpieczenia urządzeń przez zaburzeniami radioelektrycznymi jest niedopuszczenie do nadmiernej emisji na zewnątrz, jak również przez przenikaniem tej energii do danego urządzenia.

Podstawowymi środkami służącymi do realizacji tego zadania są elementy tłumiące zaburzenia w postaci elementów LC oraz ekranowanie obwodów i poszczególnych bloków.

Prawidłowy dobór elementów LC musi być poprzedzony znajomością zakresu tłumionych częstotliwości oraz parametrów obwodu. Wynika to z faktu występowania częstotliwości rezonansowej danego elementu. Przykładową charakterystykę impedancji kondensatora w funkcji częstotliwości ilustruje rysunek 4. Charakterystykę impedancji dla dławika ilustruje rysunek 5.



Rys. 4 Charakterystyka impedancji kondensatora w funkcji częstotliwości



Rys. 5 Charakterystyka impedancji dławika w funkcji częstotliwości

Wśród dostępnych na rynku kondensatorów stosowanych do zabezpieczenia przeciwzakłóceniewego bardzo korzystne parametry posiadają kondensatory przepustowe, których częstotliwości rezonansowa może wynosić powyżej 100 MHz.

Prawidłowy dobór elementów pod względem częstotliwości oraz ich skuteczność eliminacji zaburzeń zależy w dużym stopniu od znajomości parametrów obwodu. W tabeli 1 pokazano, jakie należy stosować kryteria przy instalowaniu elementów LC w wybranym obwodzie.

Tabela. 1 Zalecane konfiguracje elementów przeciwzakłóceniewych w zależności od impedancji linii zasilania i odbiornika energii

Impedancja źródła zaburzeń	Topologia filtru	Impedancja zakłócanego urządzenia
Niska		Wysoka
Wysoka		Niska
Wysoka		Wysoka
Wysoka - Nieznana		Wysoka - Nieznana
Niska		Niska
Niska - Nieznana		Niska - Nieznana

### Sposoby zabezpieczenia urządzeń przed wyładowaniami elektryczności statycznej

Wyładowania elektryczności statycznej są groźne dla elementów półprzewodnikowych o dużej integracji z powodu krótkich czasów narastania amplitud impulsów. Degradacja elementów urządzenia może nastąpić już przy amplitudzie impulsów o połowę niższej niż amplituda impulsu, na którą reaguje ludzkie ciało.

Do najskuteczniejszych sposobów redukcji zagrożeń spowodowanych przez wyładowania elektryczności statycznej należą:

- zwiększenie wilgotności powietrza w środowisku pracy urządzeń,
- unikanie tworzyw sztucznych o dużej rezystancji powierzchniowej,
- stosowanie podłoża antystatycznego z wyrównywaniem potencjału,
- stosowanie odpowiedniego antystatycznego ubioru personelu.

Do podstawowych elementów zabezpieczających można zaliczyć ekranowanie obwodów i poszczególnych bloków oraz instalowanie diod lawinowych w wybranych obwodach.

Dobór elementów ekranujących i elementów zabezpieczających powinien być skorelowany z parametrami elektrycznymi wyładowania elektryczności statycznej.

### Sposoby zabezpieczenia urządzeń przed zaburzeniami elektromagnetycznymi o dużej energii

Zaburzenia te docierają do urządzeń przez sieć zasilającą w formie przepięć pochodzenia komutacyjnego oraz w formie przepięć w wyniku obecności sprzężenia indukcyjnego z obwodami instalacji odgromowej obiektu budowlanego. W przypadku wyładowania atmosferycznego w pobliżu obiektu powstające impulsowe pole elektromagnetyczne powodujące zaindukowanie się przepięć w instalacjach elektrycznych obiektów.

Typowym przykładem sprzężenia indukcyjnego w obiekcie jest sytuacja, gdy w nieprawidłowy sposób zostanie poprowadzona instalacja odgromowa i instalacja elektryczna lub transmisji sygnałów w budynku. Wzdłuż ściany budynku poprowadzony jest przewód odprowadzający zewnętrzną instalacji odgromowej, przez który płynie prąd piorunowy o charakterystyce prądowo-czasowej np.  $I = 20 \text{ kA}/5 \mu\text{s}$ . Na ścianie wewnętrznej budynku prowadzona jest instalacja transmisji sygnałów oddalona o  $a = 1 \text{ m}$  od instalacji odgromowej. Z zależności (1) i (2) można łatwo obliczyć indukcyjność wzajemną, a następnie wartość napięcia, jaka zaindukuje się w przewodzie o długości  $l = 5 \text{ m}$  transmisji sygnałów w wyniku przepływu prądu piorunowego.

$$(1) \quad M = 0,2l \left( \ln \frac{2l+a}{a} + \ln \frac{2l+a}{l} - 1 \right) = 0,2 \cdot 5 \left( \ln \frac{2 \cdot 5 + 1}{1} + \ln \frac{2 \cdot 5 + 1}{5} - 1 \right) = 1 \cdot (\ln 10 + 0,2 - 1) = 1,5 \mu\text{H}$$

$$(2) \quad u = M \frac{di}{dt} = 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{20 \cdot 10^3}{5 \cdot 10^{-6}} = 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^9 = 6 \text{ kV}$$

Każdemu procesowi powstawania przepięć w obwodzie elektrycznym towarzyszą również przebiegi wielkiej częstotliwości. Do minimalizowania skutków tych przebiegów stosowane są diody lawinowe.

### Metodyka zabezpieczania urządzeń przed zaburzeniami radioelektrycznymi i ESD

Dopuszczalne poziomu zaburzeń radioelektrycznych generowanych przez poszczególne urządzenia są określone w ogólnych i przedmiotowych normach. Urządzenia instalowane w obiekcie zgodnie z wcześniej przyjętą zasadą nie powinny na siebie oddziaływać. Problem zabezpieczenia urządzeń przed nadmierną emisją jest rozwiązywany w toku projektowania urządzenia.

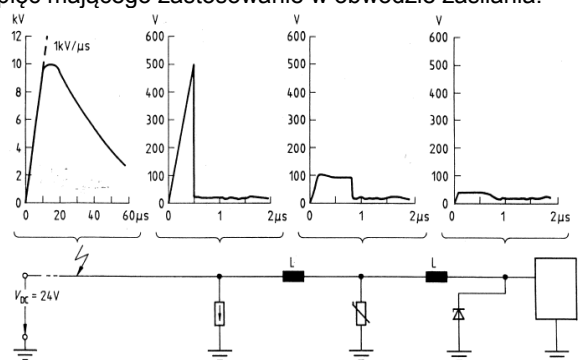
Wcześniej przedstawione zasady doboru elementów redukujących zaburzenia powinny zapewnić poziom zgodny z normą.

W celu zabezpieczenia urządzeń przez zburzeniami wywołanymi wyładowaniami elektryczności statycznej stosuje się diody lawinowe, ponieważ ich graniczna częstotliwość pracy odpowiada w pełni czasowi narastania impulsu.

Podstawową wadą diody lawinowej służącej jako element eliminujący zaburzenia jest jej duża pojemność. W związku z powyższym nie w każdym obwodzie załączona dioda lawinowa będzie w pełni spełniać swoje zadanie.

### Metodyka zabezpieczania urządzeń przed impulsowymi zaburzeniami dużej energii

Podstawowymi elementami stosowanymi do ograniczania amplitud przepięć są takie elementy jak odgromniki, warystory oraz diody lawinowe. Elementy te różnią się między sobą czasem zadziałania oraz poziomem pochłanianej energii, co ilustruje tabela 2. Istnieje zatem konieczność ich wzajemnej koordynacji poprzez separację za pomocą elementu indukcyjnego w przypadku, gdy stosowane są wielostopniowe obwody ograniczające. Na rysunku 6 pokazano przykład trójstopniowego ogranicznika przepięć mającego zastosowanie w obwodzie zasilania.



Rys. 6. Zasada działania trójstopniowego ogranicznika przepięć złożonego z odgromnika, warystora i jednokierunkowej diody lawinowej [3]

Zamieszczone na rysunku 6 elementy indukcyjne o odpowiednich parametrach mają za zadanie koordynowanie prawidłowego zadziałania poszczególnych elementów w funkcji czasu. Dodatkowo w tabeli nr 2 zestawiono podstawowe parametry wymienionych ograniczników przepięć.

W zabezpieczeniu obwodu zasilania pokazanego na rysunku 5 załączona dioda lawinowa ma za zadanie nie tylko obniżenie wypadkowego poziomu przepięć, chociaż w obwodzie zasilania prądu przemiennego 230V AC poziom ograniczania diody lawinowej jest porównywalny z poziomem warystora. Jej zadaniem jest przede wszystkim eliminowanie składowych drgań wyższych częstotliwości, które mogą pojawić się podczas oddziaływania impulsowego zaburzenia elektromagnetycznego pochodzenia atmosferycznego i komutacyjnego oraz wywołanego tym impulsem lokalnego stanu nieustalonego z powodu istnienia pasożytniczych elementów LC.

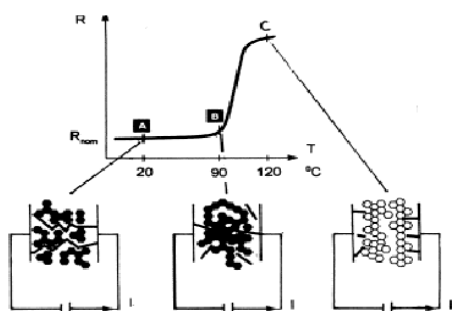
Bardzo ważnym elementem przy projektowaniu ogranicznika przepięć do danego obwodu jest właściwy dobór parametrów stosowanych elementów indukcyjnych. Elementy indukcyjne powinny zawierać rdzenie ferrytowe otwarte o wysokiej częstotliwości granicznej i o dużej stałej AL. Pozwoli to uzyskać niezbędną wymaganą indukcyjność dławika nawiniętego jako jedna warstwa, co zapewni niską pojemność własną dławika i wysoką częstotliwość własną. Jest to szczególnie istotne w przypadku tłumienia impulsów typu Burst. Eliminuje się wtedy wpływ dzielnika pojemnościowego złożonego z pojemności diody i dławika.

Tabela 2 Porównanie właściwości ochronnych podstawowych elementów

Element	Dioda Zenera	Dioda lawinowa	Warystor	Odgromnik
Charakterystyka U/I	asymetryczna	asymetryczna	symetryczna	symetryczna
Poziom ochrony	3V - 200V	6V- 190 V	20V – 2000V	65V- 12000V
Prąd udarowy (8/20)	do 0,2kA	do 1kA	do 25kA	do 60kA
Pochłaniana energia	do 0,1J	do 1J	do 1800J	do 60J
Obciążenie stałe	do 50W	do 1W	do 2W	800W (1s.)
Czas odpowiedzi	< 25ns	< 10ps	< 25ns	zależy od du/dt
Pojemność	5pF- 15000pF	300pF- 15000pF	40pF – 40000pF	0,5pF – 7pF
Dopuszczalne zmiany zakresu ochronnego	± 1%, ± 2%, ± 5%	± 5%, ± 10%	± 10%	± 15%
Prąd upływu	< 100nA	< 5µA	< 0,2mA	< 15nA
Zakres roboczych temperatur	-65°C + 175°C	-65°C + 175°C	-40°C + 125°C	-55°C + 130°C

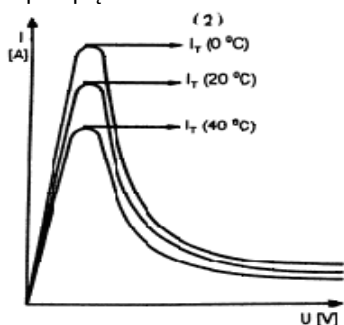
W stosowanych rozwiązaniach praktycznych złożonych z dwustopniowych ograniczników przepięć coraz częściej elementy indukcyjne zastępowane są elementami, w których rezystancja uzależniona jest od temperatury i zwane Poly-switch. Rezystor Poly-switch jest to bezpiecznik polimerowy wielokrotnego użytku, w którym po przekroczeniu dopuszczalnego prądu przestaje przewodzić, potem stygnie i po kilkunastu sekundach znów przewodzi. Struktura oraz wpływ temperatury pochodzącej od przepływu prądu udarowego na taki element przedstawiona jest na rysunku 7 oraz 8.

Element ten oprócz zapewnienia koordynacji zadziałania elementów pełni rolę bezpiecznika termicznego.



Rys. 7 Rezystory Poly-switch [4]

Poly-switchy ze względu na swoje właściwości znajdują coraz częściej zastosowanie w zabezpieczeniu wielu urządzeń elektrycznych takich jak: urządzenia zasilające, kolumny głośnikowe, bezpieczniki w instalacji elektrycznej samochodów, telekomunikacyjnych ogranicznikach przepięć.



Rys. 8 Wpływ temperatury na pracę rezystora Poly-switch [4]

## Podsumowanie

Do najważniejszych sposobów zapewnienia wymagań kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń po stronie emisji i odporności należą:

- symetryzacja,
- ekranowanie,
- filtracja,
- uziemianie,
- dobór wartości impedancji obwodu,
- separacja,
- dobór kabli.

Tłumienie zaburzeń może być realizowane za pomocą sposobów przy źródle i również poprzez eliminację dróg przenikania zaburzeń. Zagadnienia związane z kompatybilnością elektromagnetyczną powinny być uwzględniane już w pierwszym stadium projektowania, ponieważ ilość dostępnych metod jak i koszt ich stosowania są ze sobą współmierne.

Stosowanie zewnętrznych elementów tłumiących zaburzenia w większości przypadków powinno być ostatecznym rozwiązaniem dla zaburzeń o niskiej energii. W przypadku zaburzeń o dużej energii stosowanie elementów ograniczających skutki oddziaływania ich na urządzenia powinno być obowiązkowe.

## LITERATURA

- [1] A. Charoy, *Kompatybilność elektromagnetyczna -Zakłócenia w urządzeniach elektronicznych, tom 1,2,3,4*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 2000.
- [2] H. W. Otto, *Metody redukcji zakłóceń i szumów w układach elektronicznych*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne.
- [3] A. W. Sowa, *Ochrona urządzeń oraz systemów elektronicznych przed narażeniami piorunowymi*, Białystok 2011.
- [4] W. Rotkiewicz, *Kompatybilność elektromagnetyczna w radiotechnice*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1978 r.
- [5] T. Więckowski, *Pomiar odporności urządzeń elektrycznych i elektronicznych*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1980 r.

**Autorzy:** mgr inż. Artur Dłużniewski, Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Automatyki i Telekomunikacji, ul. Chłopickiego 50, 04-275 Warszawa, E-mail: [adluzniewski@ikolej.pl](mailto:adluzniewski@ikolej.pl); mgr inż. Łukasz John, Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Automatyki i Telekomunikacji, ul. Chłopickiego 50, 04-275 Warszawa, E-mail: [ljohn@ikolej.pl](mailto:ljohn@ikolej.pl).  
dr inż. Mieczysław Laskowski, Instytut Kolejnictwa, Zakład Sterowania Ruchem i Teleinformatyki, ul. Chłopickiego 50, 04-275 Warszawa, E-mail: [mjlaskowski@wp.pl](mailto:mjlaskowski@wp.pl).