

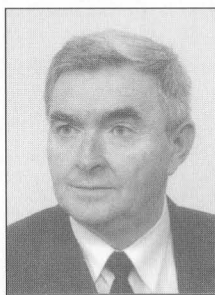
**Stanisław PANFIL**

POLITECHNIKA LUBELSKA, KATEDRA ELEKTROTECHNIKI

## Modyfikacja układu pomiarowego mocy biernej, deformacji i dystorsji przy przebiegach odkształconych napięciowych i prądowych

Mgr inż. Stanisław PANFIL

Jest absolwentem Wydziału Elektrycznego Politechniki Lubelskiej oraz doktorantem nauk technicznych. W czasie pracy nad rozprawą doktorską realizował badania dotyczące pomiarów mocy biernej, deformacji i dystorsji przy przebiegach odkształconych napięć i prądów metodą cyfrową.



### Streszczenie

W artykule, przedstawiono zmodyfikowany układ pomiarowy symulacyjnego pomiaru mocy biernej, deformacji i dystorsji przy przebiegach odkształconych napięciowych prądowych metodą cyfrową. Zrealizowanie tego typu pomiaru wymagało zaprojektowania i skonstruowania urządzenia, współpracującego z komputerem. Rozwiązanie konstrukcyjne oparto na tzw. filozofii „easy”. Urządzenie to, przede wszystkim zabezpiecza komputer przed niebezpiecznymi napięciami. Ponadto tworzy izolację galwaniczną między prądem i napięciem, realizując pomiary przebiegów wielkości odkształconych. Źródłem zasilania była sieć jednofazowa z odbiornikiem nieliniowym.

### Abstract

In article the modified measuring arrangement of simulating measurement of passive power, was introduced was, deformation and distortion near deformed courses voltage and current digital method. Realizing this type of measurement required designing and constructing device, co-operating from computer. The constructional solution was based on philosophy the „easy”. Device, then, computer first of all protects before dangerous voltage. Moreover it creates between current and voltage galvanised isolation, realizing the measurements of courses of size deformed. The single-phase net was from non-linear receiver set the source of power supply.

**Słowa kluczowe:** transoptor, moc bierna, deformacja, dystorsja

**Keywords:** transoptors, passive power, deformation, distortion

### 1. Wstęp

Analiza teorii mocy biernych w przebiegach odkształconych napięć i prądów zostały przedstawione w literaturze naukowej m.in. przez S. Fryzego, C.I. Budenanu, L.S. Czarneckiego [1], czy P. Filipskiego [3]. Budenanu wprowadził pojęcie mocy biernej w układach o przebiegach odkształconych określanej w postaci relacji [5]:

$$Q_B = \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n^* \sin \varphi_n \quad (1.1)$$

Dla układów z przebiegami sinusoidalnymi zastosowano pojęcie mocy zespolonej, pozornej wyrażonej wzorem:

$$\underline{S}_z = \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n^* = P + jQ_n \rightarrow S_z^2 = P^2 + Q_n^2 \quad (1.2)$$

Biorąc pod uwagę pełny bilans mocy wprowadzono pojęcie mocy deformacji, którą oznaczono literą (K), i określono zależnością [5]:

$$K = \sum_{n(1)} \left[ U_n^2 I_l^2 + U_l^2 - 2U_n I_n U_l I_l \cos(\varphi_n - \varphi_l) \right] \quad (1.3)$$

gdzie:  $l$  – rząd harmonicznej, przy czym  $l \neq n$ .

Suma geometryczna mocy biernej  $Q_B$  i mocy deformacji K

nazwano mocą dystorsji, określono literą (D), która zdefiniowano w postaci zależności [5]:

$$D^2 = Q^2 + K^2 \quad (1.4)$$

Inny sposób rozkładu mocy pozornej odbiornika 1-fazowego podał S. Fryze. Wyodrębnił on składową czynną z czasowego przebiegu prądu. Definiowaną wzorem [5]:

$$i_p(t) = \frac{P}{U^2} u(t) = Gu(t) \quad (1.5)$$

i składową bierną przedstawioną w postaci relacji:

$$i_q(t) = i(t) - i_p(t) \quad (1.6)$$

Składowa czynna definiowana wzorem (1.5) spełnia równanie mocy odbiornika

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i_p(t) dt \quad (1.7)$$

Stąd otrzymujemy

$$\int_0^T u(t) i(t) dt = \frac{U}{P} \int_0^T i_p(t) i_q(t) dt = 0 \quad (1.8)$$

Z powyższego wzoru wynika, że prąd bierny przedstawiony w postaci zależności (1.6) jest ortogonalny do składowej czynnej prądu określonego relacją (1.5). Pomiędzy mocą bierną podaną przez C.I. Budeanu i S. Fryzego istnieje związek, który zdefiniowano następująco [5]:

$$Q_F^2 = Q_B^2 + K^2 = D^2 \quad (1.9)$$

gdzie:  $K^2$  - moc deformacji,  $D^2$  - moc dystorsji w kwadracie,  $Q_F^2$  - moc bierna S. Fryzego w kwadracie,  $Q_B^2$  - moc bierna C.I. Budeanu w kwadracie.

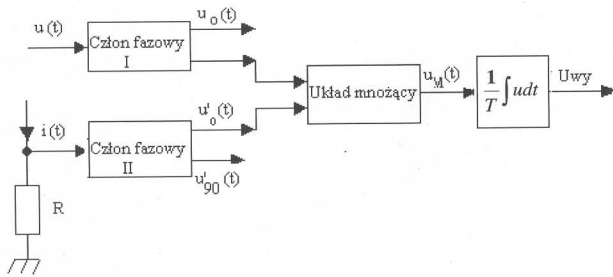
### 2. Przykład implementacji przetwornika do pomiaru mocy biernej w przebiegach odkształconych napięciowych i prądowych

Od bardzo dawna istnieje problem fizycznego określenia mocy biernej w przebiegach odkształconych. Pomiar mocy biernej, jak również deformacji i dystorsji przy przebiegach odkształconych napięciowych i prądowych jest niewątpliwie bardzo trudny.

Trudność ta polega przede wszystkim na przesunięciu o kąt  $\frac{\pi}{2}$  rad każdej harmonicznej prądu lub napięcia. Przesunięcie to jest niezbędne do zrealizowania pomiaru mocy biernej - określanej jako suma mocy poszczególnych harmonicznych.

Z literatury naukowej [3] wynika, że ww. przesunięcie nie może być zrealizowane za pomocą pojedynczego elementu reaktancyjnego, gdyż zmiana ulega wówczas nie tylko faza, ale i następuje zmiana wartości amplitudy każdej harmonicznej.

Treścią prezentowanego artykułu jest ogólna analiza i prezentacja symulacyjnego pomiaru mocy biernej przy przebiegach odkształconych napięciowych i prądowych. Metodą cyfrową pomiary wykonano opierając się na tzw. filozofii „easy” za pomocą urządzenia zabezpieczająco-izolująco-pomiarowego, współpracującego z komputerem, którego schematy i opis przedstawiono w rozdziale 3 artykułu. Do pomiaru mocy biernej stosuje się również przetworniki oparte na filtrach wszechprzepustowych (ang. *All-Pass-Filter*).



Rys. 1. Schemat blokowy przetwornika mocy biernej [1]  
Fig. 1. block scheme of power transformer passive [1]

W przetworniku tego typu, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 1, znajdują się dwa układy fazowe: jeden w torze napięciowym, drugi w torze prądowym. Odpowiednie sygnały wyjściowe z tych układów są doprowadzone do wejść układu mnożącego. Do pierwszego wejścia układu mnożącego (rys. 1) dołączono z członu fazowego I sygnał wyjściowy  $u_{00}(t)$  o fazie  $\frac{\pi}{2} + \alpha(\omega)$ , zaś drugie

wejście układu mnożącego połączono z sygnałem napięciowym  $u'_0(t)$  o fazie  $\varphi + \alpha(\omega)$  z członu fazowego II. Sygnały te w przypadku jednej częstotliwości są opisane następującymi równaniami [2]:

$$u_u(t) = u_{90}(t) = k_1 U_m \sin[\omega t + \varphi + \alpha(\omega)] \quad (2.1)$$

$$u_i(t) = u'_{00}(t) = k_2 I_m \sin\left[\omega t + \alpha(\omega) + \frac{\pi}{2}\right] \quad (2.2)$$

Sygnał wyjściowy układu mnożącego o stałej  $k_M$  ma postać:

$$u_M(t) = k_M \frac{k_1 k_2}{2} U_m I_m \left[ \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right) - \cos\left(2\omega t + \varphi + 2\alpha(\omega) + \frac{\pi}{2}\right) \right] \quad (2.3)$$

a jego wartość średnia jest opisana w postaci relacji:

$$U_{Mav} = \frac{1}{T} \int_0^T u_M(t) dt = k_M k_1 k_2 R_w U I \sin \varphi = k_q U I \sin \varphi \quad (2.4)$$

Dla sygnałów odkształconych (napięciowego i prądowego) średnia wartość sygnału jest określona zależnością [2]:

$$U_{Mav} = \frac{1}{T} k_M \int_0^T u_u(t) i(t) dt = k_q \sum_{n=1}^k U_n I_n \sin \varphi_n \quad (2.5)$$

Jeżeli do wejść układu mnożącego zostaną dołączone z członów fazowych napięcia  $u_0(t)$  i  $u'_0(t)$  lub  $u_{90}(t)$  i  $u'_{90}(t)$ , to średnia wartość sygnału wyjściowego, układu mnożącego jest opisana wzorem [2]:

$$U_{Mav} = \frac{1}{T} k_M \int_0^T u_u(t) u_i(t) dt = k_p \sum_{n=1}^k U_n I_n \cos \varphi_n \quad (2.6)$$

W ten sposób możemy zmierzyć moc czynną.

Żądany zakres częstotliwości przetwornika można uzyskać przez zmianę charakterystyki przenoszenia układu fazowego tak, aby względny zakres częstotliwości  $a = f_g / f_d$  był równy zadanej wartości. O wartości błędu pomiaru mocy biernej decyduje głównie błąd kątowny  $\theta$  układu mnożącego i fazowego.

$$\delta_{q \max} \approx \sin \theta \quad (2.7)$$

W typowych rozwiązaniach układowych np. dla zakresu częstotliwościowego od 50 do 600 Hz, można uzyskać błąd pomiaru mocy biernej równy 1% [2].

Oprócz przetworników pomiarowych mocy biernej w przebiegach odkształconych napięć i prądów stosuje się przetworniki próbkujące. Zasada działania ich jest oparta na wykorzystaniu dyskretnej transformaty Fouriera (ang. *Discrete Fourier transform*) w skrócie (DFT). Do wyznaczenia współczynników szeregu Fouriera przyjmuje się ograniczenie widm analizowanych sygnałów prądowych i napięciowych. Sygnały te są poddane procesowi próbkowania

i kwantowania. Dyskretną transformatę Fouriera można przedstawić w postaci relacji [2]:

$$U(n) = \sum_{k=0}^{N-1} U(k) e^{j \frac{2\pi}{N} nk} \quad (2.8)$$

gdzie:  $U(n)$  -  $n$ -ty współczynnik wykładniczego szeregu Fouriera,  $n$  - numer harmonicznej,  $N$  - liczba próbek,  $U(k)$  -  $k$ -ta próbka sygnału.

Obliczenie wartości  $U(n)$  wymaga  $N^2$  mnożeń i  $N(N-1)$  dodawań, co w przypadku dużej liczby próbek, czas obliczania jest bardzo długi [2]. Skrócenie czasowe można uzyskać wykorzystując algorytm Cooleya-Tukeya, który realizuje szybką transformatę Fouriera (ang. *Fast Fourier Transform*) w zapisie skrótowym (FFT). Algorytm ten wymaga sortowania próbek dzieląc je na parzyste  $U^P(k)$  i nieparzyste  $U^{nP}(k)$ . Dyskretne transformaty utworzą zdefiniowane w postaci wyrażzeń [2]:

Dla próbek parzystych

$$U^P(n) = \sum_{k=0}^{N/2-1} U^P(k) e^{j \frac{2\pi}{N/2} nk} \quad (2.9)$$

dla próbek nieparzystych

$$U^{nP} = \sum_{k=0}^{N/2-1} U^{nP}(k) e^{j \frac{2\pi}{N/2} nk} \quad (2.10)$$

Realizacja tego algorytmu pozwala na wyznaczenie współczynników szeregu Fouriera. Jeżeli znamy ich wartości możemy obliczyć wszystkie wartości wielkości mierzonych charakterystycznych dla każdego obwodu elektrycznego, niesinusoidalnego.

Wyznaczenie mocy biernej harmonicznych określających stan układów elektroenergetycznych, jest niezbędne przy ocenie ich pracy [2].

Obserwując rozwój techniki należy przypuszczać, że powszechnie stosowane w miernikach cyfrowych przetworniki analogowo-cyfrowe zostaną zastąpione rekurencyjnymi sieciami neuronowymi. Wówczas będzie możliwe wykonanie tego typu pomiarów w bardzo krótkim czasie a ich wyniki będą zawierać niewielkie uchyby [4].

### 3. Pomiar mocy biernej, deformacji i dystorsji przy przebiegach odkształconych napięciowych i prądowych

- Układ pomiarowy oparty na karcie dźwiękowej z przetwornikiem analogowo-cyfrowym, zgodnej ze standardem Sound Blaster,
- opracowanie aplikacji w języku wysokiego poziomu C++, współpracującej z układem pomiarowym pozwalającej na:
- pomiar mocy biernej, deformacji i dystorsji
- obliczenie składowych harmonicznych mierzonych sygnałów z wykorzystaniem algorytmu FFT).
- obliczenie wartości przesunięcia fazowego oraz mocy biernej, deformacji i dystorsji.

#### 3.1. Osprzęt programu

- Karta dźwiękowa,
- maksymalna częstotliwość próbkowania 44 kHz,
- dokładność próbkowania 16-bitowa.

Ze względu na możliwość wystąpienia błędów w kwantowaniu sygnału, próbkowanie odbywa się z dokładnością 12-bitową, cztery najmłodsze bity (MSB) nie są uwzględniane przez aplikację komputerową.

#### 3.2. Aplikacja komputerowa

Aplikacja została napisana w języku C++ wszystkie obliczenia numeryczne są wykonywane z wykorzystaniem liczb o podwójnej precyzji.

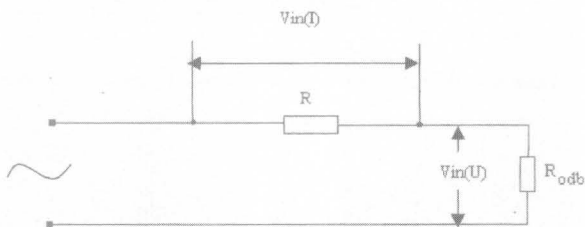
### 3.3. Algorytm przetwarzania cyfrowego

- dwukanałowa akwizycja danych (napięcia i prądu),
- 12-bitowe próbkowanie (4096) próbek,
- obliczenie współczynników szybkiej transformata Fouriera (FFT),
- obliczenie przesunięcia fazowego,
- obliczenie amplitud mierzonych sygnałów.

### 4. Układ pomiarowo-izolujący

Układ pomiarowo-izolujący został opracowany i wykonany w celu umożliwienia pomiaru napięć i prądów odkształconych płynących przez urządzenia podłączone do sieci elektrycznej. Układ ten mierzy napięcia do wartości 460 V i prądów o wartości do 10 A, co w przypadku zasilania z sieci o napięciu 230 V pozwala na podłączenie urządzeń o mocy do 1600 W. Zastosowanie układu tego typu jest konieczne, aby zabezpieczyć komputer przed niebezpiecznymi napięciami.

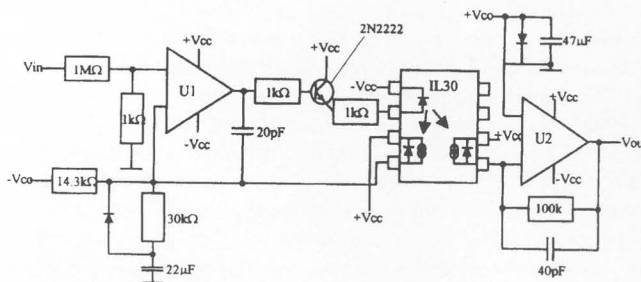
#### 4.1. Realizacja układu pomiarowego



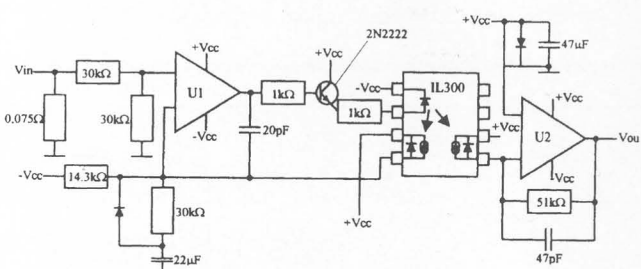
Rys. 2. Punkty podłączenia układu pomiarowego  
Fig. 2. Point of connecting the measuring arrangement

Odbiornik R jest połączony szeregowo z rezystorem dużej mocy  $P=10$  W, ale o bardzo małej rezystancji rzędu  $0,075 \Omega$ . Układ ten jest podłączony do sieci zasilającej. Napięcie jest wprost proporcjonalne do płynącego prądu, który jest mierzony w punktach podłączenie (na schemacie oznaczonych  $V_{in}(I)$ ). Spadek napięcia na rezystorze jest bardzo mały (wynoszący przy obciążeniu maksymalnym, 1600 W w granicach około 0,75 V. Przy obciążeniu 100 W około 0,05 V) nie ma więc wpływu na warunki pracy odbiornika. Na wejściu odbiornika napięcie jest mierzone w punkcie obwodu oznaczone na schemacie  $V_{in}(U)$ . Napięcia  $V_{in}(U)$  oraz prądy  $V_{in}(I)$  i są mierzone w punktach podłączeń układów zabezpieczająco-izolujących, operacyjnego. Aby uniknąć nieliniowości dioda jest sterowana pośrednio przez tranzystor tzn. wzmacniacz U1 steruje tranzystorem przy bardzo małej wartości prądu, który przez rezystor steruje diodą z fotodiod podaje sygnał na wejście odwracające wzmacniacza, realizując w ten sposób ujemne sprzężenie zwrotne. Dzięki takiemu rozwiązaniu, znacznie poprawia się liniowość urządzenia oraz poszerza zakres przenoszonych częstotliwości. Ponieważ napięcie wejściowe może być zarówno dodatnie jak też i ujemne, konieczne jest przesunięcie punktu pracy diody świecącej. Dioda ta znajduje się ciągle w stanie świecenia, natomiast sygnał wejściowy powoduje niewielkie zmiany natężenia emitowanego światła. Napięcie odniesienia potrzebne do przesunięcia punktu pracy diody jest ustalane na diodzie krzemowej i podawane na wejście odwracające wzmacniacza U1. Druga z fotodiod - wyjście transoptora podaje sygnał na drugi wzmacniacz operacyjny U2, który pozwala na wysterowanie przetwornika analogowo-cyfrowego. Ponieważ polaryzacja diody świecącej przez napięcie odniesienia spowodowałaby przesunięcia napięcia wyjściowego transoptora, sygnał wyjściowy całego układu przesuwany jest w przeciwną stronę o tę samą wartość przez analogiczny układ oparty na diodzie krzemowej. Jako wzmacniacze U1 i U2 zostały wykorzystane w modelu podwójne wzmacniacze operacyjne  $\mu A 747$  PC. Ponieważ układ ma realizować izolację galwaniczną, jeden z układów obsługuje kanały pomiaru napięcia oraz prądu w części podłączonej do sieci elektrycznej, drugi natomiast układ obsługuje część

wyjściową. Każdy z układów ma niezależne, izolowane zasilanie baterijne na różne zakresy mierzonych napięć. Inne są wartości rezystorów dzielnika napięcia, odpowiedzialnych za ustalenie napięcia wejściowego wzmacniacza U1 oraz rezystora stopnia wyjściowego, odpowiedzialnego za wzmacnienie układu U2.

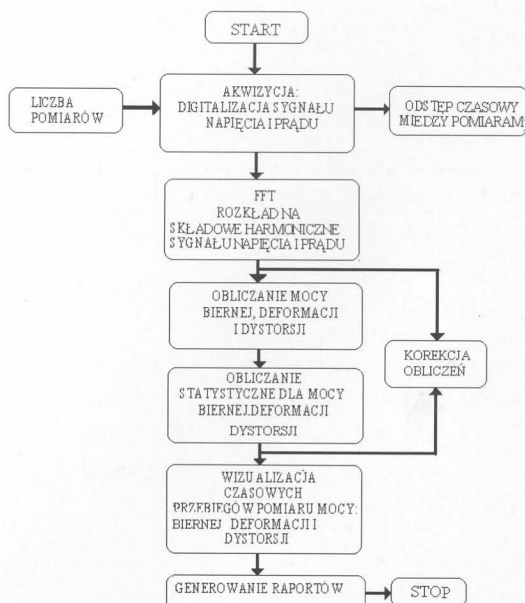


Rys. 3. Schemat układu pomiarowego sygnału napięciowego  
Fig. 3. Scheme of arrangement of measurement voltage signal



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego sygnału prądowego  
Fig. 4. Scheme of arrangement of measuring current signal

#### 4.2. Algorytm pomiaru mocy biernej, deformacji i dystorsji przy przebiegach odkształconych napięciowych i prądowych



Rys. 5. Algorytm pomiaru mocy biernej, deformacji i dystorsji przy przebiegach odkształconych napięciowych i prądowych  
Fig. 5. Algorithm of measurement of passive power, deformation and distortion near deformed courses voltage and current



## 5. Podsumowanie

Pomiar mocy biernej, deformacji i dystorsji przy przebiegach odkształconych napięciowych i prądowych metodą cyfrową charakteryzuje się dużą dokładnością. Jest to związane z charakterystyką zastosowanych urządzeń elektronicznych. Niewątpliwą zaletą tej metody jest eliminacja czynnika ludzkiego, eliminacja uciążliwych pomiarów np. oscyloskopowych. oraz 100% ich powtarzalności. Dodatkowym atutem metody cyfrowej, może być testowanie statystyczne wartości wielkości mierzonych. takich jak: mocy bierna, deformacji czy dystorsji oraz składowych harmonicznych napięcia i prądu.. Każdą z mierzonych wartości można opisać ośmioma wartościami statystyk opisowych, dziesięcioma wartościami statystyk parametrycznych. Taki dokładny opis ww. wartości mierzonych w przebiegach odkształconych, można wykorzystać w przyszłości do opisu rozkładu prawdopodobieństwa wartości w tego typu pomiarach. Wszystkie wartości testowane statystycznie można znormalizować, dzięki czemu istnieje możliwość porównywania wyników z różnych źródeł zasilania. Ponadto wyniki pomiarów i testowania statystycznego mogą być zapisywane w postaci raportów (plików HTML) i w prosty sposób archiwizowane w pamięci komputera lub drukowane. Pomiar jest obarczony jest niewielkim błędem w granicach 0,02%.

## Bibliografia

- [1] L.S. Czarnecki: Identyfikacja i modyfikacja właściwości energetycznych obwodów jednofazowych z przebiegami odkształconymi Gliwice, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, 1984. Z. 81.
- [2] Z. Kuśmerek, Pomiary mocy i energii w układach elektroenergetycznych WNT Warszawa 1994 str. 176-178.
- [3] P.S. Filipiński, P. W. Labaj.: Evaluation of reactive power meters in the presence of high harmonic distortion, *IEEE Transaction of Power Delivery* 1992 Vol. 7, nr 4.
- [4] S. Panfil: Pomiar mocy czynnej i biernej poszczególnych harmonicznych metodą analogową i cyfrową. *Wiadomości Elektrotechniczne* 2003 nr 11.
- [5] Praca zbiorowa, Poradnik inżyniera elektryka Tom II, PWN. Warszawa 1995.

**Title:** Modification of measurement of passive power, deformation and distortion near deformed courses voltage and current

Artykuł recenzowany

# ZAPRASZAMY do PRENUMERATY czasopisma PAK w 2004 roku

## PRENUMERATĘ I KOLPORTAŻ PROWADZĄ:

**Redakcja POMIARY-AUTOMATYKA-KONTROLA,**  
ul. Świętokrzyska 14A p. 535, 00-050 Warszawa  
tel./fax: (0-22) 827-25-40, e-mail: pak@data.pl, marketing: dorpak@data.pl

GARMOND PRESS S.A.  
KOLPORTER S.A.  
AS PRESS Andrzej Szlachciuk  
CZASOPISMO POLSKIE PRESS  
ARS POLONA S.A.  
G.L.M. GAJEWSKI & MORAWSKI Sp.J.  
INMEDIO Sp. z o.o.  
RUCH S.A., Oddział w Krakowie  
RUCH S.A., Oddział w Gdańsku  
RUCH S.A., Oddział w Lublinie  
RUCH S.A., Oddział Dolnośląski  
RUCH S.A., Oddział Dolnośląski

ul. Nakielska 3  
ul. Strycharska 6  
Nowa Iwiczna, ul. Krasickiego 11  
ul. Forsycji 6  
ul. Krakowskie Przedmieście 7  
ul. Uprawną 3  
Al. Kościuszki 132  
Al. Pokoju 5  
ul. Tkacka 9/10  
ul. Zamojska 24  
ul. Wspólna 8  
ul. Kwidzińska 3

01-106 Warszawa  
25-659 Kielce  
05-500 Piaseczno  
05-077 Warszawa  
00-950 Warszawa  
02-967 Warszawa  
90-146 Łódź  
31-548 Kraków  
80-836 Gdańsk  
20-950 Lublin  
45-837 Opole  
51-415 Wrocław

Indywidualną sprzedaż prowadzi Centralna Księgarnia Techniczna, 00-050 Warszawa, ul. Świętokrzyska 14A  
oraz bezpośrednio Redakcja