

**Marcin Pawlak, Czesław T. Kowalski**  
Politechnika Wrocławska, Wrocław

## **ZASTOSOWANIE ANALIZY CZĘSTOTLIWOŚCIOWEJ PRĄDU DO WYKRYWANIA USZKODZEŃ WIRNIKÓW SILNIKÓW INDUKCYJNYCH ZASILANYCH Z PRZEMIENNIKA CZĘSTOTLIWOŚCI**

### **APPLICATION OF CURRENT FREQUENCY ANALYSIS TO ROTOR FAULTS DETECTION OF CONVERTER-FED INDUCTION MOTOR**

**Abstract:** The paper deals with the application of frequency analysis of stator current to rotor fault detection of the induction motor. Special attention was focused on spectral analysis of magnitude of stator current space vector, which enables easier monitoring of current harmonics magnitudes with frequency specific to the different faults. Presented results show that combining of the current spectral analysis and neural networks enables the development of hardware fault detector of the converter-fed induction motor. The design methodology of the neural fault detector was presented and results of the detector on-line operation were demonstrated in the real laboratory system.

#### **1. Wstęp**

Diagnostyka eksploatacyjna wirników silników indukcyjnych klatkowych jest powszechnie stosowana w zakresie maszyn dużej mocy, zasilanych bezpośrednio z sieci energetycznej o stałej częstotliwości. W ostatnich latach, rozwój technologii wytwarzania półprzewodników dużej mocy spowodował znaczne obniżenie cen podzespołów energoelektronicznych wykorzystywanych do budowy rozmaitych przekształtników energii. Dlatego też w nowoczesnych układach napędowych dużej mocy do zasilania silników coraz częściej stosuje się falowniki napięcia o regulowanej częstotliwości. Główną zaletą takiego rozwiązania jest możliwość płynnej regulacji prędkości kątowej silnika oraz zachowanie dużej wartości momentu w szerokim zakresie prędkości. Zastosowanie impulsowych przekształtników energii pociąga za sobą znaczne pogorszenie jakości energii, czego efektem jest pojawienie się trudnych do odfiltrowania wyższych harmonicznnych. W napędach tego typu klasyczne metody diagnostyki wirników wykorzystujące analizę częstotliwościową prądów silnika wydają się być bezużyteczne, ze względu na silnie zniekształcone widmo sygnałów prądowych silnika. Niemniej jednak, przeprowadzone badania wykazały, że połączenie analizy częstotliwościowej prądu oraz sztucznych sieci neuronowych umożliwia opracowanie i praktyczne wykonanie aparatury diagnostycznej do monitorowania stanu wirnika silnika indukcyjnego małej mocy zasilanego

z falownika napięcia. W dalszej części referatu przedstawiono metodykę projektowania oraz wyniki badań sprzętowego detektora uszkodzeń wirnika, pracującego na obiekcie rzeczywistym *on-line*.

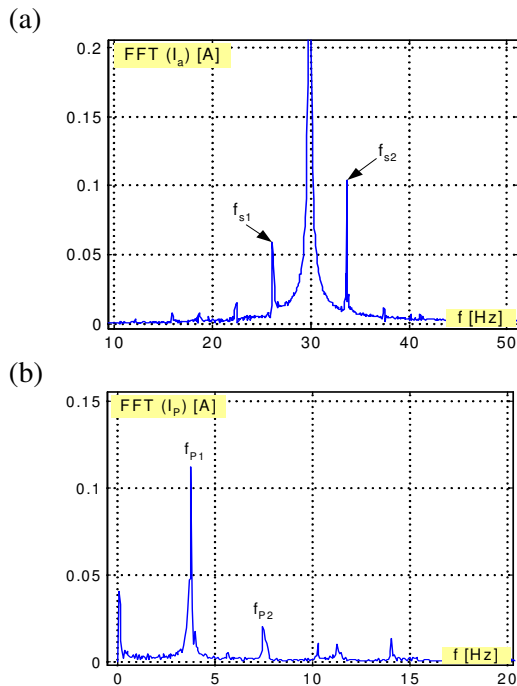
#### **2. Zastosowanie analizy częstotliwościowej prądu do wykrywania uszkodzeń wirników**

Na podstawie analizy częstotliwościowej sygnałów prądów silnika możliwe jest wykrycie różnych charakterystycznych uszkodzeń i nieprawidłowości występujących w układach napędowych, do których zaliczyć można:

- uszkodzenia stojana,
  - uszkodzenia wirnika,
  - asymetria napięć zasilania,
  - niewłaściwe sprzęgnięcie z maszyną roboczą.
- Symptomy powyższych uszkodzeń widoczne są w postaci charakterystycznych składowych częstotliwościowych w widmach prądów fazowych silnika oraz w widmie modułu wektora przestrzennego prądu [1]. Amplituda tych składowych zależy od nasilenia powyższych zjawisk i może stanowić kryterium oceny stopnia uszkodzenia. Położenie składowych częstotliwościowych wywołanych uszkodzeniami wirnika w widmach sygnałów prądowych zależy od częstotliwości zasilania oraz od poślizgu silnika. Dlatego też informacja o prędkości silnika jest

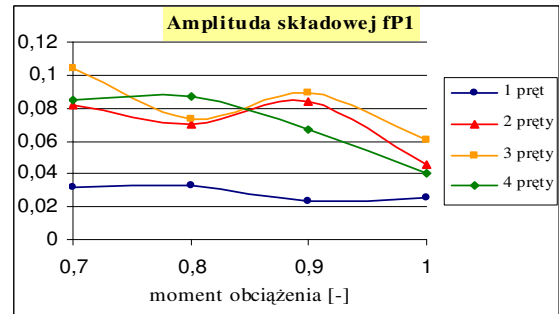
niezbędna do wyznaczenia amplitud harmonicznych uszkodzeniowych.

Na rysunku 1 przedstawiono widmo prądu stojana (a) oraz widmo modułu wektora przestrzennego prądu (b) dla silnika z 4 przerwanymi prętami klatki, przy zasilaniu z falownika o częstotliwości wyjściowej 30Hz.



Rys.1. Widmo prądu stojana (a) oraz widmo modułu wektora przestrzennego prądu (b) dla silnika z 4 przerwanymi prętami klatki, przy zasilaniu z falownika o częstotliwości 30Hz

Widma te zostały obliczone na podstawie zarejestrowanych wcześniej sygnałów prądów silnika, przepuszczonych przez filtr dolnoprzepustowy o częstotliwości odcięcia 100Hz. Stopień uszkodzenia wirnika można ocenić porównując amplitudy charakterystycznych składowych ( $f_{s1}$ ,  $f_{s2}$ ,  $f_{p1}$ ,  $f_{p2}$ ) z amplitudą składowej podstawowej  $f_s$ . Niestety, zależność stopnia uszkodzenia wirnika od amplitud tych składowych jest funkcją nieliniową, zatem do obiektywnej oceny stanu technicznego wirnika nie można stosować prostych zależności algebraicznych. Ponadto wartość tych amplitud zależy nieliniowo od momentu obciążenia silnika, co przedstawiono przykładowo dla harmonicznej  $f_{p1}$  na rys.2. Dlatego najlepszą alternatywą wydaje się zastosowanie metod sztucznej inteligencji, a w szczególności sztucznych sieci neuronowych, które ze względu na swoje właściwości doskonale radzą sobie z nieliniowymi funkcjami wielu zmiennych.



Rys.2. Zależność amplitudy składowej  $f_{p1}$  od momentu obciążenia przy różnych stopniach uszkodzenia

Do realizacji praktycznej detektora uszkodzeń wirnika, przedstawionego w dalszej części referatu, została zastosowana sztuczna sieć neuronowa, która odpowiednio wytrenowana potrafiła rozpoznawać stopień uszkodzenia wirnika silnika zasilanego z falownika.

### 3. Metodyka projektowania neuronowego detektora uszkodzeń wirnika

Efektywność zaprojektowanego detektora uszkodzeń wirnika zależy, między innymi, od doboru odpowiedniej struktury sieci neuronowej zastosowanej w roli klasyfikatora. W praktyce, z uwagi na ograniczone możliwości techniczne sprzętowej realizacji algorytmów sieci neuronowych, projektanci diagnostycznych systemów decyzyjnych zmuszeni są do znalezienia kompromisu pomiędzy stopniem złożoności zastosowanej sieci neuronowej a efektywnością działania urządzenia monitorującego. Na podstawie doświadczeń autorów referatu nabytych podczas kilkuletnich badań związanych z praktyczną realizacją neuronowych detektorów uszkodzeń silników, można stwierdzić, że w przypadku zastosowania sieci neuronowych w roli detektorów stopnia uszkodzenia wirnika, struktura zastosowanej sieci neuronowej ma mniejsze znaczenie. Kluczowym elementem, od którego głównie zależy trafność odpowiedzi zaprojektowanego detektora uszkodzeń, jest właściwie przeprowadzony proces uczenia wybranej sieci neuronowej. Pierwszym etapem projektowania neurodetektora uszkodzeń wirnika jest odpowiedni wybór sygnałów wektora wejściowego, w zależności od warunków pracy silnika. W przypadku, gdy detektor jest przeznaczony do współpracy z silnikiem, w którym zmienia się moment obciążenia, niezbędne jest doprowadzenie do sieci neuronowej sygnału niosącego informację o chwilowej wartości momentu obciążenia silnika. Sygnał

ten może być dostarczony z aparatury realizującej bezpośredni pomiar momentu obciążenia na wale silnika. Takie rozwiązanie jest możliwe w przypadku, gdy na stanowisku pracy badanego silnika jest zamontowany momentomierz, w przeciwnym razie zabudowa dodatkowych czujników jest ekonomicznie nieuzasadniona. Oprócz sygnału dostarczającego bezpośredniej informacji o obciążeniu silnika można wykorzystać również sygnały, które pośrednio zmieniają się pod wpływem zmian obciążenia silnika. Do sygnałów tych można zaliczyć prędkość silnika, poślizg, czy też wartość skuteczną lub średnią prądu.

W przypadku, gdy silnik jest zasilany z przekształtnika częstotliwości, sieć neuronowa powinna otrzymać informacje o częstotliwości wyjściowej falownika, aby detektor mógł poprawnie pracować w szerokim zakresie zmian częstotliwości zadanej.

Kolejny etap to sporządzenie zestawu uczącego i testowego do wytrenowania sieci neuronowej, pracującej w roli detektora. Etap ten jest bardzo czasochłonny i trudny w realizacji. W przypadku, gdy projektant systemu diagnostycznego dysponuje obszerną bazą danych pomiarowych silnika, zarejestrowanych w różnych stanach pracy silnika (przy różnych stopniach uszkodzenia wirnika, przy różnych wartościach momentu obciążenia) zadanie upraszcza się do ekstrakcji właściwych symptomów uszkodzeń wirnika (np. amplitudy charakterystycznych składowych częstotliwościowych widma prądu) oraz sporządzenia dwóch oddzielnych zestawów wejściowych sieci neuronowej – uczącego i testującego. Jeżeli projektant nie dysponuje kompletną bazą reguł diagnostycznych, pochodzących z historycznych danych pomiarowych diagnozowanego silnika, niezbędne jest wygenerowanie takiej bazy na podstawie danych pochodzących z symulacji. W tym celu należy sporządzić model matematyczny silnika z uszkodzoną klatką wirnika i wykonać szereg symulacji, w celu akwizycji odpowiednich danych, które posłużą do budowy bazy wzorców diagnostycznych. Oczywiście stopień powodzenia tego etapu zależy głównie od wierności odzwierciedlenia zjawisk zachodzących w uszkodzonej maszynie za pomocą wybranego modelu matematycznego silnika [5].

Trzecim etapem projektowania detektora uszkodzeń wirnika jest przeprowadzenie procesu uczenia sieci neuronowej. Do wytrenowania sieci neuronowej pracującej w roli detektora

uszkodzeń wirnika najlepiej nadają się algorytmy gradientowe, których przykładem jest algorytm wstecznej propagacji błędu oraz jego zoptymalizowane odmiany [2], [4].

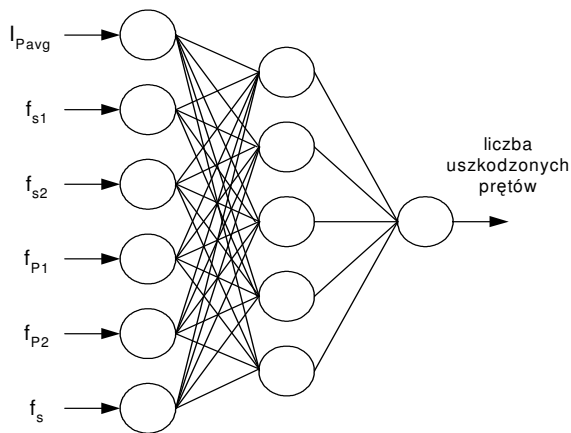
#### 4. Realizacja neuronowego detektora uszkodzeń wirnika

Zadaniem detektora było rozpoznanie stopnia uszkodzenia wirnika w postaci liczby uszkodzonych prętów klatki. Założono, że detektor powinien poprawnie pracować w szerokim zakresie zmian momentu obciążenia (0,5Mn – 1,0Mn) oraz w zakresie zmian częstotliwości falownika z przedziału 30-50Hz. Do realizacji neuronowego detektora uszkodzeń wirnika sporządzono obszerny zestaw danych pomiarowych, na podstawie badań eksperymentalnych przeprowadzonych na stanowisku laboratoryjnym. Dane pomiarowe były rejestrowane przy 3 wartościach częstotliwości zadanej falownika: 30, 40 i 50Hz. Falownik pracował w klasycznym, otwartym układzie sterowania, przy stałym stosunku napięcia do częstotliwości ( $U/f = \text{const.}$ ). Dla każdej z wybranych częstotliwości falownika zarejestrowano po 54 zestawy danych, sporządzonych dla każdego wariantu uszkodzenia wirnika (0-8 pękniętych prętów), przy 6 różnych wartościach momentu obciążenia (0.5, 0.6 ... 0.9, 1.0)Mn. W efekcie otrzymano zbiór 162 zestawów pomiarowych: (3 częstotliwości falownika) x (9 wariantów uszkodzeń) x (6 wartości momentu obciążenia). Otrzymany zbiór danych pomiarowych, zawierających przebiegi prądów trzech faz silnika został wstępnie przetworzony, w wyniku czego obliczono składowe wektorów wejściowych sieci neuronowych. W skład tych sygnałów wchodziły:

- wartość średnia amplitudy modułu wektora przestrzennego –  $I_{Pavg}$ ,
- amplituda składowej częstotliwościowej  $f_{s1}$  widma prądu 1 fazy silnika,
- amplituda składowej częstotliwościowej  $f_{s2}$  widma prądu 1 fazy silnika,
- amplituda składowej częstotliwościowej  $f_{P1}$  widma modułu wektora przestrzennego,
- amplituda składowej częstotliwościowej  $f_{P2}$  widma modułu wektora przestrzennego,
- wartość częstotliwości wyjściowej falownika  $f_s$ .

Macierz sygnałów wejściowych sieci neuronowych została rozdzielona na 2 równe części, stanowiące zestawy uczący i testujący neuro-

nowego detektora uszkodzeń. W rezultacie, każdy z wejściowych zestawów danych sieci neuronowych zawierał 81 wektorów, składających się z 6 sygnałów wejściowych. Przebadano kilkanaście struktur sieci neuronowych, uczonych według algorytmu przedstawionego w [3]. W efekcie otrzymano kilka optymalnie wytrenowanych struktur sieci, które poprawnie nauczyły się rozpoznawać stopień uszkodzenia wirnika na podstawie danych wektora wejściowego. Rysunek 3 przedstawia przykładową strukturę sieci neuronowej wykorzystanej do realizacji detektora uszkodzeń wirnika.



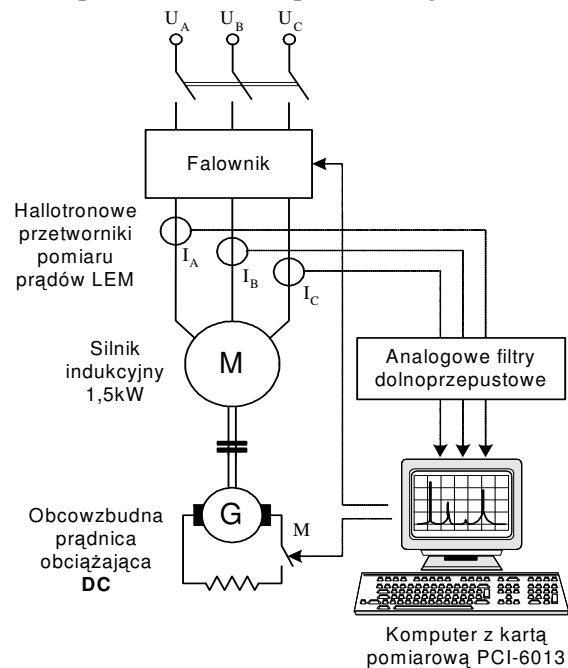
Rys.3. Schemat sieci neuronowej o topologii 6-5-1 do wykrywania uszkodzeń wirnika

## 5. Budowa sprzętowa neurodetektora

Neuronowy detektor uszkodzeń wirnika silnika indukcyjnego został zaprojektowany do pracy na stanowisku laboratoryjnym z silnikiem indukcyjnym o mocy 1,5kW zasilanym z falownika MSI. Badany silnik posiadał zestaw wymiennych wirników, w których zamodelowano różny stopień uszkodzenia, poprzez przewiercenie wybranych prętów klatki na odpowiednią głębokość. Silnik był sprzęgnięty z obcowzbudną prądnicą prądu stałego, która stanowiła maszynę obciążającą o płynnie regulowanej wartości prądu wzbudzenia oraz prądu twornika.

Tor pomiarowy prądów fazowych silnika składał się z hallotronowych przetworników prądu firmy LEM, wraz z układem wzmacniaczy, dopasowujących sygnały wyjściowe do odpowiednich poziomów napięciowych ( $\pm 10V$ ) wejść przetworników A/C karty pomiarowej. W przypadku zasilania silnika z przemiennika częstotliwości, w sygnałach prądów fazowych mogą pojawić się składowe harmoniczne, o

częstotliwościach przekraczających częstotliwość próbkowania toru pomiarowego.



Rys.4. Schemat stanowiska laboratoryjnego

Efektom tego jest powstanie zjawiska aliasingu, prowadzącego do poważnych błędów pomiarowych, które są szczególnie niebezpieczne w przypadku analizy spektralnej mierzonych sygnałów. Dlatego też, w torze pomiaru prądów silnika wbudowano zestaw analogowych filtrów dolnoprzepustowych, które skutecznie eliminują efekt ewentualnych przekłamań pojawiających się na drodze cyfrowego przetwarzania sygnałów. Na rysunku 3 przedstawiono schemat blokowy stanowiska laboratoryjnego.

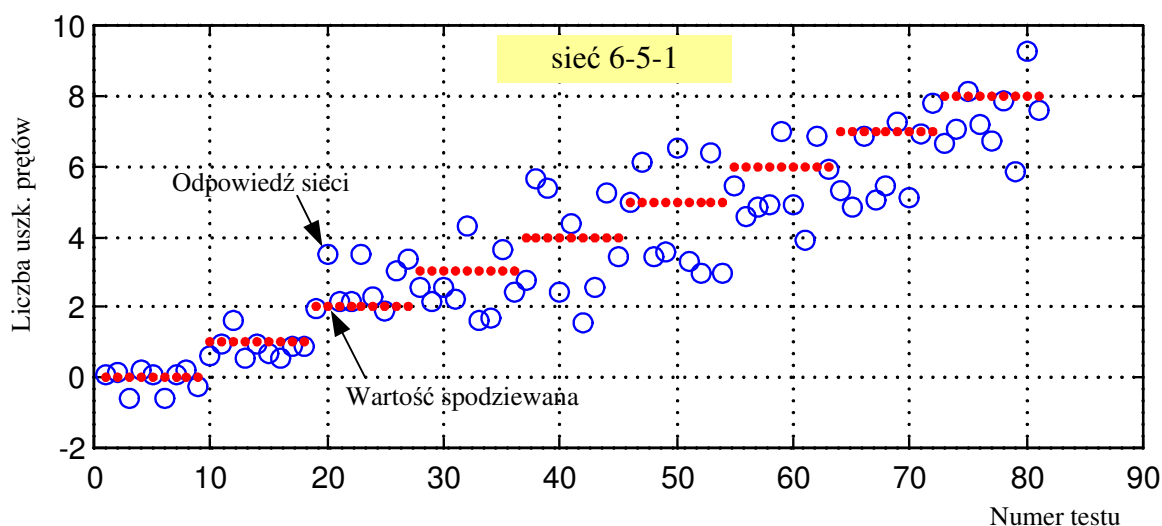
Do realizacji algorytmu neuronowego detektora uszkodzeń wirnika zastosowano komputer PC z tanią kartą pomiarową typu *PCI-6013*. Oprogramowanie detektora zostało napisane w języku *Object Pascal* pakietu *Borland Delphi 7.0*.

## 6. Wyniki testów neurodetektora na obiekcie rzeczywistym

Badania eksperymentalne neurodetektorów uszkodzeń wirnika silnika indukcyjnego były wykonywane w czasie rzeczywistym, w stanie pracy ustalonej silnika. Poszczególne testy przeprowadzono w różnych warunkach obciążenia silnika przy różnych nastawach częstotliwości falownika. Przebadano kilkanaście struktur sieci neuronowych, z których najlepszą okazała się sieć o topologii 6-5-1. Sieć ta, pomimo prostej budowy bezbłędnie potrafiła od-

różnić przypadek „zdrowego” wirnika od uszkodzonego, a ponadto z dużą dokładnością podawała stopień uszkodzenia wirnika w postaci liczby uszkodzonych prętów. Na rysunku 5 przedstawiono zestawienie odpowiedzi tej sieci na poszczególne testy, które przeprowadzono dla wszystkich wariantów uszkodzeń klatki wirnika. Z rysunku wynika, że maksy-

malny błąd odpowiedzi sieci nie przekracza 2 przerwanych prętów. Uzyskana dokładność detektora jest w zupełności wystarczająca, gdyż podczas eksploatacji maszyny dla użytkownika najbardziej istotna jest sygnalizacja wstępnej fazy rozwoju uszkodzenia, które ma z reguły charakter postępujący.



Rys.5. Odpowiedzi sieci neuronowej 6-5-1 na poszczególne testy

## 7. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że metoda analizy częstotliwościowej sygnałów prądowych silnika pozwala na zbudowanie skutecznej aparatury diagnostycznej do wykrywania uszkodzeń wirników silników indukcyjnych zasilanych z przemiennika częstotliwości. Pomimo to, że zaprezentowany detektor został przetestowany na stanowisku laboratoryjnym z silnikiem małej mocy, uzyskane wyniki pozwalają mieć nadzieję, że po odpowiedniej modyfikacji programowej i sprzętowej możliwe jest wykonanie aparatury diagnostycznej do monitorowania stanu wirników silników dużej mocy.

## Literatura

- [1]. Cruz S.M., Cardoso A.J.M., *Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors by the synchronous reference frame current Park's Vector approach*, International Conference On Electrical Machines ICEM 2000, 28-30 August 2000, Espoo (Finland), pp.776-780
- [2]. Kowalski Cz.T., Pawlak M., *Zastosowanie metody analizy wektora przestrzennego prądu stojana do wykrywania uszkodzeń w silnikach indukcyjnych*, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 7- 8, 2004

- [3]. Kowalski Cz.T., Pawlak M., *Application of AI methods for rotor faults detection of the induction motor*, Proc. of 10<sup>th</sup> European Power Electronics Conference EPE'2003, Toulouse, France, 2003
- [4]. Pawlak M., Kowalski Cz.T., *Zastosowanie neuronowego detektora do monitorowania i diagnostyki wirników klatkowych silników indukcyjnych*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, Nr 69, 2004, str. 111-116
- [5]. Pawlak M., *Uproszczony model silnika klatkowego z uszkodzonym wirnikiem*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, nr 56, 2004

## Autorzy

Mgr inż. Marcin Pawlak

E-mail: [marcin.pawlak@pwr.wroc.pl](mailto:marcin.pawlak@pwr.wroc.pl)

Dr inż. Czesław T. Kowalski

E-mail: [czeslaw.t.kowalski@pwr.wroc.pl](mailto:czeslaw.t.kowalski@pwr.wroc.pl)

Politechnika Wrocławska

Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

Ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław