

Rafał Nowak  
Politechnika Łódzka, Łódź

## WYBRANE ALGORYTMY STEROWANIA SILNIKAMI Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

### SELECTED CONTROL ALGORITHMS OF PERMANENT MAGNET MOTORS

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wybrane algorytmy sterowania silnikami z magnesami trwałymi: silnikami bezszczotkowymi prądu stałego BLDC oraz silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi PMSM. Maszyny takie pomimo zbliżonej konstrukcji mechanicznej diametralnie różnią się pod względem opisu modelu matematycznego, co za tym idzie sposób ich sterowania jest inny. W publikacji ukazano analogię opisywanych metod do strategii sterowania komutatorowego silnika prądu stałego. Zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych opisywanych algorytmów. Omówiono kwestię dwustrefowego sterowania prędkością kątową wału. Podano wytyczne dla konstruktorów układów sterowania ułatwiające podejmowanie decyzji dotyczących wyboru danego rozwiązania, jak i jego późniejszej implementacji. Omówiono wybrane aspekty konstrukcji przekształtników energoelektronicznych wykorzystywanych do sterowania silników z magnesami trwałymi.

**Abstract:** The paper presents the selected control algorithms of permanent magnet motors: brushless direct-current motors BLDC and permanent magnet synchronous motors PMSM. Such machines despite their similar mechanical structure have an entirely different mathematical model and therefore their control algorithms are different. The publication shows the analogy between the described methods and the control strategy of a brushed DC motor. The results of the simulation tests of the described algorithms were presented. The issue of two-zone control angular velocity of the shaft is discussed. The article provides guidance for designers of control systems to facilitate decision-making regarding the selection of the solution and its subsequent implementation. It discusses some selected aspects of the construction of power converters used to control permanent magnet motors.

**Słowa kluczowe:** silniki synchroniczne z magnesami trwałymi PMSM, silniki bezszczotkowe prądu stałego BLDC, sterowanie wektorowe

**Keywords:** permanent magnet synchronous motors PMSM, brushless direct-current motors BLDC, vector control

### 1. Wstęp

Silniki z magnesami trwałymi, ze względu na wysoką sprawność, prostą budowę oraz dużą gęstość mocy, są obecnie najczęściej wykorzystywanymi rodzajami maszyn elektrycznych w różnego rodzaju pojazdach elektrycznych [1]. Dominują wśród nich dwie konstrukcje: silniki synchroniczne z magnesami trwałymi PMSM (ang. Permanent Magnet Synchronous Motor) o sinusoidalnym rozkładzie siły elektromotorycznej oraz bezszczotkowe silniki prądu stałego (ang. BrushLess Direct-Current motor) o trapezoidalnym rozkładzie siły elektromotorycznej [2, 3].

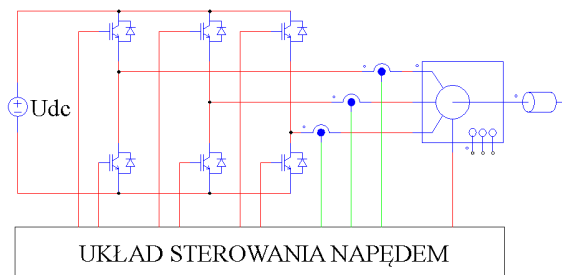
Wybór konkretnego układu napędowego do danej aplikacji podyktowany jest względami technicznymi, takimi jak moc silnika, możliwe do zaakceptowania oscylacje momentu elektromagnetycznego czy właściwości regulacyjne oraz ograniczeniami ekonomicznymi. Konsekwencją

podjętych decyzji projektowych staje się wybór układu sterującego pracą napędu. O ile konstrukcje części silnopędowych przekształtników energoelektronicznych dedykowanych do zasilania tego typu maszyn w obu przypadkach są do siebie zbliżone, to w przypadku algorytmów sterowania już tak nie jest.

### 2. Topologia przekształtników stosowanych do sterowania silników z magnesami trwałymi

Zarówno silniki synchroniczne z magnesami trwałymi, jak i bezszczotkowe silniki prądu stałego są maszynami elektrycznymi sterowanymi za pośrednictwem przekształtnika energoelektronicznego. Rozważając klasyczne konstrukcje trójfazowe, w obu przypadkach magnesy trwałe umiejscowione są zazwyczaj na wirniku maszyny, natomiast uzwojenia stojana podłączone

są do przekształtnika, którego typową część silnoprądową stanowi sterowany mostek trójfazowy, zbudowany z tranzystorów IGBT lub MOSFET. Przekształtnik jest układem o charakterze dyskretnym, zatem zadanie wytworzenia określonej wartości napięcia jest w nim realizowane poprzez załączenie określonej sekwencji sygnałów sterujących jego kluczami. Każdy ze stanów kluczy tranzystorowych odpowiada zwieraniu odpowiedniej fazy silnika do dodatniego lub ujemnego zacisku obwodu zasilania [4]. Schemat typowego przekształtnika wykorzystywanego w układach napędowych z silnikami z magnesami trwałymi przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat napędu z silnikiem trójfazowym z magnesami trwałymi.

### 3. Sterowanie silnikami BLDC

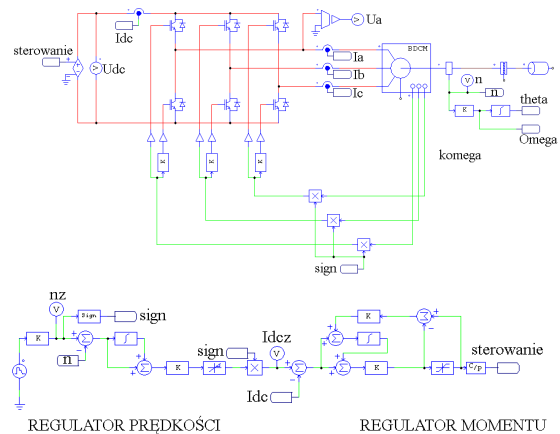
Silnik BLDC można przyrównać do klasycznego silnika prądu stałego wzbudzanego magnesami trwałymi, w którym za odpowiednie przełączanie zasilania uzwojenia twornika odpowiada komutator mechaniczny. Moment rozwijany na wale takiego silnika zależy od konstrukcji maszyny, użytych do jego budowy magnesów trwałych (decydują one o wartości uzyskiwanego strumienia magnetycznego) oraz prądu przepływającego przez uzwojenie twornika.

W przypadku konstrukcji bezszczotkowej rolę komutatora pełni przekształtnik energoelektroniczny noszący nazwę sterownika silnika. Informacja o bieżącym położeniu wirnika, konieczna do poprawnego załączenia kluczy sterownika, uzyskiwana jest na podstawie sygnałów z czujników Halla, rozłożonych na obwodzie stojana silnika co 120°.

Dokonując podziału strategii sterowania silnikiem BLDC, ze względu na wielkość regulowaną można wyróżnić dwie kategorie. Do pierwszej zaliczane są metody napięciowe (wówczas wielkością regulowaną jest napięcie zasilające uzwojenie stojana silnika), do drugiej metody prądowe (wówczas wielkością regulowaną jest prąd płynący przez poszczególne fazy silnika) [5, 6, 7].

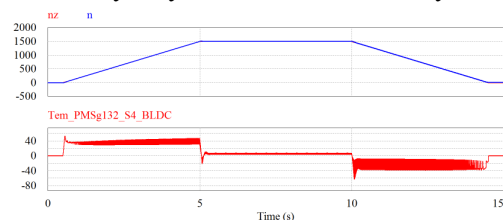
Wykorzystując sterowanie napięciowe, koniecznym staje się rozbudowanie przekształtnika energoelektronicznego o przetwornicę DC/DC, zasilającą obwód pośredniczący sterownika silnika. Nierzadko istotne jest odzyskiwanie energii podczas hamowania, sytuacja taka jest powszechna w przypadku pojazdów elektrycznych zasilanych z baterii akumulatorów. Wówczas wspomniana przetwornica musi charakteryzować się dwukierunkowym przepływem energii, co dodatkowo komplikuje jej strukturę i podnosi koszty budowy urządzenia.

Schemat blokowy napięciowego algorytmu sterowania został przedstawiony na rysunku 2. Wykorzystano kaskadowe połączenie regulatora momentu z nadrzędnym regulatorem prędkości. Pomiar prądu dokonywany jest na wyjściu obwodu pośredniczącego, natomiast do pomiaru prędkości wykorzystano czujnik umieszczony na wale silnika.



Rys. 2. Schemat blokowy napięciowego algorytmu sterowania silnikiem BLDC

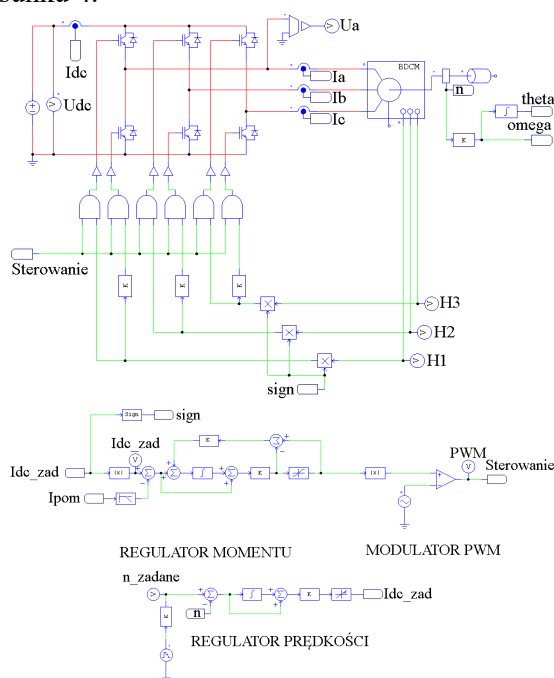
Układ taki charakteryzuje się dobrymi właściwościami dynamicznymi - przebiegi wybranych wielkości fizycznych zamieszczono na rys. 3.



Rys. 3. Przebiegi wybranych wielkości fizycznych (prędkości zadanej, prędkości mierzonej na wale silnika oraz momentu elektromagnetycznego), będących wynikiem badań symulacyjnych napięciowego algorytmu sterowania silnikiem BLDC

Prądowe metody sterowania silnikiem BLDC wypadają korzystniej pod kątem złożoności układu. Nie jest konieczna dodatkowa rozbudowa części silnoprowądowej sterownika, a funkcję regulacyjną pełnią klucze użyte do budowy trójfazowego mostka sterowanego.

Schemat blokowy prądowego algorytmu sterowania silnikiem BLDC przedstawiono na rysunku 4.



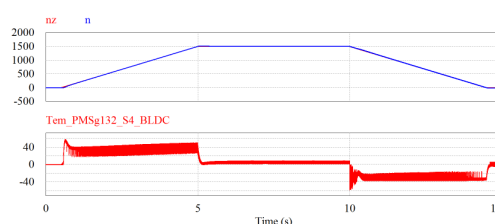
Rys. 4. Schemat blokowy prądowego algorytmu sterowania silnikiem BLDC

Również w tym przypadku wykorzystano kaskadowe połączenie podporządkowanego regulatora momentu z nadrzędnym regulatorem prędkości.

W przypadku sterowania prądowego, w zależności od tego przez jaki czas tranzystory mostka sterowanego pełnią funkcję regulacyjną, można dokonać jego podziału na podkategorie: strategia C60Q+, C60Q-, C120Q+, C120Q- oraz sterowanie bipolarne, w którym to rolę regulacyjną pełnią zarówno klucze z grupy zaworów dodatnich jak i ujemnych, w chwilach gdy są one załączone przez układ sterowania komutatora elektronicznego. Głównym powodem stosowania różnych strategii sterowania kluczami jest ograniczenie strat dynamicznych w tranzystorach, co dokładnie opisano w artykule [5].

Pewną trudnością w przypadku fizycznej realizacji przekształtnika jest dokonywanie pomiaru prądu płynącego w obwodzie pośredniczącym. Wynika to z konstrukcji połączeń mechanicz-

nych pomiędzy głównym kondensatorem obwodu pośredniczącego a biegunami zasilania mostka trójfazowego. Newralgiczną kwestią jest tutaj uzyskanie połączeń bezindukcyjnych, dzięki czemu podczas przełączeń kluczy nie występują przepięcia, które są groźne dla przyrządów półprzewodnikowych. Każda ingerencja w to połączenie powoduje wzrost indukcyjności. Można jednak zrezygnować z kłopotliwego pomiaru, a w zamian dokonywać obliczania prądu pobieranego z obwodu pośredniczącego na podstawie pomiarów prądów fazowych i zastosowania prostownika fazoczułego [8]. Kosztem jaki trzeba w tym przypadku ponieść jest zwiększenie złożoności układu oraz ilości użytych czujników pomiarowych (w przypadku silnika trójfazowego trzeba wówczas wykorzystać przynajmniej dwa czujniki pomiaru prądu). Wyniki badań symulacyjnych obrazujące jakość sterowania układem napędowym z silnikiem BLDC sterowanym z wykorzystaniem algorytmu prądowego zaprezentowano na rys. 5.



Rys. 5. Przebiegi wybranych wielkości fizycznych (prędkości zadanej, prędkości mierzonej na wale silnika oraz momentu elektromagnetycznego), będących wynikiem badań symulacyjnych prądowego algorytmu sterowania silnikiem BLDC

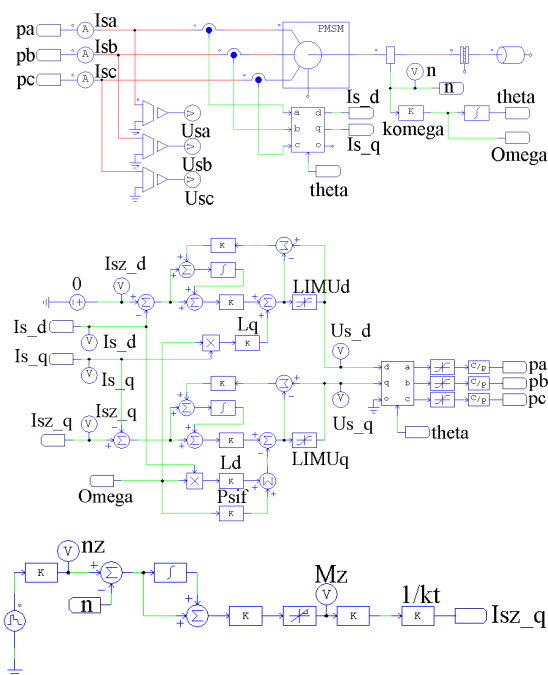
W przypadku sterowania silnikiem BLDC nie ma możliwości osłabienia strumienia wzbudzenia maszyny, a co za tym idzie efektywnej pracy w drugiej strefie sterowania prędkością (gdy moc przepływająca przez maszynę jest stała). Aby móc uzyskać większe prędkości kątowne wału silnika, konieczne jest zwiększenie napięcia zasilającego obwód pośredniczący przekształtnika. Nie należy przy tym oczywiście przekraczać wartości maksymalnych poszczególnych wielkości fizycznych wynikających z dopuszczalnego obszaru pracy napędu [9].

Ważnym aspektem w przypadku stosowania silników bezszczotkowych prądu stałego jest minimalizacja kosztów napędu. Często do pomiaru prędkości kątowej wału silnika, zamiast dedykowanego czujnika pomiarowego, wykorzystuje się informacje z czujników Halla umie-

szczonych na obwodzie stojana maszyny. Pomiar taki jest wiarygodny jedynie w zakresie dużych prędkości.

#### 4. Sterowanie silnikami PMSM

Tak jak w poprzednim punkcie sterowanie silnika BLDC przyrównano do sterowania silnika prądu stałego z komutatorem mechanicznym, tak też można uczynić z silnikiem PMSM. Należy wówczas skorzystać ze sterowania wektorowego. Schemat blokowy jednego z wariantów takiego algorytmu, tzw. sterowania połowo zorientowanego, przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat blokowy wektorowego algorytmu sterowania silnikiem PMSM

Sterowanie połowo zorientowane osadzone jest w wirującym układzie współrzędnych, którego oś rzędnych oznaczana literą d pokrywa się z wektorem strumienia pola magnetycznego. Prąd stojana w takim układzie współrzędnych usytuowany jest pod pewnym kątem w stosunku do osi rzędnych i można dokonać jego rozkładu na dwie ortogonalne składowe  $I_d$  oraz  $I_q$ . Dzięki takiej dekompozycji uzyskuje się dwa niezależne tory sterowania poszczególnymi składowymi. Zależność pozwalająca obliczyć moment elektromagnetyczny generowany w silniku synchronicznym z magnesami trwałymi przedstawia się następująco:

$$M_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot [\psi_f I_q + (L_d - L_q) I_d I_q] \quad (1)$$

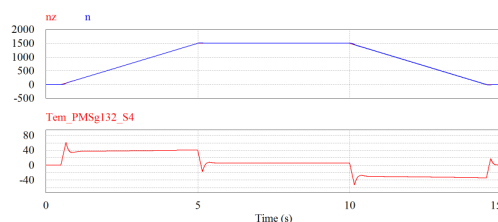
Natomiast zależność na strumień stojana:

$$\psi_s = \sqrt{\psi_f^2 - [(L_d I_d)^2 + (L_q I_q)^2]} \quad (2)$$

gdzie:

- $M_e$  – moment elektromagnetyczny silnika
- $p$  – liczba par biegunów
- $I_d$  – prąd w osi d
- $I_q$  – prąd w osi q
- $L_d$  – indukcyjność w osi d
- $L_q$  – indukcyjność w osi q
- $\psi_f$  – strumień skojarzony pochodzący od magnesów trwałych
- $\psi_s$  – strumień skojarzony stojana

Z powyższych formuł wynika, iż bezpośrednie sterowanie poszczególnymi składowymi nie zapewnia przełożenia na niezależne sterowanie momentem elektromagnetycznym i strumieniem magnetycznym, gdyż struktura taka nie jest odsprężona, występują w niej tzw. sprzężenia skrośne. Aby uzyskać możliwość niezależnej regulacji momentu elektromagnetycznego i „wzbudzenia” silnika konieczne jest dodanie kolejnych sprzężeń pomiędzy torami regulacji prądów w osi d i q, co zaprezentowano na rysunku 6.



Rys. 7. Przebiegi wybranych wielkości fizycznych (prędkości zadanej, prędkości mierzonej na wale silnika oraz momentu elektromagnetycznego), będących wynikiem badań symulacyjnych wektorowego algorytmu sterowania silnikiem PMSM

Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi wypada dużo korzystniej od silnika bezszczotkowego prądu stałego pod względem oscylacji momentu elektromagnetycznego. Dodatkowo umożliwia dwustrefową regulację prędkości kątowej wału poprzez odpowiednią regulację składowych prądu stojana [10]. Dzięki takiemu podejściu nie jest wymagane dodatkowe rozbudowanie struktury falownika, rozbudowa funk-

cyjności sprowadza się do rozbudowy oprogramowania sterownika przekształtnika energoelektronicznego.

## 5. Implementacja algorytmów sterowania silnikami z magnesami trwałymi

Praktyczna realizacja opisanych algorytmów sterowania wymaga wykorzystania jednostek obliczeniowych zdolnych do przeprowadzenia stosownych wyliczeń w czasie rzeczywistym. Oznacza to, iż wyniki będące efektem realizacji pętli regulacji muszą być uzyskane w czasie krótszym niż okres impulsowania wynikający z częstotliwości pracy przekształtnika energoelektronicznego.

W przypadku silników BLDC kwestia implementacji algorytmów wygląda korzystniej, struktury sterowania są prostsze, przez co nakład obliczeniowy jest mniejszy. Dzięki temu można wykorzystać mikrokontrolery o stosunkowo niewielkiej mocy obliczeniowej.

Silniki PMSM są pod tym względem bardziej wymagające. Struktury sterowania są dużo bardziej rozbudowane. Aby im sprostać można wykorzystać stałoprzecinkowe procesory sygnałowe. Należy wówczas obliczenia przeprowadzać jedynie w arytmetyce stałoprzecinkowej a gdy tylko jest to możliwe to wykonać je off-line i wyniki zaimplementować w pamięci programu (tzw. look-up table) [11].

W celu dokonania implementacji najbardziej wyrafinowanych algorytmów sterowania silnikami z magnesami trwałymi, w tym sterowania bezczujnikowego oraz sterowania odporowego, których prezentacja wykracza poza ramy niniejszego artykułu, konieczne jest wykorzystanie mikroprocesorów zmiennoprzecinkowych oraz układów rekonfigurowalnych FPGA [12, 13].

## 6. Podsumowanie

W artykule opisano jedynie wybrane algorytmy sterowania silnikami z magnesami trwałymi. Starano się ukazać ich analogię do sterowania silnika prądu stałego z komutatorem mechanicznym. Pełen przegląd metod sterowania tego typu maszynami elektrycznymi wykracza poza zakres artykułu, natomiast przegląd pozycji monograficznych [14, 15] stanowi bogate źródło informacji z zakresu sterowania opisywanych w niniejszej publikacji silników.

## 7. Literatura

[1]. Bernatt J., Gawron S., Król E.: *Zastosowania trakcyjne nowoczesnych silników z magnesami*

*trwałymi*. Przegląd Elektrotechniczny, 12.2009, s. 20-23.

[2]. Glinka T., Jakubiec M.: *Silniki elektryczne z magnesami trwałymi umieszczonymi na wirniku*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, Nr 71/2005, s. 103-112.

[3]. Gawron S.: *Wybrane, innowacyjne projekty maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi i ich praktyczne zastosowania*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Nr 1/2016, s. 1-10.

[4]. Nowak R., Chudzik P., Sobieraj T.: *Wektorowy falownik napięciowy z pomiarem rzeczywistego napięcia wyjściowego*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, Nr 2/2013, s. 179-183.

[5]. Domaracki A., Krykowski K.: *Silniki BLDC – klasyczne metody sterowania*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, Nr 72/2005, s. 155-159.

[6]. Krish D., Samskriti, Vittal K. P.: *Review of Developments in BLDC Motor Controllers Along with Study of Four-quadrant Operation and Active Power Factor Correction*. 978-1-4799-1876-8/15, 2015 IEEE, s. 193-198.

[7]. Vinatha U., Swetha P., Vittal K. P.: *Recent Developments in Control Schemes of BLDC Motors*. 1-4244-0726-5/06, 2006 IEEE, s. 477-482.

[8]. Dixon W. J., and Leal I. A.: *Current Control Strategy for Brushless DC Motors Based on a Common DC Signal*. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 17, No. 2, March 2002, s. 232-240.

[9]. Dębowski A., Nowak R.: *Wyznaczanie dopuszczalnego obszaru pracy trakcyjnego napędu asynchronicznego*. Przegląd Elektrotechniczny, 4b.2012, s. 47-52.

[10]. Król E.: *Silniki synchroniczne w napędach pojazdów sportowo-rekreacyjnych*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, Nr 2/2014, s. 23-27.

[11]. Rudnicki T., Czerwiński R., Fręchowicz A.: *Układy sterowania silnikiem PMSM*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, Nr 90/2011, s. 51-55.

[12]. Han-Chen W., Min-Yi W., Ching-Chang W.: *Speed Control of BLDC Motors Using Hall Effect Sensors Based on DSP*. 978-1-4673-8966-2/16, 2016 IEEE, s. 1-4.

[13]. Reddy B. P., Murali A.: *SoC FPGA-Based Field Oriented Control of BLDC Motor Using Low Resolution Hall Sensor*. 978-1-5090-3474-1/16, 2026 IEEE, s. 2941-2945.

[14]. Glinka T.: *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002, ISBN 83-7335-087X.

[15]. Zawirski K.: *Sterowanie silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005, ISBN 83-7143-3379.

**Autor**

dr inż. Rafał Nowak, Politechnika Łódzka,  
Instytut Automatyki  
ul. Stefanowskiego 18/22  
90-924 Łódź, email:  
rafal.nowak@p.lodz.pl