

Wojciech Herman, BOT Elektrownia Opole SA, Brzezie  
Jerzy Hickiewicz, Marcin Kamiński, Krystyna Macek-Kamińska, Politechnika Opolska

## SILNIKI INDUKCYJNE KLATKOWE O PODWYŻSZONEJ SPRAWNOŚCI W ELEKTROWNIACH

### HIGH-EFFICIENCY INDUCTION SQUIRREL-CAGE MOTORS IN POWER PLANTS

**Abstract:** This short document describes the possibility of replacing standard electrical motors with high-efficiency models in power plants. Two different drives – the coal mill and the primary air fan – are presented. In both of them the replacement of the standard motors with their energy-saving counterparts is considered. The economic assessment of this replacement is included. The paper also compares these two types of electrical motors with two different drives options, taking into account their dynamic and usage qualities.

#### 1. Wstęp

Silniki indukcyjne energooszczędne w stosunku do silników standardowych wyróżniają się przede wszystkim większymi wartościami znamionowej sprawności. Łączy się z tym mniejsza wartość znamionowego poślizgu. W silnikach tych stosowane są mniejsze gęstości prądu w uzwojeniach oraz niższe wartości indukcji magnetycznej w rdzeniu niż w silnikach standardowych. Powoduje to obniżenie strat mocy i ustalonych przyrostów temperatury uzwojenia przy znamionowym obciążeniu. Silniki te posiadają zwykle specjalną, staranniejszą konstrukcję węzłów łożyskowych, pozwalającą na zmniejszenie szczeliny pomiędzy stojanem a wirnikiem. Z tego względu, a także z uwagi na potrzebę odprowadzenia mniejszych strat mocy, a tym samym mniej intensywny układ wentylacyjny, posiadają wyraźnie mniejsze straty mechaniczne. W efekcie posiadają większą masę, a ceny ich są wyższe niż standardowych odpowiedników. Silniki energooszczędne oprócz lepszych wskaźników ekonomicznych wyróżniają się również niższym poziomem drgań i emitowanego hałasu, a także większą niezawodnością i trwałością. Przykładowe porównanie parametrów eksploatacyjnych silników 6 kV standardowych i wysokosprawnych o tej samej mocy znamionowej pokazuje niekiedy znaczne różnice ich parametrów, również takich jak krotność momentu rozruchowego i krotność momentu maksymalnego. Biorąc pod uwagę relatywnie niskie ceny energii elektrycznej bezpośrednio u wytwórcy, elektrownia nie wydaje się być najlepszym obiektem, w którym można uzyskać krótkie okresy zwrotu nakładów inwestycyjnych, związanych z zastosowaniem

silników energooszczędnych. Jednak w przypadku elektrowni można brać pod uwagę również składniki oszczędności wynikające ze zmniejszenia emisji zanieczyszczeń do atmosfery. Dodatkowe korzyści to działania na rzecz ochrony środowiska w postaci zmniejszenia poziomu hałasu emitowanego przez układy napędowe. W literaturze krajowej przeprowadzono szacunki oszczędności, jakie mogą wynikać z zastosowania silników energooszczędnych w napędach potrzeb własnych elektrowni. W opracowaniu [1] z 2001 roku autor szacuje, że w ośmiu największych krajowych elektrowniach węglowych można na skutek racjonalizacji użytkowania energii elektrycznej uzyskać rocznie, w skali całego kraju, oszczędności około 279 tys. MWh, co przy cenie 130 zł/MWh może dać oszczędność rzędu 36 milionów zł. W opracowaniu [2] z 2003 roku autor ocenia, że oszczędności, jakie można uzyskać poprzez wymianę silników 6 kV na silniki energooszczędne dla typowego bloku energetycznego 200 MW mogą wynieść nawet 580 tys. zł rocznie. W opracowaniu [3] przeprowadzono z kolei szacunek oszczędności dla bloku energetycznego 360 MW, oceniając je w przybliżeniu na 165 tys. zł rocznie. Faktyczne oszczędności mogą okazać się niższe od szacowanych, bo decyzję o wymianie silników należy podejmować wyłącznie po przeprowadzeniu szczegółowej analizy ekonomicznej dla danej grupy napędów, biorąc pod uwagę czas pracy napędu, stopień jego obciążenia itp. Dodatkowo, uwzględniając warunki eksploatacyjne danej grupy napędów, konieczne jest sprawdzenie poprawności doboru silnika ener-

gooszczędnego do napędu pod względem dynamicznym, a przede wszystkim sprawdzenie jego własności rozruchowych.

## 2. Zasady oceny ekonomicznej zastosowania silników energooszczędnych

Zagadnieniu kosztów przetwarzania energii elektrycznej przez silniki indukcyjne poświęcono wiele prac [4], [5]. Opracowano również programy wspomagające podejmowanie decyzji przy wymianie silników standardowych na energooszczędne [6]. Problemy oceny efektywności ekonomicznej takiej wymiany, uwzględniając różnice sprawności silników w wykonaniu standardowym i energooszczędnym, sprowadzają się zwykle do określenia:

- oszczędności zużycia energii elektrycznej,
- zmniejszenia zadeklarowanego poziomu zapotrzebowania mocy,
- zmniejszenia kosztów zużycia energii elektrycznej,
- zmniejszenia kosztów zapotrzebowania mocy,
- całkowitej wartości oszczędności, jako sumy wartości zaoszczędzonej energii i wartości zmniejszenia kosztów zapotrzebowania mocy,
- dopłaty inwestycyjnej, jako różnicy między kosztem zabudowy silnika energooszczędnego i standardowego – dopłata ta utożsamiana jest z całością nakładów inwestycyjnych,
- prostego okresu zwrotu nakładów, jako ilorazu dopłaty inwestycyjnej i całkowitej wartości oszczędności.

Do wstępnego oszacowania skutków ekonomicznych wystarczające jest zwykle określenie prostego okresu zwrotu nakładów. Do bardziej dokładnych obliczeń konieczne jest określenie stopy dyskonta, a następnie dyskontowanego okresu zwrotu nakładów.

Przeprowadzenie obliczeń ekonomicznych wymaga dysponowania zarejestrowanymi przebiegami mocy pobieranej przez poszczególne silniki wszystkich rozpatrywanych grup napędów w postaci grafików obciążenia dobowego, a także w dłuższym horyzoncie czasowym. Potrzebna jest też znajomość jednostkowych cen energii elektrycznej oraz wysokości opłat za zapotrzebowanie mocy w poszczególnych strefach czasowych.

## 3. Możliwości oceny dynamicznej poprawności doboru silnika do napędu

Do oceny poprawności doboru, pod względem dynamicznym, silnika indukcyjnego do urządzenia napędzanego mogą posłużyć proste obwodowe modele matematyczne, sformułowane przy założeniach: symetrii budowy maszyny, liniowości charakterystyk magnesowania, jednonarmonicznego rozkładu pola magnetycznego w szczelinie i pominięciu strat w rdzeniu magnetycznym. W przypadku dużych silników głębokożłobkowych występuje wyraźna nierównomierność rozkładu gęstości prądu w przekroju pręta wirnika. Zależy ona głównie od wymiaru promieniowego pręta, jak i częstotliwości strumienia rozproszenia w wirniku. Przyjmuje się wówczas dyskretyzację pręta względem zmiennej promieniowej i zastępuje obwód wirnika kilkoma obwodami zastępczymi o stałych wartościach parametrów elektromagnetycznych. Obwodowe modele matematyczne [7] sprowadzają się do układów nieliniowych równań różniczkowych obwodów elektrycznych stojana i wirnika, które mogą być przedstawione w zapisie macierzowym:

$$U = L \frac{dI}{dt} + Z(\omega)I;$$

uzupełnionych równaniem ruchu:

$$\frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_m;$$

w którym moment elektromagnetyczny:

$$M_e = \frac{3}{2} \frac{X_M}{\omega_o} [I_s]_t \{ [I_{r1}] + [I_{r2}] + \dots \};$$

gdzie:

$U, I, I_s, I_{r1}, I_{r2}, L, Z$  – odpowiednio macierze napięć, prądów (stojana, obwodów zastępczych wirnika), indukcyjności, impedancji,  
 $\omega$  – prędkość kątowna wirnika,  
 $\varphi$  – kąt obrotu wirnika względem stojana,  
 $J$  – moment bezwładności,  
 $p$  – liczba par biegunów,  
 $X_m$  – reaktancja magnesowania,  
 $\omega_o$  – pulsacja,  
 $M_m$  – moment obciążenia.

W macierzach indukcyjności i impedancji występują parametry elektromagnetyczne modelu matematycznego takie jak: rezystancje obwodu stojana i obwodów zastępczych wirnika oraz indukcyjności, związane z głównym strumieniem magnetycznym oraz indukcyjności związane ze strumieniami rozproszenia obwodu stojana, a także zastępczych obwodów wirnika. Ważnym problemem, poprzedzającym obliczenia symulacyjne, jest identyfikacja parametrów

elektromagnetycznych modelu. W tym celu wykorzystano metodę [8], polegającą na wyznaczeniu parametrów na podstawie zdjętej pomiarowo charakterystyki mechanicznej. Modele dynamiczne [7] były używane do testowania poprawności doboru silników napędów potrzeb własnych, aktualnie pracujących w jednej z krajowych elektrowni. Był opracowany katalog [7] parametrów silników WN, zastosowanych w napędach potrzeb własnych bloku 360 MW, były przeprowadzone badania symulacyjne i weryfikacja pomiarowa wyników obliczeniowych [9]. W przypadku wymiany silników standardowych na energooszczędne istniałaby możliwość wykorzystania opracowanych modeli do sprawdzających obliczeń dynamicznych, musi to być jednak poprzedzone wyznaczeniem parametrów elektromagnetycznych modeli silników energooszczędnych. W tym celu zaktualizowano metodę wyznaczania parametrów [10] [11] oraz metodę obliczeń symulacyjnych [12].

#### 4. Przykłady możliwości wymiany silników standardowych na energooszczędne

Silniki pracujące w elektrowniach są to przede wszystkim silniki krajowej produkcji, już dość dawno wyprodukowane. Można zatem rozważać ewentualność wymiany tych silników na nowe – energooszczędne. Rozpatrzono dwa przypadki napędów: młyna węglowego i wentylatora powietrza pierwotnego do kotła. Jako zamienniki zaproponowano silniki energooszczędne, krajowe. W tabeli 1 przedstawiono porównawczo dane znamionowe silników młynów węglowych, a w tabeli 2 silników wentylatorów powietrza. W pierwszych kolumnach – aktualnie stosowanych, w drugich i trzecich – ich ewentualnych zamienników. Ocenę ekonomiczną, na podstawie rzeczywistego zużycia energii elektrycznej przez napędy oraz ocenę dynamiczną wykonano w pracy dyplomowej [13]. Roczne rzeczywiste zużycie energii elektrycznej silnika młyna węglowego w 2004 roku wyniosło 1 023 977 kWh. Różnica sprawności silników zainstalowanego i jego zamiennika wynosi 4,7 % w przypadku producenta A. Przyjmując stałość różnicy sprawności niezależnie od stopnia obciążenia silnika, wymiana silnika mogłaby spowodować oszczędność energii elektrycznej wielkości 48 126 kWh. Zakładając ostrożnie cenę jednostkową 120 zł/MWh, można by z dodatkowej sprze-

daży energii uzyskać dodatkowy przychód w wysokości 5 775 zł.

Tabela 1.

Dane znamionowe silników młyna węglowego

Parametr	Silnik istniejący	Silnik oferta A	Silnik oferta B
Moc [kW]	650	630	630
Napięcie [kV]	6	6	6
Prąd [A]	80	70,5	73,5
Prędkość obr. [ $\text{min}^{-1}$ ]	1480	1494	1489
Sprawność [%]	92,0	96,7	96,0
Współczynnik mocy	0,85	0,89	0,86
$M_R/M_N$	1,65	0,9	1,5
$M_U/M_N$	2,8	2,4	2,4
$I_R/I_N$	6,0	6,6	6,2
Straty mech. [kW]	20	3,2	6,3
Wznios wału [mm]	400	400	400
Hałas [dB(A)]	$\leq 94$	$\leq 83$	$\leq 85$

Tabela 2.

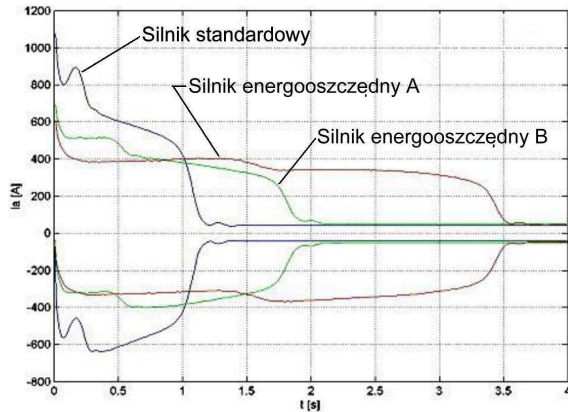
Dane znamionowe silników wentylatora powietrza pierwotnego

Parametr	Silnik istniejący	Silnik oferta A	Silnik oferta B
Moc [kW]	1000	1000	1000
Napięcie [kV]	6	6	6
Prąd [A]	117,5	117,0	116,0
Prędkość obr. [ $\text{min}^{-1}$ ]	990	994	993
Sprawność [%]	93,0	96,9	96,4
Współczynnik mocy	0,88	0,85	0,86
$M_R/M_N$	1,3	0,8	0,8
$M_U/M_N$	2,5	2,0	2,5
$I_R/I_N$	5,5	5,9	5,9
Straty mech. [kW]	14,5	2,6	8,0
Wznios wału [mm]	750	500	500
Hałas [dB(A)]	$\leq 92$	$\leq 81$	$\leq 83$

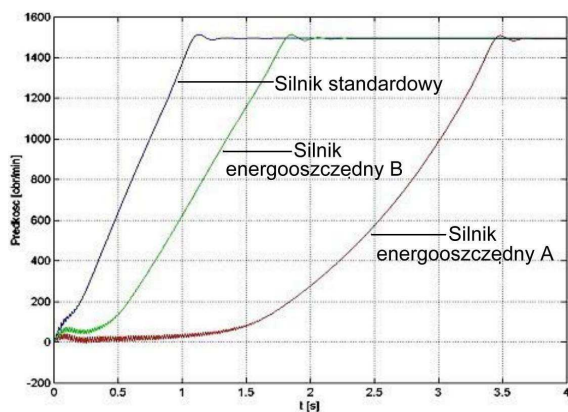
Jeśli przyjąć cenę silnika energooszczędnego na poziomie 150 tys. zł, a cenę standardowego 120 tys. zł, to wysokość dopłaty inwestycyjnej związanej z wymianą silnika wynosi 30 tys. zł. Prosta stopa zwrotu nakładów wyniesie wówczas 5 lat i 71 dni. Parametry elektromagnetyczne silników standardowych uzyskano z opracowania [7], a energooszczędnych z [11], a następnie na podstawie modelu [7] wykonano porównawcze badania symulacyjne przebiegów rozruchowych.

Na rysunku 1 przedstawiono porównawczo obwiednie przebiegów prądów rozruchowych silnika standardowego i energooszczędnego. Na rysunku 2 – przebiegi prędkości obrotowych podczas rozruchu silnika obciążonego stałym

momentem –  $0,37 M_N$ . Stopa zwrotu nakładów inwestycyjnych jest stosunkowo długa, wynika to z małego wykorzystania silnika w ciągu roku (pracują jednocześnie tylko trzy silniki z sześciu zainstalowanych).



Rys. 1. Silnik młyna węglowego obciążony  $0,37 M_N$  – obwiednie przebiegów prądów rozruchowych

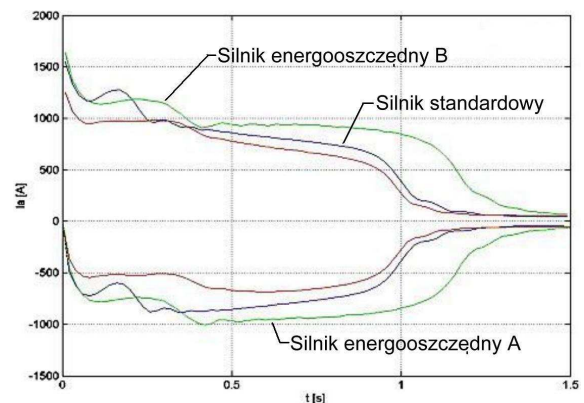


Rys. 2. Silnik młyna węglowego obciążony  $0,37 M_N$  – przebiegi prędkości obrotowych podczas rozruchu

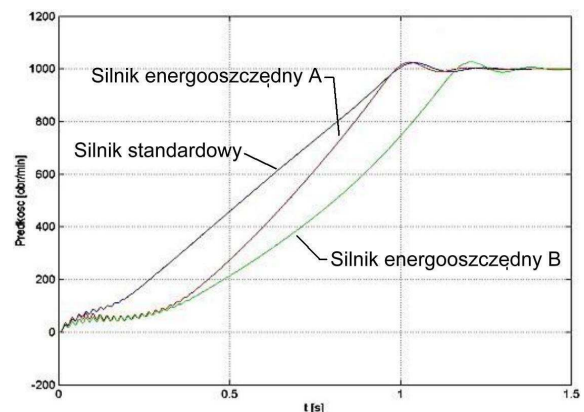
Wyraźnie gorsze są przebiegi rozruchowe silnika energooszczędnego w porównaniu do aktualnie pracującego. Biorąc pod uwagę, że silniki napędu młyna węglowego winny dokonywać rozruchu nawet w przypadku zasypania młyna węglem, to nawet gdyby zwiększyć wykorzystanie silnika nie można zalecać silnika energooszczędnego do tego rodzaju napędu chyba, że istnieje możliwość skonstruowania energooszczędnego zamiennika o wyraźnie lepszych właściwościach rozruchowych.

Roczne rzeczywiste zużycie energii elektrycznej silnika wentylatora powietrza pierwotnego wyniosło 6 529 368 kWh. Różnica sprawności silników zainstalowanego i jego zamiennika wynosi 3,9% (producenta A). Możliwa oszczędność energii elektrycznej wynosi

254 645 kWh. Przyjmując cenę jednostkową 120 zł/MWh, można uzyskać z dodatkowej sprzedaży energii 30 557 zł. Przyjmując cenę silnika energooszczędnego na poziomie 200 tys. zł, a cenę standardowego 160 tys. zł, to uzyskuje się prostą stopę zwrotu nakładów 1 rok i 112 dni. Porównanie obwiedni przebiegów prądów rozruchowych silnika standardowego i energooszczędnego nieobciążonego silnika wentylatora przedstawia rysunek 3. Rysunek 4 przedstawia porównanie przebiegów prędkości obrotowych podczas rozruchu nieobciążonego silnika.



Rys. 3. Silnik wentylatora powietrza pierwotnego nieobciążony – obwiednie przebiegów prądów rozruchowych



Rys. 4. Silnik wentylatora powietrza pierwotnego nieobciążony – przebiegi prędkości obrotowych podczas rozruchu

Krótką stopę zwrotu nakładów inwestycyjnych, porównywalne przebiegi rozruchowe oraz fakt, że silnik wentylatora powietrza pierwotnego dokonuje zawsze rozruchu jako nieobciążony powodują, że wymiana silnika na energooszczędny wydaje się celowa. Dodatkową korzyścią z tej wymiany może być znaczące obniżenie poziomu hałasu. Pewne utrudnienie stanowi różnica wzniosu wałów obu silników, w

związku z tym montaż silnika energooszczędnego będzie wymagał dodatkowej ramy adaptacyjnej. Konstrukcję taką należałoby zbadać pod względem dynamicznym.

## 5. Wnioski

Wydaje się, że choć jednostkowy koszt energii elektrycznej u wytwórcy energii – elektrowni, jest najniższy to warto brać pod uwagę celowość zastosowania silników energooszczędnych do napędów potrzeb własnych elektrowni, w szczególności wtedy, gdy istnieje konieczność zakupu nowego silnika lub wymiany silnika zamiast przeprowadzenia remontu kapitalnego silnika uszkodzonego, czy wyeksploatowanego. Można ostrożnie szacować, że docelowo mogłoby to dać zwiększenie przychodu elektrowni o około  $1 - 2\%$ , bez zwiększania kosztów eksploatacyjnych. Niezależnie od efektów wymiernych, takich jak oszczędności zużycia energii elektrycznej, możliwość uzyskania dodatkowego przychodu ze sprzedaży zaoszczędzonej energii, czy oszczędności na kosztach paliwowych i innych – pozapaliwowych (np. opłaty za emisję zanieczyszczeń atmosfery), występują jeszcze efekty niewymierne lub trudne do wyliczenia, takie jak zwiększenie trwałości silników, a co za tym idzie zwiększenie ich niezawodności i dyspozycyjności, wydłużenie okresów międzyprzegądowych i międzyremontowych oraz obniżenie poziomu drgań oraz poziomu hałasu na obiekcie, jako istotne działania na rzecz ochrony środowiska.

Można też liczyć się w przyszłości ze zmianą przepisów prawnych nakazujących stosowanie silników wysokosprawnych.

Decyzję o zastosowaniu silnika energooszczędnego, na podstawie analizy ekonomicznej, należałoby każdorazowo poprzedzić obliczeniami symulacyjnymi stanów dynamicznych, takich jak rozruch, czy powtórne załączenie.

## Literatura:

- [1]. Mantorski Z.: *Możliwości obniżenia energochłonności urządzeń potrzeb własnych bloku 200 MW przez wymianę silników wysokiego napięcia*. Zeszyty Problemowe Komel Nr 63/2001, str. 33-42,
- [2]. Bernatt J.: *Możliwości obniżenia energochłonności napędów dużej mocy przez wymianę silników wysokiego napięcia*. Zeszyty Problemowe Komel Nr 67/2003, str. 23-28,
- [3]. Herman W., Hickiewicz J.: *Ocena możliwości zastosowania silników energooszczędnych w napę-*

*dach potrzeb własnych elektrowni*. Wiadomości Elektrotechniczne (w druku),

- [4]. Śliwiński T.: *Koszt przetwarzania energii przez silniki indukcyjne*. Zeszyty Problemowe Komel Nr 63/2001, str. 21-26,
- [5]. Bernatt M.: *Optymalny wybór silników niskiego napięcia*. Zeszyty Problemowe Komel Nr 67/2003, str. 7-10,
- [6]. Liszka Sz.: *Program EF Motor narzędzie wspomagające podejmowanie decyzji o wymianie silników elektrycznych*. Zeszyty Problemowe Komel Nr 63/2001, str. 73-78,
- [7]. Hickiewicz J. i inni: *Opracowanie modeli matematycznych silników głębokożłobkowych i dwuklatkowych w celu sprawdzenia poprawności ich doboru do urządzeń napędowych*. Praca naukowo-badawcza dla Elektrowni Opole w budowie 1984-1986.
- [8]. Macek-Kamińska K.: *Modele matematyczne silników asynchronicznych głębokożłobkowych i identyfikacja ich parametrów*. Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Wrocław 1983 r.
- [9]. Dzierżanowski A. i inni: *Eksperymentalne i symulacyjne badania stanów dynamicznych silników indukcyjnych WN*. Zeszyty Problemowe Komel Nr 50/1995, str. 25-30.
- [10]. Macek-Kamińska K.: *Estymacja parametrów modeli matematycznych silników indukcyjnych dwuklatkowych i głębokożłobkowych*. WSI Opole, Studia i monografie nr 61, Opole 1992 r.
- [11]. Kamiński M.: *Program do estymacji parametrów silnika na podstawie charakterystyki statycznej w środowisku Delphi*. Materiały niepublikowane, 2005 r.
- [12]. Hickiewicz J., Macek-Kamińska K., Kamiński M.: *Modelowanie i identyfikacja maszyn indukcyjnych z wykorzystaniem techniki programowania obiektowego*. Proceedings of XLI International Symposium on Electrical Machines, SME'2005 (w druku).
- [13]. Holeksa P., Kazuk A.: *Silniki energooszczędne w energetyce*. Praca dyplomowa, Politechnika Opolska, Opole 2005 r.

## Autorzy:

mgr inż. Wojciech Herman – Główny Specjalista ds. Nadzoru i Technicznego Utrzymania Urządzeń Elektrycznych i Automatyki – e-mail: wojciech.herman@elopole.bot.pl;  
 BOT Elektrownia Opole SA w Brzeziu k. Opola  
 dr hab. inż. Jerzy Hickiewicz – Profesor Politechniki Opolskiej – e-mail: jh@po.opole.pl,  
 dr inż. Marcin Kamiński – Adiunkt – e-mail: mkam@po.opole.pl,  
 dr hab. inż. Krystyna Macek-Kamińska – Profesor Politechniki Opolskiej – e-mail: kmk@po.opole.pl,  
 Instytut Układów Elektromechanicznych i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Opolskiej, Opole

