

# Symulacyjna analiza współpracy trójfazowego odbiornika nieliniowego z systemem energetycznym

*Simulation analysis of the interaction of a three-phase nonlinear load with a power system*

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono zasady tworzenia modeli trójfazowych odbiorników nieliniowych w języku Modelica oraz biblioteki pozwalające na modelowanie elementów systemu energetycznego. Zaproponowano sposób modelowania współpracy trójfazowego odbiornika nieliniowego z systemem energetycznym. Zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych pozwalających na analizę wpływu pieca łukowego na system energetyczny dla różnych faz wytopu.

**Abstract.** The article presents the principles of creating models of three-phase nonlinear loads in the Modelica language and libraries that allow modeling of power system components. A method of modeling the interaction of a three-phase nonlinear load with a power system is proposed. The results of simulation studies allowing analysis of the impact of the arc furnace on the power system for different phases of melting are presented.

**Słowa kluczowe:** modelowanie, odbiornik nieliniowy, system energetyczny, piec łukowy, Modelica

**Keywords:** modeling, nonlinear load, power system, arc furnace, Modelica

## Wstęp

Piece łukowe są nieliniowymi odbiornikami dużej mocy powszechnie wykorzystywanymi do wytopu stali. Moce tych urządzeń przekraczają dla pieców UHP 100 MVA. W związku z założeniem osiągnięcia do 2050 roku neutralności pod względem emisji dwutlenku węgla w przyszłości ich wykorzystanie może znacznie wzrosnąć. Spowoduje to, że z każdym rokiem będzie rosła ilość stali wytwarzanej za pomocą tych urządzeń oraz ich moc [1, 2].

Ponieważ piece łukowe są nieliniowymi, niestacjonarnymi odbiornikami dużej mocy o losowym charakterze zmian mocy, konieczne jest stosowanie urządzeń ograniczających ich negatywny wpływ na system energetyczny i inne odbiorniki.

Wpływ ten ogranicza się przez stosowanie różnych urządzeń technicznych takich jak kompensatory mocy biernej, filtry wyższych harmonicznych oraz dławiki w torze wielkopiędowym [3]. Duże znaczenie ma też odpowiednie przygotowanie wsadu pieca oraz sposób prowadzenia wytopu.

Pomimo ciągłego usprawniania urządzeń i technologii wytopu nie zostały w pełni rozwiązane problemy wpływu pieca na system energetyczny. W przyszłości mogą one nawet wzrosnąć w wyniku zwiększania wielkości pieców i zmian struktury wytwarzania energii.

elektryczną Huty Celsa i miasta Ostrowiec Świętokrzyski. Główna stacja elektroenergetyczna zasilana jest bezpośrednio dwiema liniami 400 kV z elektrowni Kozienice i Połaniec. Pozwala to na maksymalne ograniczenie wpływu pieca na inne odbiorniki, jednak w przypadku jego niestabilnej pracy może wpływać na inne odbiorniki zasilane z tej samej stacji elektroenergetycznej.

Kierunek transformacji energetycznej, uwzględniający wykorzystanie energii ze źródeł odnawialnych powoduje, że do systemu podłączani są mniejsi wytwórcy i system zmienia się w układ generacji rozproszonej. W takim systemie ograniczane jest wykorzystanie dużych jednostek wytwarzających energię.

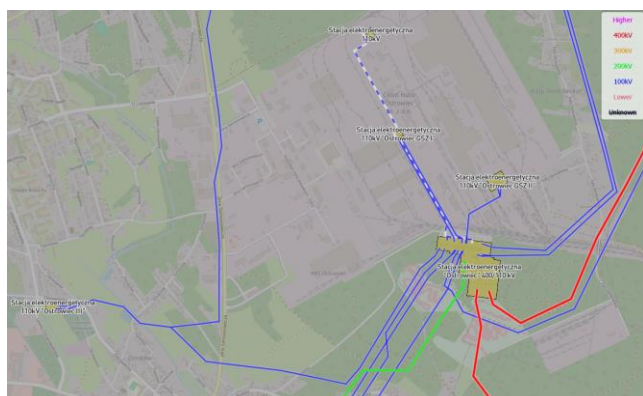
Ponieważ rośnie różnorodność urządzeń wytwarzających energię i każde z tych urządzeń ma inną charakterystykę, zmienia się także wypadkowa charakterystyka systemu.

Eksploatacja pieców łukowych podłączonych do systemu energetycznego o zmieniających się ciągle parametrach powoduje, że utrudnione jest dobieranie nastaw procesu na podstawie danych z wcześniejszych wytopów. Dodatkowo wzrasta problem negatywnego oddziaływania pieca na system energetyczny.

W takiej sytuacji rośnie znaczenie badań symulacyjnych, pozwalających na uwzględnienie zmian charakterystyk systemu energetycznego i przeanalizowanie ich wpływu na przebieg procesu. Może to pozwolić na znalezienie sposobu zapewnienia stabilniejszej oraz efektywniejszej energetycznie pracy pieca i ograniczenia jego negatywnego wpływu na inne odbiorniki podłączone do systemu energetycznego.

Odbiornik nieliniowy jakim jest piec łukowy współpracujący z systemem energetycznym jest złożonym układem składającym się z elementów mechanicznych, elektrycznych, elektronicznych, hydraulicznych, które nie mogą być analizowane niezależnie. Projektowanie tego typu układów wymaga zastosowania narzędzi pozwalających modelować takie systemy jako jeden obiekt.

W artykule przedstawiono zasady tworzenia modeli trójfazowych odbiorników nieliniowych w języku Modelica oraz biblioteki pozwalające na modelowanie elementów systemu energetycznego. Zaproponowano sposób modelowania współpracy trójfazowego odbiornika nieliniowego z systemem energetycznym z wykorzystaniem przekształcenia Parka. Jako odbiornik nieliniowy wykorzystano model pieca łukowego. Zaprezentowano



Rys. 1. System energetyczny Huty Celsa i miasta Ostrowiec Św.

Obecnie piece łukowe zasilane są z wykorzystaniem dedykowanych linii wysokiego napięcia, do których energia dostarczana jest z dużych jednostek wytwórczych. Na rysunku 1 przedstawiony został system zasilania energią

przykładowe wyniki badań symulacyjnych. Zaproponowany model pozwala na symulacyjną analizę wpływu pieca łukowego na system energetyczny dla różnych faz wytopu.

### Modelowanie w języku Modelica

Przy tworzeniu modeli symulacyjnych możliwe są dwa podejścia. Pierwsze polega na zbudowaniu modelu matematycznego na podstawie równań różniczkowo-algebraicznych, w postaci układu równań lub schematu blokowego. Wadą takiego podejścia jest to, że struktura połączeń schematu blokowego nie odpowiada połączeniom fizycznym w modelowanym układzie, a także konieczność ręcznego wyznaczania nowych równań przy każdej zmianie struktury układu.

Drugim sposobem modelowania układów jest modelowanie fizyczne. W systemach tego typu tworzony jest model fizyczny układu o strukturze i sposobie połączeń odpowiadającym rzeczywistym elementom, z których zbudowany jest układ lub ich fizycznym przybliżeniem. Dla utworzonego modelu, w sposób automatyczny generowany jest model matematyczny, składający się z równań różniczkowo-algebraicznych. W obydwu podejściach powstały układ równań, rozwiązywany jest za pomocą metod numerycznych. Modelowanie fizyczne wspierane jest obecnie przez wiele popularnych, komercyjnych narzędzi obliczeniowych np. EMTP, SimScape, które implementują własne metody modelowania.

Ten sposób modelowania wspierany jest także w ramach języka Modelica, który jest rozwijany przez organizację non-profit Modelica Association i udostępniany na otwartej licencji. Równocześnie z rozwojem języka tworzona jest darmowa biblioteka elementów Modelica Standard Library. Modelowanie z wykorzystaniem języka Modelica wspierane jest obecnie przez wiele środowisk komercyjnych takich jak AmeSim, Dymola, SystemModeler, MapleSim oraz środowisko OpenModelica rozpowszechniane na licencji otwartej.

Modelica jest uniwersalnym, obiektowym językiem programowania służącym do tworzenia modeli matematycznych złożonych systemów fizycznych [4]. Język ten jest stosunkowo młody i został stworzony przez międzynarodowy zespół jako próba uogólnienia koncepcji stosowanych we wcześniejszych językach służących do modelowania. Głównymi założeniami przy projektowaniu języka były:

- łatwość modelowania interdyscyplinarnego,
- umożliwienie ponownego wykorzystania utworzonych modeli,
- efektywność symulacji.

Programy w języku Modelica budowane są na podstawie klas, zwanych także modelami. Klasa w języku Modelica podobnie jak w klasycznych językach programowania składa się deklaracji stałych, parametrów modelu oraz z deklaracji zmiennych, którym można nadawać wartości początkowe. Opis działania obiektu realizowany jest głównie poprzez deklarowanie równań, co różni ten język od klasycznych języków obiektowych. Zachowanie systemu opisywane może być za pomocą równań różniczkowych, różniczkowo-algebraicznych lub różnicowych.

Wprowadzenie równań do specyfikacji języka pozwala opisać zachowanie się systemu fizycznego w prostszy sposób, w porównaniu do klasycznych języków programowania, operujących na wyrażeniach, które wymagają znajomości kierunku przebiegu sygnałów. W języku Modelica znajomość przebiegu sygnałów nie jest konieczna na etapie tworzenia modelu elementu. Zachowanie obiektu opisywane jest za pomocą zestawu

równań, dla których nie muszą być określone sygnały wejściowe i wyjściowe.

Specyfikacja języka Modelica obejmuje nie tylko elementy związane ze składnią i implementacją języka. Zawiera ona także obszerną bibliotekę standardową obejmującą elementy z różnych dziedzin:

- Blocks - schematy blokowe,
- StateGraph - diagramy stanów,
- Electrical - elementy elektryczne i elektroniczne,
- Electrical Machines - maszyny elektryczne,
- Magnetics - obwody magnetyczne,
- Mechanics - elementy mechaniczne,
- Fluids i Media - przepływy cieczy i gazów,
- Thermal - przepływy ciepła.

Biblioteka Blocks pozwala modelować elementy systemu w sposób analogiczny do środowiska Simulink pakietu MATLAB. Przydatna jest do modelowania toru sterowania oraz do modelowania elementów systemu, które wygodniej jest opisać w postaci funkcji opisującej zależność pomiędzy wejściami i wyjściami, np. transmitancja, równanie stanu. Z wykorzystaniem biblioteki możliwe jest modelowanie układów ciągłych i dyskretnych. Zawiera ona bloki służące do zadawania wymuszeń o różnym charakterze, podstawowe funkcje matematyczne oraz bloki logiczne. Zawiera także podstawowe modele regulatorów takie jak PI, PD, PID, co ułatwia modelowanie układów regulacji.

Biblioteka Electrical zawiera podstawowe elementy elektryczne, które można wykorzystać do modelowania obwodów elektrycznych i elektronicznych. W bibliotece Mechanics znajdują się elementy mechaniczne dla ruchu liniowego i obrotowego.

### Modelowanie systemu energetycznego

Modelowanie elementów systemu energetycznego możliwe jest przy wykorzystaniu elementów znajdujących się w zbiorze komponentów Electrical.Analog. W przypadku obwodów trójfazowych wygodniejszym rozwiązaniem może być wykorzystanie Electrical.MultiPhase. Biblioteka ta zawiera komponenty do modelowania wielofazowych obwodów elektrycznych. Liczba faz  $m$  nie jest ograniczona do trzech. Złącze zawiera tablicę  $m$  jednofazowych pinów. Większość komponentów tej biblioteki wykorzystuje tablicę jednofazowych komponentów z Electrical.Analog.

Do analizy obwodów trójfazowych można także wykorzystać bibliotekę Electrical.QuasiStationary. Służy ona jednak tylko do analizy obwodów elektrycznych jedno oraz wielofazowych z czysto sinusoidalnymi napięciami i prądami. Wszystkie komponenty elektryczne tej biblioteki są ściśle liniowe. Wyższe harmoniczne napięć i prądów nie są brane pod uwagę. Pomijane są także wszelkie elektryczne efekty przejściowe.

Poza bibliotekami standardowymi w modelowaniu systemu energetycznego przydatne mogą być biblioteki specjalizowane rozprowadzane na licencjach otwartych i licencjach komercyjnych [5, 6]. Spośród bibliotek rozprowadzanych bezpłatnie szczególną uwagę można zwrócić na:

- PowerGrids,
- PowerSystems,
- Dynawo,
- OpenIPSL.

W dalszej części pracy przedstawione zostanie wykorzystanie bibliotek standardowych do modelowania odbiornika nieliniowego w postaci pieca łukowego i biblioteki PowerSystems do modelowania systemu energetycznego, z którego zasilany jest piec [7].

## Biblioteka PowerSystems

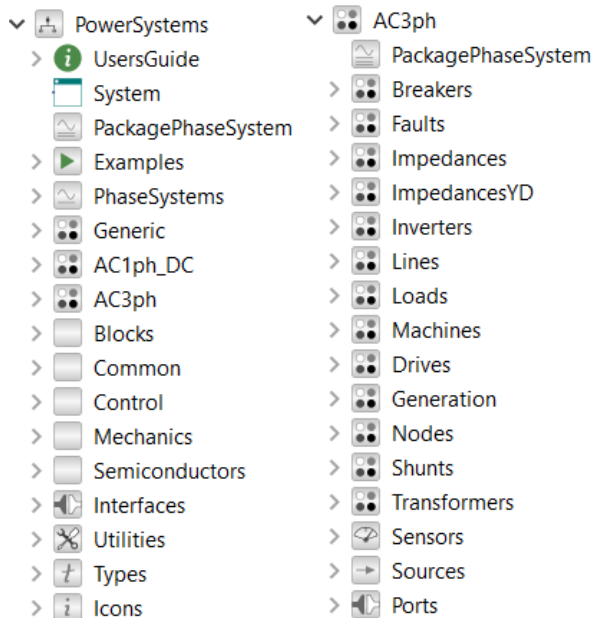
Biblioteka PowerSystems [7] przeznaczona jest do modelowania systemów elektroenergetycznych na różnych poziomach szczegółowości, zarówno w stanie przejściowym, jak i ustalonym. W szczególności zaprojektowana została do modelowania systemów takich jak:

- układy prądu przemiennego, w tym stacjonarne, przejściowe i asymetryczne,
- systemy o zmiennej częstotliwości, m.in. w turbinach wiatrowych lub do sterowania napędami,
- systemy zasilania prądem stałym.

Podstawowe elementy biblioteki wykorzystywane do modelowania systemu energetycznego zawarte są w pakietach:

- AC1ph\_DC zawierającym szczegółowe modele komponentów dla prądu stałego i jednofazowego prądu przemiennego,
- AC3ph zawierającym szczegółowe modele komponentów dla trójfazowego prądu przemiennego.

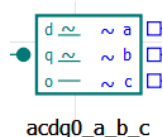
Struktura biblioteki PowerSystems i pakietu AC3ph przedstawiona jest na rysunku 2.



Rys. 2. Struktura biblioteki PowerSystems i modułu AC3ph.

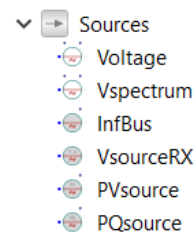
Zawiera ona wszystkie elementy, które są niezbędne do zamodelowania systemu energetycznego, zarówno te związane z przesyłem energii, jak i jej wytwarzaniem. Możliwe jest także łatwe modelowanie zakłóceń pojawiających się w systemie w wyniku awarii.

W przypadku modelowania układów trójfazowych elementy biblioteki opracowane są w układzie dq0, co upraszcza modelowanie elementów systemu energetycznego. W przypadku potrzeby modelowania części obwodu we współrzędnych abc można wykorzystać blok ACdq0\_a\_b\_c, wykorzystujący odwrotną transformację Parka. Ikona przedstawiająca blok przedstawiona jest na rysunku 3



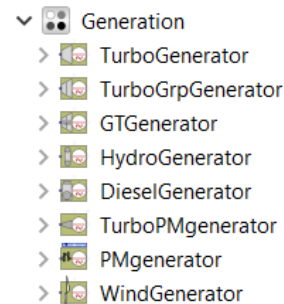
Rys. 3. Blok ACdq0\_a\_b\_c, wykorzystujący odwrotną transformację Parka.

Do modelowania źródeł zasilania można wykorzystać uproszczone modele dostępne w module AC3ph.Sources, pokazane na rysunku 4.



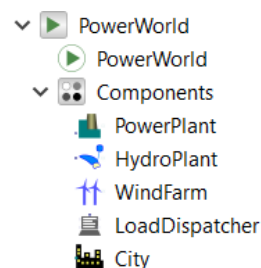
Rys. 4. Modele źródeł zasilania dostępne w pakiecie AC3ph.Sources.

W przypadku potrzeby modelowania zachowania systemu energetycznego z uwzględnieniem zjawisk dynamicznych związanych z działaniem systemów wytwarzania energii można wykorzystać modele generatorów dostępne w module AC3ph.Generation, pokazane na rysunku 5. Uwzględniają one zjawiska związane z gromadzeniem energii w elementach mechanicznych występujących w rzeczywistych generatorach energii oraz wynikające z działania układów sterowania występujących w tych systemach.



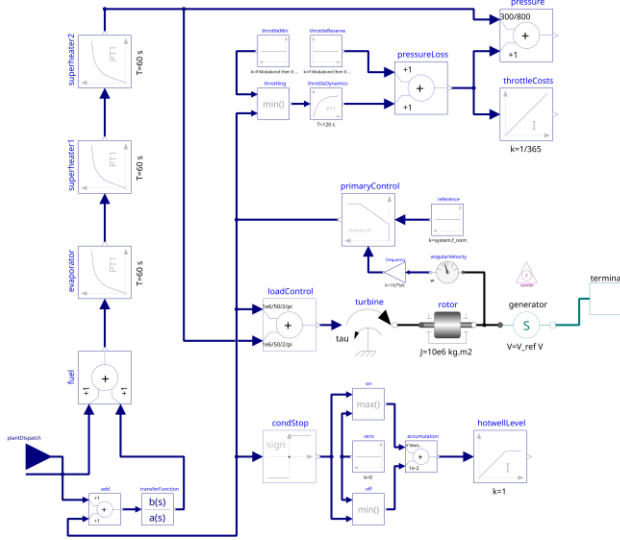
Rys. 5. Złożone modele generatorów dostępne w module AC3ph.Generation.

Najbardziej złożone modele generatorów, uwzględniające procesy zachodzące w systemach wytwarzania energii oraz ich układy sterowania znajdują się w module PowerWorld, którego elementy pokazane są na rysunku 6.



Rys. 6. Systemy wytwarzania energii dostępne w module PowerWorld.

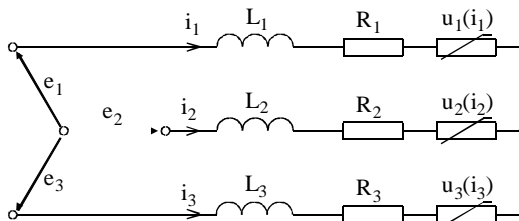
Struktura wewnętrzna bloku PowerPlants pokazana jest na rysunku 7. Widoczne są na nim modele elementów mechanicznych, generatora oraz sterujących. Model ten uwzględnia własności dynamiczne różnych podsystemów systemu wytwarzania energii. Wyjście generatora zrealizowane jest z wykorzystaniem współrzędnych pq0 i dostępne jest na złączu terminal.



Rys. 7. Struktura wewnętrzna bloku PowerPlants pakietu PowerWorlds.Components.

### Tor elektryczny pieca łukowego AC

Tor elektryczny pieca łukowego składa się z wielu elementów, jednak do celów analizy pracy pieca i jego wpływu na system energetyczny, można przedstawić transformatory wraz z liniami zasilającymi piec w postaci szeregowo połączonych rezystancji i reaktancji, przeliczonych na stronę wtórną transformatora piecowego. Otrzymuje się schemat zastępczy przedstawiony na rysunku 8, w którym dodatkowo pokazany jest uproszczony model zasilania pieca w postaci trzech napięć zasilających  $e_1, e_2, e_3$ , połączonych w gwiazdę [8].



Rys. 8. Schemat zastępczy toru elektrycznego pieca łukowego

Na schemacie tym tor elektryczny pieca łukowego jest obwodem trójfazowym bez przewodu zerowego. W każdej z faz występują indukcyjności  $L_1, L_2, L_3$ , na które składają się indukcyjności linii zasilających, transformatorów oraz toru wieloprądowego, zwłaszcza strony wtórnej transformatora, szyno-przewodów i przewodów giętkich. Rezystancje  $R_1, R_2, R_3$ , związane są głównie z rezystancją elektrod, opornością przejścia w uchwycie elektrod oraz rezystancją wsadu. Obciążeniem w obwodzie są wyładowania łukowe  $u_1, u_2, u_3$  opisane nieliniową funkcją prądu.

Przetwornikiem energii elektrycznej na energię cieplną jest wyładowanie łukowe. W literaturze spotkać można wiele modeli wyładowań łukowych. Najprostsze z nich to modele liniowe, które w związku z małą dokładnością nie były brane pod uwagę w czasie badań. Dostępnym często w literaturze spotyka się model dynamiczny poprawnie opisujący wyładowanie wieloprądowe występujące w piecu łukowym opracowany przez Cassiego. Wadą tego modelu jest trudność identyfikacji jego parametrów. Ponadto sterowanie procesem odbywa się dużo wolniej od szybkości zjawisk zachodzących w łuku. W związku z tym wystarczające jest przyjęcie modelu statycznego.

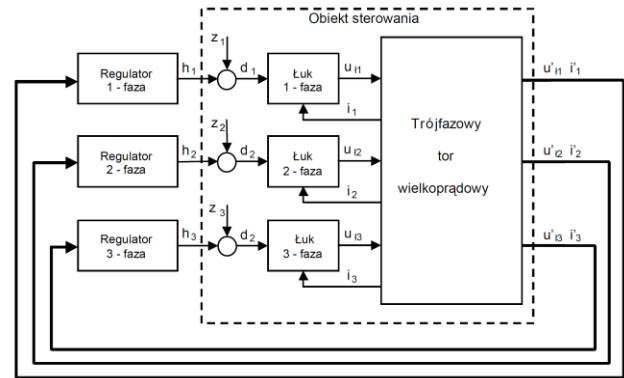
Modelem statycznym dosyć dobrze odzwierciedlającym charakter zjawisk elektrycznych zachodzących w wyładowaniu łukowym jest model łuku opracowany przez Lowke [9] dla łuku prądu stałego, który w postaci zmodyfikowanej [8] może być wykorzystany do modelowania łuku prądu przemiennego. Zależność opisująca tego typu model ma postać:

$$u(t) = c \cdot |i(t)|^a d^b \text{sign}(i(t)) \quad (1)$$

gdzie  $d$  – długość łuku

$a, b, c$  – parametry zależne od etapu wytopu.

Sterowania położeniem elektrod pieca odbywa się z wykorzystaniem sygnałów uzyskanych z toru elektrycznego pieca. W czasie trwania procesu technologicznego praca układów regulacji zakłócana jest przez różne zjawiska wynikające ze zmian własności łuku, zmian składu chemicznego atmosfery pieca oraz zmian struktury geometrycznej i stanu fizycznego wsadu. Schemat struktury układu sterowania położeniem elektrod pokazany jest na rysunku 9 [10].



Rys. 9. Struktura układu sterowania położeniem elektrod pieca.

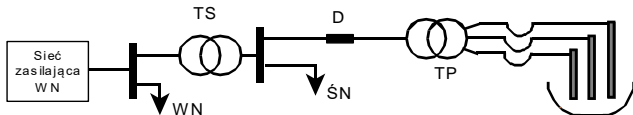
W efekcie zmianie ulegają charakterystyki łuku, które wpływają na napięcia, prądy oraz moce. Zjawiska te następnie wpływają na system energetyczny, powodując powstawanie wahań napięcia.

Piece łukowe prądu przemiennego o dużej mocy zasilane są z sieci wysokiego napięcia przemiennego. Instalacja zasilająca piec łukowy jest połączona z systemem zasilającym całą hutę i następnie z systemem energetycznym.

W układach dużej mocy zasilanych z sieci o napięciu 110 kV lub większym stosowane są dwa transformatory, sieciowy zasilany z sieci wysokiego napięcia przekształcający napięcie do poziomu zazwyczaj około 30 kV i transformator piecowy obniżający napięcie do poziomu 300 ÷ 1500 V. Transformatory mają uzwojenia wtórne połączone najczęściej w trójkąt, a uzwojenia pierwotne są przełączane z trójkąta na gwiazdę oraz posiadają szereg zaczepek pozwalających skokowo zmieniać wartość napięcia wtórnego. Przełączanie trójkąt gwiazda dokonuje się w stanie beznapięciowym. Zmiana zaczepek możliwa jest pod pełnym obciążeniem transformatora.

Przykładowy schemat instalacji zasilającej piece elektrostalowni przedstawiony jest na rysunku 10. Instalacja ta obejmuje szynę zasilającą wysokiego napięcia WN o napięciu 400 kV. Szyna ta połączona jest poprzez transformator TS z główną szyną zasilającą hutę ŚN o napięciu znamionowym 110 kV, która połączona jest następnie z piecem poprzez transformator piecowy TP [11].





Rys. 10. Przykładowy schemat instalacji zasilającej piece łukowe.

### Model symulacyjny

W celu zamodelowania toru elektrycznego pieca z uwzględnieniem nieliniowości łuków w języku Modelica, niezbędne jest opracowanie własnego modelu łuku, gdyż w bibliotece standardowej nie jest on dostępny. Przykładowy model wykorzystujący zależność (1) może mieć postać przedstawioną na listingu 1. W modelu tym tworzony jest nowy model dziedziczący z modelu Electrical.Analog.Interfaces.OnePort. Ponieważ element ten zawiera dwa przyłącza, dlatego dodane zostało dodatkowe wejście d, do którego przekazywana jest informacja o aktualnej długości łuku.

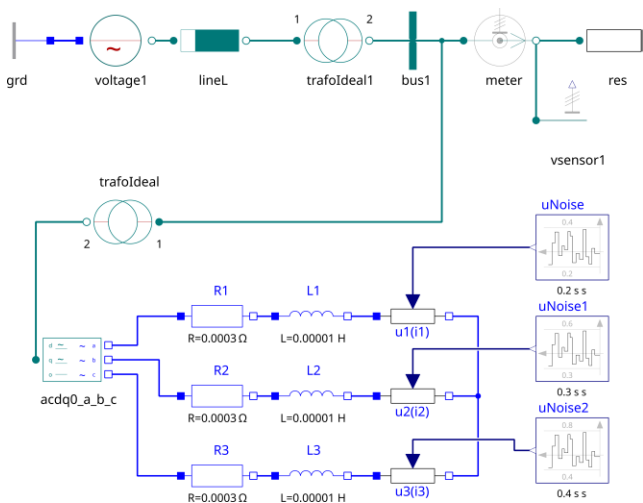
Listing 1. Model wyładowania łukowego w języku Modelica.

```

model arc
  extends Modelica.Electrical.Analog.
    Interfaces.OnePort;
  parameter Real a = 1;
  parameter Real b = 1;
  parameter Real c = 1;
  Modelica.Blocks.Interfaces.RealInput d;
equation
  v = c*d^b*abs(i)^a*sign(i);
end arc;

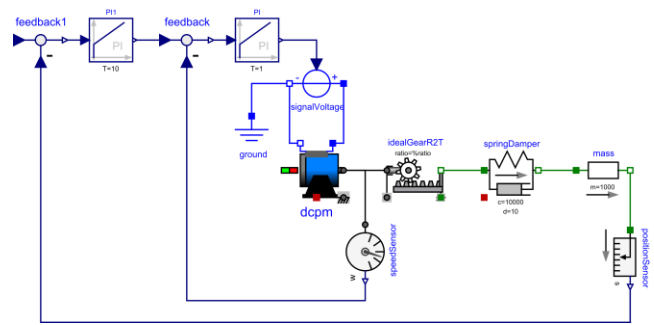
```

Wykorzystując przedstawiony model i elementy biblioteki standardowej można zbudować schemat toru wielokoprawowego. Przykładowy schemat obwodu elektroenergetycznego utworzony w środowisku OpenModelica, rozszerzony o model systemu zasilania i zbudowany w oparciu o elementy biblioteki PowerSystems pokazany jest na rysunku 11. Zawiera on generator napięcia voltage1, model linii przesyłowej lineL, transformator trafoldeal1, szynę średniego napięcia i transformator piecowy trafoldeal.



Rys. 11. Schemat obwodu pieca łukowego wraz z systemem zasilania.

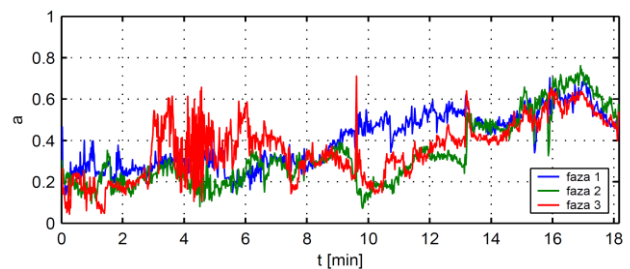
W celu zamodelowania układu umożliwiającego zmianę długości łuku, można rozbudować schemat, dodając elektromechaniczny układ zmiany położenia elektrody, wraz z układem sterowania. Schemat takiego modelu przedstawiony został na rysunku 12.



Rys.12. Model układu napędowego elektrod.

Model przedstawiony na rysunku 11 pozwala na badanie przepływów energii w systemie zasilania oraz pozwala na badanie oddziaływania pieca łukowego na system energetyczny. Umożliwia on łatwą rozbudowę części modelowanej z wykorzystaniem współrzędnych pq0 jak i abc. W przedstawionej wersji nie uwzględnia zjawisk dynamicznych w systemie, ale po zastąpieniu źródła napięcia blokiem PowerPlants, HydroPlants, czy WindPlants, możliwe jest uwzględnienie procesów dynamicznych zachodzących w systemie energetycznym.

W przypadku wykorzystania przedstawionego na listingu 1 modelu łuku niezbędna jest znajomość wartości parametrów modelu. Badania takie prowadzone były w ramach prac badawczych przedstawionych w pracy [10]. Parametr a modelu łuku odpowiada za kształt charakterystyki wyładowania łukowego. W zależności od etapu wytopu zmienia się jego wartość w zakresie od ok. 0.05 do 0.8. Przykładowy wykres zmian parametru a dla pierwszego kosza wytopu na piecu 140 t przedstawiony jest na rys. 13 [10].



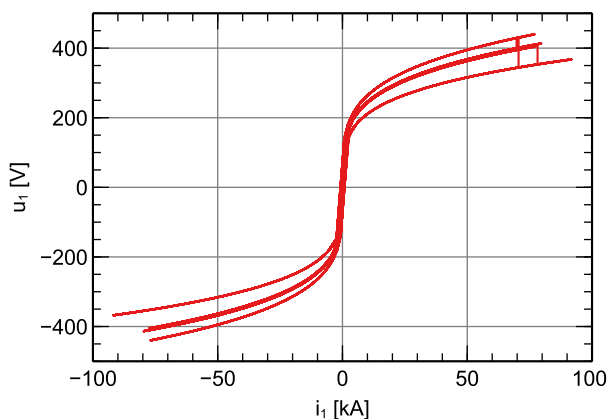
Rys. 13. Wykres zmian parametru a dla kosza 1

W tabeli 1 przedstawione zostały parametry modelu łuku elektrycznego, wyznaczone w sposób eksperymentalny w czasie podnoszenia elektrody, przy zakończeniu wytopu każdego z koszy.

Tabela 1. Parametry modelu łuku

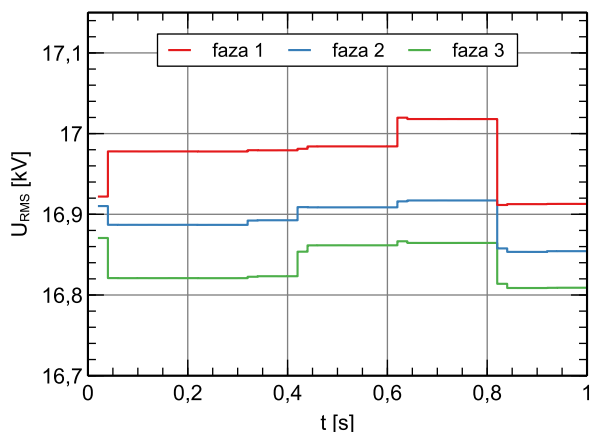
Nr kosza	a	b	c
1	0.45	0.9	11.26
2	0.55	1	1.37
3	0.75	1.6	0.15
4	0.25	0.4	22

Rysunek 14 przedstawia przykładowe symulowane charakterystyki łuku dla fazy 1, przy zmieniającej się w sposób losowy długości łuku. Łuk modelowany był przy założeniu następujących parametrów  $a = 0.25$ ,  $b = 0.4$ ,  $c = 22$ . Jeżeli porównamy uzyskany wynik z charakterystykami przedstawionymi w pracy [10] uzyskanymi na obiekcie rzeczywistym, to można zauważyć dużą zbieżność.



Rys. 14. Charakterystyka prądowo-napięciowa łuku o parametrach  $a = 0.25$ ,  $b = 0.4$ ,  $c = 22$ .

Rysunek 15 przedstawia wykres wartości skutecznych wyznaczonych po stronie średniego napięcia. Przebiegi charakteryzują się asymetrią napięć, która wynika z przyjęcia różnych parametrów łuku dla każdej z faz, co często występuje w piecu łukowym, szczególnie w początkowych okresach roztopienia wsadu. Widoczne są też wahania napięcia wynikające ze zmian długości łuku.



Rys. 15. Wykres wartości skutecznych po stronie średniego napięcia.

## Podsumowanie

Przedstawiony w pracy sposób modelowania pieca łukowego i systemu energetycznego, wykorzystujący język Modelica pozwala na efektywne tworzenie modeli o różnym stopniu złożoności. Wykorzystanie otwartoźródłowych bibliotek takich jak PowerGrids, PowerSystems, Dynawo, OpenIPSL znacznie upraszcza modelowanie i symulację współpracy odbiorników nieliniowych z systemem energetycznym.

Ma to szczególnie istotne znaczenie we współczesnych czasach, w związku z rosnącymi wymaganiami związanymi z jakością energii, coraz bardziej rozbudowaną strukturą systemu energetycznego i dużą różnorodnością systemów wytwarzania energii. Dodatkowo otwartość języka Modelica pozwala na wykorzystywanie różnych narzędzi symulacyjnych, w tym bezpłatnie dostępnego środowiska OpenModelica.

W przypadku konieczności modelowania obok części elektrycznej np. złożonych układów elektromechanicznych istotna jest cecha języka Modelica pozwalająca na łączenie modeli obejmujących różne dziedziny. Podejście takie można wykorzystać do stworzenia pełnego modelu pieca łukowego, obejmującego system energetyczny, obwód elektroenergetyczny pieca oraz układy regulacji położenia elektrod.

W ramach dalszych badań planowane jest opracowanie szczegółowego modelu pieca łukowego i jego podsystemów w języku Modelica, celem przeprowadzenia badań pozwalających na optymalizację przebiegu procesu technologicznego oraz ograniczenie wpływu pieca na system energetyczny.

**Autorzy:** dr inż. Robert Kazała, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Automatyki, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: rkazała@tu.kielce.pl;

## LITERATURA

- [1] Gajdzik B., Energochłonność produkcji stali – analiza retrospektywna i prognostyczna, *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza*, 68 (2016), nr 4, 34-41
- [2] Berger R., The future of steelmaking – How the European steel industry can achieve carbon neutrality, *Focus.*, 05 (2020), Roland Berger GmbH
- [3] Lange, A.G., Redlarski, G., Selection of C-Type Filters for Reactive Power Compensation and Filtration of Higher Harmonics Injected into the Transmission System by Arc Furnaces, *Energies* 13, (2020), 2330, <https://doi.org/10.3390/en13092330>
- [4] Fritzson, P., Principles of Object Oriented Modeling and Simulation with Modelica 3.3: A Cyber-Physical Approach, 1st ed. Wiley (2014), <https://doi.org/10.1002/9781118989166>
- [5] Winkler, D., Electrical Power System Modelling in Modelica - Comparing Open-source Library Options, 58th Conference on Simulation and Modelling (SIMS 58), Reykjavik, Iceland, September 25th – 27th, (2017), 263–270, <https://doi.org/10.3384/ecp17138263>
- [6] Fachini, F., Vanfretti, L., De Castro, M., Bogodorova, T., Laere, G., Modeling and Validation of Renewable Energy Sources in the OpenIPSL Modelica Library, IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, Toronto, ON, Canada, (2021), 1–6, <https://doi.org/10.1109/IECON48115.2021.9589148>
- [7] Franke, R., Wiesmann, H., Flexible modeling of electrical power systems -- the Modelica PowerSystems library, *Proceedings of the 10th International Modelica Conference*, March 10-12, (2014), Lund, Sweden, 515–522, <https://doi.org/10.3384/ecp14096515>
- [8] Wcislik M.: Metoda estymacji parametrów toru elektrycznego urządzenia łukowego dla potrzeb sterowania procesem elektrostalowniczym. Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej E 28(1992), Kielce.
- [9] Lowke J.J.: A simple theory of free burning arc, XIII ICPIG, 0466, Berlin (1977), 519-520
- [10] Kazała R., Analiza układu regulacji położenia elektrod pieca łukowego z uwzględnieniem sprzężeń międzyfazowych obwodu elektroenergetycznego, Praca doktorska (2007), Politechnika Świętokrzyska
- [11] Wcislik M., Kazała R., Parametry i charakterystyki układu elektrycznego trójfazowego stalowniczego pieca łukowego, *Przegląd Elektrotechniczny*, t. 1, (2023), nr 12, 53–57, doi: 10.15199/48.2023.12.09
- [12] Kazała R., Modelowanie procesów i urządzeń elektrotechnologicznych w języku Modelica, *Procesy elektrotechnologiczne : modelowanie i sterowanie*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, M69 (2015), ISBN 978-80-554-1043-2