

## **ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA STEROWANIA PREDYKCYJNEGO TURBINĄ PAROWĄ ELEKTROWNI JĄDROWEJ**

**Anna KOBYLARZ<sup>1</sup>, Kazimierz DUZINKIEWICZ<sup>2</sup>, Michał GROCHOWSKI<sup>3</sup>**

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki

1. tel.: 58 347 17 42 e-mail: akobylarz@eia.pg.gda.pl
2. tel.: 58 347 22 39 e-mail: kazimierz.duzinkiewicz@pg.gda.pl
3. tel.: 58 347 29 04 e-mail: michal.grochowski@pg.gda.pl

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia wyniki wstępnej analizy możliwości zastosowania sterowania predykcyjnego MPC turbiną parową elektrowni jądrowej. Tradycyjnie przyjmuje się, że turbina pracuje w jednym punkcie pracy odpowiadającym jej mocy nominalnej, co pozwala na stosowanie klasycznych regulatorów PID. Synteza sterowania dla warunków zmiennego punktu pracy wymaga uwzględnienia nieliniowego charakteru procesów turbiny oraz możliwości naruszania przez generowane sterowanie ograniczeń dopuszczalnego działania. W algorytmie MPC wykorzystany został opracowany wcześniej nieliniowy model turbiny 4CKC465. Opracowany algorytm MPC został porównany z regulatorem PID strojonym dla trajektorii zadanej. Proponowane sterowanie MPC umożliwia sterowanie turbiną z zadowalającymi skutkami. W artykule dokonano krótkiej analizy wpływu parametrów algorytmu MPC na jakość sterowania turbiną parową.

**Słowa kluczowe:** turbina parowa, elektrownia jądrowa, sterowanie predykcyjne, sterowanie PID.

### **1. WSTĘP**

Praca elektrowni w warunkach obowiązywania zasad deregulacji rynku energii może prowadzić do konieczności jej pracy ze zmiennym, w określonym przedziale, obciążeniem. Pociąga to za sobą zmienność punktu pracy turbiny parowej bloku elektrowni. Turbina parowa jest obiektem o nieliniowej dynamice. Synteza systemu sterowania dla obiektu pracującego ze zmiennowartościową trajektorią punktu pracy powinna być przeprowadzona z wykorzystaniem nieliniowego modelu dynamiki. Zwykle przyjmuje się, że trajektoria punktu pracy turbiny jest stałowartościowa. Pozwala to stosować w syntezie sterowania zlinearyzowane w otoczeniu trajektorii stałowartościowej modele transmitancyjne. Najczęstszą technologią sterowania jest wtedy sterowanie PID. Sterowanie z przechodzeniem do kolejnych stanów pracy turbiny może prowadzić do naruszania przez generowane sterowania ograniczeń dopuszczalnego działania układów wykonawczych sterowania i samej turbiny. Nieliniowość i ograniczenia to dwa czynniki uzasadniające zastosowanie sterowania predykcyjnego. Zastosowanie wybranego algorytmu MPC wymaga wykazania celowości i realizowalności proponowanego sterowania. W artykule podjęta została próba oceny celowości zastosowania MPC do sterowania turbiną pracującą ze zmiennym w określonym przedziale

obciążeniem. Przyjęto, że użycie sterowania MPC można będzie uznać za celowe jeżeli wskaźniki jakości sterowania będą lepsze dla tego sterowania niż dla sterowania odniesienia. Za sterowanie odniesienia przyjęto sterowanie PID.

Opracowane sterowanie predykcyjne turbiną parową elektrowni jądrowej wykorzystuje model turbiny parowej zbudowany w oparciu o dane turbiny 4CK465 [1]. Jest to turbina parowa projektowana dla elektrowni jądrowej, co przenosi się bezpośrednio na zwiększenie jej mocy w porównaniu do turbiny konwencjonalnej. Turbina ta wykorzystuje również parę o innych właściwościach (para nasycona). Model ten został szczegółowo opisany w [2] oraz był już wykorzystywany w poprzednich pracach [3, 4].

W celu przeprowadzenia badań opracowano implementację klasycznego sterowania predykcyjnego opisanego dokładniej w rozdziale 2.

Na ogół strojenie regulatorów PID prowadzone jest dla stałowartościowej trajektorii wartości zadanej systemu. W prowadzonych badaniach strojenie regulatora PID prowadzono dla zmiennych trajektorii wartości zadanych o kształcie takim jak trajektoria referencyjna/zadana MPC. W artykule przyjmowane trajektorie referencyjne mieszczą się w przedziale od 35 do 100% mocy nominalnej turbiny.

Opis i wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w rozdziałach 3. oraz 4. Rozdział 5. zawiera podsumowanie.

### **2. METODA STEROWANIA PREDYKCYJNEGO**

Technologia sterowania predykcyjnego operuje wspólnymi elementami, są to:

1. model predykcyjny stanu lub wyjścia systemu,
2. wskaźnik jakości sterowania,
3. sposób uzyskiwania trajektorii sterowania.

W rozważanym zagadnieniu model predykcyjny wyjścia systemu stanowi dyskretyzowany model dynamiki turbiny i warunki dopuszczalności sterowania. Wskaźnik jakości sterowania oparty został na dwóch argumentach – odległości trajektorii rzeczywistej i referencyjnej/zadanej systemu oraz różnicy sterowań w kolejnych krokach. Trajektoria sterowania uzyskiwana jest w wyniku rozwiązania zagadnienia optymalizacyjnego mającego postać zagadnienia programowania matematycznego

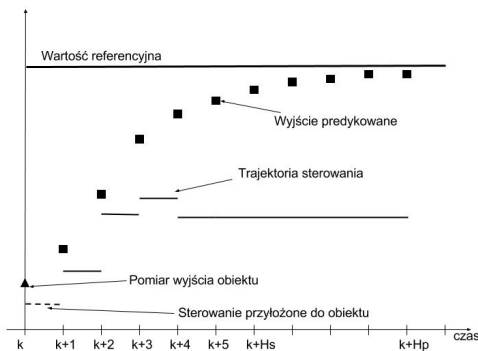
z wskaźnikiem jakości sterowania jako kryterium optymalizacji i modelem predykcyjnym jako ograniczeniami.

Algorytm MPC generuje sterowania stałowartościowe dla kolejnych kroków czasowych o długości  $\Delta t_{MPC}$  dla horyzontu czasowego nazwanego horyzontem predykcji  $H_p$ . Można w algorytmach MPC wyróżnić horyzont sterowania  $H_s$ . Nierówność  $H_s \neq H_p$  oznacza, że wyznaczone sterowanie może przyjmować różne wartości na horyzoncie  $H_s$ , a poza nim, do horyzontu  $H_p$ , przyjmuje wartość ostatniego sterowania w horyzoncie  $H_s$ . Sterowanie wyznaczone algorytmem MPC oceniane jest wartością kryterium jakości sterowania  $J_{MPC}$ . Wartość  $J_{MPC}$  obliczana jest dla horyzontu predykcji  $H_p$ . W prowadzonych badaniach przyjmowano różne horyzonty sterowania i predykcji. Generowanie sterowania dla chwili  $t_k$  polega na rozwiązaniu zagadnienia optymalizacyjnego MPC mającego postać zagadnienia programowania matematycznego.

Bardziej szczegółowy opis metod sterowania predykcyjnego zawarty jest w [5].

Ilustracja elementów sterowania predykcyjnego została podana na rysunku 1. Dla bieżącej chwili  $t_k$  pozyskiwana jest informacja o bieżącym stanie systemu – turbiny. Dla horyzontu  $H_p$  liczonego od chwili  $t_k$  znana jest trajektoria referencyjna/zadana wyjścia systemu. Z wykorzystaniem tych danych rozwiązywane jest scharakteryzowane wyżej zagadnienie optymalizacyjne sterowania predykcyjnego.

Z wyznaczonej w taki sposób trajektorii sterowania kierowane jest do realizacji wyznaczone sterowanie w kroku pierwszym, a początek okna horyzontu predykcji przesuwany jest do chwili  $t_{k+1}$ . Procedura powtarzana jest dalej od tej chwili.



Rys. 1. Elementy sterowania predykcyjnego

### 3. ZAŁOŻENIA I PROGRAM BADAŃ TESTOWYCH

Model turbiny parowej wykorzystany w analizie jest dynamicznym modelem nieliniowym. Jego wejściami są parametry jakości pary dolotowej turbiny parowej. Złożony jest z części wysoko i niskoprężnej, zawierających łącznie 16 stopni połączonych w grupy między stopniami regulowanymi. Umożliwia on obliczeniowy dostęp do 52 najistotniejszych zmiennych procesowych, takich jak ciśnienia, temperatury, przepływy masowe wzdłuż całej turbiny parowej (w tym za separatorem wilgoci i przegrzewaczem międzystopniowym), spadki entalpii, moce teoretyczne poszczególnych grup stopni oraz moc efektywna całej turbiny. Zakłada się zachowanie stałych parametrów pary napływającej z wytwornicy pary o wartościach nominalnych i zastosowanie sterowania dławieniowego poprzez przemykanie zaworu sterowania na wejściu

do części wysokoprężnej turbiny. W ten sposób uzyskuje się zmiany ciśnienia i przepływu masowego za zaworem sterującym. Wielkością manipulacyjną jest procentowy stopień otwarcia zaworu (przetwarzany przez układ wykonawczy zaworu) w zakresie od 0 do 100%. Wyjściem pomiarowym i sterowanym modelem jest wartość mocy efektywnej turbiny parowej odniesiona do jej wartości nominalnej. Moc nominalna testowej turbiny wynosi 471,329 MW.

Przed sterowaniem predykcyjnym stawiano dwa zadania: dobre nadążanie za trajektoria referencyjną/zadaną oraz unikanie dużych zmian sygnału sterującego z kroku na krok. Użyto funkcji kryterialnej w postaci:

$$J_{MPC,1} = \sum_{k=1}^{H_p} w_{\Delta u} [u(t_k) - u(t_{k-1})]^2 + \frac{1}{t_k} w_n [y_{ref}(t_k) - y_{pred}(t_k)]^2 \quad (1)$$

gdzie:  $u(t_k)$  – sterowanie przykładane w chwili  $t_k$ ,  
 $w_{\Delta u}$  – waga składnika różnic wartości sterowania,  
 $w_n$  – waga składnika nadążania,  $y_{ref}(t_k)$  – wartość referencyjna wielkości sterowanej – mocy turbiny,  
 $y_{pred}(t_k)$  – wartość predykowana wielkości sterowanej – mocy turbiny

Analiza porównawcza prowadzona była dla regulatora PID. W badaniach posłużono się dyskretną emulacją działania regulatora PID, co oznaczało zmianę sterowania PID co krok sterowania do wartości odpowiadającej wartości sterowania ciągłego w chwili przykładania sterowania. Regulator PID został nastrojony optymalnie według kryterium (1) dla testowej trajektorii referencyjnej/zadanej. W procesie strojenia wykorzystano algorytm optymalizacji oparty o odmianę metody punktu wewnętrznego dostępną w środowisku obliczeniowym Matlab [6].

W ramach analizy badano wpływ różnych kroków sterowania, horyzontów sterowania, horyzontów predykcji oraz wag poszczególnych elementów kryterium (1). Dla celów porównania efektów sterowania przyjęto kryterium w postaci:

$$J_{MPC,PID,2} = \sum_{k=1}^{H_p} [y_{ref}(t_k) - y_{sym}(t_k)]^2 \quad (2)$$

gdzie:  $y_{sym}(t_k)$  – wartość wyjścia z symulatora turbiny

### 4. SYMULACYJNE BADANIA TESTOWE

Wyniki liczbowe przeprowadzonych badań efektów sterowania dla algorytmu MPC przedstawiono poniżej w tabeli 1. Wyniki z najlepszymi wartościami wskaźnika  $J_{MPC,2}$  zaznaczono na szaro. W tabeli 2. przedstawiono wyniki badań efektów sterowania PID. Wyniki te przedstawiono dla dwóch trajektorii wartości zadanych – jednej używanej w strojeniu nastaw regulatora PID i drugiej innej niż ta użyta w strojeniu.

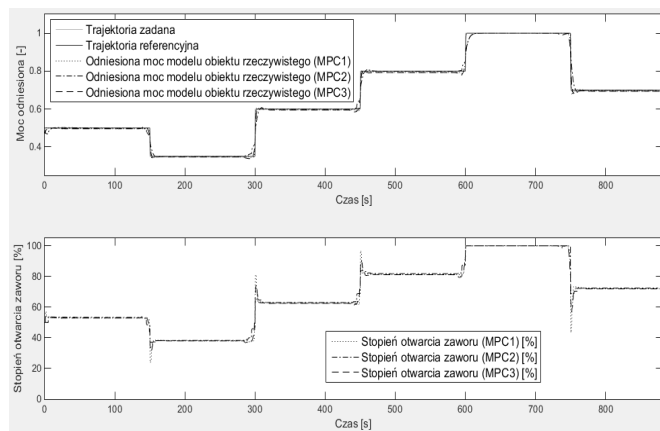
Tabela 1. Wyniki badań testowych algorytmu MPC

$\Delta t_{MPC}$ [s]	$H_s$ [s]	$H_p$ [s]	$w_n$	$w_{\Delta u}$	$J_{MPC,2}$
0,2	1	5	1000	0,01	1,0369
0,2	1	5	3000	0,01	1,1332
0,5	2,5	5	1000	0,001	0,5861
0,5	5	10	1000	0,001	0,6005
0,5	5	10	1000	0,01	0,7122
0,5	5	8	1000	0,01	0,7387
0,5	5	10	3000	0,01	0,8278
1	5	10	1000	0,001	0,4258
1	7	10	1000	0,001	0,4411
1	5	8	1000	0,001	0,4648
1	5	10	1000	0,0001	0,4698
1	10	10	1000	0,001	0,5190
2	6	20	1000	0,01	0,7655
2	18	20	1000	0,01	0,8178
2	6	40	1000	0,01	0,9264
2	6	10	1000	0,01	2,3753
5	10	30	1000	0,01	1,2605
5	15	30	1000	0,01	5,4951
5	10	20	1000	0,01	10,0356
7	14	21	1000	0,01	2,2759
7	14	25	1000	0,01	13,7068
10	20	30	1000	0,01	1,8536

Tabela 2. Wyniki badań testowych sterowania PID

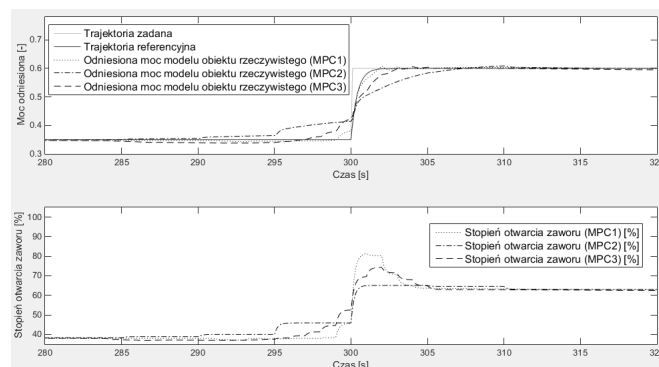
$\Delta t_{MPC}$ [s]	Trajektorja zadana	$J_{PID,2}$
0,5	Strojenia	0,3980
0,5	Testowania	0,4578
1,0	Strojenia	1,0080
1,0	Testowania	0,9710

Graficznie przykładowe wyniki sterowania predykcynego przedstawiono na rysunkach 2. i 3. Na rysunkach 4. i 5. pokazane zostało porównanie działania algorytmu MPC z najmniejszą wartością wskaźnika  $J_{MPC,2}$  oraz regulatora PID. W obydwu przypadkach sterowanie zmieniane jest z tym samym krokiem sterowania. Sterowanie PID i predykcynne badane było przy użyciu tej samej trajektorii testowej (innej od trajektorii strojenia regulatora PID) umożliwiając miarodajną analizę układów w ekwiwalentnych warunkach.



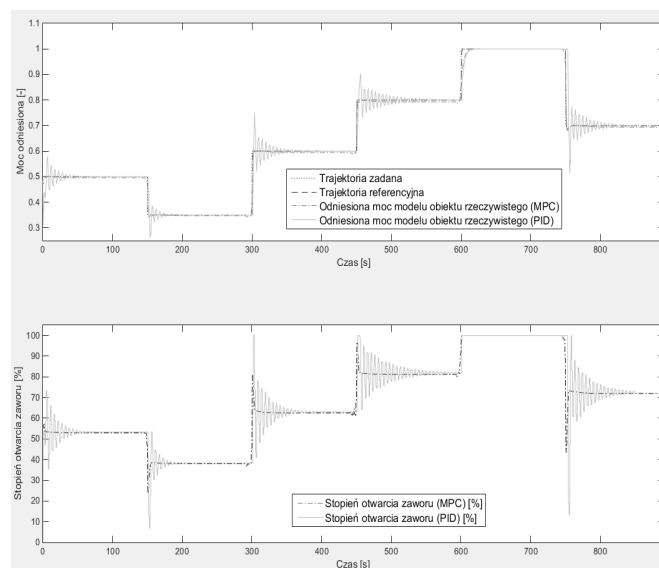
Rys. 2. Trajektorie wyjścia sterowania predykcynego i przebiegi otwarcia zaworu sterującego dla trzech kombinacji parametrów (MPC1:  $H_p = 10s$ ;  $H_s = 5s$ ;  $\Delta t_{MPC} = 1s$ ;  $w_{\Delta u} = 0,001$ ;  $w_n = 1000$ ; MPC2:  $H_p = 30s$ ;  $H_s = 10s$ ;  $\Delta t_{MPC} = 5s$ ;  $w_{\Delta u} = 0,01$ ;  $w_n = 1000$ ; MPC3:  $H_p = 20s$ ;  $H_s = 3s$ ;  $\Delta t_{MPC} = 1s$ ;  $w_{\Delta u} = 0,01$ ;  $w_n = 1000$ )

Dla uzyskania dobrych efektów sterowania predykcynego ważne jest dobranie odpowiednich parametrów algorytmu MPC. Jak wynika z analizy uzyskanych wyników horyzont predykcji ma wartość optymalną, którą można wyznaczyć eksperymentalnie – ilustrują to wyniki podane w Tabeli 1. Wraz z wzrostem horyzontu sterowania, jakość sterowania ulega poprawie.

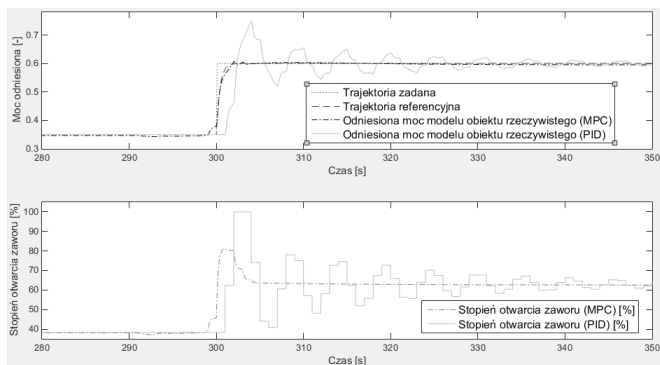


Rys. 3. Powiększenie fragmentu rysunku 2. (przedział czasowy od 280 do 320 sekund)

Waga dla członu kryterium odpowiedzialnego za zmiany sterowania nie powinna być zbyt duża, aby nie powodować zbyt dużych czasów narastania a jednocześnie nie powinna być zbyt mała, aby nie dopuszczać do pojawiania się przeregulowań. Dobór jej wartości można przeprowadzić eksperymentalnie – ilustrują to wyniki podane w Tabeli 1. Waga członu kryterium odpowiedzialnego za nadążanie powinna być takiego rozmiaru, aby spełnić zadowalająco warunki nadążania, czyli zapewniać akceptowalne wartości  $J_{MPC,2}$ . Zbytne jej zwiększanie nie wpływa pozytywnie na jakość sterowania a może jedynie wprowadzić niepożądaną złożoność obliczeniową. Krok sterowania powinien być możliwie jak najmniejszy. Należy jednak pamiętać o spełnieniu postulatu czasu rzeczywistego, to znaczy o tym, że algorytm MPC musi wyznaczać kolejne optymalne sterowania w okresie kroku sterowania, czyli przed chwilą kolejnego sterowania.



Rys. 4. Porównanie wyników dla algorytmu MPC ( $H_p = 10s$ ;  $H_s = 5s$ ;  $\Delta t_{MPC} = 1s$ ;  $w_{\Delta u} = 0,001$ ;  $w_n = 1000$ ) i sterowania PID z krokiem 1s



Rys. 5. Powiększenie fragmentu rysunku 4. (zakres: od 280 do 350 sekund)

Wyniki przedstawione na rysunkach 4. i 5. uzasadniają uznanie przewagi efektów sterowania predykcyjnego nad efektami sterowania PID. W sterowaniu PID przy zmianach trajektorii wartości zadanej pojawiają się duże przeregulowania wielkości sterowanej oraz trudne do zrealizowania zmiany stopnia otwarcia zaworu turbiny. Sterowanie MPC pozwala na dokładne nadążanie za wartością referencyjną (rysunek 4. – odpowiedź obiektu pokrywa się w sporej części z trajekcją referencyjną). Regulator PID strojony dla wzorcowej trajektorii zadanej daje znacznie gorszą jakość sterowania dla innych przebiegów tej trajektorii.

## 5. PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule wyniki zastosowania sterowania predykcyjnego do sterowania mocą turbiny parowej elektrowni jądrowej uzasadniają prowadzenie dalszych prac badawczych mających na celu jego prototypową implementację. Porównanie ze sterowaniem PID zastosowanym w ekwiwalentnych warunkach i przy przyjętych założeniach wskazało na przewagę sterowania predykcyjnego. Przewagi widoczne są w jakości nadążania przy zmiennej trajektorii zadanej wielkości sterowanej - mocy turbiny oraz w zmienności sygnału sterującego – stopnia otwarcia zaworu regulacyjnego. Sterowanie predykcyjne pozwala na szybsze

osiągnięcie stanu ustalonego bez oscylacji i przeregulowań jak przy sterowaniu z regulatorem PID. Zmiany sygnału sterującego w sterowaniu MPC są dużo łagodniejsze, mają mniejszy zakres i pozwalają na wydłużenie eksploatacji urządzeń wykonawczych. Uzyskane wyniki wskazują ponadto na ważność procesu doboru parametrów algorytmu predykcyjnego.

Dalsze prace ukierunkowane będą na zagadnienie czasu rzeczywistego. Podjęte zostaną prace nad optymalizacją algorytmu MPC (w tym skrócenie czasu wykonania kodu algorytmu sterowania, jak również skrócenie wywołania modelu obiektu) oraz ewentualnym upraszczaniem modelu turbiny parowej elektrowni jądrowej, aby spełnić postulat czasu rzeczywistego. Kontynuowana również będzie analiza doboru kroku sterowania, horyzontów algorytmu sterowania predykcyjnego i jego kryterium jakości.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Pawlik M., Strzelczyk F.: *Elektrownie*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 2014.
2. Kulkowski K., Kobylarz A., Grochowski M., Duzinkiewicz K.: *Dynamic model of nuclear power plant steam turbine*, Archives of Control Sciences, Numer 25(LXI), 2015, s. 65-86.
3. Sokółski P., Kulkowski K., Kobylarz A., Duzinkiewicz K., Rutkowski T. A., Grochowski M.: *Advanced Control Structures of Turbo Generator System of Nuclear Power Plant*, ActaEnergetica, Numer 3/24., 2015, s. 83-90.
4. Sokółski P., Kulkowski K., Kobylarz A., Duzinkiewicz K., Rutkowski T. A., Grochowski M.: *Wieloobszarowa Regulacja Systemu Turbogeneratorsa Elektrowni Jądrowej*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, Numer 42., Gdańsk 2015, s. 129-132.
5. Tatjewski P.: *Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych. Struktury i algorytmy*, Wydawnictwo EXIT, 2002.
6. Geletu A.: *Solving Optimization Problems Using the Matlab Optimization Toolbox – a Tutorial*, TU-Ilmenau, Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften 2007.

## ANALYSIS OF MODEL PREDICTIVE CONTROL APPLICABILITY FOR CONTROL OF NUCLEAR POWER PLANT STEAM TURBINE

The results of a preliminary analysis of the model predictive control (MPC) in steam turbine of nuclear power plant applicability was presented. Traditionally it is assumed that the turbine works in single operating point corresponding to its nominal power, what allows the usage of classic PID controllers. Synthesis of control for varying operating point conditions requires taking under consideration a nonlinear character of processes taking place within steam turbine as well as possibility of control constraints violation. In MPC algorithm, previously developed nonlinear model of 4CK465 steam turbine was used. Designed MPC algorithm was compared with PID controller tuned for a given trajectory. MPC control proposed in this paper gives satisfactory results of steam turbine control. In this article a brief analysis of the MPC algorithms parameters impact into control quality of steam turbine was presented.

**Keywords:** steam turbine, nuclear power plant, model predictive control, PID control.