

## Streszczenie

### **Kooperacyjny układ sterowania turbozespołu elektrowni jądrowej: zastosowanie rozproszonej regulacji predykcyjnej i komunikacji wyzwalanej zdarzeniowo**

Celem niniejszej rozprawy jest rozwiązanie problemu naukowego zdefiniowanego jako kooperacyjne sterowanie dwoma podstawowymi obiektami obiegu wtórnego elektrowni jądrowej z reaktorem wodnym ciśnieniowym (PWR, ang. *Pressurized Water Reactor*) tj. turbiną parową i generatorem synchronicznym, w szerokim zakresie zmian punktu pracy, z wykorzystaniem komunikacji wyzwalanej zdarzeniowo. Badania prowadzone były w oparciu o nieliniowe modele referencyjne stanowiące obiekt wirtualny na potrzeby weryfikacji proponowanych rozwiązań oraz modele uproszczone i zlinearyzowane na potrzeby syntezy układu regulacji. Przeanalizowano metody kooperacji poprzez wzajemną wymianę informacji pomiędzy lokalnymi układami regulacji oraz możliwość minimalizacji ilości przesyłanych informacji dzięki zastosowaniu zdarzeniowego wyzwalania komunikacji. Celem zastosowania takich rozwiązań jest minimalizacja wpływu innych podukładów na działanie rozpatrywanego układu regulacji (jak na przykład zmiana prędkości obrotowej wału turbogeneratora) występujących podczas pracy w warunkach zmiennego obciążenia tj. minimalizacja amplitudy i częstotliwości oscylacji mocy czynnej, częstotliwości oraz uchybu regulacji napięcia generatora, a także minimalizacja ilości danych przekazywanych przez sieć komunikacyjną. W celu oceny, czy proponowane rozwiązanie spełnia postawione zadanie, zastosowano całkowite wskaźniki jakości typu całka kwadratu uchybu i całka kwadratu uchybu z liniowo wzrastającą wagą pozwalające porównać jakość sterowania układów w różnych konfiguracjach i w różnych punktach pracy.

W niniejszej rozprawie doktorskiej przedstawiono charakterystykę wybranych obiektów obiegu wtórnego elektrowni jądrowej typu PWR: turbiny parowej i generatora synchronicznego. Następnie zaprezentowano dwie grupy modeli wybranych obiektów obiegu wtórnego elektrowni jądrowej. Jedne zostaną wykorzystane, do opracowania metod syntezy układów automatycznego sterowania wykorzystujących metody sterowania kooperującego, a drugie zostaną wykorzystane do testowania proponowanych układów sterowania. W celu minimalizacji wpływu niedokładnego modelowania zjawisk nieliniowych przez model liniowy, zastosowano rekurencyjną metodę najmniejszych kwadratów, która uaktualnia estymaty parametrów modelu obiektu regulacji on-line w zależności od punktu pracy układu. Na bazie tych modeli opracowano układ kooperacyjnej regulacji predykcyjnej z wyzwalaniem zdarzeniowym, a następnie przeprowadzono analizę jakościową opracowanych układów sterowania na

podstawie wyników symulacyjnych badań testowych w oparciu o wspomniane wyżej wskaźniki całkowite.

Zastosowanie dodatkowego kanału komunikacyjnego pomiędzy układami regulacji pozwoliło na poprawę jakości sterowania (mierzone całkowitymi wskaźnikami jakości) w stosunku do klasycznie stosowanych w elektroenergetyce układów regulacji. Dodatkowo, zastosowanie komunikacji wyzwalanej zdarzeniowo pozwoliło na znaczne ograniczenie ilości informacji przesyłanych przez sieć komunikacyjną podczas kooperacji układów.

**Słowa kluczowe:**

elektrownia jądrowa, turbozespół, sterowanie predykcyjne, kooperacja, wyzwalanie zdarzeniami

# Abstract

## **Cooperative control system for a nuclear power plant turbine-generator set: application of distributed predictive control and event-triggered communication**

The dissertation aims to solve a scientific problem defined as cooperative control of two basic objects of the secondary circuit of a nuclear power plant with a pressurized water reactor (PWR), i.e. a steam turbine and a synchronous generator, in a wide range of operating point changes, using event-triggered communication. The research was carried out on the basis of non-linear reference models which constituted a virtual object for the purpose of verifying the proposed solutions and simplified and linearized models for the purposes of the control system synthesis. Methods of cooperation through the mutual exchange of information between local control systems and the possibility of minimizing the amount of transmitted information through the use of event-driven communication were analyzed. The purpose of using such solutions is to minimize the impact of other subsystems on the operation of the considered control system (such as, for example, changing the rotational speed of the turbine-generator set's shaft) occurring during operation under variable load conditions, i.e. minimizing the amplitude and frequency of active power and frequency oscillations as well as the generator voltage control error and minimizing the amount of data transmitted over the communication network. In order to assess whether the proposed solution meets the task set, integral quality indices such as the integral of the squared error and the integral of the squared error with a linearly increasing weight were used to compare the control quality of the systems in different configurations and at different operating points.

The doctoral dissertation presents the characteristics of selected objects of the secondary circuit of a PWR nuclear power plant: a steam turbine and a synchronous generator. Then, two groups of models of selected secondary circuit objects of a nuclear power plant were presented. One will be used to develop methods for the synthesis of automatic control systems using cooperative control methods, and the other will be used to test the proposed control systems. In order to minimize the impact of inaccurate modeling of non-linear phenomena by the linear model, the recursive method of least squares was used, which updates the estimates of parameters of the on-line control object model depending on the operating point of the system. On the basis of these models, a cooperative predictive control system with event triggering was developed, and then a qualitative analysis of the developed control systems was carried out based on the results of simulation tests ba-

sed on the above-mentioned integral indices.

The use of an additional communication channel between the control systems made it possible to improve the control quality (measured by integral quality indicators) in relation to the control systems classically used in the power industry. In addition, the use of event-triggered communication allowed for a significant reduction in the amount of information sent via the communication network during the cooperation of the systems.

**Keywords:**

nuclear power plant, turbine-generator set, model predictive control, cooperation, event-triggered