

## Streszczenie rozprawy doktorskiej

*Analiza stanów dynamicznych wybranych elektrycznych układów napędowych z zastosowaniem modeli matematycznych i komputerowych dla drgań złożonych*

Niniejsza rozprawa przedstawia metodę analizy zjawisk drganiowych w układzie elektromechanicznym na podstawie sygnałów elektrycznych. Opisana metoda wykorzystująca sieć neuronową może zostać zaimplementowana do systemów diagnostycznych zestawów elektromaszynowych pracujących w ciężkich warunkach, które nie pozwalają na zamontowanie czujników pomiarowych.

W pierwszym rozdziale zdefiniowano problem badawczy pracy, na podstawie którego sformułowano cel oraz tezę pracy.

W drugim rozdziale opisano ogólne zagadnienia teoretyczne związane ze zjawiskami drganiowymi w układach elektromechanicznych. Scharakteryzowano zjawiska związane z drganiami swobodnymi i wymuszonymi o jednym stopniu swobody. Scharakteryzowano zagadnienie prędkości krytycznych w układach elektromechanicznych wraz ze zjawiskiem rezonansu mechanicznego oraz opisano drgania skrętne występujące w układach elektromechanicznych.

W trzecim rozdziale omówiono obserwatory zmiennych stanu jako narzędzie do analizy drgań w układach elektromechanicznych. Z uwagi na założenia pracy, w których przyjęto implementację zewnętrznego obserwatora lub innego narzędzia do estymacji drgań w układzie elektromechanicznym szerzej omówiono obserwator Luenbergera.

W rozdziale czwartym przedstawiono ogólną budowę sieci neuronowej. Analizie poddano budowę wewnętrzną sieci jednokierunkowej oraz sklasyfikowano funkcje aktywujące na przykładzie narzędzi dostępnych w programie MatlabSimulink. Dodatkowo scharakteryzowano metody uczenia sieci.

W rozdziale piątym przedstawiono modele matematyczne silników elektrycznych. Na ich podstawie zbudowano modele symulacyjne. Przedstawiono budowę modeli symulacyjnych silników PMSM oraz BLDC. W dalszej części rozdziału piątego przedstawiono kompletne modele silników wraz z przekształtnikiem energoelektronicznym. Wykonano próbne symulacje, których wyniki przedstawiono w pracy.

W rozdziale szóstym wykonano symulacje komputerowe przygotowanych wcześniej modeli symulacyjnych silników elektrycznych wraz z modelem wału mechanicznego. Wykonano symulacje komputerowe, w których przedstawiono zjawiska drganiowe zachodzące w wale mechanicznym. Dodano model sieci neuronowej do układu sterowania silnikiem PMSM i BLDC, której zadaniem była estymacja prędkości silników.

W rozdziale siódmym przedstawiono elementy składowe stanowiska laboratoryjnego, w skład którego wchodzi przekształtnik energoelektroniczny, zestaw elektromechaniczny z silnikiem PMSM oraz BLDC połączonym wałem sprężystym z prądnicą prądu stałego. Przedstawiono również system pomiarowy, w skład którego wchodzi karty pomiarowe połączone z komputerem klasy PC, oscyloskop cyfrowy z osprzętem separowanym galwanicznie do pomiaru prądu i napięcia w układzie elektromechanicznym.

W rozdziale ósmym przedstawiono badania eksperymentalne, które zweryfikowały badania symulacyjne oraz potwierdziły tezę pracy. Pokazano przebiegi prądów oraz napięć w układzie elektromechanicznym podczas pracy. Przedstawiono przebiegi zmian kąta skręcenia wału oraz przemieszczenia wału w punkcie znajdującym się w połowie jego długości. Pokazano odpowiedź sieci neuronowej po podaniu na jej wejście prądów i napięć silnika. Porównano odpowiedź sieci neuronowej z mierzonym kątem skręcenia wału. Stwierdzono, iż sieć z właściwą dokładnością odtwarza i odpowiednią dynamiką odtwarza kąt skręcenia wału.

W rozdziale dziewiątym podsumowano wykonaną pracę oraz przedstawiono wnioski wynikające z porównania wyników symulacji komputerowych z wynikami badań laboratoryjnych. Stwierdzono, iż sieć neuronowa może zostać wykorzystana do odtwarzania parametrów mechanicznych na podstawie sygnałów elektrycznych.



## Summary of a doctoral dissertation

*Analysis of dynamic states of selected electric drive systems with mathematical and computer models for complex vibrations*

This dissertation describes a method of analyzing vibration phenomena in an electromechanical system on the basis of electrical signals. The described method using a neural network can be implemented in diagnostic blocks of electromechanical systems operating in hard conditions, which do not allow the installation of measuring sensors.

In the first chapter, the research problem of the work was defined. On the basis of the problem main target and thesis of the work were formulated.

The second chapter describes general theoretical issues related to vibration phenomena in electromechanical systems. The phenomena related to free and forced vibrations with one degree of freedom were characterized. The problem of critical speeds in electromechanical systems was characterized along with the phenomenon of mechanical resonance, and torsional vibrations occurring in electromechanical systems were described.

The third chapter discusses state observers for analyzing vibrations in electromechanical systems. Due to the assumptions of the work in which the implementation of an external observer or another tool for estimating vibrations in an electromechanical system was adopted, the Luenberger observer is discussed in more detail.

The fourth chapter presents the general structure of the neural network. The internal structure of the feed forward network was analyzed, the activating functions were classified basis on available tools in the Matlab Simulink. Additionally, the methods of network training were characterized.

Chapter five presents mathematical models of electric motors. On their basis, simulation models were built. Simulation models of the BLDC and PMSM motors were presented. In the further part of the fifth chapter, complete motor models with the power electronic converter are presented. Sample simulations were performed, the simulation results were presented.

In the sixth chapter, computer simulations of previously prepared simulation models of electric motors with a model of a mechanical shaft were performed. Computer simulations were performed, vibration phenomena occurring in the mechanical shaft were presented. A neural network model was added to the PMSM and BLDC motor control system to estimate the speed of the motors.

The seventh chapter presents the components of the laboratory stand, which includes a power electronic converter, electromechanical system with a PMSM and a BLDC motor connected to DC generator by flexible shaft. A measurement system was also presented, which includes measurement cards connected to a PC computer, a digital oscilloscope with galvanically separated equipment for measuring current and voltage in an electromechanical system.

The eighth chapter presents the experimental studies that verified the simulation studies and confirmed the thesis of the work. The time curves of currents and voltages in the

electromechanical system during operation were presented. The time curves of changes in the shaft torsion angle and shaft displacement at a point located in the middle of his length are presented. The response of the neural network based on electrical signals from inverter was presented. The response of the neural network was compared with the measured angle of torsion of the shaft. The results showed that the network estimates the angle of torsion of the shaft with the appropriate accuracy and with the appropriate dynamics.

Chapter nine contains a summary of the work and final conclusions. The results confirmed that the neural network can be used to estimate mechanical parameters on the basis of electrical signals.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Amal', is located in the lower right quadrant of the page.