

Tytuł rozprawy doktorskiej:

Elektromagnetyczna pompa o programowalnej charakterystyce wydajności z synchronicznym silnikiem liniowym o magnesach trwałych

Autor rozprawy doktorskiej:

Sebastian Bartel

Streszczenie rozprawy doktorskiej

Celem pracy jest opracowanie koncepcji, projektu oraz budowa prototypu napędu elektromagnetycznej pompy zintegrowanej z elektrycznym silnikiem liniowym z magnesem trwałym, jak też stanowiska laboratoryjnego do badania jego właściwości w stanach statycznych i dynamicznych.

W przyjętej koncepcji elektryczny silnik liniowy jest zintegrowany z częścią hydrauliczną pompy w taki sposób, że biegnik silnika jest równocześnie tłokiem pompy. Pompa hydrauliczna ma budowę modułową (moduł pompy odpowiada fragmentowi cylindra z pojedynczą cewką wzbudzenia), a układ zasilania każdego modułu jest niezależny.

Istotne oryginalne cechy proponowanego rozwiązania to: kompaktowa budowa pompy, niezależne sterowanie poszczególnymi cewkami wzbudzenia układu napędowego oraz innowacyjna budowa tłoka pompy. Zintegrowanie układu napędowego z częścią hydrauliczną w jedną kompaktową całość znacznie zmniejsza gabaryty pompy, upraszcza jej konstrukcję oraz zwiększa niezawodność jej działania, natomiast niezależne zasilanie i sterowanie poszczególnymi elektromagnetycznymi modułami napędu (cewkami wzbudzenia) stwarza szerokie możliwości kształtowania charakterystyki wydajności pompy oraz programowania jej pracy.

Na początku pracy przedstawiono przegląd literatury, dotyczący napędów elektromagnetycznych pomp, ich klasyfikację, jak też rys historyczny rozwoju silników skokowych. Na podstawie dokonanego przeglądu i klasyfikacji istniejących rozwiązań pomp sformułowano koncepcję liniowej pompy elektromagnetycznej, integrującej elektryczny napęd pompy (elektryczny silnik liniowy) z częścią hydrauliczną pompy (cylindryczną pompą tłokową). Następnie zaprezentowano budowę prototypu zintegrowanej liniowej pompy elektromagnetycznej o przykładowej liczbie cewek wzbudzenia równej 9. Opisano zasadę działania zintegrowanej liniowej pompy dla rozwiązania konstrukcyjnego z pierścieniowym magnesem trwałym zasklepionym (rozwiązanie klasyczne) oraz dla rozwiązania z wewnętrznym zaworem zwrotnym, umiejscowionym w środku pierścieniowego magnesu trwałego. Dla pompy o scharakteryzowanej powyżej konstrukcji opracowano modele przestrzenne oraz polowe, wykorzystując odpowiednio oprogramowanie Autodesk Inventor oraz FEMM 4.2. Na podstawie opracowanego modelu polowego dokonano analizy rozkładu przestrzennego pola magnetycznego oraz siły działającej na tłok w pompie elektromagnetycznej z pojedynczą aktywowaną cewką wzbudzenia (układ "cewka wzbudzenia – tłok/biegnik").

Następnie skoncentrowano się na doborze optymalnych wymiarów geometrycznych cewek wzbudzenia (stosunku wysokość cewki T_C do jej długość L_C) z punktu widzenia siły działającej na tłok/biegnik dla zredukowanej liczby wariantów, obejmujących 5 różnych przypadków. Uzyskane metodą połową rozkłady przestrzenne sił elektromagnetycznych dla wybranego wariantu cewki wzbudzenia zweryfikowano w sposób pomiarowy na odpowiednio zaprojektowanym stanowisku laboratoryjnym.

W kolejnej części pracy zaprezentowano nową metodę rozwiązywania modelu matematycznego, wykorzystującą funkcję aproksymującą do analitycznego opisu rozkładu przestrzennego siły elektromagnetycznej działającej na tłok tłok/biegnik.

Kolejno rozważono jako możliwe funkcje aproksymujące/przybliżające: funkcję Gauss'a oraz różne zmodyfikowane postacie funkcji Kloss'a, definiując ostatecznie nową funkcję aproksymującą: **funkcję Kloss'a–modyfikacja 2**. Przy pomocy całki nieoznaczonej z tej funkcji dokonano również aproksymacji rozkładu strumienia sprzężonego z cewką wzbudzenia. W dalszej części rozprawy doktorskiej wyznaczono siłę elektromotoryczną rotacji indukowaną w cewce wzbudzenia i zweryfikowano jej przebieg czasowy w sposób pomiarowy na stanowisku laboratoryjnym.

Na podstawie sformułowanego modelu matematycznego elektromagnetycznej pompy zrealizowano szeroki program badań symulacyjnych oraz dokonano weryfikacji pomiarowej opracowanego modelu na stanowisku badawczym wyposażonym w szybką kamerę. Dokonano również analizy kolejnych uproszczeń opracowanego modelu matematycznego napędu pompy elektromagnetycznej z pojedynczą cewką wzbudzenia pod kątem charakteru uzyskiwanych przebiegów dynamicznych oraz czasu obliczeń.

Zweryfikowany pomiarowo model układu: "cewka wzbudzenia – tłok/biegnik", wykorzystano do sformułowania iteracyjnego modelu matematycznego N-cewkowego napędu pompy elektromagnetycznej. Bazując na tym modelu, przeprowadzono szerokie badania symulacyjne dla przykładowego, prototypowego 9-cewkowego napędu pompy elektromagnetycznej. Rezultatem tych badań jest potwierdzenie szerokiej możliwości kształtowania charakterystyk objętości przepompowanej cieczy i wydajności pompy poprzez odpowiednie zmiany napięć cewek wzbudzenia. Rozważono różne strategie sterowania napędem pompy przy pracy ciągłej (przepompowywanie cieczy), jak też przy pracy skokowej (dawkowane/dozowane cieczy).

Autor:

mgr inż. Sebastian Bartel

Title of the doctoral dissertation:

Electromagnetic pump with programmable performance characteristics with a permanent magnet synchronous linear motor

Author of the doctoral dissertation:

Sebastian Bartel

Dissertation abstract

The aim of the study is to develop the concept, design and construction of a prototype drive for an electromagnetic pump integrated with a permanent magnet electric linear motor, as well as a laboratory bench to test its properties in static and dynamic states.

In the proposed concept, the electric linear motor is integrated with the hydraulic part of the pump in such a way that the motor runner is at the same time the pump piston. The hydraulic pump is modular (a pump module corresponds to a section of a cylinder with a single excitation coil) and the power supply for each module is independent.

Major original features of the proposed solution include the compact design of the pump, the independent control of the individual excitation coils of the drive system and the innovative design of the pump piston. By integrating the drive system with the hydraulic part into a single compact unit significantly reduces the pump's size, simplifies its design and increases the reliability of its operation, while the independent power supply and control of the individual electromagnetic drive modules (excitation coils) creates a wide range of possibilities for shaping the pump's performance characteristics and programming its operation.

The study begins with a literature review of electromagnetic pump drives, their classification and a historical overview of the stepper motor development. Based on the review and classification of existing pump solutions, the concept of a linear electromagnetic pump was formulated, which integrates the electric drive of the pump (electric linear motor) with the hydraulic part of the pump (cylindrical piston pump). Following this, the construction of a prototype integrated linear electromagnetic pump with an example number of excitation coils equal to 9 is presented. The principle of operation of an integrated linear pump is described for a design solution with an sealed internal permanent magnet (classical solution) and for a solution with an internal valve located in the centre of the permanent magnet.

Spatial and field models were developed for the pump with an sealed internal permanent magnet, by using Autodesk Inventor and FEMM 4.2 software respectively. On the basis of the developed field model, the magnetic field spatial distribution and the electromagnetic force acting on the piston in a electromagnetic pump with a single activated excitation coil ("excitation coil – piston/runner" system) were analysed. Next, the focus was on selecting the optimal geometrical dimensions of the excitation coils (ratio of coil height T_C to its length L_C) from the point of view of the force acting on the piston/runner for a reduced number of variants, involving 5 different cases. The spatial distributions of electromagnetic forces obtained by the field method for the selected excitation coil variant were verified by measurement way on a specially designed laboratory bench.

The next part of the study presents a new method for solving the mathematical model, using an approximating function for analytical description of the spatial distribution of the electromagnetic force acting on the piston/runner.

The following were subsequently considered as possible approximating functions: the Gauss function and various modified forms of the Kloss function, finally defining a new approximating function: the **Kloss-modification 2** function. Using the indeterminate integral from this function, the flux linkage distribution of the excitation coil was also approximated. In the further part of the dissertation, the electromotive force of the rotation induced in the excitation coil was determined and was verified by measurement on a laboratory bench.

Based on the formulated mathematical model of the electromagnetic pump, an extended programme of simulation tests was realised and a measurement verification of the developed model was done on a test bench equipped with a high-speed camera. An analysis of simplifications of the developed mathematical model for the drive of an electromagnetic pump with a single excitation coil was also done in terms of the nature of the dynamic waveforms obtained and the calculation time.

A measurement-verified model of the system: "excitation coil – piston/runner" was used to formulate an iterative mathematical model of the N-coil drive of the electromagnetic pump. Based on this model, a wide-ranging simulation study was completed for an exemplary 9-coil electromagnetic pump drive. The result of this research is confirmation of the great potential for shaping the pumped liquid volume and pump performance characteristics by appropriately controlling the excitation coil voltages. Different pump drive control strategies were considered for continuous operation (pumping of liquids) as well as for step operation (dosing of liquids).

Author:

Sebastian Bartel, M.Sc.