

DYNAMICZNA APLIKACJA INTERNETOWA ASP.NET SILNIKA INDUKCYJNEGO JAKO ELEMENTU WIRTUALNEGO LABORATORIUM MASZYN ELEKTRYCZNYCH

Andrzej WILK¹, Ewa CHOJNACKA²

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 583471087 e-mail: andrzej.wilk@pg.gda.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: e-mail: ewa.chojnacka.c@gmail.com

Streszczenie: Tematem referatu jest dynamiczna aplikacja internetowa, która umożliwia symulację obwodową silnika indukcyjnego trójfazowego Sg 100 L2 z wykorzystaniem interfejsu przeglądarki WWW. Model matematyczny silnika jest zdefiniowany w tzw. osiach naturalnych i sformułowany na podstawie metody energetycznej Lagrange'a. Do implementacji modelu maszyny w aplikacji internetowej wybrano projekt typu Web Forms, który jest składnikiem środowiska programistycznego Microsoft Visual Studio. W referacie pokazano wyniki symulacji następujących stanów pracy silnika: bieg jałowy, stan zwarcia pomiarowego, rozruch przy zadanym obciążeniu wału maszyny. Możliwości symulacyjne programu wykraczają poza zakres ćwiczeń wykonywanych w rzeczywistym laboratorium.

Słowa kluczowe: aplikacja internetowa, silnik indukcyjny, biblioteka .NET Framework, HTML.

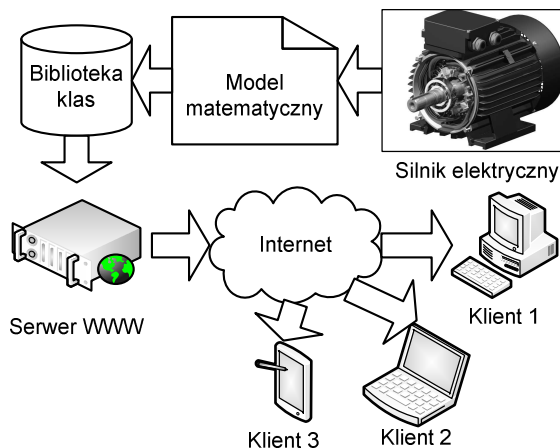
1. WPROWADZENIE

Na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki PG (WEiA) od szeregu lat rozwijana jest koncepcja Wirtualnego Laboratorium Maszyn Elektrycznych (WLME). To wirtualne laboratorium koresponduje z rzeczywistym Laboratorium Maszyn Elektrycznych na WEiA. Zasadniczym celem WLME jest wspomaganie procesu nauczania oraz możliwość przeprowadzenia symulacji różnych stanów pracy maszyny indukcyjnej z wykorzystaniem tylko przeglądarek internetowych. To oznacza, że WLME jest dostępne dla każdego użytkownika korzystającego z Internetu. Zaletą symulatora internetowego jest możliwość przeprowadzenia symulacji obwodowych silnika indukcyjnego przy różnych parametrach zasilania i obciążenia. W tym wirtualnym laboratorium istnieje możliwość wykonania szeregu badań, które przewiduje plan studiów.

Opracowany program komputerowy to aplikacja serwerowa o charakterze klient serwer (rys.1). Pojęcie serwer odnosi się do komputera lub grupy komputerów działających jak serwer WWW. Pojęcie klient odnosi się do komputera korzystającego z aplikacji internetowej za pośrednictwem protokołu HTTP oraz przeglądarki WWW. W aplikacji dynamicznej na żądanie klienta realizowany jest kod logiki programowalnej po stronie serwera aplikacji w zależności od zdarzeń określonych przez użytkownika [1].

W rozdziale 2 przedstawiono komputerowy model 3D i model matematyczny maszyny Sg100 L2. W rozdziale 3 opisano hybrydową aplikację serwerową w kontekście

przedstawionej maszyny. Pokazano interfejs aplikacji i wybrane wyniki symulacji obwodowej silnika w stanie rozruchu, zwarcia pomiarowego oraz biegu jałowego.



Rys. 1. Architektura dynamicznej aplikacji internetowej silnika indukcyjnego jako komponentu WLME

2. MODEL MATEMATYCZNY SILNIKA Sg100 L2

2.1. Komputerowy model 3D silnika indukcyjnego

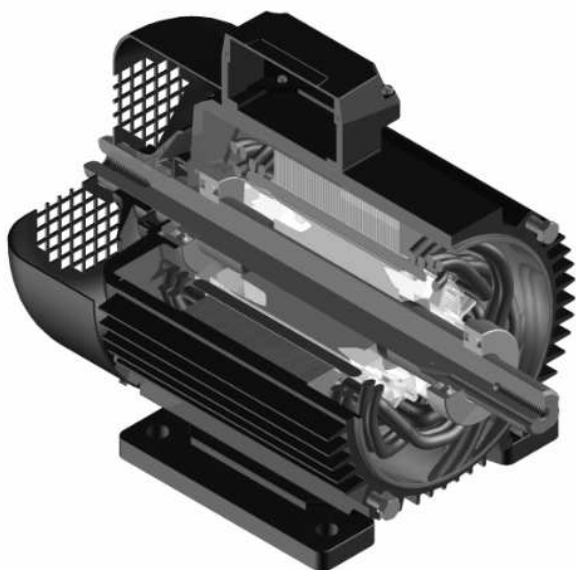
W WLME zawarte są komputerowe modele 3D szeregu maszyn elektrycznych. Model 3D maszyny to w istocie zbiór modeli 3D integralnych części mechanicznych silnika (wałek, wpust, pakiet blach itp.) skojarzonych ze sobą w podzespoły (wirnik, stojan, łożyska itp.). Połączone ze sobą podzespoły dają kompletny model maszyny.

Przedmiotem tego referatu jest aplikacja komputerowa zawierająca symulator obwodowy silnika indukcyjnego klatkowego typu Sg100 L2 wyprodukowanego przez FME Indukta S.A. Dane znamionowe silnika podano w tablicy 1.

Tablica 1. Dana znamionowe silnika indukcyjnego Sg100 L2

| Wielkość | Jednostka | Wartość |
|---------------------------------------|-----------|---------|
| Moc znamionowa - P_n | kW | 3,0 |
| Napięcie znamionowe - U_n | V | 400 |
| Prąd znamionowy - I_n | A | 4,8 |
| Prędkość znamionowa - n_n | obr/min | 2095 |
| Moment znamionowy - T_n | Nm | 9,86 |
| Współczynnik mocy - $\cos(\varphi_n)$ | - | 0,86 |
| Sprawność - η | % | 83,4 |

Na rysunku 2 pokazano widok modelu 3D silnika Sg100 L2 w przekroju wykonanym w osi podłużnej w celu wizualizacji wewnętrznej struktury maszyny.



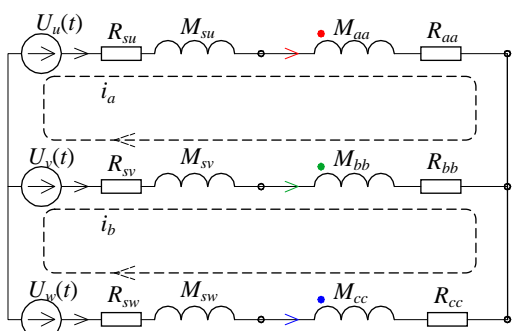
Rys. 2. Widok komputerowego modelu 3D silnika Sg100 L2 w częściowym przekroju podłużnym

2.2. Opis modelu matematycznego

Model maszyny w WLME zawiera 24 stopnie swobody, co umożliwi wykonanie symulacji również z uwzględnieniem asymetrii uzwojeń stojana i wirnika. Założono, że w aplikacji będzie także podany układ równań różniczkowych, aby użytkownik miał wiedzę o możliwościach modelu i założeniach upraszczających. Model opracowano na podstawie metody energetycznej Lagrange'a. Opis tej metody można znaleźć w [2].

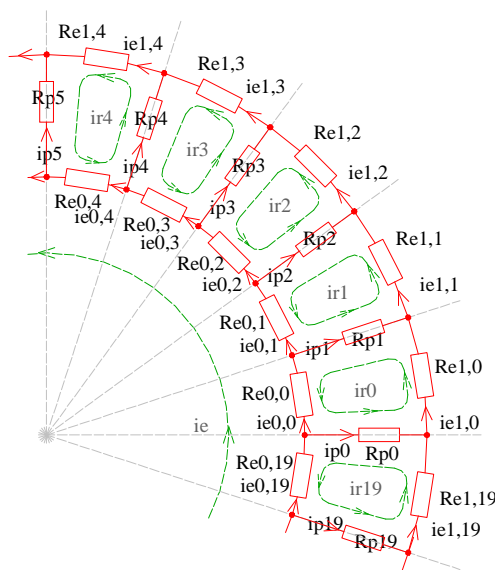
Jedynym istotnym założeniem upraszczającym w modelu silnika Sg100 L2 jest przyjęcie liniowych sprzężeń magnetycznych pomiędzy skupionymi cewkami stojana i wirnika. Wypieranie prądu w prętach klatki wirnika uwzględniono poprzez odpowiednią zmianę ich rezystancji w funkcji poślizgu.

Szczegółowa metodyka modelowania maszyn elektrycznych jest podana w [3]. U podstaw budowy modelu obwodowego maszyny leży jej podział na skupione elementy zachowawcze i dyssypatywne zarówno elektryczne, jak i mechaniczne. Na rys.3 pokazano schemat obwodu stojana silnika zawierającego skupione elementy uzwojenia (cewki M_{aa} , M_{bb} , M_{cc} i rezystory R_{aa} , R_{bb} , R_{cc}) oraz skupione elementy zewnętrzne (cewki M_{su} , M_{sv} , M_{sw} i rezystory R_{su} , R_{sv} , R_{sw}).



Rys. 3. Schemat obwodu stojana silnika Sg100 L2

Na rysunku 4 pokazano schemat ideowy elektryczny 1/4 klatki wirnika z zaznaczonymi elementami dyssypatywnymi – rezystancje prętów R_p i fragmentów pierścieni R_e .



Rys. 4. Fragment schematu obwodowego klatki wirnika silnika Sg100 L2

Istotnym wnioskiem wynikającym z rys.3 i rys.4 jest to, że obwód elektromagnetyczny silnika posiada 2 stopnie swobody od strony stojana (prądy i_a , i_b) oraz 21 stopni swobody od strony wirnika (prądy $i_{r0}, \dots, i_{r19}, i_e$). Model silnika uzupełnia obwód mechaniczny składający się z jednego elementu bezwładnościowego i tłumiącego w ruchu obrotowym. Występuje tu 1 stopień swobody – prędkość kątowa ω . Równania modelu silnika Sg100 L2 są następujące:

$$\mathbf{M}(\beta) \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_{r0} \\ i_{r1} \\ \vdots \\ i_{r19} \\ i_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_u(t) - U_v(t) \\ U_v(t) - U_w(t) \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \left[\frac{\partial}{\partial \beta} \mathbf{M}(\beta) \right] \omega_r - \mathbf{R}(s) \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_{r0} \\ i_{r1} \\ \vdots \\ i_{r19} \\ i_e \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \beta = \omega, \quad J \frac{d}{dt} \omega = T_{elem}(\mathbf{i}, \beta) + T_{ext}(t) - D\omega$$

gdzie: β – kąt obrotu wirnika, $\mathbf{M}(\beta)$ – macierz indukcyjności, $\mathbf{R}(s)$ – macierz rezystancji w funkcji poślizgu s , J – moment bezwładności, $T_{elem}(\mathbf{i}, \beta)$ – moment elektromagnetyczny, $T_{ext}(t)$ – moment zewnętrzny, D – współczynnik tłumienia.

Moment elektromagnetyczny jest wyrażony wzorem

$$T_{elem}(\mathbf{i}, \beta) = \frac{1}{2} \mathbf{i}^T \left[\frac{\partial}{\partial \beta} \mathbf{M}(\beta) \right] \mathbf{i}, \quad \mathbf{i}^T = [i_a \ i_b \ i_{r0} \ i_{r1} \ \dots \ i_{r19} \ i_e] \quad (2)$$

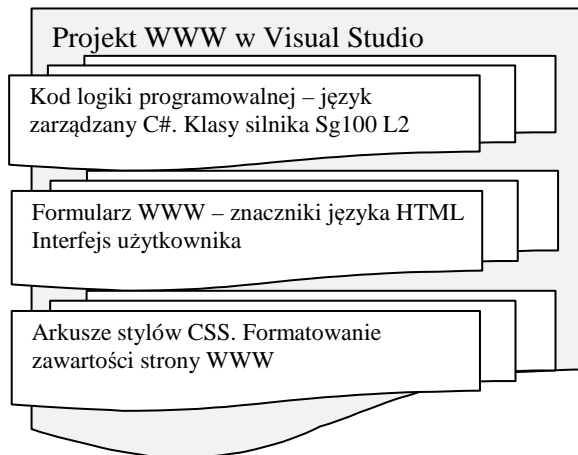
Szczegółowa postać macierzy indukcyjności $\mathbf{M}(\beta)$ i macierzy rezystancji $\mathbf{R}(s)$ podana jest w [4].

3. OPIS OPRACOWANEJ APLIKACJI ASP.NET

3.1. Struktura aplikacji ASP.NET

ASP.NET [1] jest technologią opracowaną przez firmę Microsoft do tworzenia dynamicznej zawartości stron WWW. Technologia ta wykorzystuje infrastrukturę .NET

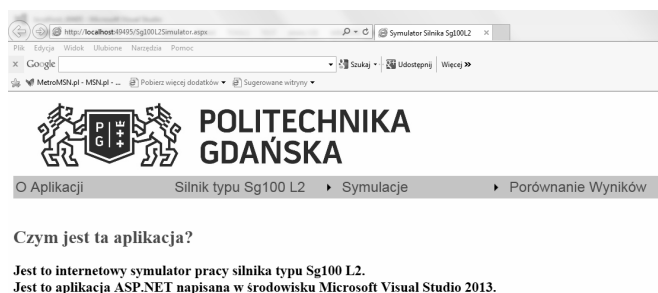
Framework [5] oraz jej zasoby. Do zaprojektowania omawianej aplikacji jako strony WWW zastosowano podejście hybrydowe. Polega ono na podzieleniu aplikacji na kod formularza WWW (znaczniki języka HTML) oraz na kod logiki programowalnej (klasy zdefiniowane w języku C#), jak pokazano schematycznie na rys.5. Dodatkowo zastosowano arkusze stylów CSS (ang. Cascading Style Sheets) do formatowania zawartości HTML.



Rys. 5. Struktura aplikacji internetowej symulatora obwodowego silnika Sg100 L2

3.2. Interfejs aplikacji

Widok fragmentu interfejsu graficznego użytkownika aplikacji serwerowej silnika Sg100 L2 w przeglądarce Windows Internet Explorer pokazano na rys.6.



Zakres

W tej aplikacji dostępne są następujące symulacje silnika asynchronicznego typu Sg 100 L2:

- Rozruch
- Stan zwarcia pomiarowego
- Bieg jałowy

Rys. 6. Fragment interfejsu użytkownika dynamicznej aplikacji serwerowej symulatora silnika Sg100L2

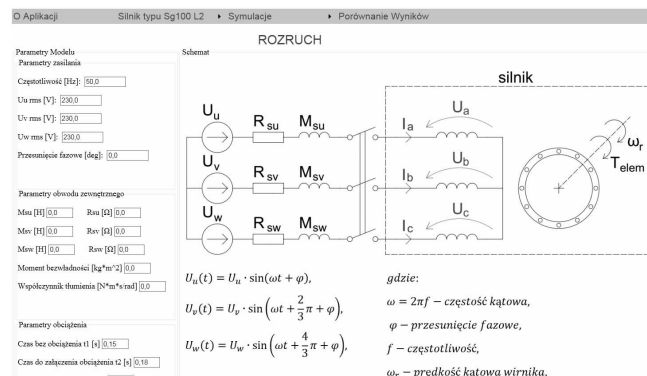
W aplikacji tej istnieją następujące zakładki:

- **O Aplikacji.** Prezentuje cel i zakres.
- **Silnik typu Sg100 L2.** Przedstawia dane znamionowe oraz komputerowe modele 3D silnika.
- **Symulacje.** Umożliwia edycję parametrów oraz przeprowadzenie symulacji: rozruchu, zwarcia pomiarowego i biegu jałowego.
- **Porównanie wyników.** Pozwala na porównanie wyników symulacji z wybranymi wynikami pomiarów.

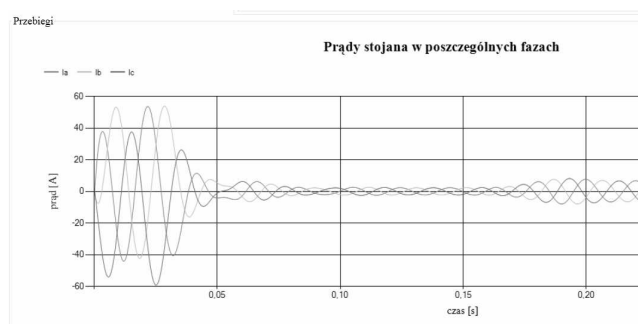
3.3. Wyniki symulacji

Na rys. 7 pokazano interfejs użytkownika umożliwiający edycję parametrów rozruchu bezpośredniego. Użytkownik może zdefiniować: wartości napięć, indukcyjności i rezystancje w obwodzie zasilania, czas symulacji, moment obciążenia itp. Na

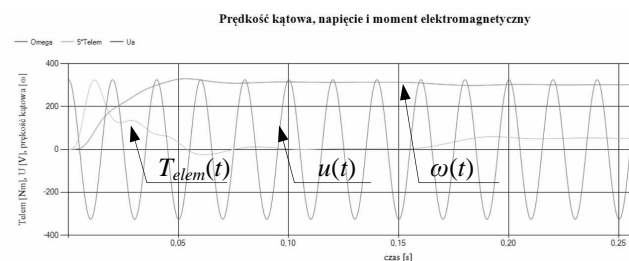
rys. 8 pokazano przebiegi prądów w poszczególnych fazach silnika, natomiast na rys. 9 pokazano przebiegi napięcia fazowego, momentu elektromagnetycznego oraz prędkości kątowej wirnika.



Rys. 7. Interfejs użytkownika umożliwiający edycję parametrów rozruchu bezpośredniego

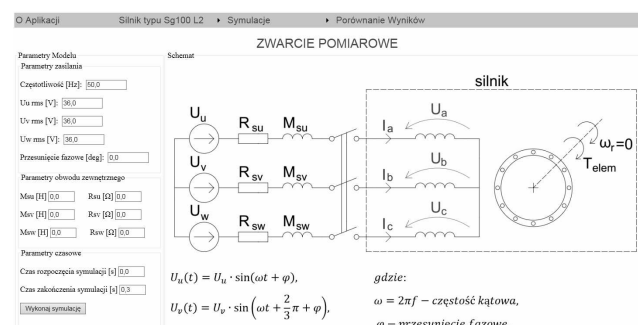


Rys. 8. Przebieg prądów w poszczególnych fazach silnika Sg100L2 podczas rozruchu bezpośredniego



Rys. 9. Przebieg napięcia fazowego, momentu elektromagnetycznego oraz prędkości kątowej wirnika podczas rozruchu bezpośredniego

Na rys. 10 pokazano interfejs użytkownika umożliwiający edycję parametrów zwarcia pomiarowego. Użytkownik może zdefiniować: wartości napięć, indukcyjności i rezystancje w obwodzie zasilania oraz czasu symulacji.



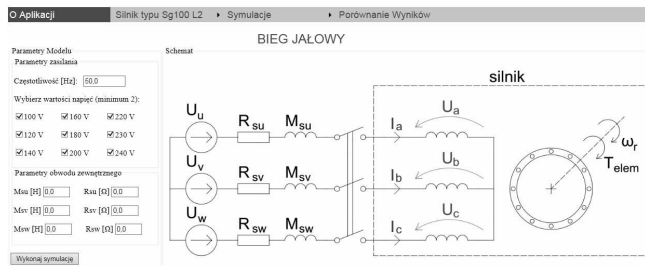
Rys. 10. Interfejs użytkownika umożliwiający edycję parametrów zwarcia pomiarowego

Na rys.11 pokazano wyniki symulacji zwarcia pomiarowego. Są one podane między innymi w formie tabeli i zawierają wartości: napięć, prądów, impedancji, reaktancji, rezystancji, strat mocy, współczynnika mocy itp.

| Wyniki Symulacji | | | | |
|------------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|
| Napięcia | Prądy | Impedancje | Reaktancje | Rezystancje |
| Ua_rms = 35,63 V | Ia_rms = 5,74 A | Za = 6,21 Ω | Xa = 4,18 Ω | Ra = 4,59 Ω |
| Ub_rms = 35,84 V | Ib_rms = 5,71 A | Zb = 6,28 Ω | Xb = 4,23 Ω | Rb = 4,64 Ω |
| Uc_rms = 35,94 V | Ic_rms = 5,76 A | Zc = 6,24 Ω | Xc = 4,16 Ω | Rc = 4,66 Ω |

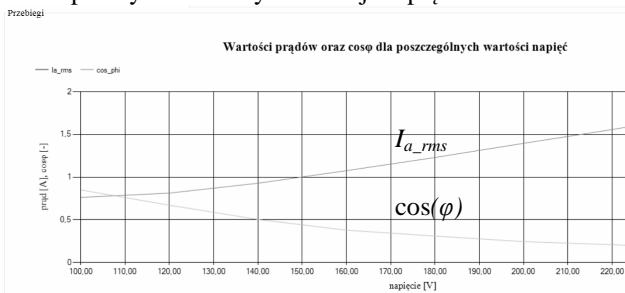
Rys. 11. Niektóre wyniki symulacji zwarcia pomiarowego

Na rys. 12 pokazano interfejs użytkownika umożliwiający edycję parametrów biegu jałowego. Użytkownik może zdefiniować: wartości napięć z dostępnej listy, indukcyjności i rezystancje w obwodzie zasilania.



Rys. 12. Interfejs użytkownika umożliwiający edycję parametrów biegu jałowego – wartości napięć mogą być wybierane tylko z dostępnej listy

Na rys.13 pokazano charakterystyki prądu biegu jałowego oraz współczynnika mocy w funkcji napięcia.



Rys. 13. Charakterystyki prądu biegu jałowego oraz współczynnika mocy w funkcji napięcia

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawiona aplikacja jest jednym z komponentów Wirtualnego Laboratorium Maszyn Elektrycznych rozwijanego w Politechnice Gdańskiej. Jest wsparciem procesu edukacyjnego teorii i praktyki maszyn elektrycznych. Ponieważ jest to aplikacja internetowa, więc jest ona dostępna w globalnej sieci WWW. Do jej uruchomienia potrzebna jest jedynie przeglądarka internetowa. Jest dedykowana studentom, ale ze względu na stosunkowo dokładny model maszyny może być przydatna inżynierom w projektowaniu różnych napędów z silnikiem Sg100 L2.

W referacie przedstawiono wybrane wyniki symulacji rozruchu bezpośredniego silnika przy określonej funkcji obciążenia jego wału. Oprócz pokazanych przebiegów momentu elektromagnetycznego, prędkości kątowej i prądów w obwodzie stojana możliwe jest zaprezentowanie także prądów w prętach klatki wirnika.

W referacie zaprezentowano również wyniki zwarcia pomiarowego. Moduł aplikacji automatycznie oblicza: impedancje, rezystancje, reaktancje zwarcia oraz straty mocy i współczynniki mocy. Zaletą tego modułu jest wyznaczenie składowych impedancji, rezystancji i reaktancji dla obwodu stojana i wirnika.

Ponadto w tej pracy zaprezentowano wyniki symulacji biegu jałowego. Moduł symulacji biegu jałowego automatycznie wykreśla charakterystyki: prądu biegu jałowego, współczynnika mocy oraz strat mocy w funkcji napięcia. Zaletą tego modułu jest wyznaczenie składowych elektrycznych i mechanicznych strat mocy.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Connolly R.: ASP.NET 2.0. Projektowanie aplikacji internetowych, Wydawnictwo Helion 2008.
2. White D.C., Woodson H.H.: Electromechanical Energy Conversion, Wiley, New York, 1959.
3. Sobczyk T.: Metodyczne aspekty modelowania matematycznego maszyn elektrycznych, Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa 2004.
4. Chojnacka E.: Internetowa aplikacja ASP.NET symulatora silnika asynchronicznego typu Sg100 L2, Praca dyplomowa, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2015.
5. Templeman J., Vitter D.: Visual Studio .NET: The .NET Framework. Black Book, Wydawnictwo Helion 2003.

ASP.NET DYNAMIC INTERNET APPLICATION OF INDUCTION MOTOR AS A COMPONENT OF VIRTUAL LABORATORY OF ELECTRICAL MACHINES

This paper presents dynamic Internet application for circuit simulation of induction motor (Sg 100 L2 type) using Web browser. Mathematical model of the motor is formulated by means of Lagrange's energy method. The application was developed using Web Forms type project in Visual Studio software and is supported by the .NET Framework as integrated component of Windows. The application is implemented as component of Virtual Laboratory of Electrical Machines. Simulation results of electromagnetic torque, currents and angular velocity for start-up simulation are presented. Results of impedances, reactances, resistances, and power factors for short circuit test are also shown. In addition simulation results of no-load test are included.

Keywords: Internet application, induction motor, .NET Framework library, HTML.