

## INTERNETOWA APLIKACJA ASP.NET SILNIKA INDUKCYJNEGO KLATKOWEGO DLA POTRZEB SYMULACJI W WIRTUALNYM LABORATORIUM MASZYN ELEKTRYCZNYCH

Andrzej WILK<sup>1</sup>, Anna GOLENIEWSKA<sup>2</sup>, Anna NOWAK<sup>3</sup>, Maciej CISEK<sup>4</sup>

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
tel.: 583471087 e-mail: andrzej.wilk@pg.edu.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
e-mail: anna.goleniewska@pg.edu.pl
3. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
e-mail: anna.nowak@pg.edu.pl
4. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
tel.: 583472857 e-mail: maciej.cisek@pg.edu.pl

**Streszczenie:** Tematem referatu są zagadnienia dotyczące modelowania matematycznego silnika, wyznaczania jego parametrów, implementacji modelu w programie komputerowym oraz opracowania aplikacji internetowej do potrzeb symulacji stanów przejściowych i ustalonych silnika indukcyjnego klatkowego typu Sg 132S-2A-G. Zagadnienia te są ściśle związane z koncepcją Wirtualnego Laboratorium (WL) maszyn elektrycznych rozwijanego od szeregu lat w Politechnice Gdańskiej. To wirtualne laboratorium koresponduje do rzeczywistego Laboratorium Maszyn Elektrycznych na WEiA PG. W referacie opisano sposób opracowania modelu matematycznego oraz iteracyjny algorytm wyznaczania parametrów obwodowych silnika przy założeniu, że nie są znane jego wewnętrzne szczegóły konstrukcyjne. Przedstawiono sposób implementacji modelu silnika w aplikacji komputerowej przy wykorzystaniu programowania zorientowanego obiektowo. Zastosowano hybrydowe podejście ASP.NET w celu opracowania aplikacji internetowej do symulacji pracy silnika.

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

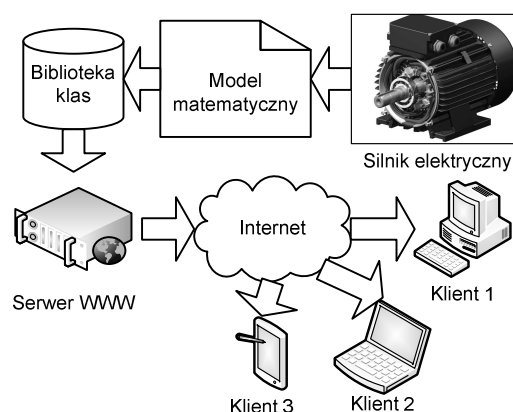
### 1. WPROWADZENIE

Dynamiczny rozwój technologii informatycznych (ang. Information Technology - IT) dostarcza użytkownikowi coraz bardziej wydajnych narzędzi (stacjonarnych i mobilnych) do akwizycji, przetwarzania i archiwizacji informacji. Ten szybki rozwój i powszechność użycia narzędzi IT, zwłaszcza przez osoby uczące się sprawia, że stosowanie nowoczesnych technologii IT w dydaktyce staje się koniecznością. Obecnie funkcjonuje szereg form tzw. „E-learningu”, które implementowane są w różnych środowiskach e-learningowych (ang. Virtual Learning Environment - VLE).

Na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki PG (WEiA) od szeregu lat rozwijana jest koncepcja Wirtualnego Laboratorium Maszyn Elektrycznych (WLME) jako jednego z komponentów VLE. To wirtualne laboratorium koresponduje do rzeczywistego Laboratorium Maszyn Elektrycznych na WEiA. Zasadniczym celem WLME jest wspomaganie procesu nauczania oraz możliwość

przeprowadzenia symulacji różnych stanów pracy maszyny z wykorzystaniem jedynie przeglądarek internetowych. To zapewnia powszechność dostępu do zasobów WLME każdemu użytkownikowi z dostępem do Internetu (stacjonarnego lub mobilnego). Architekturę WLME przedstawia rys.1, natomiast opis koncepcji opisano w [1].

Istotnym elementem WLME jest program komputerowy - dynamiczna aplikacja internetowa 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. Jest to aplikacja hybrydowa typu ASP.NET [2] (ang. Active Server Pages) opracowywana w środowisku Microsoft VisualStudio.



Rys. 1. Architektura dynamicznej aplikacji internetowej WLME

W tej pracy poruszono dwa nowe zagadnienia nie omawiane w [1]. Pierwsze dotyczy sposobu wyznaczania parametrów maszyny indukcyjnej bez znajomości jej wewnętrznych szczegółów konstrukcyjnych. Drugie dotyczy wykorzystania kontrolki serwera WWW o nazwie *Kreator* (ang. Wizard) do potrzeb funkcjonalności aplikacji WLME.

W rozdziale 2 przedstawiono model matematyczny maszyny Sg132S-2A oraz sposób wyznaczania parametrów obwodowych. W rozdziale 3 opisano hybrydową aplikację serwerową w kontekście przedstawionej maszyny. Pokazano interfejs aplikacji i wybrane wyniki symulacji obwodowej silnika w stanie rozruchu.

## 2. MODEL MATEMATYCZNY SILNIKA Sg132S-2A

### 2.1. Podstawowe informacje o silniku

Obiektem aplikacji WLME w tej pracy jest silnik indukcyjny klatkowy typu Sg132S-2A wyprodukowany przez CELMA/Indukta S.A. Dane znamionowe silnika podano w tablicy 1. Uzwojenie stojana jest skojarzone w trójkąt. Stopień ochrony silnika IP-55.

Tablica 1. Dane znamionowe silnika indukcyjnego Sg132S-2A

Wielkość	Jednostka	Wartość
Moc znamionowa - $P_n$	kW	5,5
Napięcie znamionowe - $U_n$	V	400
Prąd znamionowy - $I_n$	A	10,4
Prędkość znamionowa - $n_n$	obr/min	2920
Moment znamionowy - $T_n$	Nm	18,05
Współczynnik mocy - $\cos(\varphi_n)$	-	0,88
Sprawność - $\eta$	%	87

Na rys.2 pokazano fotografię silnika Sg132S-2A zainstalowanego w zespole elektromaszynowym z maszyną prądu stałego i silnikiem synchronicznym PMSM.



Rys.2. Fotografia silnika Sg132S-2A w zespole elektromaszynowym

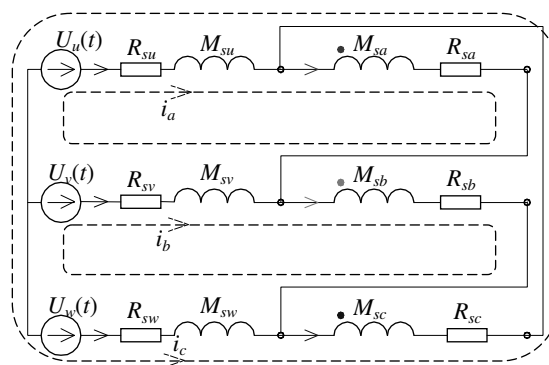
### 2.2. Model matematyczny

Do potrzeb WLME niezbędne są modele i parametry obwodowe kilkudziesięciu maszyn. Wyznaczanie parametrów na drodze symulacji polowej lub w sposób analityczny jest pracochłonne. Analizowane są zatem modele uproszczone i szybsze sposoby wyznaczania parametrów. W tej pracy założono, że nie są znane wewnętrzne szczegóły konstrukcyjne maszyny indukcyjnej. Przyjęto cztery podstawowe założenia upraszczające:

- obwód elektryczny wirnika klatkowego jest sprowadzony do trójfazowego uzwojenia stojana;
- indukcyjności własne i wzajemne są niezależne od prądów;
- indukcyjności wzajemne pomiędzy uzwojeniami stojana i wirnika są mono-harmonicznymi funkcjami kąta obrotu wirnika;
- uzwojenia stojana i wirnika są symetrycznie rozmieszczone i mają takie same liczby zwojów.

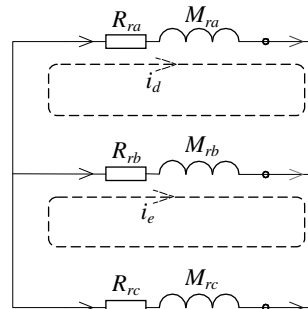
Szczegółowa metodyka modelowania obwodowego maszyn elektrycznych jest podana w [3,4]. U podstaw budowy modelu obwodowego maszyny leży jej podział na

skupione elementy zachowawcze i dyssypatywne zarówno elektryczne, jak i mechaniczne. Na rys.3 pokazano schemat obwodu stojana silnika skojarzonego w trójkąt, który zawiera skupione elementy uzwojenia (cewki  $M_{sa}, M_{sb}, M_{sc}$  i rezystory  $R_{sa}, R_{sb}, R_{sc}$ ) 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 Sg132S-2A

Na rys.4 pokazano schemat ideowy uzwojenia wirnika skojarzonego w gwiazdę, który zawiera skupione elementy uzwojenia (cewki  $M_{ra}, M_{rb}, M_{rc}$  i rezystory  $R_{ra}, R_{rb}, R_{rc}$ ).



Rys.4. Schemat obwodu wirnika silnika Sg132S-2A sprowadzonego do uzwojenia trójfazowego

Istotnym wnioskiem wynikającym z rys.3 i rys.4 jest to, że obwód elektromagnetyczny silnika posiada 5 elektrycznych stopni swobody – prądy oczkowe  $i_a, i_b, i_c$  w obwodzie stojana oraz prądy oczkowe  $i_d, i_e$  w obwodzie wirnika. Model silnika uzupełnia obwód mechaniczny składający się z jednego elementu bezwładnościowego i tłumiącego w ruchu obrotowym. Występuje tu 1 stopień swobody – prędkość kątowa  $\omega$ . Równania modelu silnika Sg132S-2A są następujące:

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

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

gdzie:  $\beta$  – 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:

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

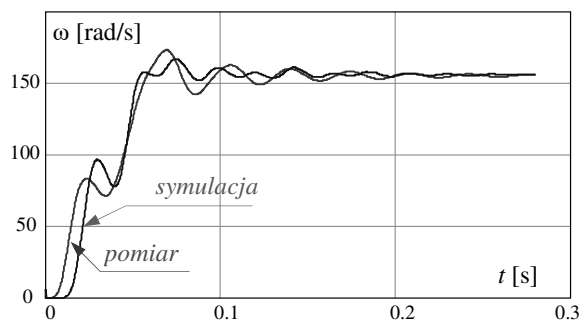
Szczegółowa postać macierzy indukcyjności  $M(\beta)$  i macierzy rezystancji  $R(s)$  podana jest w [5].

### 2.3. Wyznaczanie parametrów obwodowych

Ze względu na przyjęte założenia upraszczające oraz symetrię uzwojeń stojana i wirnika do określenia wszystkich wyrazów macierzy indukcyjności potrzeba trzech wartości: indukcyjność rozproszenia jednej z faz  $M_{\sigma s}=M_{\sigma r}$ , indukcyjność własna jednej z faz  $M_s=M_r$ , oraz maksymalna wartość indukcyjności wzajemnej pomiędzy uzwojeniem stojana i wirnika  $M_{sr}$ . Do określenia macierzy rezystancji wystarczy wartość rezystancji jednej z faz stojana lub wirnika  $R_s=R_r$ . Potrzebne są jeszcze wartości momentu bezwładności  $J$  i współczynnika tłumienia  $D$ . Razem jest nieznanymi 6 parametrów. Spośród tych parametrów rezystancja uzwojenia może być zmierzona stosunkowo łatwo i dokładnie. W tej pracy przyjęto, że takie parametry jak:  $M_{\sigma s}$ ,  $M_s$ ,  $M_{sr\_max}$ ,  $J$ ,  $D$  są nieznanymi i będą wyznaczone w oparciu o proces iteracyjny w dwóch lub więcej etapach.

Proces ten polega na zdefiniowaniu w pierwszym etapie w sposób arbitralny dyskretnych zbiorów pięciu nieznanymi parametrów  $\{M_{\sigma s}\}$ ,  $\{M_s\}$ ,  $\{M_{sr}\}$ ,  $\{J\}$ ,  $\{D\}$ . Następnie wybiera się w sposób iteracyjny wszystkie możliwe kombinacje wartości parametrów i przekazuje do solvera równań (1) i (2). Każdy wynik symulacji porównuje się z referencyjnym wynikiem uzyskanym na drodze pomiarowej. Jako kryterium porównawcze zastosowano metodę najmniejszych kwadratów. Kombinacja, przy której uzyskano najlepsze dopasowanie wyniku symulacji z przebiegiem referencyjnym wskazuje na parametry maszyny dające wyniki o względnie dobrej aproksymacji. Kolejny etap prowadzący do lepszej aproksymacji, to zmniejszenie zakresu zbiorów (blisko wartości wyznaczonych w pierwszym etapie) i ich liczebności.

W tej pracy do wyznaczenia parametrów przyjęto stan rozruchu bezpośredniego a przebiegiem referencyjnym była prędkość kątowa wirnika. Na rys.5 pokazano porównanie wyników symulacji i pomiaru prędkości kątowej podczas rozruchu bezpośredniego silnika. Procedurę wyznaczania parametrów opracowano w programie Mathcad. Parametry modelu przy tej symulacji są następujące:  $M_{\sigma s}=M_{\sigma r}=0,0045$  H;  $M_s=M_r=0,25$  H;  $M_{sr}=0,248$  H;  $J=0,013$  kg·m<sup>2</sup>;  $D=0,11$  Nm·s/rad. Rezystancja zmierzona metodą techniczną wynosi  $R_s=R_r=0,59$  Ω.



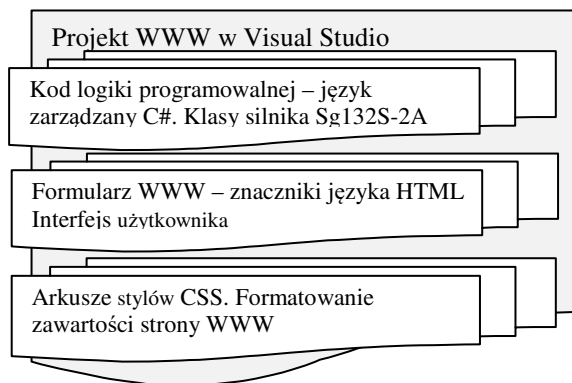
Rys.5. Porównanie wyników symulacji i pomiarów prędkości kątowej silnika podczas rozruchu bezpośredniego

## 3. OPIS OPRACOWANEJ APLIKACJI ASP.NET

### 3.1. Struktura aplikacji ASP.NET

ASP.NET [2] jest technologią opracowaną przez firmę Microsoft do tworzenia dynamicznej zawartości stron WWW. Technologia ta wykorzystuje infrastrukturę .NET Framework [7] oraz jej zasoby. Do zaprojektowania

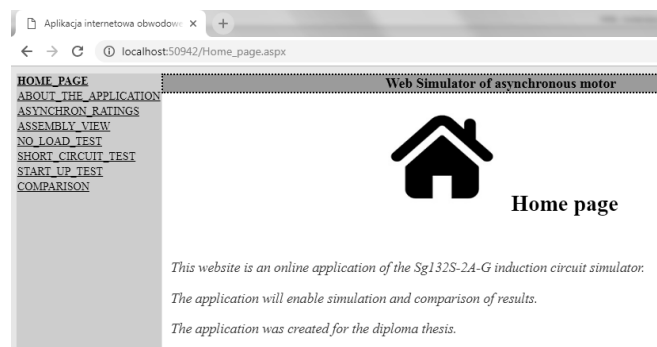
omawianej aplikacji w charakterze strony WWW zastosowano podejście hybrydowe. Polega ono na podzieleniu aplikacji na kod formularza WWW (znaczniki języka HTML) oraz na kod logiki programowalnej (klasy zdefiniowane w języku C#), jak pokazano schematycznie na rys.6. Zastosowano także arkusze stylów CSS (ang. Cascading Style Sheets) do formatowania zawartości HTML.



Rys.6. Struktura aplikacji internetowej symulatora obwodowego silnika indukcyjnego

### 3.2. Interfejs aplikacji

Widok fragmentu graficznego interfejsu użytkownika aplikacji serwerowej silnika Sg132S-2A L2 w przeglądarce Google Chrome pokazano na rys.7. Szczegółowy opis kodu programu można znaleźć w pracach [5,6].



Rys.7. Fragment interfejsu użytkownika dynamicznej aplikacji serwerowej symulatora silnika Sg132S-2A

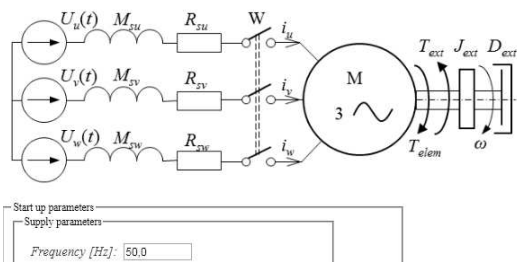
Funkcjonalność tej aplikacji oparta jest na właściwościach zaawansowanej kontrolki serwera WWW o nazwie *Kreator* (Wizard). Praca użytkownika z programem polega na sekwencyjnym wyborze poszczególnych kroków z paska nawigacji lub paska bocznego. Jest to szczególnie istotne w procesie edukacyjnym, w którym użytkownik powinien sekwencyjnie realizować poszczególne kroki dotyczące procesu symulacji. Kroki, które zaproponowano są następujące:

- *About the application.* Prezentuje cel i zakres aplikacji.
- *Asynchronous ratings.* Zawiera dane znamionowe silnika.
- *Assembly view.* Przedstawia fotografie i rysunki z wymiarami silnika.
- *No-load test.* Umożliwia symulację biegu jałowego silnika.
- *Short-circuit test.* Umożliwia symulację zwarcia pomiarowego silnika.

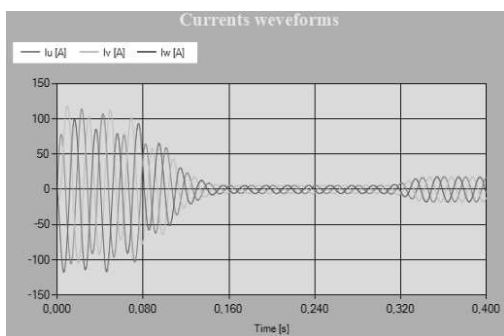
- *Start-up test.* Umożliwia symulację rozruchu silnika.
- *Comparison.* Zawiera porównanie wyników symulacji z wynikami pomiarów.

### 3.3. Wyniki symulacji

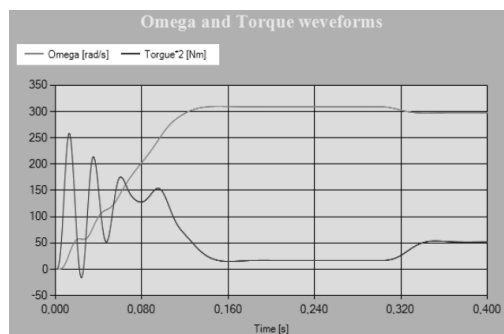
Na rys. 8 pokazano fragment interfejsu użytkownika umożliwiający edycję parametrów rozruchu bezpośredniego. Użytkownik może zdefiniować: wartości napięć, indukcyjności i rezystancji w obwodzie zasilania, czas symulacji, moment obciążenia itp. Na rys.9 pokazano przebiegi prądów w obwodzie zasilającym silnik, natomiast na rys.10 pokazano przebiegi momentu elektromagnetycznego oraz prędkości kątovej wirnika.



Rys.8. Fragment graficznego interfejsu użytkownika umożliwiający edycję parametrów rozruchu bezpośredniego



Rys.9. Przebieg prądów w obwodzie zasilającym silnik Sg132S-2A



Rys.10. Przebieg momentu elektromagnetycznego oraz prędkości kątovej wirnika podczas rozruchu bezpośredniego

## 4. WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawiona aplikacja jest jednym z komponentów Wirtualnego Laboratorium Maszyn Elektrycznych rozwijanego w Politechnice Gdańskiej. Aplikacja jest wsparciem procesu nauczania maszyn elektrycznych. Atrybutem aplikacji internetowej jest globalny zasięg - dostępna w sieci WWW. Może być uruchomiona za pomocą przeglądarki internetowej.

Zaproponowany model matematyczny silnika ze sprowadzonym uzwojeniem klatkowym do układu trójfazowego generuje zbliżone do pomierzonych przebiegi prądów stojana i prędkości kątovej. Metoda iteracyjna wyznaczania parametrów obwodowych pozwala na ich względnie poprawny dobór bez złożonych metod i układów pomiarowych. Przebiegi symulacyjne są zbliżone do pomierzonych, co oznacza, że zastosowany model i sposób wyznaczania parametrów jest zasadny.

Zastosowanie zaawansowanej kontrolki serwera WWW Wizard jest przydatne w procesie symulacji ze względu na sekwencję kroków. Pozwala to na określenie pewnej systematyki działań użytkownika w celu uzyskania wyniku symulacji. Podejście to, okazało się być zasadne.

## 5. BIBLIOGRAFIA

1. Wilk A., Chojnacka E.: Dynamiczna aplikacja internetowa ASP.NET silnika indukcyjnego jako elementu wirtualnego laboratorium maszyn elektrycznych, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG, ISSN 2353-1290, Nr 44/2015.
2. Connolly R.: ASP.NET 2.0. Projektowanie aplikacji internetowych, Wydawnictwo Helion 2008.
3. White D.C., Woodson H.H.: Electromechanical Energy Conversion, Wiley, New York, 1959.
4. Sobczyk T.: Metodyczne aspekty modelowania matematycznego maszyn elektrycznych, Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa 2004.
5. Nowak A.: Symulator obwodowy silnika indukcyjnego klatkowego typu Sg 132S-2A. Internetowa aplikacja ASP.NET, Praca dyplomowa, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2018.
6. Goleniewska A.: Symulator obwodowy silnika asynchronicznego typu SUDf 11M-4B 132S. Internetowa aplikacja ASP.NET, Praca dyplomowa, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2018.
7. Templeman J., Vitter D.: Visual Studio .NET: The .NET Framework. Black Book, Wydawnictwo Helion 2003.

## ASP.NET DYNAMIC INTERNET APPLICATION OF INDUCTION MOTOR FOR CIRCUIT SIMULATION IN VIRTUAL LABORATORY OF ELECTRICAL MACHINES

This paper presents dynamic Internet application for circuit simulation of induction motor (Sg132S-2A type) using Web browser. The application is implemented as component of Virtual Laboratory of Electrical Machines. The application was developed using ASP.NET type project in Visual Studio software and is supported by the .NET Framework as integrated component of Windows. Advanced Wizard control is implemented to obtain sequential processing of simulation. Circuit parameters of this motor are determined using iteration process. In this process angular velocity at start-up test was taken as a reference waveform. Graphical user interface of this application is shortly described to show the functionality of application. Simulation results of electromagnetic torque, currents and angular velocity for start-up simulation are presented.

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