



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI
I AUTOMATYKI

Imię i nazwisko autora rozprawy: **Zbigniew Kłosowski**

Dyscyplina naukowa: **Elektrotechnika**

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy w języku polskim: **Symulacja układu elektrownia wiatrowa – sieć elektroenergetyczna w czasie rzeczywistym**

Tytuł rozprawy w języku angielskim: **Real-time simulation of electric power network with wind turbine**

Promotor <i>podpis</i>	Drugi promotor <i>podpis</i>
dr hab. inż. Sławomir Cieślak	
Promotor pomocniczy <i>podpis</i>	Kopromotor <i>podpis</i>
dr inż. Kazimierz Bieliński	

Gdańsk, 2019

SPIS TREŚCI

1. Wstęp	3
1.1. Aktualny światowy stan badań dotyczących symulacji układów elektrycznych w czasie rzeczywistym	3
1.1.1. Definicja symulatora pracującego w czasie rzeczywistym	3
1.1.2. Wymagania dotyczące konstrukcji symulatorów PwCR	3
1.1.3. Podział symulatorów PwCR	4
1.1.4. Przykłady stosowania symulatorów PwCR.....	4
1.2. Opis wybranego obiektu badań	5
1.3. Cele, teza i zakres rozprawy	7
2. Struktura sprzętowa i programowa symulatora pracującego w czasie rzeczywistym	8
2.1. Struktura sprzętowa symulatora	8
2.2. Struktura programowa symulatora	9
2.3. Przykład pracy symulatora.....	12
3. Model matematyczny i algorytmy modelowania układu elektrownia wiatrowa – sieć elektroenergetyczna SN	14
3.1. Wybór metody modelowania matematycznego	14
3.2. Modele matematyczne wybranych trójfazowych elementów strukturalnych	17
3.2.1. Modele matematyczne podstawowych elementów ERLC	17
3.2.2. Model matematyczny maszyny indukcyjnej z wirnikiem pierścieniowym.....	18
3.2.3. Model matematyczny przekształtnika energoelektronicznego	20
3.2.4. Model matematyczny transformatora trójfazowego	22
3.3. Weryfikacja adekwatności proponowanych modeli matematycznych	26
3.3.1. Adekwatność modelu matematycznego maszyny indukcyjnej z wirnikiem pierścieniowym.....	26
3.3.2. Adekwatność modelu matematycznego przekształtnika energoelektronicznego	28
3.3.3. Adekwatność modelu matematycznego transformatora trójfazowego	29
3.4. Model matematyczny układu elektrownia wiatrowa – sieć elektroenergetyczna SN.....	30
3.5. Algorytm modelowania matematycznego układu elektrownia wiatrowa – sieć elektroenergetyczna SN.....	30
4. Badanie wybranych stanów pracy układu elektrownia wiatrowa – sieć elektroenergetyczna SN z zastosowaniem symulatora pracującego w czasie rzeczywistym	34
4.1. Problem stabilności symulacji	34
4.2. Badanie stabilności symulacji w czasie rzeczywistym układu uproszczonego	35
4.3. Badanie wybranych stanów pracy układu z zastosowaniem symulatora pracującego w czasie rzeczywistym.....	37
4.3.1. Opis eksperymentu.....	37
4.3.2. Wyniki badań	39
5. Podsumowanie i wnioski	45
Literatura (wybór ze spisu w rozprawie)	47

1. Wstęp

Obszar nauki dotyczący symulacji układów elektrycznych, zwłaszcza realizowanych w symulatorach pracujących w czasie rzeczywistym, z pewnością nie jest do końca zagospodarowany. Jednym z interesujących wątków w tym obszarze jest poszukiwanie modeli matematycznych i algorytmów symulacji układów elektroenergetycznych, które umożliwią wykonywanie obliczeń w strukturze sprzętowej komputera osobistego, w określonym czasie i o zadanej precyzji. Jest to zagadnienie wiodące w rozprawie doktorskiej.

1.1. Aktualny światowy stan badań dotyczących symulacji układów elektrycznych w czasie rzeczywistym

1.1.1. Definicja symulatora pracującego w czasie rzeczywistym

Istnieje określona grupa symulatorów układów elektrycznych, które umożliwiają adekwatną symulację stanów pracy w czasie rzeczywistym. W tego typu symulatorach wykonywana jest symulacja z czasem dyskretnym i stałym krokiem. Zaletą takiego symulatora jest również możliwość współpracy z rzeczywistym obiektem technicznym (np. regulatorem cyfrowym lub cyfrowym zabezpieczeniem elektroenergetycznym) w czasie rzeczywistym. Będzie on działał prawidłowo, jeżeli wyniki symulacji będą uzyskiwane w tym samym czasie co w jego fizycznym odpowiedniku. Obliczenia w symulatorze odbywają się szybciej niż kwant pracy symulatora, ponieważ należy uwzględnić czas potrzebny na sterowanie wejściami i wyjściami podłączonych do niego obiektów rzeczywistych.

Biorąc pod uwagę ideę pracy symulatora przedstawioną powyżej oraz standardy IEEE (ang. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) [16, 45], można zdefiniować pojęcie **symulatora pracującego w czasie rzeczywistym** (w skrócie „symulator PwCR”) jako cyfrową platformę, w której obliczenia wykonywane są współbieżnie z procesem zewnętrznym (otoczeniem) w celu czynnego monitorowania, a więc nadzorowania, sterowania lub terminowego reagowania na zdarzenia w nim zachodzące. Czynne monitorowanie rozumiane jest zgodnie z definicjami sformułowanym i stosowanymi m. in. w publikacjach [3, 15].

1.1.2. Wymagania dotyczące konstrukcji symulatorów PwCR

Podstawowe wymagania dotyczące konstrukcji i działania symulatorów PwCR koncentrują się na trzech komplementarnych aspektach: stabilnej pracy, obliczeniach wykonywanych wystarczająco szybko (aby nadążyć za rzeczywistością) oraz adekwatności uzyskiwanych wyników. Jednym z zasadniczych parametrów charakteryzujących symulator jest kwant czasu jego pracy. Aby dokonać wyboru odpowiedniej wartości należy wziąć pod uwagę:

- rodzaj symulowanych procesów dynamicznych (ujęcie jakościowe i ilościowe);
- złożoność oraz rozmiar modelowanego układu elektrycznego;
- czas potrzeby na rozwiązanie układu równań modelowanego układu elektrycznego;

- czas komunikacji/przesyłania danych z kart pomiarowych;
- czas na komunikację i wymianę danych pomiędzy procesorami.

1.1.3. Podział symulatorów PwCR

Symulatory PwCR stosowane do symulacji układów elektrycznych można podzielić na aplikacje:

- RCP (ang. *Rapid Control Prototyping*) - w aplikacji RCP algorytm działania sterownika jest implementowany w symulatorze PwCR, który podłączony jest do rzeczywistego obiektu sterowania [18, 26],
- HIL (ang. *Hardware in the Loop*) - w aplikacji HIL, fizyczny sterownik czy rzeczywiste urządzenie (np. regulator kąta położenia łopat turbiny wiatrowej) jest podłączony przez terminale I/O do symulatora PwCR, w którym zaimplementowany jest złożony model układu elektrycznego [4, 53],
- SIL (ang. *Software in the Loop*) - w aplikacji SIL wykorzystywane są dwa symulatory. Jeden symulator jest połączony z drugim symulatorem przez terminale I/O. W jednym symulatorze zaimplementowany jest algorytm sterownika, który miałby podlegać testom, natomiast w drugim symulatorze zaimplementowany jest model obiektu sterowanego [20, 28].

1.1.4. Przykłady stosowania symulatorów PwCR

W pracach badawczych i przemysłowych najczęściej wykorzystywanymi komercyjnymi symulatorami PwCR są: RTDS (ang. *Real-Time Digital Simulator*) firmy kanadyjskiej RTDS Technologies oraz RT-LAB (ang. *Real-Time Laboratory*) również firmy kanadyjskiej OPAL-RT Technologies. Na podstawie prac [31, 32] w tabeli 1.1 zestawiono przykłady wykorzystania tych dwóch symulatorów w środowiskach akademickich lub ośrodkach przemysłowych i badawczych.

Tab. 1.1. Przykłady zastosowań komercyjnych wybranych symulatorów PwCR (z wykorzystaniem [31])

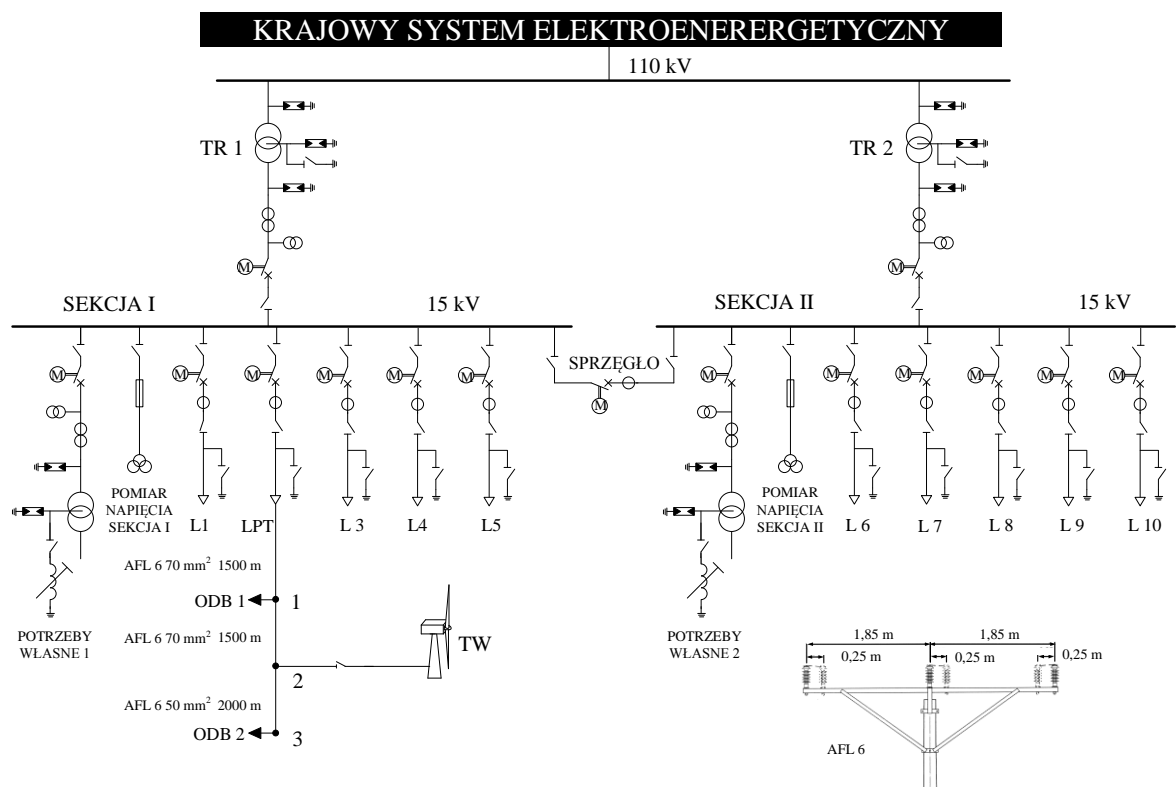
Symulator PwCR	Środowisko akademickie	Ośrodki badawcze i przemysłowe
RTDS	Texas Tech University Baylor University University of Houston Texas A&M University Politechnika Łódzka	Bonneville Power Administration – HVDC, Entergy, Pacific Gas & Electric PPL, Electric Utilities Corporation, National Renewable Energy Lab, Savannah River Nuclear Solutions ABB USA, GE Grid Solutions USA
RT-LAB	Texas Tech University Imperial Collage KTH Massachusetts Institute of Technology	Entergy, EMBRAER, China Electric Power Institute, NR Electric, NASA, ABB USA, DELPHI, SESA Lab

Koszt komercyjnych symulatorów jest bardzo duży, w związku z tym środowiska naukowe oraz badawcze wykorzystują tańsze symulatory PwCR. Do takiej grupy można zaliczyć symulatory oparte na procesorze sygnałowym DSP [8, 11, 13] lub układach FPGA [48] oraz oparte na klasycznych komputerach osobistych.

Drugą grupą symulatorów o tańszej konstrukcji są symulatory oparte na klasycznych komputerach osobistych, w których standardem jest stosowanie procesorów wielordzeniowych o dużej mocy obliczeniowej. Wykorzystanie komputera osobistego jako platformy cyfrowej pracującej w czasie rzeczywistym jest bardzo popularne w ośrodkach akademickich [6, 24, 34, 43, 44, 49]. W celu umożliwienia podłączenia rzeczywistego obiektu do tego typu symulatora, niezbędne są karty pomiarowe (karty I/O), które instalowane są na szynach PCI komputera osobistego. Do tworzenia aplikacji działającej w czasie rzeczywistym najczęściej wykorzystywane jest środowisko do programowania w języku C++, biblioteki Real-Time Windows Target (RTWT) lub xPC Target wchodzące w skład programu symulacyjnego Matlab/Simulink.

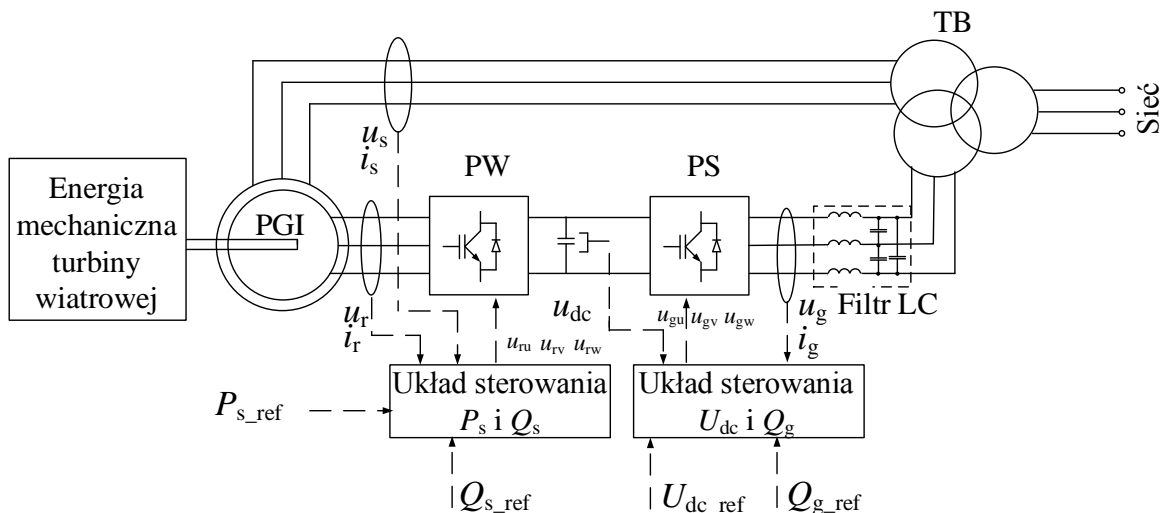
1.2. Opis wybranego obiektu badań

W rozprawie wybrano przykład elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej średniego napięcia, której schemat ideowy przedstawiono na rysunku 1.1. Z rozdzielni SN w sekcji I wyprowadzona jest specjalna linia elektroenergetyczna (LPT) do zasilania parku technologicznego z dwoma głównymi odbiorami. Do tej linii jest przyłączona turbina wiatrowa (TW) o mocy znamionowej 1,8 MW.



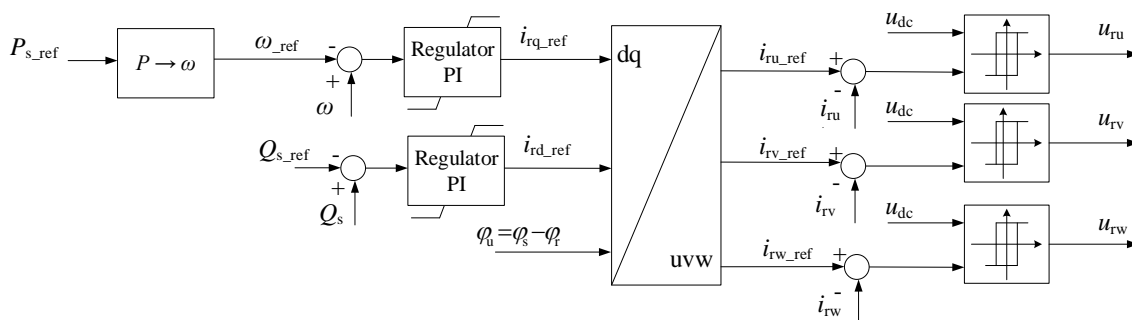
Rys. 1.1. Schemat ideowy przykładowej elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej SN

Turbina wiatrowa (TW) składa się z następujących głównych elementów (rys. 1.2): koła wiatrowego jako źródła energii mechanicznej (wraz z przekładnią), pierścieniowego generatora indukcyjnego (PGI); przekształtnika od strony wirnika (PW); przekształtnika od strony sieci (PS); filtra LC; trójzwojowego transformatora blokowego (TB) oraz układów sterowania.

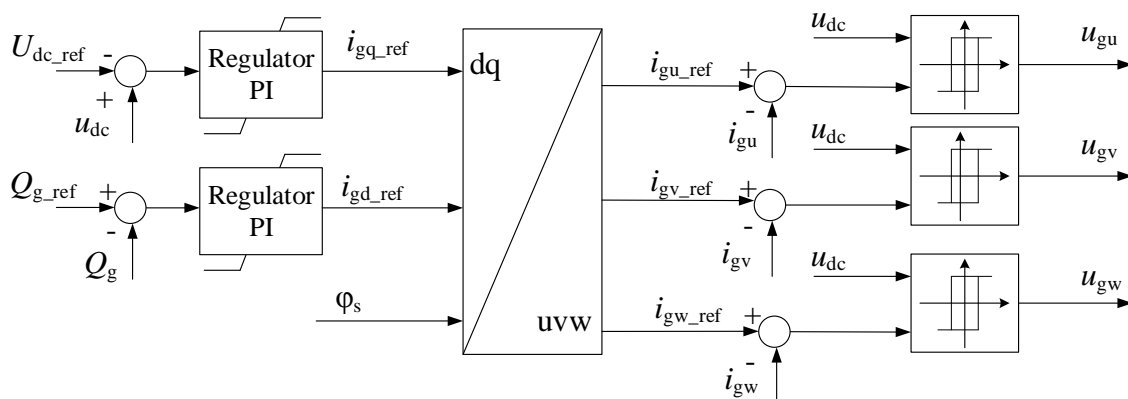


Rys. 1.2. Schemat poglądowy struktury zastosowanej turbiny wiatrowej

Na rysunkach 1.2 i 1.4 przedstawiono schematy układów sterowania przekształtników na podstawie [21, 39]



Rys. 1.3. Schemat układu sterowania przekształtnika od strony wirnika



Rys. 1.4. Schemat układu sterowania przekształtnika od strony sieci

Zastosowane algorytmy i struktury układów sterowania nie są przedmiotem analizy w rozprawie. Zostały one podane w celu uwzględnienia odpowiednich zależności w modelu matematycznym turbiny wiatrowej.

1.3. Cele, teza i zakres rozprawy

Symulacja układu elektrownia wiatrowa – sieć elektroenergetyczna jest rozumiana jako sztuczne odtwarzanie właściwości tego układu za pomocą jego modelu matematycznego. Model matematyczny jest zaimplementowany w strukturze sprzętowo-programowej platformy cyfrowej komputera osobistego. Symulacja ma się odbywać w czasie rzeczywistym, zatem niezbędne jest stosowanie takich algorytmów modelowania matematycznego, aby możliwe było wykonanie obliczeń w określonym czasie i o zadanej precyzji.

Celem naukowym rozprawy jest opracowanie modelu matematycznego i algorytmu symulacji stanów pracy układu elektrownia wiatrowa – elektroenergetyczna sieć dystrybucyjna SN, które zaimplementowane w strukturze sprzętowej klasycznego komputera osobistego będą stanowiły symulator pracujący w czasie rzeczywistym. Wykonane zostaną badania m.in. potwierdzające stabilność symulacji wybranych stanów pracy przykładowego układu.

Celem praktycznym pracy jest wykonanie symulatora układu elektrownia wiatrowa – elektroenergetyczna sieć dystrybucyjna SN, działającego w czasie rzeczywistym, którego zasadniczą cechą jest możliwość jego współpracy z rzeczywistym otoczeniem przez wymianę informacji (sygnałów) w obu kierunkach, od symulatora do otoczenia i z otoczenia do symulatora.

Oczekiwanyimi wynikami naukowymi rozprawy doktorskiej są:

- model matematyczny układu elektrownia wiatrowa – sieć elektroenergetyczna SN, który będzie charakteryzował się akceptowalnym stopniem adekwatności, przy działaniu ze stosunkowo długim krokiem całkowania numerycznego układów równań;
- algorytm symulacji wybranych stanów pracy układu elektrownia wiatrowa – sieć elektroenergetyczna SN, który umożliwi stabilną symulację tego układu w czasie rzeczywistym.

Oczekiwanyimi wynikami praktycznymi rozprawy doktorskiej są:

- projekt i realizacja sprzętowa oraz programowa symulatora układu elektrownia wiatrowa – sieć elektroenergetyczna SN pracującego w czasie rzeczywistym;
- wyniki badań, na podstawie których można sprecyzować ograniczenia w zakresie symulacji tego układu.

W kontekście przedstawionych wyżej aktualnych zagadnień dotyczących symulacji w czasie rzeczywistym stanów pracy układów elektrycznych oraz postawionych celów sformułowana została **teza rozprawy**:

Możliwe jest zastosowanie takiego modelu matematycznego i takiego algorytmu symulacji układu elektrownia wiatrowa – elektroenergetyczna sieć dystrybucyjna SN, aby w czasie rzeczywistym stabilnie i adekwatnie odwzorowywać jego właściwości z zastosowaniem platformy cyfrowej opartej na bazie komputera osobistego.

2. Struktura sprzętowa i programowa symulatora pracującego w czasie rzeczywistym

Opracowany symulator PwCR (symulator Pracujący w Czasie Rzeczywistym) oparty jest na platformie cyfrowej klasycznego komputera osobistego z systemem operacyjnym Microsoft Windows, którego podstawowymi zasobami są [42]: procesor, pamięć operacyjna, urządzenia zewnętrzne i zbiór danych. Platforma cyfrowa z takim systemem operacyjnym należy do grupy środowisk wielozadaniowych, w których poszczególne zadania rywalizują o dostęp do ograniczonych zasobów, a jednocześnie mogą współdziałać, aby osiągnąć zadane cele. Powoduje to znaczące utrudnienia w spełnieniu wyżej wymienionych warunków pracy symulatora PwCR, które mogą np. prowadzić do problemów z właściwym przydziałem zasobów pomiędzy poszczególne zadania i ochroną przydzielonych zasobów. Jest to pierwszy problem do rozwiązania w tej części pracy.

W celu komunikowania się symulatora z otoczeniem zastosowano karty pomiarowe z przetwornikami analogowo-cyfrowymi i cyfrowo-analogowymi, które umożliwiają przyłączanie poprzez specjalny interfejs (np.: wzmacniacz napięciowy, prądowy lub układy pomiarowe) urządzeń rzeczywistych. Stwarza to problem związany z właściwym zarządzaniem kartami (przetwornikami), które dla symulatora są urządzeniami wewnętrznymi, a w pracy platformy cyfrowej stanowią urządzenia zewnętrzne. Wpływa to na jeden z najważniejszych parametrów symulatora, mianowicie wartość kwantu czasu jego pracy. Niezbędne jest w tym aspekcie uwzględnienie czasu potrzebnego na:

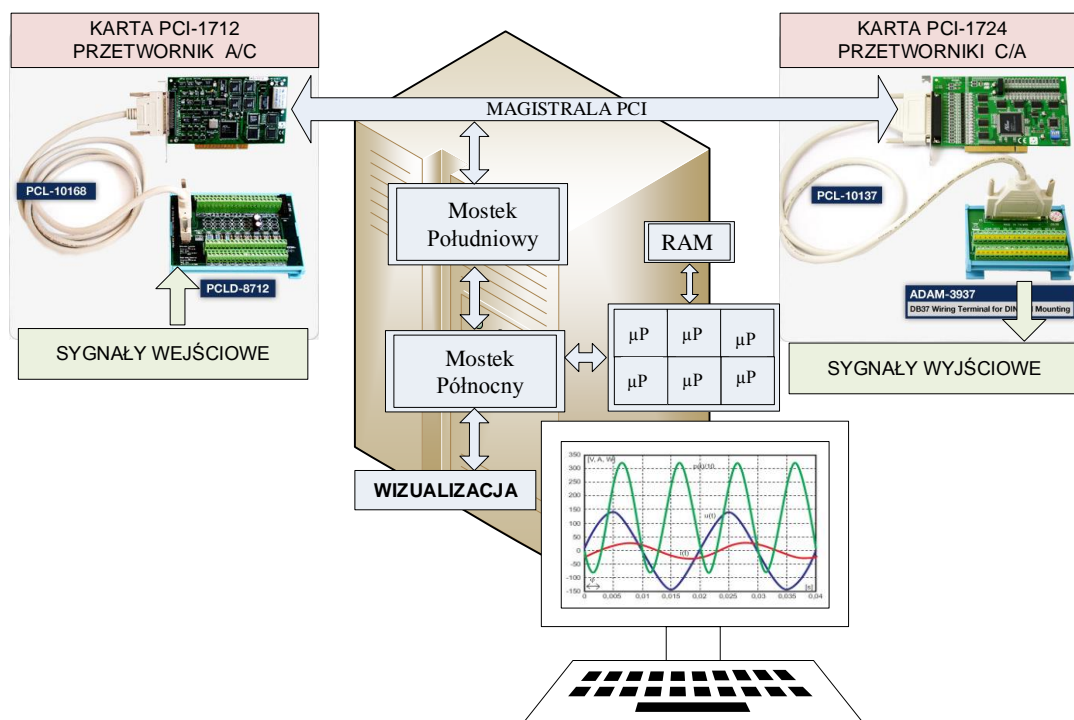
- obsługę przetworników analogowo-cyfrowych (czas uzależniony od liczby obsługiwanych wejść/wyjść);
- obsługę przetworników cyfrowo-analogowych (czas uzależniony od liczby obsługiwanych wejść/wyjść);
- rozpoczęcie kolejnego cyklu działania (czas uwzględniający wykonywanie procesów systemowych potrzebnych do stabilnej pracy systemu operacyjnego).

2.1. Struktura sprzętowa symulatora

Symulator PwCR (rys. 2.1) zbudowany jest na bazie platformy cyfrowej z sześciordzeniowym procesorem firmy Intel (typu Intel® Core™ i7 970) o częstotliwości taktowania 3,20 GHz. Prędkość magistrali systemowej wynosi 1600 MHz. W platformie dostępna jest pamięć RAM (4,00 GB DDR3).

Komunikacja pomiędzy otoczeniem i symulatorem realizowana jest dwukierunkowo, z wykorzystaniem sygnałów cyfrowych i analogowych. Do wprowadzania do symulatora sygnałów z otoczenia (np. prędkość wiatru, moc, napięcie, prąd oraz informacje o zdarzeniach) zastosowano kartę PCI-1712 firmy Advantech. Jest to wielofunkcyjna karta pomiarowa, która umożliwia wykorzystanie 16 wejść analogowych oraz 16 wejść lub wyjść cyfrowych. Karta jest wyposażona w jeden przetwornik analogowo-cyfrowy pracujący z rozdzielczością 12 bitów i z maksymalną częstotliwością próbkowania 1 MHz albo 1 MS/s (ang. *Mega Samples per second*), która zależy od ilości wykorzystanych wejść analogowych.

Do wyprowadzania sygnałów z symulatora do otoczenia (np. do zacisków na liście sygnałów wejściowych rzeczywistych regulatorów, zabezpieczeń) zastosowano kartę PCI-1724 firmy Advantech. Karta pozwala na uaktywnienie 32 kanałów wyjściowych. Każdy kanał posiada przetwornik cyfrowo-analogowy pracujący z rozdzielczością 14 bitów w trybie bezpośrednim. Oznacza to, że prędkość próbkowania zależy od wydajności zastosowanej platformy cyfrowej.



Rys. 2.1. Schemat poglądowy symulatora PwCR opartego na komputerze osobistym

2.2. Struktura programowa symulatora

Praca platformy cyfrowej, która jest podstawą symulatora PwCR, zarządzana jest przez klasyczny system operacyjny Microsoft Windows XP Professional. Aplikacja realizująca proces symulacji (model matematyczny oraz algorytmy komunikacyjne) napisana jest w środowisku Borland Builder C++. Uruchomienie programu symulacyjnego, który ma pracować w czasie rzeczywistym spowoduje, że zostanie utworzony nowy proces (wątek, ang. *Thread*). Proces ten otrzymuje najwyższy priorytet. Najwyższy priorytet procesu umożliwi aplikacji szybszy dostęp do pamięci czy magistrali PCI (karty z przetwornikiem A/C czy z przetwornikami C/A). Nadanie procesowi wysokiego priorytetu częściowo rozwiązuje problem z właściwym przydziałem zasobów pomiędzy poszczególne zadania i ochroną przydzielonych zasobów. Niestety w pełni satysfakcjonującego rozwiązania nie da się osiągnąć pod systemem operacyjnym Microsoft Windows, gdyż system nie pozwala na pełną kontrolę nad przydziałem zasobów pomiędzy poszczególne zadania. Przykładowy algorytm pracy symulatora PwCR przedstawiono na rysunku 2.2.

W pierwszym etapie pracy symulatora (Blok A1) następuje wprowadzanie parametrów modelowanego układu elektrycznego i warunków początkowych symulacji. W bloku tym również wyznaczane są wartości stałe w procesie symulacji.

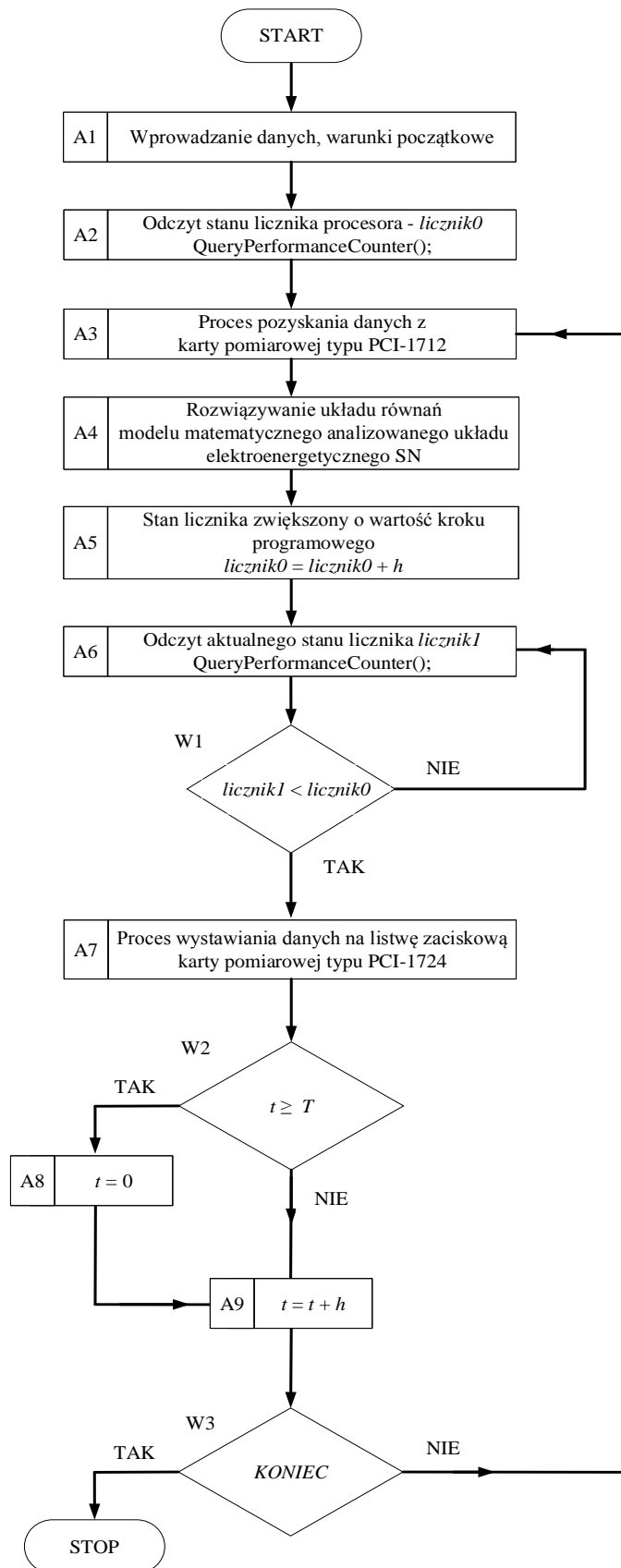
W bloku A2 następuje odczyt stanu licznika zegara wysokiej rozdzielczości. Zaimplementowany jest on w pamięci operacyjnej komputera przez system operacyjny. Odczyt stanu licznika umożliwia pracę symulatora ze stałym kwantem. Odczytana wartość licznika w momencie wywołania tej funkcji, traktowana jest jako czas początkowy danego cyklu i przechowywana jest w obszarze pamięci komputera pod zmienną *licznik0*.

W bloku A3 realizowany jest proces pozyskania danych z karty pomiarowej PCI-1712, które po skończeniu tego procesu dostępne są dla aplikacji zawierającej model matematyczny układu. Następnie realizowane są procedury rozwiązywania układu równań opisującego analizowany układ elektryczny oraz wyznaczane są wielkości fizyczne opisujące poszczególne elementy analizowanego układu (Blok A4).

W celu spełnienia ściśle określonych czasowych rygorów pracy symulatora konieczne jest wprowadzenie pewnej rezerwy czasowej. W bloku A5 zwiększana jest zmienna *licznik0* o wartość odpowiadającą kwantowi czasu pracy symulatora, która jest równa programowemu krokowi całkowania h . Dla tej chwili wartość przechowywana pod zmienną *licznik0* traktowana jest jako określony czas końcowy danego cyklu (również jako czas początkowy następnego cyklu). Następnie odczytywany jest aktualny stan licznika zegara (Blok A6). Odczytana wartość licznika w momencie wywołania tej funkcji, traktowana jest jako aktualny czas i przechowywana jest w obszarze pamięci komputera pod zmienną *licznik1*. W dalszej kolejności w algorytmie następuje sprawdzenie warunku W1, czy bieżący czas jest mniejszy od czasu końcowego tego cyklu. Jeżeli warunek jest spełniony, to następuje swego rodzaju wyczekiwanie na osiągnięcie czasu końcowego. W przypadku, gdy bieżący czas osiągnie określoną wartość czasu końcowego cyklu, następuje przejście do kolejnego bloku wykonawczego. W bloku A7 odbywa się proces wystawiania danych na listwę zaciskową karty pomiarowej typu PCI-1724.

Zmienna czasu t podczas symulacji sukcesywnie jest zwiększana. Teoretycznie wartość zmiennej czasu t może dążyć do nieskończoności (ciągła praca symulatora), w związku z czym może dojść do przepełnienia bufora przewidzianego dla tej zmiennej i programowego przerwania pracy symulatora lub jego pracy z niedopuszczalnymi błędami. Aby temu zapobiec zastosowano zerowanie zmiennej czasu t po przekroczeniu wartości okresu T sygnałów występujących w modelu (głównie wymuszeń – częstotliwość wymuszenia równa jest 50 Hz). Zerowanie zmiennej czasu t odbywa się z wykorzystaniem bloku warunkowego W2 w bloku A8.

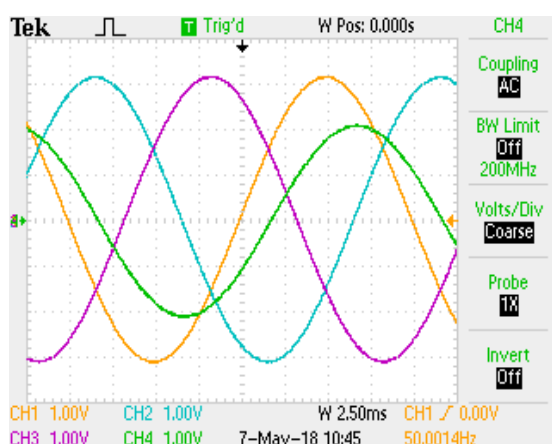
W bloku A9 następuje zwiększenie wartości zmiennej t o wartość programowego kroku całkowania h i po sprawdzeniu warunku W3 przejście do kolejnego cyklu pracy symulatora (warunek niespełniony) lub do przerwania jego pracy (warunek spełniony). Logiczna treść symbolu *KONIEC* może przyjmować różne postaci, np. może to być sygnał cyfrowy podawany z zewnątrz symulatora (np. 1 – praca symulatora, 0 – zatrzymanie pracy).



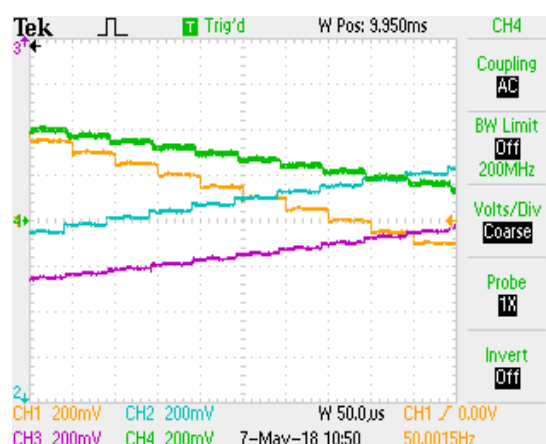
Rys. 2.2. Przykładowy algorytm pracy symulatora PwCR

2.3. Przykład pracy symulatora

Jakość pracy skonstruowanego symulatora PwCR została określona na podstawie analizy przebiegów czasowych. Do jej oceny zaimplementowano w urządzeniu model matematyczny trójfazowego transformatora, który został przedstawiony w pracy [24]. Na rysunku 2.3 zaprezentowano przebiegi napięć fazowych oraz przebieg prądu w fazie L1 uzwojenia górnego transformatora energetycznego w stanie ustalonym po obciążeniu go mocą znamionową. Dodatkowo na rysunku 2.4 przedstawiono te same przebiegi ze zmniejszoną skalą czasu, po to aby pokazać, że skonstruowany symulator PwCR pracuje z kwantem czasu pracy wynoszącym $50 \mu\text{s}$. Z analizy przebiegów czasowych przedstawionych poniżej można zauważyć, że symulator pracuje prawidłowo, ponieważ sygnały przesyłane na listwę zaciskową karty pomiarowej typu PCI-1724 odbywa się w tych samych chwilach czasowych (rys. 2.5).



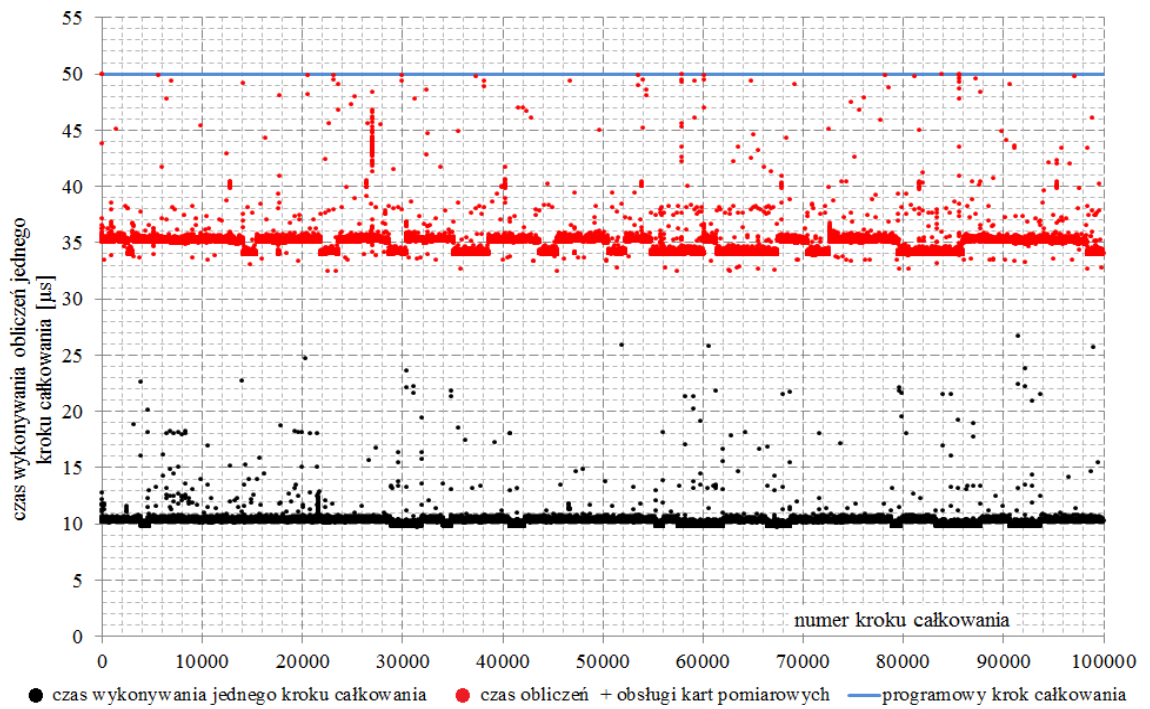
Rys. 2.3. Przebiegi napięć fazowych oraz prądu fazowego górnego uzwojenia transformatora pracującego w stanie ustalonym z obciążeniem mocą znamionową (u_{L1} – CH1, u_{L2} – CH2, u_{L3} – CH3: przekładnia 100/1 V/V; i_{L1} – CH4: przekładnia 10/1 A/V)



Rys. 2.4. Przebiegi ze zmniejszoną skalą czasu napięć fazowych oraz prądu górnego uzwojenia transformatora pracującego w stanie ustalonym z obciążeniem mocą znamionową

Częstotliwość pracy symulatora (kwant czasu pracy symulatora równy jest $50 \mu\text{s}$) została dobrana na podstawie analizy czasów wykonywania obliczeń jednego kroku całkowania, czasu na wykonanie procesu pozyskania danych z karty pomiarowej PCI-1712 oraz czasu na realizację procesu wystawiania danych na listwę zaciskową karty pomiarowej PCI-1724. Kwant czasu pracy symulatora musi być równy bądź większy sumy czasów potrzebnych na wykonanie wyżej wymienionych procesów. Idea doboru częstotliwości pracy symulatora została przedstawiona na rysunku 2.7. Do określenia częstotliwości pracy symulatora wykonano dwa eksperymenty symulacyjne. Pierwszy miał na celu określenie czasu wykonywania jednego kroku całkowania (czerwone punkty na rysunku 2.5). Wyniki drugiego eksperymentu pozwoliły na określenie czasu wykonywania obliczeń wraz z obsługą kart pomiarowych (czarne punkty na rysunku 2.5). Wyniki przeprowadzonych eksperymentów symulacyjnych (przykładowo dla 100000 kroków całkowania, rysunek 2.5) potwierdzają, że symulator może skutecznie pracować z kwantem czasu pracy równym $50 \mu\text{s}$ (niebieska linia na rysunku 2.7), przy

wykorzystaniu 6 kanałów wyjściowych (6 przetworników D/A) i jednego wejściowego (1 przetwornika A/D).



Rys. 2.5. Czas wykonywania obliczeń jednego kroku całkowania oraz czas wykonywania obliczeń jednego kroku całkowania wraz z czasem obsługi kart pomiarowych w symulatorze układu elektrycznego – wszystkie zadania wykonywane sekwencyjnie

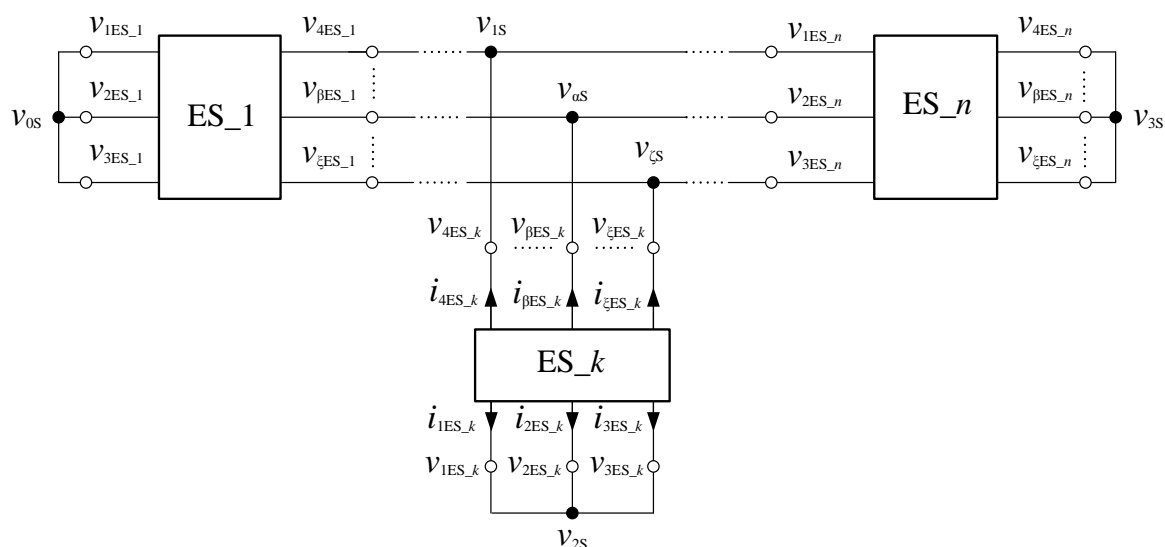
3. Model matematyczny i algorytmy modelowania układu elektrownia wiatrowa – sieć elektroenergetyczna SN

Analiza stanów pracy układu w postaci elektrowni wiatrowej przyłączonej do elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej średniego napięcia wymaga zastosowania odpowiednich modeli dynamicznych. Modelowane mają być ustalone i nieustalone stany pracy tego układu, z możliwością analizy prądów w poszczególnych gałęziach układu oraz mocy i napięć w jego węzłach. Wymagania dotyczące doboru kwantu czasu pracy symulatora uniemożliwiają analizę przebiegów wielkości fizycznych zachodzących wewnątrz przekształtników energoelektronicznych. Przekształtniki te uwzględniane są w modelu układu w postaci funkcjonalnych modeli matematycznych, pozwalających na uzyskanie zadowalającego stopnia adekwatności w zakresie przebiegów wielkości fizycznych na zewnątrz przekształtnika [19, 51], co jest rozwiązaniem pożądanym w konstrukcji symulatorów pracujących w czasie rzeczywistym.

3.1. Wybór metody modelowania matematycznego

Należy wyróżnić dwa ważne aspekty, które z punktu widzenia specyfiki konstrukcji symulatorów PwCR określają kierunek poszukiwań odpowiedniej metody modelowania matematycznego. Pierwszy aspekt to szybkie uzyskiwanie wyników (nie można przekroczyć ściśle określonego czasu) o odpowiednim poziomie adekwatności, drugi to rozwiązywanie układów równań ze stosunkowo dużym krokiem całkowania.

W monografii [10] skutecznie zastosowano w symulatorach PwCR metodę modelowania matematycznego opartą na wielobiegownikach elektrycznych. Zaletą tej metody jest możliwość podziału zadań obliczeniowych tak, aby możliwe było ich wykonywanie współbieżnie, np. w wielordzeniowym procesorze.



Rys. 3.1. Schemat zastępczy układu elektrycznego jako połączenie wielobiegowników elektrycznych

W publikacji [35] przedstawiony został sposób modelowania matematycznego obwodów elektrycznych, oparty na wyznaczaniu średnich wartości napięć na kroku całkowania, który charakteryzuje się możliwością zwiększenia kroku całkowania

z zachowaniem odpowiedniego stopnia adekwatności uzyskiwanych wyników. Autor rozprawy prowadził szereg badań tego sposobu w różnych zastosowaniach, czego wymiernym efektem są publikacje [25, 36, 37]. Sposób ten był stosowany do modelowania układów elektrycznych również przez innych autorów [np. 27, 34].

Biorąc pod uwagę znane zalety zastosowania wielobiegunników elektrycznych w symulatorach PwCR [7, 13, 34] oraz uzyskane wyniki badań wspomnianego sposobu modelowania obwodów elektrycznych, autor rozprawy postanowił zastosować metodę modelowania matematycznego przedmiotowego układu elektroenergetycznego opartą na połączeniu metody wielobiegunników elektrycznych z równaniami wyprowadzonymi na podstawie średnich wartości napięć na kroku całkowania.

Na rysunku 3.1 przedstawiono schemat strukturalny modelowanego układu elektrycznego w postaci połączonych elektrycznie n wielobiegunników. Wielobiegunniki elektryczne połączone są w $(\zeta S + 1)$ węzłach elektrycznych, a potencjał jednego z nich jest przyjęty jako 0 ($v_{0S} = 0$). Potencjały pozostałych węzłów zapisano w postaci macierzy potencjałów węzłów modelowanego układu

$$\mathbf{v}_S = [v_{1S} \quad v_{2S} \quad \cdots \quad v_{\alpha S} \quad \cdots \quad v_{\zeta S}]^T. \quad (3.1)$$

Każdy k -ty element strukturalny (ES) ma postać wielobiegunnika o ζ_{ES_k} zaciskach i jest charakteryzowany dwiema macierzami: macierzą kolumnową potencjałów węzłów zewnętrznych

$$\mathbf{v}_{ES_k} = [v_{1ES_k} \quad v_{2ES_k} \quad \cdots \quad v_{\beta ES_k} \quad \cdots \quad v_{\zeta ES_k}]^T \quad (3.2)$$

i macierzą kolumnową prądów gałęzi zewnętrznych

$$\mathbf{i}_{ES_k} = [i_{1ES_k} \quad i_{2ES_k} \quad \cdots \quad i_{\beta ES_k} \quad \cdots \quad i_{\zeta ES_k}]^T. \quad (3.3)$$

Opis matematyczny takiego wielobiegunnika, oparty na średnich wartościach napięć na kroku całkowania, sprowadza się do równania macierzowego w postaci

$$\mathbf{i}_{ES_k} + \mathbf{A}_{ES_k} \cdot \mathbf{c}\mathbf{v}_{ES_k} + \mathbf{B}_{ES_k} = \mathbf{0}, \quad (3.4)$$

gdzie: \mathbf{A}_{ES_k} – macierz kwadratowa o rozmiarze $\zeta_{ES_k} \times \zeta_{ES_k}$, \mathbf{B}_{ES_k} – macierz kolumnowa ζ_{ES_k} -elementowa, $\mathbf{c}\mathbf{v}_{ES_k}$ – ζ_{ES_k} -elementowa macierz kolumnowa całek z potencjałów węzłów zewnętrznych, zapisana w postaci

$$\mathbf{c}\mathbf{v}_{ES_k} = \begin{bmatrix} \int_{t_n}^{t_{n+1}} v_{1ES_k} \cdot dt & \int_{t_n}^{t_{n+1}} v_{2ES_k} \cdot dt & \cdots & \int_{t_n}^{t_{n+1}} v_{\beta ES_k} \cdot dt & \cdots & \int_{t_n}^{t_{n+1}} v_{\zeta ES_k} \cdot dt \end{bmatrix}^T. \quad (3.5)$$

Elementy macierzy \mathbf{A}_{ES_k} i \mathbf{B}_{ES_k} określone są przez parametry i wewnętrzne wielkości fizyczne związane z k -tym elementem strukturalnym. Dla trójfazowych elementów strukturalnych, o niezależnych gałęziach fazowych (A, B i C), macierze \mathbf{A}_{ES_k} i \mathbf{B}_{ES_k} można zapisać w ogólnych postaciach:

$$\mathbf{A}_{ES_k} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{ES_k} & -\mathbf{a}_{ES_k} \\ -\mathbf{a}_{ES_k} & \mathbf{a}_{ES_k} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{ES_k} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{ES_k} \\ -\mathbf{b}_{ES_k} \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

gdzie:

$$\mathbf{a}_{ES_k} = \text{diag}(\alpha_{AES_k}, \alpha_{BES_k}, \alpha_{CES_k}) \quad \text{oraz} \quad \mathbf{b}_{ES_k} = [\beta_{AES_k} \quad \beta_{BES_k} \quad \beta_{CES_k}]^T.$$

Wyznaczanie wartości tych macierzy dla poszczególnych ES zostało omówione szczegółowo w rozprawie doktorskiej.

Związek pomiędzy macierzą całek z potencjałów zewnętrznymi k -tego elementu strukturalnego a macierzą całek potencjałów węzłów modelowanego układu elektrycznego w postaci

$$\mathbf{c}\mathbf{v}_{ES_k} = \mathbf{P}_{ES_k}^T \cdot \mathbf{c}\mathbf{v}_S, \quad (3.7)$$

gdzie $\mathbf{c}\mathbf{v}_S$ jest $\zeta\mathbf{S}$ -elementową macierzą kolumnową całek z potencjałów węzłów modelowanego układu elektrycznego, zapisaną w postaci:

$$\mathbf{c}\mathbf{v}_S = \begin{bmatrix} \int_{t_n}^{t_{n+1}} \mathbf{v}_{1S} \cdot dt & \int_{t_n}^{t_{n+1}} \mathbf{v}_{2S} \cdot dt & \cdots & \int_{t_n}^{t_{n+1}} \mathbf{v}_{\alpha S} \cdot dt & \cdots & \int_{t_n}^{t_{n+1}} \mathbf{v}_{\zeta S} \cdot dt \end{bmatrix}^T. \quad (3.8)$$

Macierz \mathbf{P}_{ES_k} w równaniu (3.7) jest macierzą incydencji k -tego elementu strukturalnego i dla określonej struktury modelowanego układu elektrycznego jest ona stała (składa się z 0 i 1, wymiar macierzy $\zeta\mathbf{S} \times \zeta\mathbf{ES}_k$). Liczba wierszy tej macierzy jest równa liczbie niezależnych węzłów układu elektrycznego, natomiast liczba kolumn równa się liczbie gałęzi zewnętrznymi k -tego elementu strukturalnego.

Stosując I prawo Kirchhoffa dla wszystkich niezależnych węzłów układu, otrzymuje się zależność

$$\sum_{k=1}^n \mathbf{P}_{ES_k} \cdot \mathbf{i}_{ES_k} = \mathbf{0}. \quad (3.9)$$

Wyznaczając macierz prądów zewnętrznymi k -tego elementu strukturalnego z równania (3.4) i podstawiając do zależności (3.9) oraz uwzględniając równanie (3.7) otrzymuje się równanie macierzowe modelowanego układu elektrycznego w postaci

$$\mathbf{A}_S \cdot \mathbf{c}\mathbf{v}_S + \mathbf{B}_S = \mathbf{0}, \quad (3.10)$$

gdzie: \mathbf{A}_S – macierz kwadratowa o rozmiarach $\zeta\mathbf{S} \times \zeta\mathbf{S}$ wyrażona jest zależnością

$$\mathbf{A}_S = \sum_{k=1}^n \mathbf{P}_{ES_k} \cdot \mathbf{A}_{ES_k} \cdot \mathbf{P}_{ES_k}^T, \quad (3.11)$$

\mathbf{B}_S – macierz kolumnowa o $\zeta\mathbf{S}$ -elementach, wyrażona jest zależnością

$$\mathbf{B}_S = \sum_{k=1}^n \mathbf{P}_{ES_k} \cdot \mathbf{B}_{ES_k}. \quad (3.12)$$

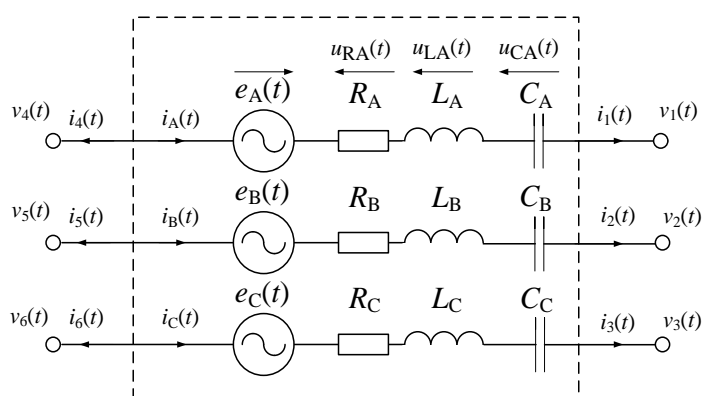
W ten sposób otrzymuje się stosunkowo prosty w realizacji algorytm modelowania matematycznego stanów pracy rozpatrywanego układu elektrycznego. Dla określonej struktury układu formułuje się macierze incydencji \mathbf{P}_{ES_k} .

3.2. Modele matematyczne wybranych trójfazowych elementów strukturalnych

W rozprawie przedstawiono modele matematyczne wybranych elementów strukturalnych, z których mogą składać się modele układów elektrycznych, ale zaprezentowane wyprowadzenia matematyczno-fizyczne modeli są uniwersalne i mogą być stosowane do opracowania modeli matematycznych elementów strukturalnych o praktycznie dowolnej strukturze.

3.2.1. Modele matematyczne podstawowych elementów ERLC

Na rys. 3.2 przedstawiono schemat trójfazowego elementu strukturalnego typu ERLC w postaci sześciobiegunnika. Element strukturalny typu ERLC składa się z trzech niezależnych gałęzi, które zawierają szeregowe połączenie idealnych elementów: źródła napięcia, rezystora, cewki i kondensatora.



Rys. 3.2. Schemat elementu strukturalnego typu ERLC

Tworząc model matematyczny elementu strukturalnego typu ERLC (rys. 3.2) w pierwszej kolejności należy zapisać równania na podstawie II prawa Kirchhoffa dla sześciobiegunnika następnie skorzystano z metody średnich wartości napięć na kroku całkowania [35]. Jednakże wykorzystując tę metodę do modelowania układów elektrycznych zawierających kondensator o bardzo małej pojemności (np. pojemność linii elektroenergetycznych) przy większym kroku całkowania napotkano problem ze stabilnością symulacji. Problem rozwiązano przez wprowadzenie modyfikacji, która polegała na zmianie sposobu całkowania napięcia na kondensatorze przy nie zmienionym kroku całkowania. Wykorzystano do tego celu metodę prostokątów. W autoreferacie zostanie przedstawiona tylko końcowa postać równania zewnętrznego (3.4) dla elementu strukturalnego typu ERLC, jako sześciobiegunnika elektrycznego

$$\mathbf{i}_{\text{ERLC}} + \mathbf{A}_{\text{ERLC}} \cdot \mathbf{c} \mathbf{v}_{\text{ERLC}} + \mathbf{B}_{\text{ERLC}} = \mathbf{0}, \quad (3.13)$$

gdzie:

$$A_{\text{ERLC}} = \begin{bmatrix} A^{-1} \cdot \Gamma \\ -A^{-1} \cdot \Gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{\text{ERLC}} & -a_{\text{ERLC}} \\ -a_{\text{ERLC}} & a_{\text{ERLC}} \end{bmatrix}, \quad B_{\text{ERLC}} = \begin{bmatrix} A^{-1} \cdot \Pi \\ -A^{-1} \cdot \Pi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{\text{ERLC}} \\ -b_{\text{ERLC}} \end{bmatrix},$$

$$a_{\text{ERLC}} = \text{diag}(\alpha_{\text{AERLC}}, \alpha_{\text{BERLC}}, \alpha_{\text{CERLC}}) = \text{diag}\left(\frac{1}{\Delta t \cdot A_A}, \frac{1}{\Delta t \cdot A_B}, \frac{1}{\Delta t \cdot A_C}\right),$$

$$b_{\text{ERLC}} = [\beta_{\text{AERLC}} \quad \beta_{\text{BERLC}} \quad \beta_{\text{CERLC}}]^T = \begin{bmatrix} \frac{\Pi_A}{A_A} & \frac{\Pi_B}{A_B} & \frac{\Pi_C}{A_C} \end{bmatrix}^T,$$

W rozprawie doktorskiej przedstawiono szczegółowo jak otrzymano końcową postać równania zewnętrznego elementu strukturalnego typu ERLC. W rozprawie również zamieszczono wzory pozwalające wyznaczyć elementy macierzy A_{ES_k} i B_{ES_k} dla struktur wielobiegunników typu ERL, RL, R,C oraz RLC.

3.2.2. Model matematyczny maszyny indukcyjnej z wirnikiem pierścieniowym

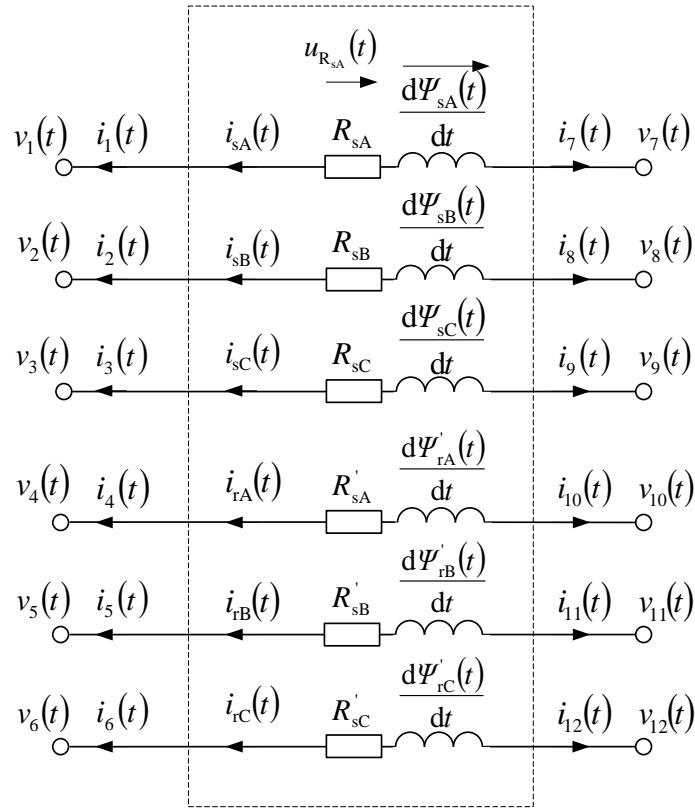
Model maszyny indukcyjnej z wirnikiem pierścieniowym (MIzWP) oparty na średnich wartościach napięć na kroku całkowania zostanie wyprowadzony przy następujących założeniach upraszczających [9, 17, 29, 40]:

- maszyna ma symetryczną konstrukcję stojana i wirnika, a uzwojenia stojana i wirnika są tak rozłożone, że zapewniają sinusoidalny rozkład przestrzenny przepływu magnetycznego,
- pole magnetyczne w maszynie składa się z trzech składowych: pola rozproszenia uzwojeń stojana (linie pola magnetycznego skojarzone są tylko z uzwojeniami stojana), pola rozproszenia uzwojeń wirnika (linie pola magnetycznego skojarzone są tylko z uzwojeniami wirnika) i pola głównego (linie pola magnetycznego skojarzone są jednocześnie z uzwojeniami stojana i wirnika),
- pomija się zjawisko nasycenia obwodu magnetycznego – zakłada się liniowość charakterystyki magnesowania,
- w rdzeniu magnetycznym maszyny nie występują straty mocy – pomija się zjawisko histerezy magnetycznej i występowanie prądów wirowych,
- rdzenie stojana i wirnika są bezżłobkowe – nie uwzględnia się również skosów żłobków.

Uwzględniając powyższe założenia upraszczające, MIzWP może być traktowana jako dwunastobiegunnik, o obwodowym schemacie zastępczym pokazanym na rys. 3.3, dla której zapisano następujący układ równań:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi(t)}{dt} + R \cdot i(t) + \mathcal{E} \cdot v(t) = 0 \\ J \frac{d\omega(t)}{dt} = M_e(t) - M_m(t) \\ \omega(t) = \frac{1}{p} \frac{d\gamma(t)}{dt} \end{cases}, \quad (3.14)$$

gdzie: $\Psi(t) = L(\gamma(t)) \cdot i(t), \quad (3.15)$



Rys. 3.3. Obwodowy schemat zastępczy maszyny indukcyjnej z wirnikiem pierścieniowym jako dwunastobiegunnika

Model matematyczny maszyny indukcyjnej pierścieniowej wyprowadzono na podstawie średnich wartości napięć na kroku całkowania. W autoreferacie zostanie przedstawiona tylko końcowa postać równania zewnętrznego (3.4) dla maszyny indukcyjnej z wirnikiem pierścieniowym, jako dwunastobiegunnika elektrycznego

$$\mathbf{i}_{\text{MIzWP}} + \mathbf{A}_{\text{MIzWP}} \cdot \mathbf{c} \mathbf{v}_{\text{MIzWP}} + \mathbf{B}_{\text{MIzWP}} = \mathbf{0}, \quad (3.16)$$

$$\mathbf{A}_{\text{MIzWP}} = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{E}}{\Delta t} \cdot \left(\frac{\mathbf{L}(\gamma(t_{n+1}))}{\Delta t} + \frac{\mathbf{R}}{m+1} \right)^{-1} \\ -\frac{\mathbf{E}}{\Delta t} \cdot \left(\frac{\mathbf{L}(\gamma(t_{n+1}))}{\Delta t} + \frac{\mathbf{R}}{m+1} \right)^{-1} \end{bmatrix},$$

gdzie:

$$\mathbf{B}_{\text{MIzWP}} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}'(t_n) \cdot \left(\frac{m \cdot \mathbf{R}}{m+1} - \frac{\mathbf{L}(\gamma(t_n))}{\Delta t} \right) + \sum_{k=1}^{m-1} \left(\frac{\Delta t^k \cdot (m-k)}{(k+1)! \cdot (m+1)} \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{i}^{(k)}(t_n) \right) \\ -\mathbf{i}'(t_n) \cdot \left(\frac{m \cdot \mathbf{R}}{m+1} - \frac{\mathbf{L}(\gamma(t_n))}{\Delta t} \right) - \sum_{k=1}^{m-1} \left(\frac{\Delta t^k \cdot (m-k)}{(k+1)! \cdot (m+1)} \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{i}^{(k)}(t_n) \right) \end{bmatrix},$$

Szczegółowy opis wielkości fizycznych opisujących maszynę indukcyjną oraz sposób wyznaczenia elementów macierzy $\mathbf{A}_{\text{MIzWP}}$ i $\mathbf{B}_{\text{MIzWP}}$ został zaprezentowany w rozprawie doktorskiej.

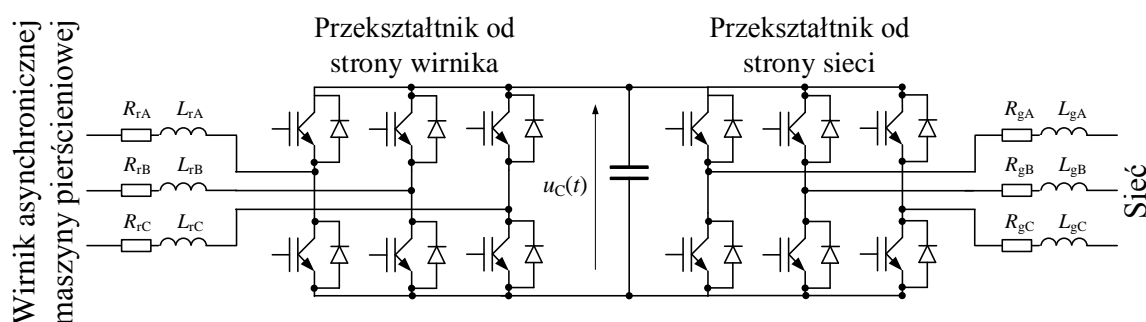
Do wyznaczenia prądów płynących w uzwojeniach maszyny konieczne jest wyznaczenie macierzy indukcyjności na końcu kroku całkowania $L(\gamma(t_{n+1}))$, która zależy od wartości kąta obrotu wirnika na końcu kroku całkowania $\gamma(t_{n+1})$. Na początku wyznaczana jest wartość tego kąta z wykorzystaniem niejawniej metody Eulera (predykcja kąta obrotu wirnika), na podstawie wzorów:

$$\begin{aligned} \gamma(t_{n+1}) &= \gamma(t_n) + dt \cdot p \cdot \omega(t_{n+1}), \\ \omega(t_{n+1}) &= \omega(t_n) + dt \cdot \frac{M_e(t_n) - M_m(t_n)}{J}. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Znając wartości prądów gałęziowych na końcu kroku całkowania oraz wartość elektrycznego kąta obrotu wirnika, można wyznaczyć strumienie magnetycznie skojarzone z uzwojeniami poszczególnych faz stojana i wirnika, stosując bezpośrednio zależność (3.15).

3.2.3. Model matematyczny przekształtnika energoelektronicznego

W rozdziale przedstawiony zostanie model matematyczny przekształtnika energoelektronicznego stosowanego w układach elektrowni wiatrowych z pierścieniowymi generatorami indukcyjnymi, którego schemat ideowy przedstawiono na rys. 3.4.

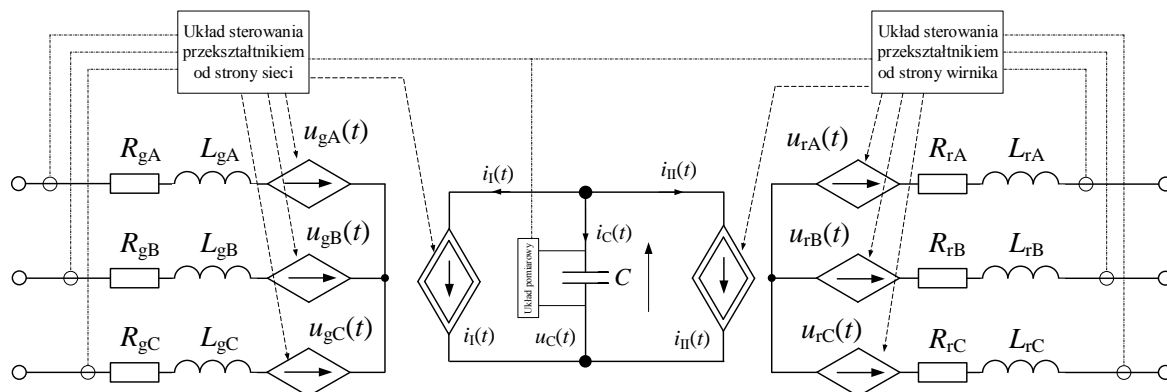


Rys. 3.4. Schemat ideowy modelowanego przekształtnika energoelektronicznego

Przyjęto, że nie uwzględnia się zjawisk zachodzących w łącznikach energoelektronicznych [21, 29, 39, 51]: komutacji, strat mocy, przebiegów, przetężeń. Zjawiska te oczywiście mają wpływ na przebiegi napięć i prądów w obwodzie głównym przekształtnika, ale w tym przypadku konieczne jest odtworzenie pracy przekształtnika pod względem funkcjonalnym jako elementu elektrowni wiatrowej. Utworzenie modelu matematycznego odwzorowującego funkcjonalność przekształtnika energoelektronicznego umożliwi symulację w czasie rzeczywistym ze stosunkowo dużym kwantem czasu pracy. Na podstawie literatury [21, 29, 39, 51] został utworzony schemat funkcjonalny takiego przekształtnika energoelektronicznego, który przedstawiono na rys. 3.5.

Układ tranzystorów został zastąpiony przez sterowane źródła napięciowe, które pobudzane są odpowiednimi sygnałami sterującymi. Obwód pośredniczący przekształtnika energoelektronicznego został zamodelowany z wykorzystaniem sterowanych źródeł prądowych, których wartości zależą od chwilowych wartości mocy od strony sieci i wirnika oraz napięcia na kondensatorze. Takie podejście pozwala na

modelowanie matematyczne pracy przekształtnika energoelektronicznego np. z modulacją szerokości impulsu PWM (ang. *Pulse-Width Modulation*).

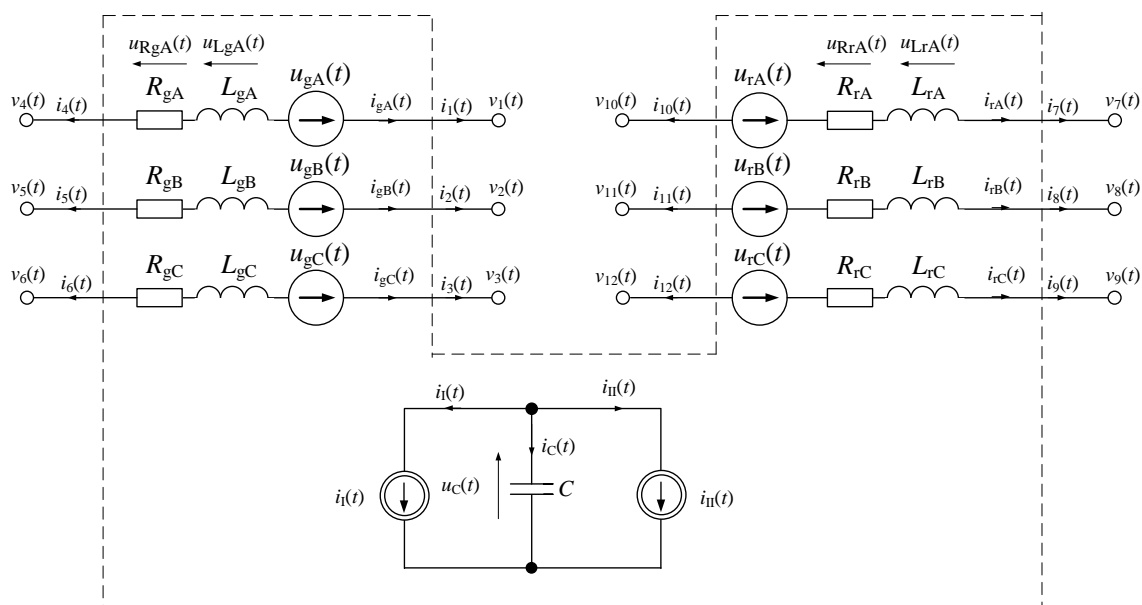


Rys. 3.5. Schemat funkcjonalny modelowanego przekształtnika energoelektronicznego

Wartości napięć sterowanych źródeł napięcia określane są jako iloczyny napięcia na kondensatorze w obwodzie pośredniczącym i współczynników z układu sterowania:

$$\begin{aligned} u_{gA}(t) &= H_{gA} \cdot u_C(t), & u_{gB}(t) &= H_{gB} \cdot u_C(t), & u_{gC}(t) &= H_{gC} \cdot u_C(t), \\ u_{rA}(t) &= H_{rA} \cdot u_C(t), & u_{rB}(t) &= H_{rB} \cdot u_C(t), & u_{rC}(t) &= H_{rC} \cdot u_C(t). \end{aligned} \quad (3.19)$$

gdzie: $H_{gA}, H_{gB}, H_{gC}, H_{rA}, H_{rB}, H_{rC}$ – współczynniki z układu sterowania (przyjmują wartości 0,5 lub -0,5), $u_C(t)$ – napięcie na kondensatorze.



Rys. 3.6. Schemat zastępczy modelowanego przekształtnika energoelektronicznego jako dwunastobiegunnik

Wartości prądów sterowanych źródeł prądu określone są ilorazami chwilowych wartości mocy przekształtnika od strony wirnika i od strony sieci (odpowiednio) i napięcia w obwodzie pośredniczącym (na kondensatorze):

$$i_{\text{I}}(t) = \frac{p_{\text{g}}(t)}{u_{\text{C}}(t)}, \quad i_{\text{II}}(t) = \frac{p_{\text{r}}(t)}{u_{\text{C}}(t)}, \quad (3.20)$$

gdzie: $p_{\text{g}}(t)$ – wartość chwilowa mocy przekształtnika od strony sieci, $p_{\text{r}}(t)$ – wartość chwilowa mocy przekształtnika od strony wirnika.

Na rysunku 3.6 przedstawiono modelowany przekształtnik energoelektroniczny jako wielobiegownik elektryczny, składający się z dwóch sześciobiegowników (sześciobiegownik od strony sieci oraz sześciobiegownik od strony wirnika) oraz obwodu pośredniczącego z kondensatorem. Każdy sześciobiegownik składa się z trzech niezależnych gałęzi, które zawierają szeregowe połączenie idealnych elementów: źródła napięcia, rezystora i cewki.

Tworząc model matematyczny przekształtnika energoelektronicznego w pierwszej kolejności należy zapisać równania na podstawie II prawa Kirchhoffa dla sześciobiegownika od strony sieci i sześciobiegownika od strony wirnika. Następnie wykorzystując metodę średnich wartości napięć na kroku całkowania można otrzymać końcowa postać równania zewnętrznego (3.4) dla przekształtnika energoelektronicznego, jako dwunastobiegownika elektrycznego

$$\mathbf{i}_{\text{PE}} + \mathbf{A}_{\text{PE}} \cdot \mathbf{c} \mathbf{v}_{\text{PE}} + \mathbf{B}_{\text{PE}} = \mathbf{0}, \quad (3.21)$$

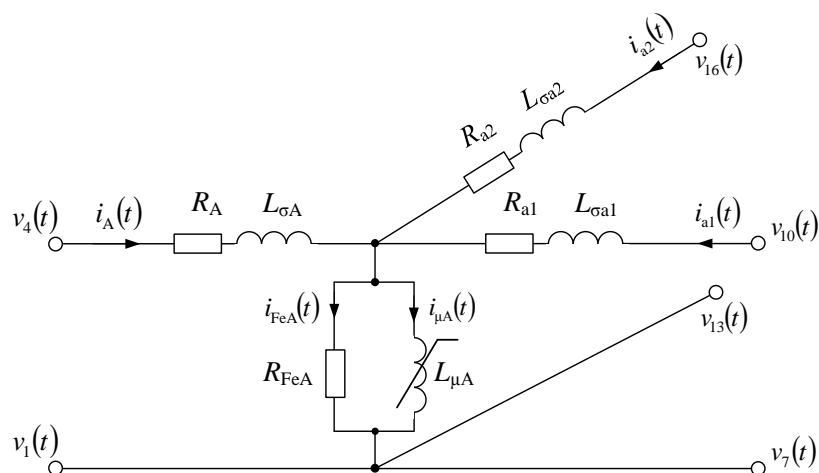
gdzie:

$$\mathbf{A}_{\text{PE}} = \begin{bmatrix} \left(\mathbf{A} - \frac{\Delta t}{(m+1)} \cdot \mathbf{H}^{\text{T}} \cdot \mathbf{H} \right)^{-1} \cdot \boldsymbol{\Gamma} \\ - \left(\mathbf{A} - \frac{\Delta t}{(m+1)} \cdot \mathbf{H}^{\text{T}} \cdot \mathbf{H} \right)^{-1} \cdot \boldsymbol{\Gamma} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{\text{PE}} = \begin{bmatrix} \left(\mathbf{A} - \frac{\Delta t}{(m+1)} \cdot \mathbf{H}^{\text{T}} \cdot \mathbf{H} \right)^{-1} \cdot \boldsymbol{\Pi}_1 \\ - \left(\mathbf{A} - \frac{\Delta t}{(m+1)} \cdot \mathbf{H}^{\text{T}} \cdot \mathbf{H} \right)^{-1} \cdot \boldsymbol{\Pi}_1 \end{bmatrix},$$

Szczegółowy opis wielkości fizycznych opisujących przekształtnik energoelektroniczny oraz sposób otrzymania równania zewnętrznego i wyznaczenia elementów macierzy \mathbf{A}_{PE} i \mathbf{B}_{PE} został zaprezentowany w rozprawie doktorskiej.

3.2.4. Model matematyczny transformatora trójzwojeniowego

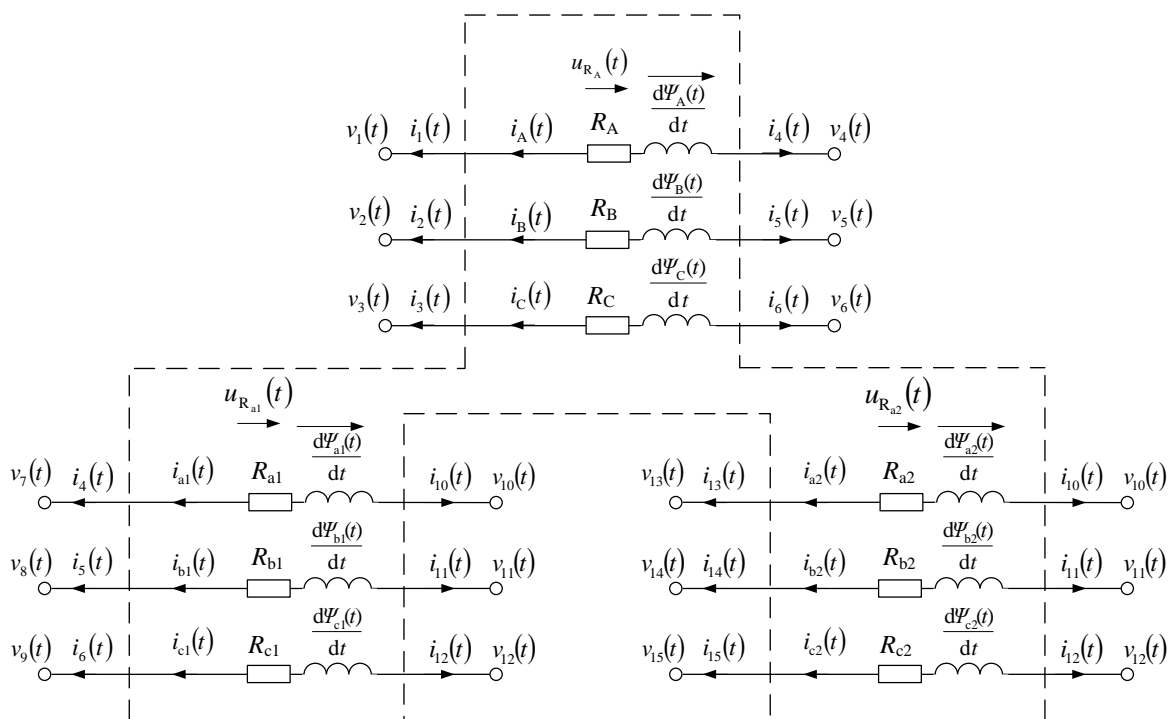
Trójfazowy transformator trójzwojeniowy składa się z trójkolumnowego rdzenia ferromagnetycznego, na którym nawinięte są uzwojenia górnego napięcia (indeksy faz A, B C) oraz dolnych napięć (indeksy faz odpowiednio: a1, b1, c1 oraz a2, b2, c2). Na każdej kolumnie umieszczone jest jedno uzwojenie górnego napięcia i dwa uzwojenia dolnych napięć. Przy tworzeniu modelu matematycznego transformatora uwzględniono [9, 52] straty w rdzeniu, nieliniową charakterystykę magnesowania oraz straty w elementach konstrukcyjnych (rys. 3.7). Na rysunku 3.8 przedstawiono schemat trójfazowego transformatora trójzwojeniowego jako osiemnastobiegownika.



Rys. 3.7. Schemat zastępczy jednej fazy modelowanego transformatora elektroenergetycznego

Obwód elektryczny modelowanego transformatora opisano następującym równaniem macierzowym

$$\mathbf{G} \cdot \mathbf{v}(t) - \mathbf{R} \cdot \mathbf{i}_g(t) - \mathbf{L}_\sigma \frac{d\mathbf{i}_g(t)}{dt} - \frac{d\Psi_\mu(t)}{dt} = \mathbf{0}, \quad (3.21)$$



Rys. 3.8. Schemat zastępczy obwodów elektrycznych trójfazowego transformatora trójzwojeniowego jako osiemnastobiegunnika

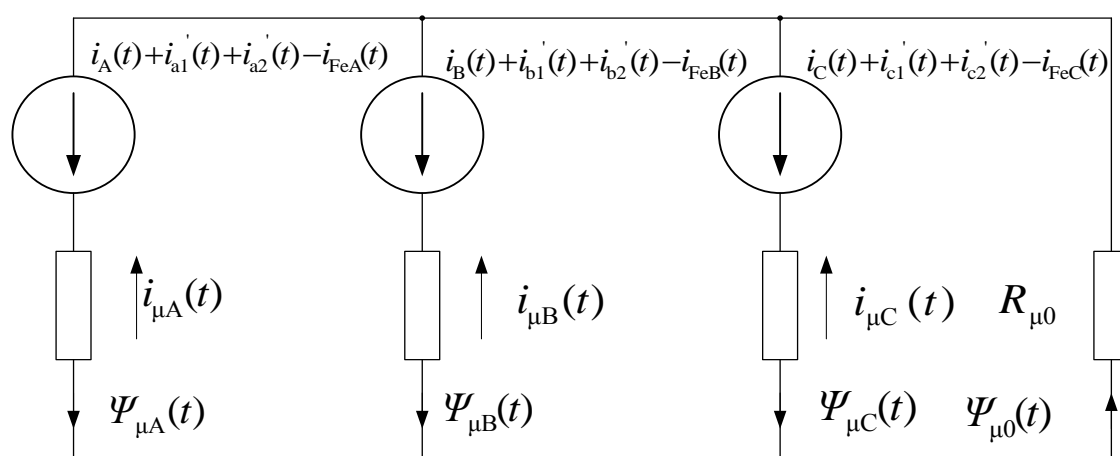
Rdzeń transformatora wykonany jest z materiału ferromagnetycznego, który charakteryzuje krzywa magnesowania, przedstawiająca zależność indukcji magnetycznej B od natężenia pola magnetycznego H , $B = f(H)$. Zależność ta jest nieliniowa ponieważ przenikalność magnetyczna względna materiału, z którego wykonany jest rdzeń transformatora jest określona funkcją nieliniową $\mu_r = f(H)$. W konsekwencji zależność

między głównym strumieniem magnetycznie skojarzonym z uzwojeniem odpowiedniej fazy a prądem magnesującym tej fazy jest również nieliniowa i odpowiada charakterystyce magnesowania: $\Psi_{\mu A}(i_{\mu A}), \Psi_{\mu B}(i_{\mu B}), \Psi_{\mu C}(i_{\mu C})$. Wyznaczyć je można przeprowadzając próbę biegu jałowego. Wyniki z tej próby można aproksymować funkcją

$$\Psi_{\mu j}(i_{\mu j}) = a_{0j} \cdot i_{\mu j} + a_{1j} \cdot \arctan(a_{2j} \cdot i_{\mu j}), \quad (3.22)$$

gdzie: $j =$ faza: A, B, C, a_{0j}, a_{1j}, a_{2j} – współczynniki funkcji aproksymującej.

Pełny model matematyczny trójfazowego transformatora trójuzwojeniowego wymaga uzupełnienia równania macierzowego (3.21) równaniami opisującymi obwód magnetyczny [1, 9, 41]. W tym celu skonstruowano schemat zastępczy obwodu magnetycznego modelowanego transformatora, jak pokazano na rysunku 3.9.



Rys. 3.9. Schemat zastępczy obwodu magnetycznego modelowanego transformatora

W obwodzie magnetycznym oprócz strumieni głównego pola magnetycznego uwzględniono dodatkowo strumień magnetyczny, reprezentujący część pola magnetycznego, które powoduje straty w elementach konstrukcyjnych transformatora np.: kadzi, pokrywie, belkach, płaskownikach i śrubach.

Korzystając z praw Kirchhoffa utworzono następujący układ równań macierzowych

$$i_G(t) + \frac{1}{n_1} \cdot i_{d1}(t) + \frac{1}{n_2} \cdot i_{d2}(t) - i_{Fe}(t) - i_{\mu}(t) - R_{\mu 0} \cdot \Psi_{\mu 0}(t) \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = 0, \quad (3.23)$$

Model matematyczny elektroenergetycznego transformatora trójuzwojeniowego wyprowadzono na podstawie średnich wartości napięć na kroku całkowania. W autoreferacie zostanie przedstawiona tylko końcowa postać równania zewnętrznego (3.4) dla trójfazowego transformatora trójuzwojeniowego, jako osiemnastobiegownika elektrycznego

$$i_{Tr} + A_{Tr} \cdot cv_{Tr} + B_{Tr} = 0, \quad (3.24)$$

gdzie: $A_{Tr} = \begin{bmatrix} \Gamma_{Tr} \\ -\Gamma_{Tr} \end{bmatrix}, \quad B_{Tr} = \begin{bmatrix} \Pi_{Tr} \\ -\Pi_{Tr} \end{bmatrix},$

Szczegółowy opis wielkości fizycznych opisujących elektroenergetyczny transformator trójzwojennieniowy oraz sposób wyznaczenia elementów macierzy A_{Tr} i B_{Tr} został zaprezentowany w rozprawie doktorskiej.

Pierwszym krokiem do znalezienia rozwiązania równania macierzowego (3.68) jest wyznaczenie indukcyjności magnesowania rdzenia ferromagnetycznego w każdej fazie dla chwili t_{n+1} . W tym celu zastosowano następujący algorytm predykcji indukcyjności magnesowania obwodu magnetycznego w każdej fazie:

- korzystając z jawnej metody Eulera wyznacza się macierz prądów magnesujących na końcu kroku całkowania, według wzoru

$$\mathbf{i}_{\mu}(t_{n+1}) = \mathbf{i}_{\mu}(t_n) + \Delta t \cdot \frac{d\mathbf{i}_{\mu}(t_n)}{dt}, \quad (3.25)$$

- znając wartości macierzy kolumnowej prądów magnesujących w chwili t_{n+1} wyznacza się indukcyjności magnesowania obwodu magnetycznego w każdej fazie, według zależności:

$$L_{\mu s \zeta}(i_{\mu A}(t_{n+1})) = \frac{\psi_{\mu \zeta}(i_{\mu \zeta}(t_{n+1}))}{i_{\mu \zeta}(t_{n+1})} = \frac{a_{0 \zeta} \cdot i_{\mu \zeta}(t_{n+1}) + a_{1 \zeta} \cdot \arctan(a_{2 \zeta} \cdot i_{\mu \zeta}(t_{n+1}))}{i_{\mu \zeta}(t_{n+1})}, \quad (3.26)$$

Z zasady zachowania energii w polu magnetycznym wynika zasada ciągłości strumienia magnetycznego, która głosi, że iloczyny prądu i indukcyjności w chwilach t_n i t_{n+1} powinny być równe. Wyznaczanie indukcyjności magnesowania rdzenia ferromagnetycznego w każdej fazie w chwili t_{n+1} z równań (3.25) i (3.26) może spowodować niespełnienie tego warunku. W związku z tym na podstawie prac [38, 40, 47] w modelu transformatora w sposób przybliżony rozwiązano ten problem. Algorytm uwzględniający ciągłość strumienia magnetycznego jest następujący:

- oblicza się macierz prądów płynących przez uzwojenia transformatora dla chwili czasowej t_{n+1} , wykorzystując zależność (3.24),
- przy wyznaczonej z predykcji (zależność 3.26) indukcyjności magnesowania w każdej fazie $L_{\mu s \zeta}(i_{\mu \zeta}(t_{n+1}))$ oblicza się macierz estymowanych prądów magnesujących $\mathbf{i}_{\mu}^*(t_{n+1})$ dla odpowiednich faz,
- oblicza się indukcyjności magnesowania w każdej fazie $L_{\mu s \zeta}^*(i_{\mu \zeta}^*(t_{n+1}))$, korzystając z następujących zależności:

$$L_{\mu s \zeta}^*(i_{\mu \zeta}^*(t_{n+1})) = \frac{\psi_{\mu \zeta}(i_{\mu \zeta}^*(t_{n+1}))}{i_{\mu \zeta}^*(t_{n+1})} = \frac{a_{0 \zeta} \cdot i_{\mu \zeta}^*(t_{n+1}) + a_{1 \zeta} \cdot \arctan(a_{2 \zeta} \cdot i_{\mu \zeta}^*(t_{n+1}))}{i_{\mu \zeta}^*(t_{n+1})},$$

- oblicza się zmodyfikowane wartości prądów magnesujących w każdej fazie transformatora tak, aby były spełnione następujące warunki:

$$L_{\mu s \zeta}^*(i_{\mu \zeta}^*(t_{n+1})) \mathbf{i}_{\mu \zeta}(t_{n+1}) = L_{\mu s \zeta}(i_{\mu \zeta}(t_{n+1})) \mathbf{i}_{\mu \zeta}^*(t_{n+1}),$$

przekształcenie powyższych zależności umożliwia wyznaczenie zmodyfikowanych prądów magnesujących:

$$i_{\mu\zeta}(t_{n+1}) = \frac{L_{\mu\zeta}(i_{\mu\zeta}(t_{n+1}))}{L_{\mu\zeta}^*(i_{\mu\zeta}^*(t_{n+1}))} i_{\mu\zeta}^*(t_{n+1}),$$

- wartości poprawionych prądów magnesujących oraz indukcyjności magnesowania w każdej fazie wyznaczone dla chwili czasowej t_{n+1} są przyjmowane w kolejnym kroku obliczeniowym.

gdzie: ζ – faza trójfazowego elementu strukturalnego ($\zeta := A, B, C$)

3.3. Weryfikacja adekwatności proponowanych modeli matematycznych

Adekwatność stosowanego modelu matematycznego jest jednym z elementów przydatności proponowanego rozwiązania do zastosowania w symulatorach PwCR. Kluczowe znaczenie ma tutaj prawidłowe odwzorowywanie rzeczywistości przy zastosowaniu stosunkowo dużego kroku całkowania. W pracach autora rozprawy jest to krok wynoszący od kilkudziesięciu do kilkaset mikrosekund. Weryfikacja adekwatności modeli matematycznych dla stosunkowo prostych struktur elementów układów elektrycznych, takich jakie przedstawiono w podrozdziale 3.2.1, pracujących z różnymi krokami całkowania była badana przez autora, a wyniki publikowano m.in. w [25, 36, 37]. Zastosowanie sposobu opartego na średnich wartościach napięć na kroku całkowania pozwala na uzyskiwanie wysokiego stopnia adekwatności wyników symulacji ze stosunkowo dużym krokiem całkowania i nie był szerzej dyskutowany w rozprawie.

W dalszej części pracy uwaga autora została skoncentrowana na weryfikacji adekwatności proponowanych modeli matematycznych trzech bardziej skomplikowanych elementów strukturalnych: maszyny indukcyjnej z wirnikiem pierścieniowym, przekształtnika energoelektronicznego oraz transformatora trójfazowego.

3.3.1. Adekwatność modelu matematycznego maszyny indukcyjnej z wirnikiem pierścieniowym

Jednym ze sposobów weryfikacji modelu matematycznego jest porównanie uzyskiwanych wyników (symulacja ze spodziewanym krokiem całkowania wynikającym z założenia pracy w czasie rzeczywistym) z wynikami uzyskanymi z zastosowaniem profesjonalnego, uznanego w środowisku naukowym oprogramowania (symulacja z krokiem całkowania nawet kilka rzędów wielkości mniejszym). Ten właśnie sposób zastosowano do weryfikacji adekwatności proponowanego modelu matematycznego trójfazowej maszyny indukcyjnej z wirnikiem pierścieniowym. Zastosowano środowisko programistyczne Matlab z pakietem Simulink. Pakiet ten zawiera sprawdzony w wielu pracach naukowych (np. w [2, 30, 46]) model maszyny indukcyjnej. W związku z tym, opracowany przez autora rozprawy model matematyczny trójfazowej maszyny indukcyjnej z wirnikiem pierścieniowym zweryfikowany został na podstawie porównania wyników z symulacji komputerowej wykonanej w środowisku Matlab z wynikami symulacji komputerowej wykonanej w środowisku utworzonym przez autora.

Do oceny adekwatności modelu matematycznego trójfazowej maszyny indukcyjnej z wirnikiem pierścieniowym wybrano maszynę o parametrach $P_n = 1,8$ MW, $U_n = 0,69$ kV, $f_n = 50$ Hz, $I_{s_n} = 1772,1$ A $I_{r_n} = 578,9$ A.

Badania symulacyjne przeprowadzono dla wielu stanów pracy maszyny, z których zostaną szczegółowo rozpatrzone trzy następujące: rozruch maszyny na biegu jałowym, załączenie obciążenia o momencie $M_o = 8 \text{ kN}\cdot\text{m}$ (praca maszyny jako silnik) oraz zmiana obciążenia z $M_o = 8 \text{ kN}\cdot\text{m}$ na $M_o = -4 \text{ kN}\cdot\text{m}$ (praca maszyny jako generator). Przebiegi bazowe (przebiegi prądów fazowych stojana i wirnika, przebieg momentu elektromagnetycznego oraz prędkości kątowej), do których będą porównywane wyniki, uzyskano z symulacji komputerowej, z zastosowaniem modelu z Matlab, z krokiem całkowania $h = 1 \mu\text{s}$. Przebiegi bazowe porównano z przebiegami uzyskanymi z symulacji komputerowej w tym samym środowisku (Matlab), z tym samym modelem, ale ze zdecydowanie większym krokiem całkowania ($h = 200 \mu\text{s}$) oraz z przebiegami uzyskanymi z symulacji w autorskim środowisku (aplikacja C++), w którym został zaimplementowany proponowany przez autora model matematyczny, również z krokiem całkowania $h = 200 \mu\text{s}$ (zakłada się, że z takim programowym krokiem całkowania będzie pracował konstruowany symulator PwCR).

Różnicę pomiędzy przebiegami bazowymi a innymi porównywanymi przebiegami w i -tym stanie pracy wyznaczono z następującej zależności:

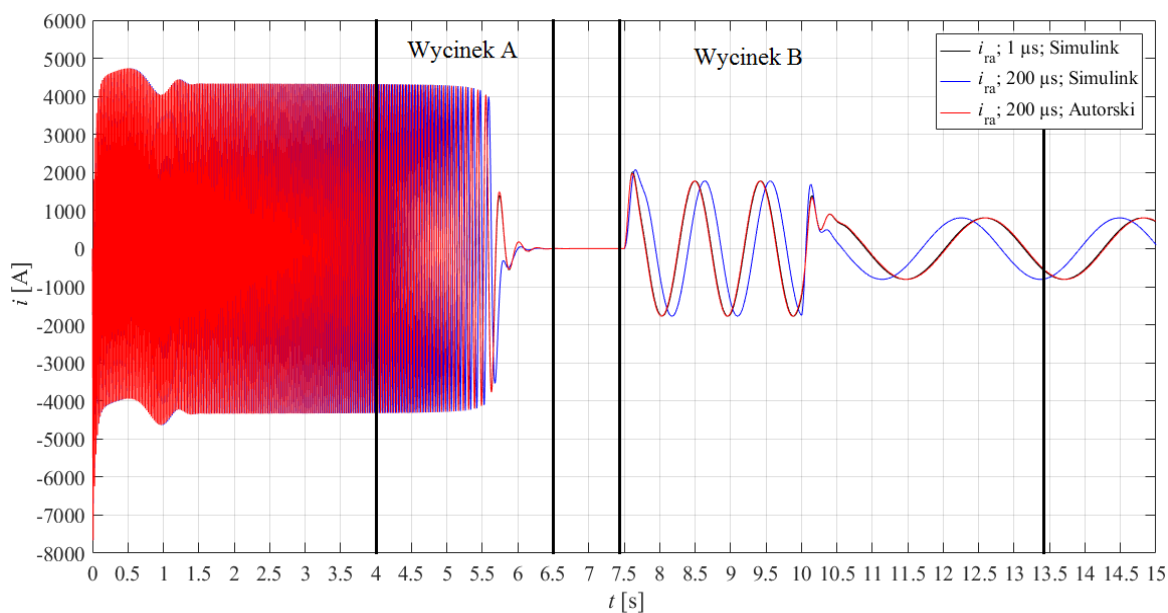
$$\delta_{ji}(t) = \frac{|x_{jbi}(t) - x_{jsi}(t)|}{|X_{ji}|} \cdot 100\%, \quad (3.27)$$

gdzie:

- $x_{jbi}(t)$ – wartość chwilowa j -ej zmiennej wyników bazowych w i -tym stanie pracy,
- $x_{jsi}(t)$ – wartość chwilowa j -ej zmiennej weryfikowanych wyników w i -tym stanie pracy,
- X_{ji} – wartość stała lub arbitralnie ustalona j -ej zmiennej wyników bazowych w i -tym stanie pracy,
- i – symbol stanu pracy maszyny: rozruch na biegu jałowym $i = 1$, obciążenie momentem oporowym z pracą silnikową $i = 2$, zmiana momentu oporowego i praca generatorowa $i = 3$.

Maksymalna różnica pomiędzy przebiegami bazowymi prądów uzwojeń stojana fazy A, momentu elektromagnetycznego i prędkości kątowej wirnika maszyny w badanych warunkach a uzyskanymi z symulacji komputerowej z proponowanym przez autora modelem nie przekracza 0,7% dla prądu stojana w fazie A, 0,9% dla momentu i 0,02% dla prędkości, natomiast maksymalna różnica pomiędzy przebiegami bazowymi a uzyskanymi z symulacji komputerowej w Matlabie (ze zwiększonym krokiem całkowania) dochodzi do 9,4% dla prądu stojana w fazie A, 23% dla momentu i 1,4% dla prędkości.

Na rysunku 3.10 przedstawiono przebiegi czasowe prądów uzwojeń wirnika fazy A dla dwóch stanów pracy maszyny, mianowicie: rozruch na biegu jałowym oraz obciążenie maszyny i praca silnikowa. Maksymalna różnica pomiędzy przebiegami bazowymi a uzyskanymi z symulacji komputerowej z proponowanym przez autora modelem nie przekracza 11%, natomiast maksymalna różnica pomiędzy przebiegami bazowymi a uzyskanymi z symulacji komputerowej w Matlabie (ze zwiększonym krokiem całkowania) osiąga nawet 198%.



Rys. 3.10. Przebiegi prądu wirnika w fazie a z trzech eksperymentów symulacyjnych obejmujących dwa stany pracy

3.3.2. Adekwatność modelu matematycznego przekształtnika energoelektronicznego

Symulator cyfrowy stanów pracy układów elektrycznych, pracujący w czasie rzeczywistym z krokiem całkowania (kwantem pracy) rzędu $200 \mu\text{s}$, uniemożliwia odwzorowanie procesów wewnętrznych w przekształtnikach energoelektronicznych. W analizie układów elektroenergetycznych, w których występują przekształtniki energoelektroniczne, konieczne jest zastosowanie sposobu modelowania przekształtnika, który z dużym stopniem adekwatności odwzorowuje zjawiska występujące w układzie na zewnątrz przekształtnika. W tym celu stosowane są modele odwzorowujące funkcjonalność przekształtnika energoelektronicznego bez możliwości analizy procesów fizycznych zachodzących wewnątrz przekształtnika. W literaturze [19, 39, 50, 51] opisano metodę modelowania stanów przejściowych i ustalonych trójfazowego przekształtnika energoelektronicznego jako AVM (ang. *Average – Value Model*). W modelu matematycznym obwodu prądu przemiennego przekształtnika DC/AC uwzględniono jego dynamikę w postaci trójfazowego sterowanego źródła napięciowego, natomiast dynamikę obwodu DC uwzględniono w postaci sterowanego źródła prądowego. Z analizy danych przedstawionych w publikacjach [19, 39, 50, 51] wynika, że modelowanie przekształtnika DC/AC jako AVM jest wystarczające do odwzorowania stanów przejściowych i ustalonych w analizowanych obwodach, w porównaniu do pełnego modelu przekształtnika DC/AC, w którym uwzględnione są modele matematyczne elementów półprzewodnikowych.

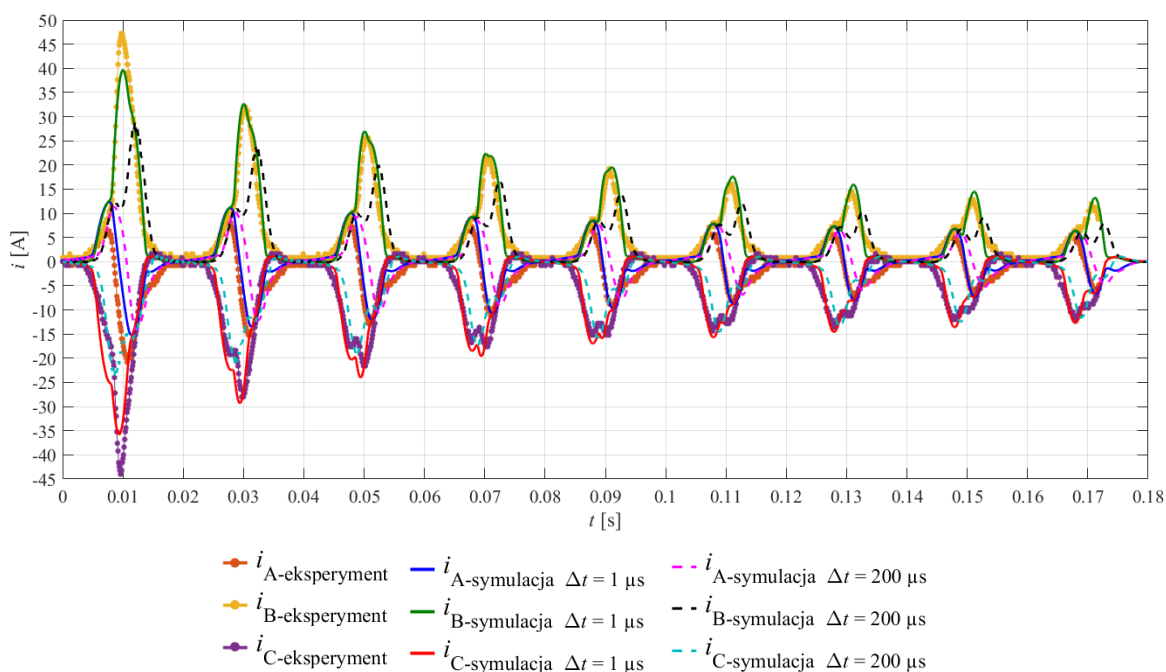
Bazując na wynikach przedstawionych w wymienionych wyżej publikacjach innych autorów, stwierdzono, że proponowany w podrozdziale 3.2.3 model matematyczny przekształtnika energoelektronicznego jest adekwatny w zakresie odtwarzania stanów pracy układu elektroenergetycznego i może być stosowany w symulatorach pracujących w czasie rzeczywistym, przy kroku całkowania (kwancie pracy symulatora PwCR)

równym $200 \mu\text{s}$, oczywiście z uwzględnieniem konsekwencji wynikających z przyjętych założeń upraszczających.

3.3.3. Adekwatność modelu matematycznego transformatora trójfazowego

Adekwatność opracowanego modelu matematycznego transformatora oceniono na podstawie analizy porównawczej wyników z eksperymentu pomiarowego na obiekcie rzeczywistym z wynikami symulacji komputerowej. Do symulacji komputerowej przyjęto parametry transformatora wyznaczone na podstawie próby stanu jałowego i pomiarowego stanu zwarcia. W modelu transformatora została uwzględniona charakterystyka magnesowania obwodu magnetycznego, którą wyznaczono z próby biegu jałowego, natomiast nie uwzględniono histerezy magnetycznej i prądów wirowych. Impedancja generatora zastępczego, w próbach stanu pracy transformatora, została wyznaczona z zastosowaniem miernika MPI-530 firmy Sonel, przeznaczonego do pomiarów w instalacjach elektrycznych. Do oceny adekwatności modelu matematycznego trójfazowego transformatora wykorzystano transformator o mocy $S_N = 10 \text{ kVA}$, $U_{\text{NGN}} = 380 \text{ V}$, $U_{\text{NDN}} = 340 \text{ V}$.

Wyniki z eksperymentu pomiarowego porównano z wynikami z symulacji komputerowej, w której zastosowano model matematyczny wyprowadzony na podstawie wartości średnich napięć na kroku całkowania (podrozdział 3.2.4). Porównano wyniki dla kroku całkowania $\Delta t = 1 \mu\text{s}$ oraz sprawdzono jak będą odwzorowywane przebiegi prądów przy kroku całkowania $\Delta t = 200 \mu\text{s}$.



Rys. 3.11. Przebiegi czasowe prądów fazowych w uzwojeniach górnego napięcia transformatora po załączeniu na biegu jałowym (symulacja komputerowa z predykcją indukcyjności magnesowania)

Na rysunku 3.11 przedstawiono przebiegi czasowe prądów fazowych w uzwojeniach górnego napięcia podczas stanu przejściowego spowodowanego załączeniem transformatora do sieci niskiego napięcia, gdzie faza początkowa napięcia zasilającego

wynosiła $\psi = 85^\circ$. Zwiększoną dokładność odwzorowywania zjawisk fizycznych w symulacji komputerowej z krokiem całkowania $\Delta t = 200 \mu s$ uzyskano przez zastosowanie predykcji indukcyjności magnesowania transformatora, co zostało przedstawione w rozdziale 3.2.4.

Porównując odpowiednie przebiegi czasowe prądów fazowych z eksperymentu i symulacji komputerowej z krokiem $\Delta t = 200 \mu s$ można stwierdzić, że maksymalna względna różnica wartości kolejnych wierzchołków w przebiegach prądów fazowych nie przekracza 45%. Proces przejściowy załączenia transformatora w stanie jałowym, w ujęciu jakościowym został odwzorowany w stopniu zadowalającym.

3.4. Model matematyczny układu elektrownia wiatrowa – sieć elektroenergetyczna SN

Na rysunku 1.8 przedstawiono schemat ideowy przykładowej elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej średniego napięcia. W dalszej pracy rozpatrywany będzie fragment sieci (nazywany dalej układem elektroenergetycznym), w którym odwzorowano następujące elementy: Krajowy System Elektroenergetyczny, stację transformatorową (TR 1), linie i odbiory zasilane z pól rozdzielni sekcji I, w tym szczegółowo linię elektroenergetyczną SN (oznaczenie LPT), do której oprócz odbiorów energii elektrycznej dołączono elektrownię wiatrową. Rozpatrywany układ elektroenergetyczny podzielono na elementy strukturalne.

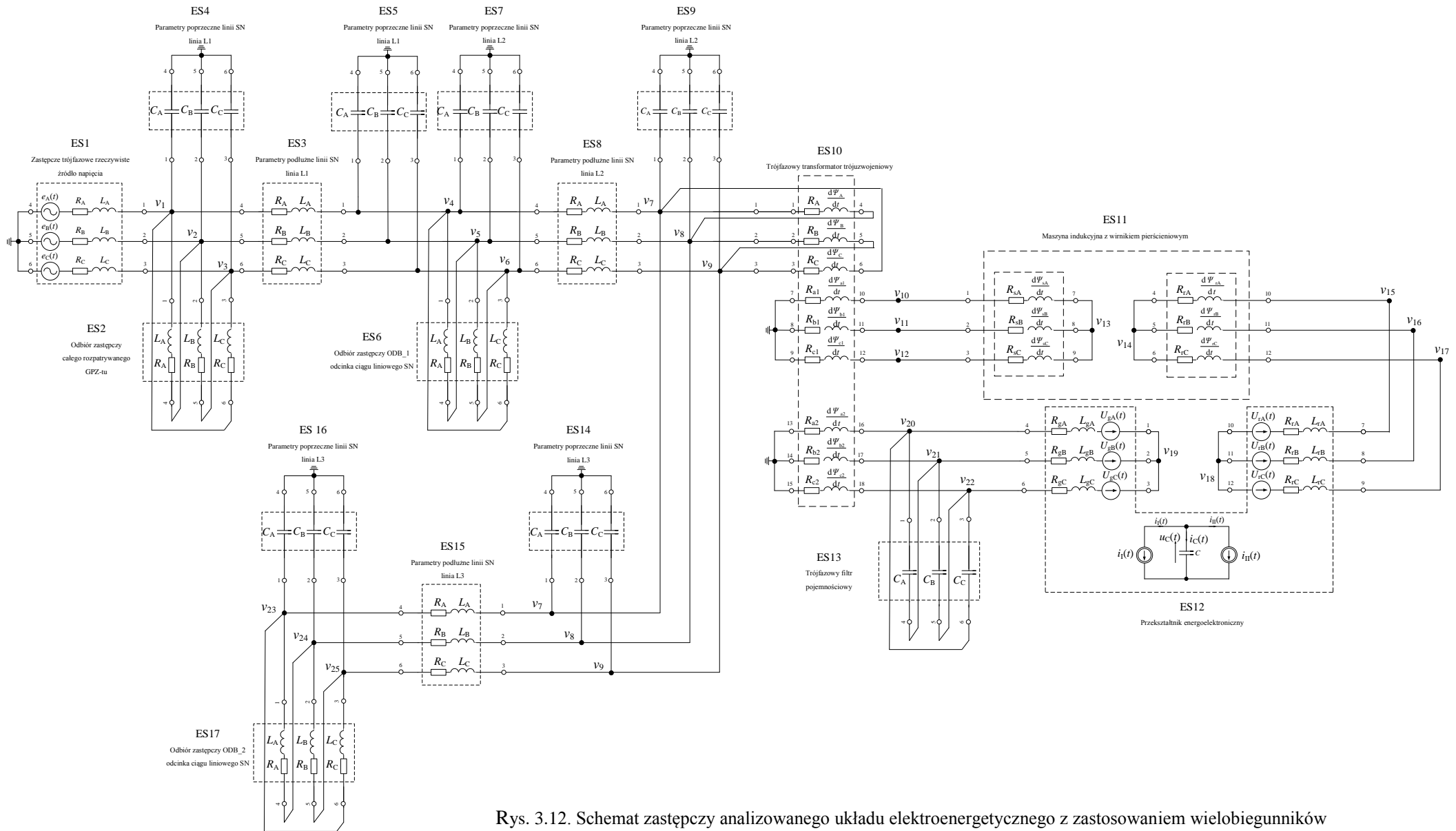
Na rysunku 3.12 przedstawiono schemat zastępczy analizowanego układu elektroenergetycznego z zastosowaniem wielobiegowników. Sposób połączenia elementów strukturalnych modelowanego układu wyrażany jest przez macierze incydencji, które zostały zamieszczone w rozprawie doktorskiej. Autor, korzystając z faktu, że macierze incydencji są macierzami rzadkimi, zastosował odpowiednie algorytmy mnożenia, które spowodowały znaczące przyspieszenie obliczeń wykonywanych w symulatorze PwCR, co umożliwiło zmniejszenie kwantu czasu pracy symulatora PwCR (programowego kroku całkowania).

3.5. Algorytm modelowania matematycznego układu elektrownia wiatrowa – sieć elektroenergetyczna SN

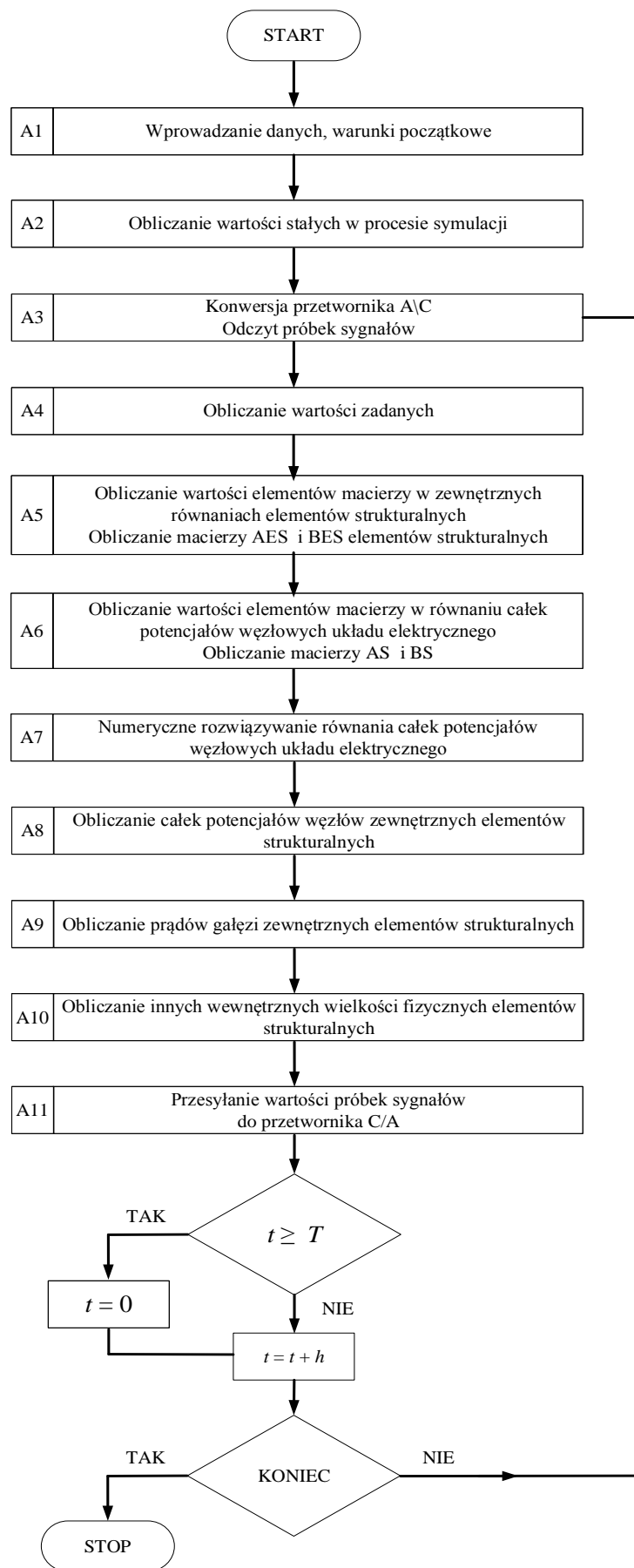
Na rysunku 3.13 przedstawiono blokową postać algorytmu modelowania matematycznego układu elektrownia wiatrowa – sieć elektroenergetyczna SN, który został zastosowany do symulacji w czasie rzeczywistym stanów pracy tego układu.

W pierwszym etapie modelowania (Blok A1) następuje wprowadzanie fizycznych parametrów opisujących model matematyczny układu elektrownia wiatrowa – sieć elektroenergetyczna SN oraz wprowadzenie warunków początkowych symulacji. W kolejnym etapie (Blok A2) wyznaczane są wartości stałe w procesie symulacji.

Blok A3 odpowiada za akwizycję sygnałów z otoczenia przez przetwornik A/C i wprowadzenie ich do modelu matematycznego. Wielkością wprowadzaną do symulatora jest np. informacja o prędkości wiatru, na podstawie której wyznaczany jest moment na wale MIzWP.



Rys. 3.12. Schemat zastępczy analizowanego układu elektroenergetycznego z zastosowaniem wielobiegunkników



Rys. 3.13. Algorytm modelowania matematycznego układu elektrownia wiatrowa – sieć elektroenergetyczna

Po wprowadzeniu sygnałów do symulatora, w bloku A4 wyznaczane są wartości zadane i sygnały sterujące przekształtnikiem od strony sieci i przekształtnikiem od strony wirnika oraz wykonywana jest predykcja kąta elektrycznego obrotu wału MIzWP i predykcja indukcyjności magnesowania w każdej fazie transformatora. Schemat układu sterowania przekształtnikiem od strony wirnika przedstawiono na rys. 1.3 w podrozdziale 1.2, natomiast schemat układu sterowania przekształtnikiem od strony sieci przedstawiono na rys. 1.4 w podrozdziale 1.2. Algorytmy modelowania układów sterowania tymi przekształtnikami szczegółowo zaprezentowano w rozprawie doktorskiej.

Po wyznaczeniu wartości zadanych oraz wartości z predykcji realizuje się w Bloku A5 obliczenia wartości elementów macierzy w zewnętrznych równaniach elementów strukturalnych. Następnie w Bloku A6 oblicza się wartości elementów macierzy w równaniu całek potencjałów węzłowych układu elektrycznego (3.11) i (3.12). Numerycznie rozwiązuje się liniowy układ równań w Bloku A7. Autor rozprawy zastosował metodę iteracyjną Gaussa-Seidela, gdyż pozwala ona na zmniejszenie czasu obliczeń w porównaniu z rozkładem LU, co zostało wykazane w pracy [14]. Po wyznaczeniu całek potencjałów węzłowych układu elektrycznego w Bloku A8 wyznacza się całki potencjałów zewnętrznych węzłów elementów strukturalnych, natomiast w Bloku A9 wyznacza się prądy gałęzi zewnętrznych elementów strukturalnych. Ostatnim etapem symulacji jest wyznaczenie innych wewnętrznych wielkości fizycznych elementów strukturalnych (Blok A10), takich jak np.: napięcie na kondensatorze w obwodzie pośredniczącym, moment elektromagnetyczny, prądy magnesujące w każdej fazie transformatora, moment elektromagnetyczny i prędkość kątową generatora, moc stojana i wirnika generatora oraz realizowany jest algorytm uwzględniający nieliniowość obwodu magnetycznego transformatora.

Po przeprowadzeniu procedury obliczeniowej dotyczącej modelu matematycznego, w bloku A11 przesyłane są wartości chwilowe określonych sygnałów wielkości fizycznych do przetwornika C/A. Do wyjść przetwornika podłączane są urządzenia zewnętrzne, z którymi symulator PwCR współpracuje.

4. Badanie wybranych stanów pracy układu elektrownia wiatrowa – sieć elektroenergetyczna SN z zastosowaniem symulatora pracującego w czasie rzeczywistym

4.1. Problem stabilności symulacji

Znany jest problem stabilności algorytmu numerycznego całkowania, wyjaśniony np. w [5]. Rozwiązanie równania różniczkowego, z zastosowaniem numerycznego algorytmu całkowania, nie jest dokładne. W każdym kroku całkowania powstaje błąd, ale ważny jest również błąd, który występuje po określonym czasie ciągłego procesu całkowania. Według [10], błąd lokalny określony jest wzorem

$$\Delta x_L(t_{n+1}) = \tilde{x}(t_{n+1}) - x(t_{n+1}) \quad (4.1)$$

gdzie: $\tilde{x}(t_{n+1})$ – rozwiązanie dokładne przy warunku początkowym $x_0 = x(t_n)$, $x(t_{n+1})$ – rozwiązanie numeryczne przy warunku początkowym $x_0 = x(0)$.

Błąd lokalny określony wzorem (4.1) jest błędem występującym w chwili t_{n+1} przy założeniu, że $x(t_n)$ jest warunkiem początkowym.

Według [10], błąd całkowity określony jest wzorem

$$\Delta x_C(t_{n+1}) = \hat{x}(t_{n+1}) - x(t_{n+1}) \quad (4.2)$$

gdzie: $\hat{x}(t_{n+1})$ – rozwiązanie dokładne przy warunku początkowym $x_0 = x(0)$, $x(t_{n+1})$ – rozwiązanie numeryczne przy warunku początkowym $x_0 = x(0)$.

Błąd całkowity określony wzorem (4.2) jest błędem występującym w chwili t_{n+1} , czyli faktycznym błędem powstałym przy całkowaniu w przedziale czasu od 0 do t_{n+1} , przy warunku początkowym $x_0 = x(0)$.

Błąd lokalny może być zarówno dodatni jak i ujemny. Zatem błąd całkowity, na który składają się błędy lokalne może zarówno wzrastać jak i maleć w czasie procesu całkowania. Algorytmem numerycznie stabilnym nazywa się taki algorytm, w którym błąd całkowity nie zwiększa się w procesie całkowania ponad dopuszczalną wartość.

Oczywiste jest, że koncentrując się tylko na błędzie lokalnym można wyciągnąć niewłaściwe wnioski. Nawet mała wartość błędu lokalnego, w dłuższym czasie procesu całkowania może spowodować znaczącą wartość błędu całkowitego, co spowoduje, że otrzymywane wyniki całkowania będą bezużyteczne.

W symulatorach układów elektroenergetycznych pracujących w czasie rzeczywistym, których zasadniczą zaletą jest współpraca z rzeczywistym otoczeniem zewnętrznym, wymaga się bezwzględного spełnienia dwóch podstawowych warunków [10]:

1. wymiana danych (i wyników symulacji) z otoczeniem odbywa się zgodnie z taktowaniem zegara sterującego z określoną stałą częstotliwością (z tego bezpośrednio wynika programowy krok całkowania);

2. uzyskiwane wyniki symulacji ze ściśle określonym programowym krokiem całkowania muszą posiadać założoną dokładność (warunek użyteczności otrzymywanych wyników).

Zatem dla spełnienia warunku 1) często zwiększa się wartość programowego kroku całkowania i/lub numeryczny algorytm całkowania, co powoduje zazwyczaj większy błąd otrzymywanych wyników symulacji. Dodatkowym aspektem, który będzie rzutował na dokładność wyników symulacji jest fakt współpracy z elektrycznymi urządzeniami w rzeczywistym otoczeniu (np. regulatory), z których pochodzą dyskretne wartości wprowadzane do procesu symulacji komputerowej. Będzie to powodowało dodatkowe błędy, wynikające z tego, że nie jest możliwa precyzyjna synchronizacja w czasie procesu symulacji komputerowej (platforma cyfrowa) z procesem (często analogowym – ciągłym) w otoczeniu rzeczywistym. Zatem, zdaniem autora rozprawy celowe jest zdefiniowanie i badanie stabilności symulacji z zastosowaniem symulatora PwCR. Sformułowano następującą definicję stabilności symulacji w czasie rzeczywistym:

Symulacja w czasie rzeczywistym, jako proces realizowany w danej strukturze platformy cyfrowej, jest stabilna w określonym przedziale czasu, jeżeli przy ograniczonej wartości sygnałów z otoczenia rzeczywistego jej wyniki są obciążone ograniczonym błędem całkowitym.

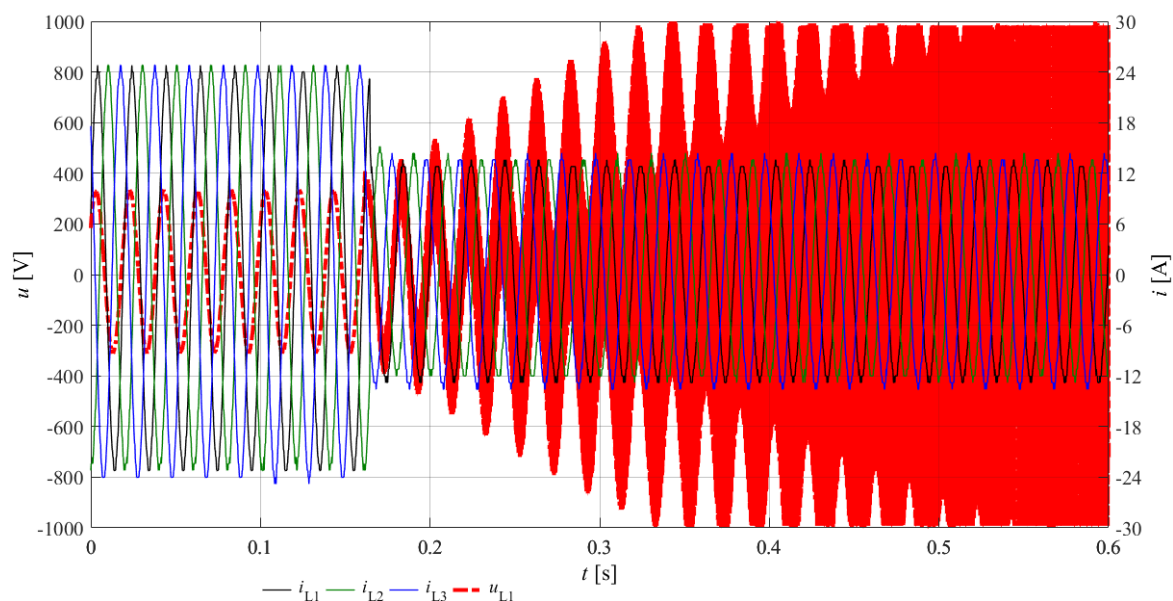
Problem stabilności symulacji w czasie rzeczywistym jest dość słabo ugruntowany w literaturze (oprócz symulatorów gier komputerowych i pozycji [12] trudno jest znaleźć opis i rozwiązanie tego problemu). Autor zaproponował eksperymentalną weryfikację stabilności symulacji z zastosowaniem opracowanego symulatora PwCR.

4.2. Badanie stabilności symulacji w czasie rzeczywistym układu uproszczonego

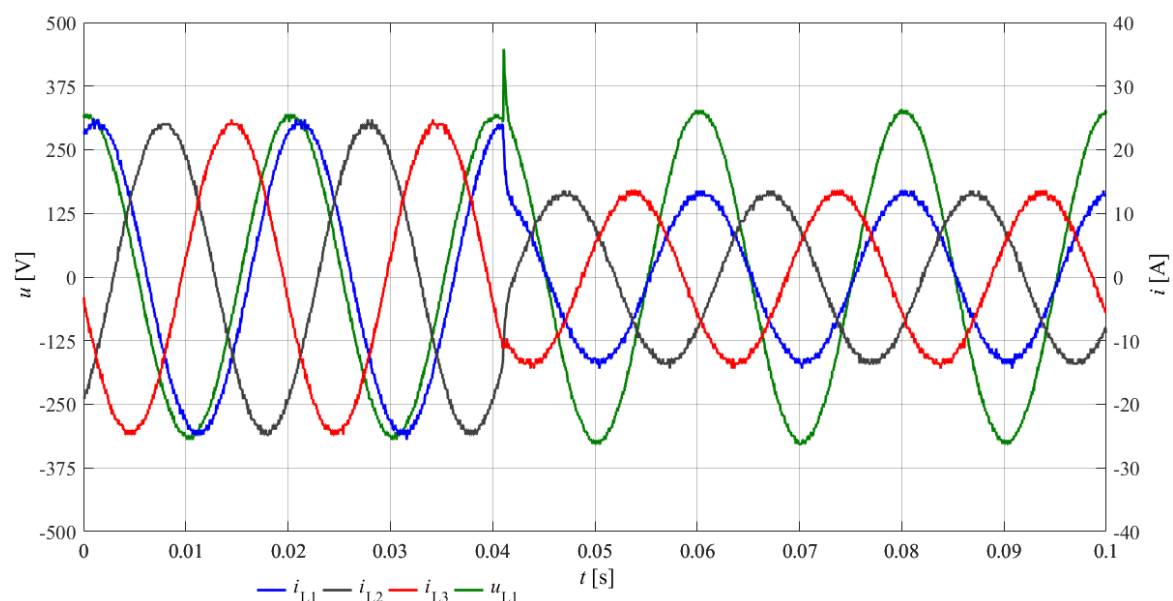
Pierwsze eksperymenty dotyczyły symulacji stanów pracy układu z jednym z bardziej złożonych elementów, mianowicie transformatorem [24]. Model analizowanego układu elektroenergetycznego składał się z trzech elementów strukturalnych generatora zstępczego (ES1), transformatora (ES2) oraz obciążenia (ES3). Model matematyczny analizowanego układu opisano szczegółowo w pracy [24]. Symulację tę przeprowadzono wykorzystując algorytm trapezów ze stałym programowym krokiem całkowania ($\Delta t = 50 \mu s$), a do rozwiązywania układu równań liniowych zastosowano dwie metody: metodę iteracyjną Jacobię [22] i metodę eliminacji Gaussa [22].

Stabilność symulacji badano porównując wartości chwilowe napięcia w jednej fazie oraz prądów fazowych w uzwojeniu górnego napięcia transformatora elektroenergetycznego, pracującego w stanie ustalonym, ze szczególnym uwzględnieniem następujących stanów pracy: załączenie transformatora na biegu jałowym, zwiększenie obciążenia i zmniejszenie obciążenia. Porównywano wartości w chwili t_1 z wartościami w chwili $t_1 + T \cdot k$, gdzie T jest okresem przebiegu, a k jest współczynnikiem wynoszącym kilkaset tysięcy. Jako kryterium stabilności przyjęto, że różnica pomiędzy odpowiednimi wartościami chwilowymi napięcia oraz różnice wartości chwilowych prądu

w poszczególnych fazach tego samego stanu ustalonego nie mogą przekroczyć ustalonej maksymalnej wartości.



Rys. 4.1. Przebieg czasowy napięcia w fazie L1 i prądów fazowych w uzwojeniu transformatora elektroenergetycznego po zmniejszeniu obciążenia z widoczną utratą stabilności symulacji



Rys. 4.2. Przebieg czasowy napięcia w fazie L1 i prądów fazowych w uzwojeniu transformatora elektroenergetycznego po zmniejszeniu obciążenia (model oparty na wartościach średnich napięć na kroku całkowania) ze stabilną symulacją

Przeprowadzone eksperymenty dowiodły, że symulacja w czasie rzeczywistym z zastosowaniem algorytmu całkowania trapezów oraz nieiteracyjnych metod rozwiązywania układów równań liniowych, przebiega stabilnie w stosunkowo długim okresie pracy (kilka godzin). W przypadku zastosowania iteracyjnej metody rozwiązywania układów równań liniowych (metoda Jacobiego) symulacja przebiegała niestabilnie (rys. 4.1), gdyż po zmianie parametrów w modelu (zmiana obciążenia

transformatora) pojawiały się rosnące, nietłumione oscylacje numeryczne w potencjałach analizowanego układu elektroenergetycznego. Na zmniejszenie (wyeliminowanie) oscylacji nie miała wpływu liczba iteracji poprawiających rozwiązanie.

Iteracyjne metody rozwiązywania układów równań liniowych (np. metoda Jacobiego czy Gaussa-Seidla) pozwalają na skrócenie czasu obliczeń w porównaniu z metodami nieiteracyjnymi [14] (np. rozkład LU czy metoda Gaussa). Ale jak widać mogą one prowadzić do niestabilnej symulacji w dłuższym okresie czasu. Rozwiązaniem, które zastosował autor rozprawy, jest zastosowanie modeli matematycznych opartych na wartościach średnich napięć na kroku całkowania (zamiast algorytmu trapezów) [35].

Na rysunku 4.2 przedstawiono przebieg czasowy napięcia w jednej fazie i prądów fazowych w uzwojeniu transformatora elektroenergetycznego po zmniejszeniu obciążenia z zastosowaniem modeli matematycznych opartych na wartościach średnich napięć na kroku całkowania. Porównując uzyskane wyniki z poprzednimi (rys. 4.1) należy stwierdzić, że zastosowanie tego typu modeli [35] oraz iteracyjnej metody rozwiązywania układów równań liniowych powoduje, że symulacja w czasie rzeczywistym przebiega stabilnie.

4.3. Badanie wybranych stanów pracy układu z zastosowaniem symulatora pracującego w czasie rzeczywistym

4.3.1. Opis eksperymentu

Na rysunku 4.3 przedstawiono schemat układu eksperymentalnego, który składa się z symulatora PwCR z modelem układu elektrownia wiatrowa – sieć elektroenergetyczna SN, zewnętrznego rzeczywistego układu (komputer osobisty) jako źródła informacji np. o aktualnej wartości prędkości wiatru oraz profesjonalnego analizatora parametrów sieci PQ-Box 100.

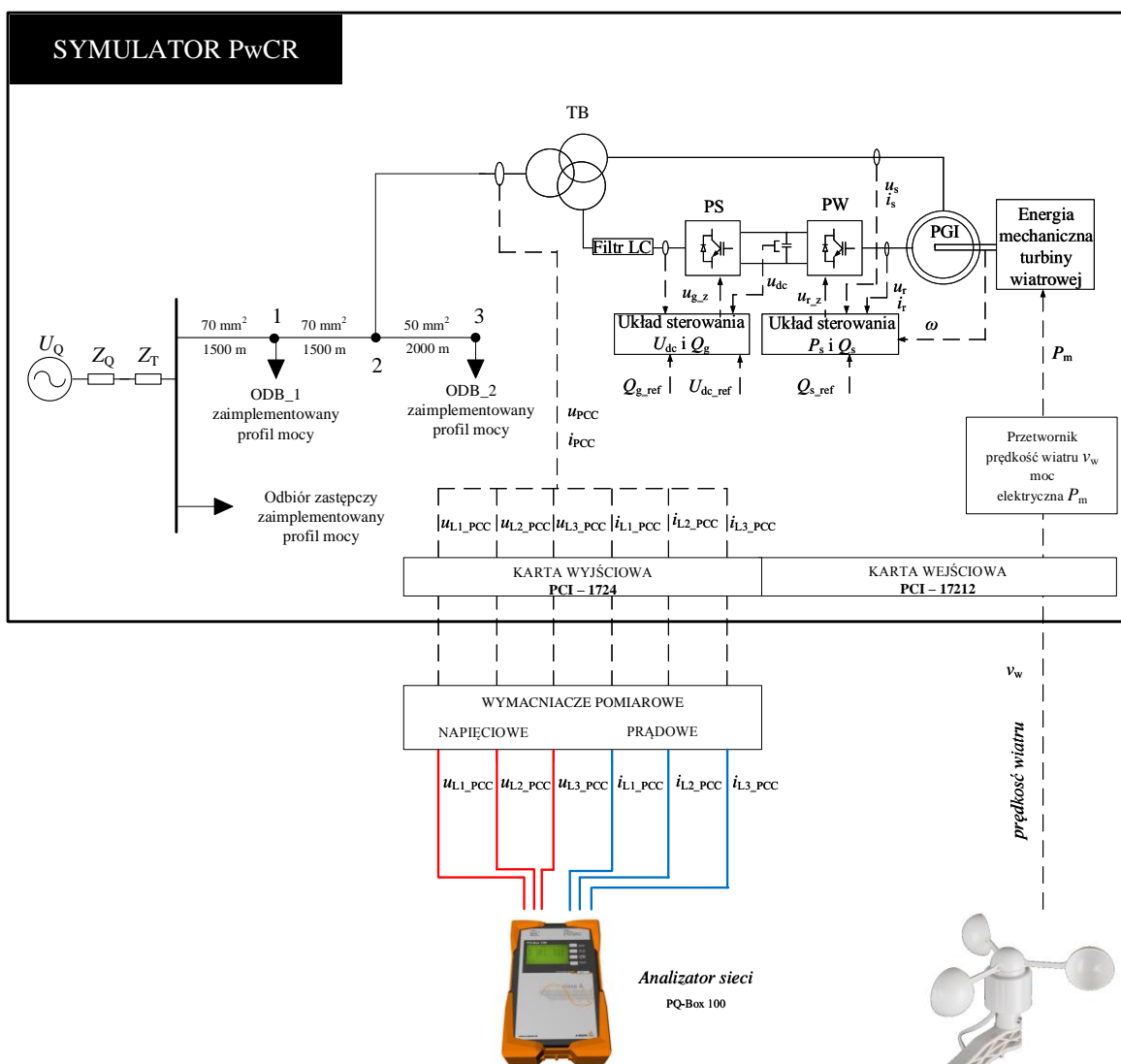
Eksperyment polegał na uruchomieniu symulatora w określonym czasie, jego pracy przez czas pełnych siedmiu dni oraz rejestracji wartości wybranych wielkości fizycznych (analizator PQ-Box) przy zmieniających się określonych parametrach wewnątrz i na zewnątrz symulatora.

W analizie pracy prezentowanego układu elektroenergetycznego uwzględniono zmienność wartości prędkości wiatru wraz z katalogową charakterystyką mocy turbiny wiatrowej Vestas V90 oraz zmienność obciążenia trzech odbiorów wyróżnionych w modelowanym układzie charakteryzowana jest przez odpowiednie profile mocy czynnej i biernej, które zostały przedstawione w rozprawie doktorskiej.

Ponadto przygotowano scenariusze symulacji zdarzeń losowych, które wyszczególniono w tabeli 4.1. Zdarzenia te były inicjowane w modelu matematycznym symulowanego układu w czasie trwania eksperymentu.

W symulatorze PwCR zaimplementowano model matematyczny układu elektroenergetycznego, który został opisany w rozprawie (rozdział 3.4). Kwant czasu pracy symulatora w czasie eksperymentu był równy 200 μ s. Do wyjść analogowych symulatora PwCR przez wzmacniacze napięciowe i prądowe podłączono profesjonalny analizator parametrów sieci PQ-Box 100. Zadaniem wzmacniaczy jest zapewnienie kompatybilności elektrycznej obwodów wyjściowych symulatora z zewnętrznymi

obwodami elektrycznymi układów rzeczywistych. W tym przypadku wzmacniacze na wyjściu odwzorowują obwody wtórne przekładników prądowych i napięciowych.



Rys. 4.3. Schemat układu eksperymentalnego

Tabela 4.1. Harmonogram zdarzeń losowych pracy systemu elektroenergetycznego

Numer zdarzenia	Data wystąpienia zakłócenia	Czas wystąpienia zakłócenia	Czas trwania zakłócenia	Opis
1	17.10.2018	13 ⁰⁰	0,2 s	Zwarcie między fazami L2 i L3 w ODB_2
2	18.10.2018	10 ⁰⁰	1,0 s	Zmniejszenie amplitudy napięcia zasilającego w fazie L1 (do 60% napięcia wyjściowego)
3	19.10.2018	8 ⁰⁰	0,2 s	Zwarcie między fazami L1 i L2 w ODB_1
4	19.10.2018	14 ⁰⁰	0,15 s	Zwarcie doziemne w linii średniego napięcia - faza L1. Zwarcie wystąpiło w punkcie przyłączenia elektrowni wiatrowej do sieci elektroenergetycznej

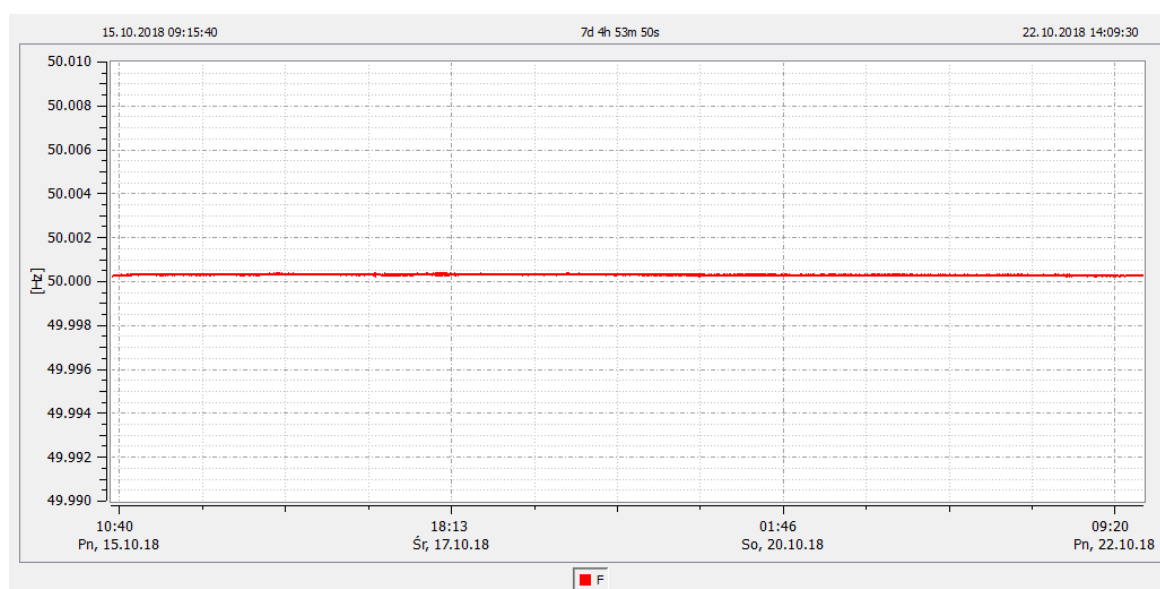
Numer zdarzenia	Data wystąpienia zakłócenia	Czas wystąpienia zakłócenia	Czas trwania zakłócenia	Opis
5	20.10.2018	20 ⁰⁰	0,15 s	Zwarcie doziemne w linii średniego napięcia - faza L1 Zwarcie wystąpiło w punkcie przyłączenia ODB_2 do sieci elektroenergetycznej
6	21.10.2018	19 ⁰⁰	1,0 s	Zmniejszenie amplitudy napięcia zasilającego we wszystkich trzech fazach (do 80% napięcia wyjściowego)

Celem badań eksperymentalnych jest weryfikacja stabilności pracy symulatora działającego w czasie rzeczywistym, z uwzględnieniem procesów wywołanych normalną pracą elementów układu oraz z uwzględnieniem procesów inicjowanych zdarzeniami awaryjnymi.

Czas trwania eksperymentu: od poniedziałku 15 października 2018 roku (godz. 9¹⁵) do poniedziałku 22 października 2018 roku (godz. 14¹⁰).

4.3.2. Wyniki badań

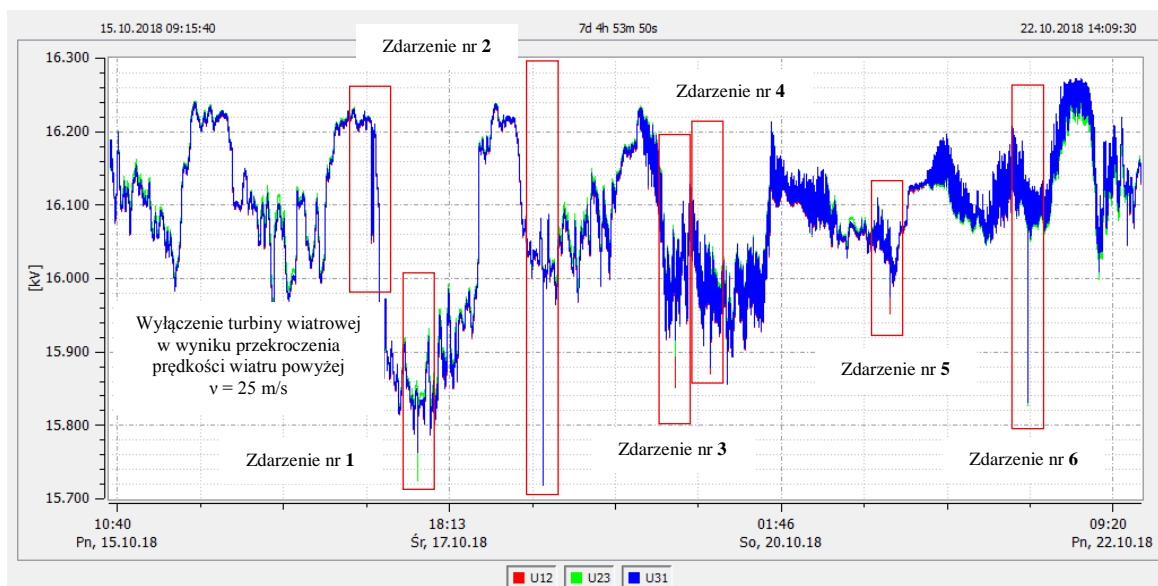
Na rysunku 4.4 przedstawiono przebieg częstotliwości napięcia zasilającego w całym okresie eksperymentu. Wartość średnia częstotliwości zarejestrowana przez analizator parametrów sieci jest równa 50,0003 Hz. Analiza szczegółowa tego przebiegu pozwala na sformułowanie oceny, że pod względem częstotliwości symulator pracował stabilnie w całym okresie eksperymentu oraz że kwant czasu pracy symulatora został prawidłowo dobrany.



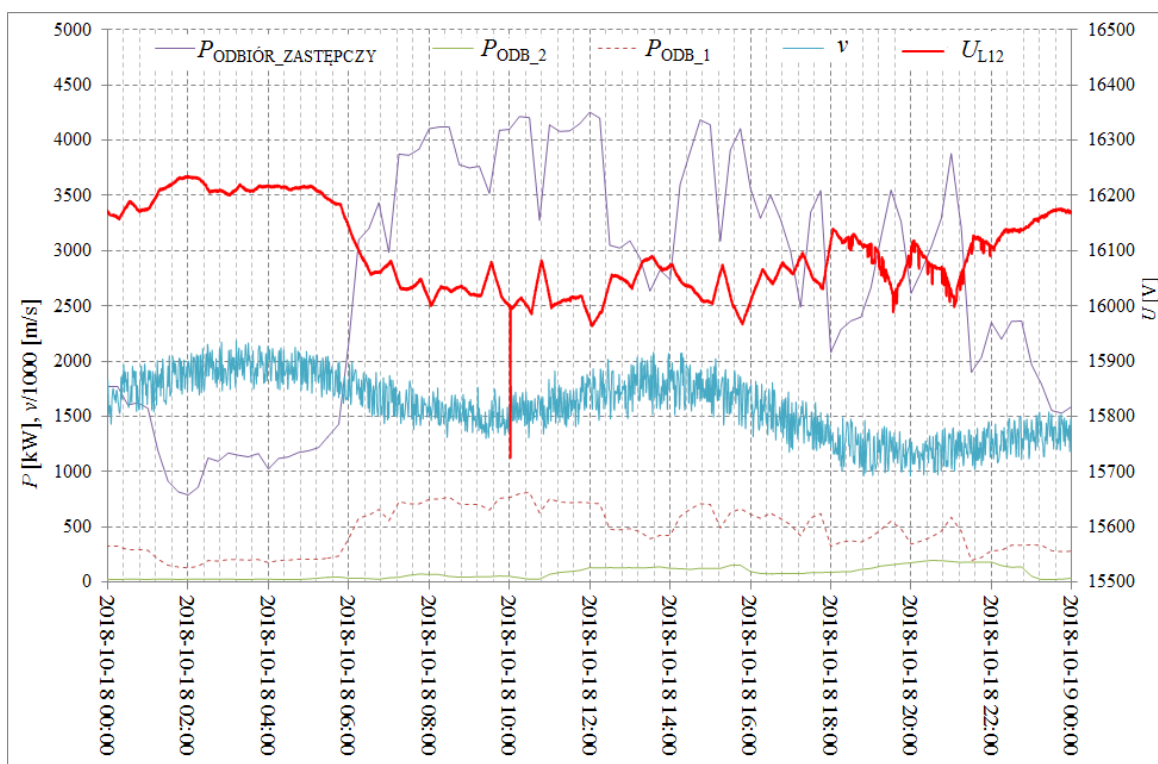
Rys. 4.4. Przebieg częstotliwości napięcia zasilającego w okresie eksperymentu

Na rysunku 4.5 przedstawiono wartości skuteczne napięć międzyfazowych, w węźle przyłączenia elektrowni wiatrowej do sieci dystrybucyjnej SN. Zmiany wartości

napięć spowodowane są zmieniającymi się obciążeniami trzech wyróżnionych odbiorów (profile mocy czynnej i biernej), zmianami wynikającymi ze zmieniającej się prędkości wiatru (praca turbiny wiatrowej) oraz zmianami powodowanymi zdarzeniami losowymi. Analizując szczegółowo uzyskane przebiegi oraz zarejestrowane przez analizator zdarzenia można wyróżnić charakterystyczne stany pracy, które zaznaczono na rys. 4.5 odpowiednimi prostokątami (kolor czerwony). Numery zdarzeń zastosowane na tym rysunku odpowiadają numeracji przyjętej w tabeli 4.1.



Rys. 4.5. Przebieg wartości skutecznej napięcia międzyfazowego w PCC w okresie eksperymentu

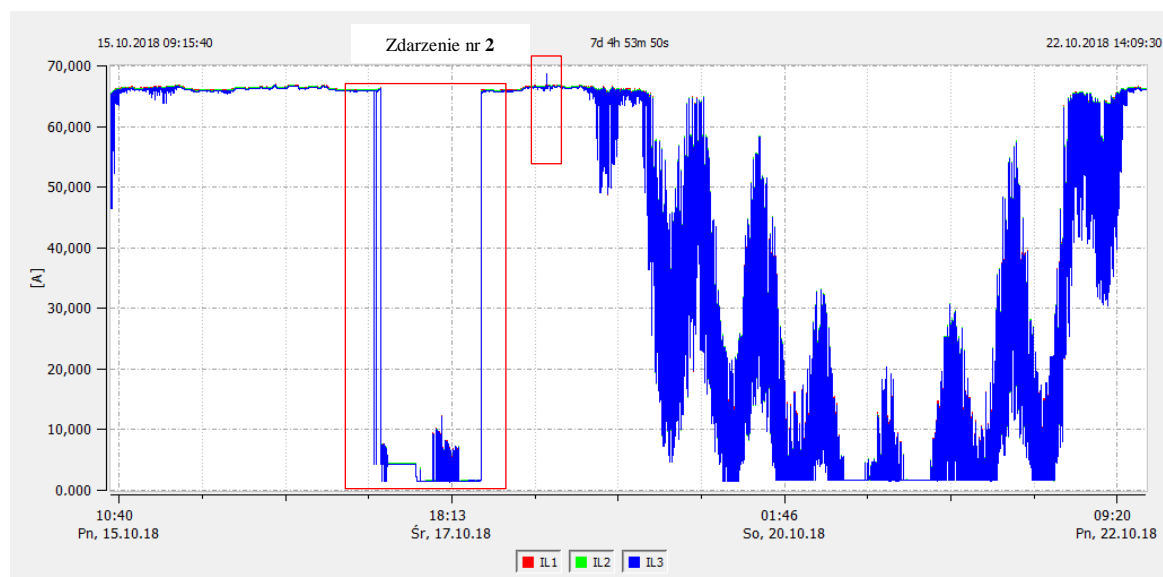


Rys. 4.6. Przebieg zmienności wartości skutecznej napięcia międzyfazowego (L1-L2) w PCC z dnia 18.10.2018 r. z uwzględnieniem profili mocy czynnych odbiorów oraz profilu prędkości wiatru

Rysunek 4.6 przedstawia zmienność napięcia międzyfazowego (L1-L2) w punkcie przyłączenia jednostki wytwórczej do sieci, zarejestrowaną w dniu 18.10.2018 r., z uwzględnieniem zmienności mocy czynnej odbiorów w analizowanej sieci dystrybucyjnej SN oraz zmian prędkości wiatru. Analizując te przebiegi można wyróżnić trzy charakterystyczne stany. Pierwszy z nich trwa od godziny 00⁰⁰ do godziny 6⁰⁰. W tym okresie odbiory pracują ze stosunkowo małą mocą, natomiast turbina wiatrowa pracuje z mocą znamionową, ponieważ prędkość wiatru przekracza 14 m/s. Zatem, zmienność napięcia w sieci spowodowana jest zmieniającymi się wartościami mocy odbiorów, ale w stosunkowo niewielkim zakresie.

Drugi stan trwa od godziny 6⁰⁰ do godziny 18⁰⁰. W tym okresie prędkość wiatru cały czas przekracza wartość 14 m/s, co powoduje, że turbina wiatrowa ciągle pracuje z mocą znamionową. Natomiast ok. godziny 6⁰⁰ następuje wyraźne zwiększenie mocy odbiorów, powodujące zmniejszenie wartości napięć, co zarejestrował analizator. Analizując dalej przebieg napięcia w tym okresie, można zauważyć że ok. godziny 10⁰⁰ wystąpiło krótkookresowe zmniejszenie napięcia do wartości ok. 15,75 kV. Jest to spowodowane wystąpieniem zaplanowanego w scenariuszu (tab. 4.1) zmniejszenia amplitudy napięcia zasilającego w fazie L1 (zdarzenie nr 2).

Trzeci charakterystyczny stan trwa od godziny 18⁰⁰ do godziny 24⁰⁰. W tym czasie można zaobserwować charakterystyczne wahania wartości skutecznej napięcia w PCC, które spowodowane są zarówno zmiennością obciążenia, jak również zmiennością mocy turbiny wiatrowej, spowodowanej tym, że przy prędkości wiatru poniżej 14 m/s moc turbiny zmienia się zgodnie z jej charakterystyką Vestas V90. Na wolne wahania napięcia, których przyczyną jest zmiana obciążenia odbiorów w sieci nakładają się szybkie wahania napięcia spowodowane pracą turbiny wiatrowej.

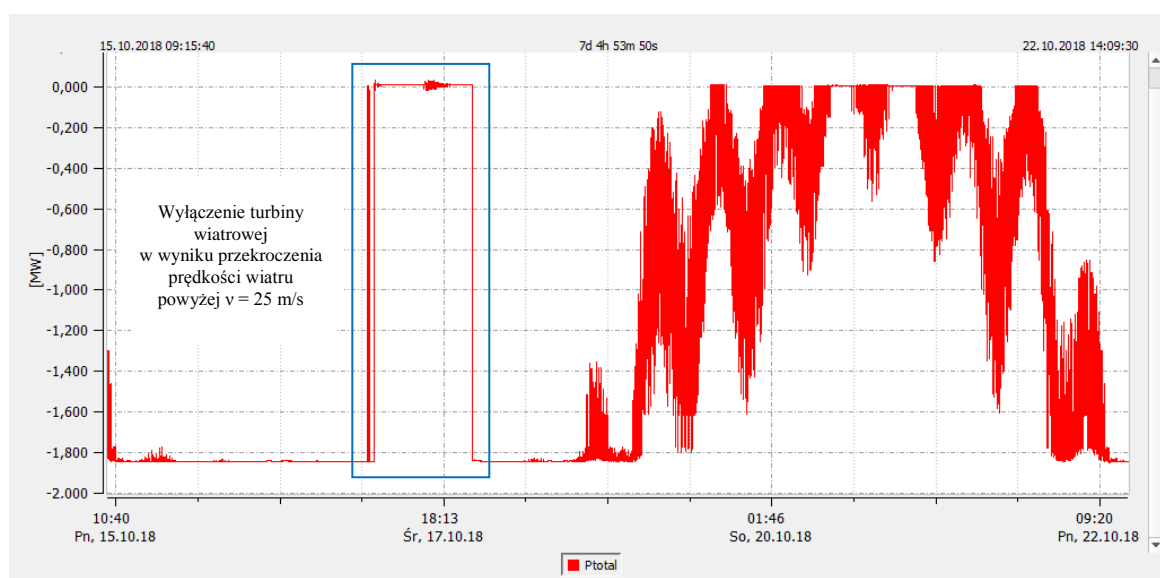


Rys. 4.7. Przebiegi wartości skutecznych prądów w PCC w czasie eksperymentu

W dalszej części analizy rozpatrzone zostaną szczegółowo wybrane fragmenty przebiegów prądów i mocy w PCC. Na rysunkach 4.7 i 4.8 przedstawiono przebiegi, odpowiednio prądów i mocy czynnej w PCC w całym okresie trwania eksperymentu.

Z przebiegów prądów widać, że wartości skuteczne prądów nie zmieniają się w przypadku, gdy jednostka wytwórcza pracuje ze stałą wartością mocy. W okresach od 16.10.2018 r. od godziny 00⁰⁰ oraz 18.10.2018 r. od godziny 8⁰⁰ turbina wiatrowa generuje energię elektryczną z mocą znamionową, równą 1,8 MW (prędkość wiatru jest powyżej prędkości 14 m/s). W tym czasie zmiana wartości skutecznych prądów wynosi około 1,5 A.

W dniu 17.10.2018 r. prędkość wiatru przekroczyła wartość maksymalną dla pracy turbiny wiatrowej, w związku z czym nastąpiło jej wyłączenie. Oczywiście wartość mocy czynnej zmniejszyła się z 1,8 MW do 0 MW (rys. 4.8), a wartość skuteczna prądu zmniejszyła się z 66,0 A do 4,0 A (rys. 4.7). Takie zmiany mają duży wpływ na wartość napięcia w węźle przyłączenia jednostki wytwórczej do sieci (PCC), o czym napisano wcześniej. Turbina wiatrowa nie pracowała przez ok. 18 godzin, co było zgodne z algorytmem sterowania turbiny wiatrowej, który nie podlega analizie w ramach rozprawy.

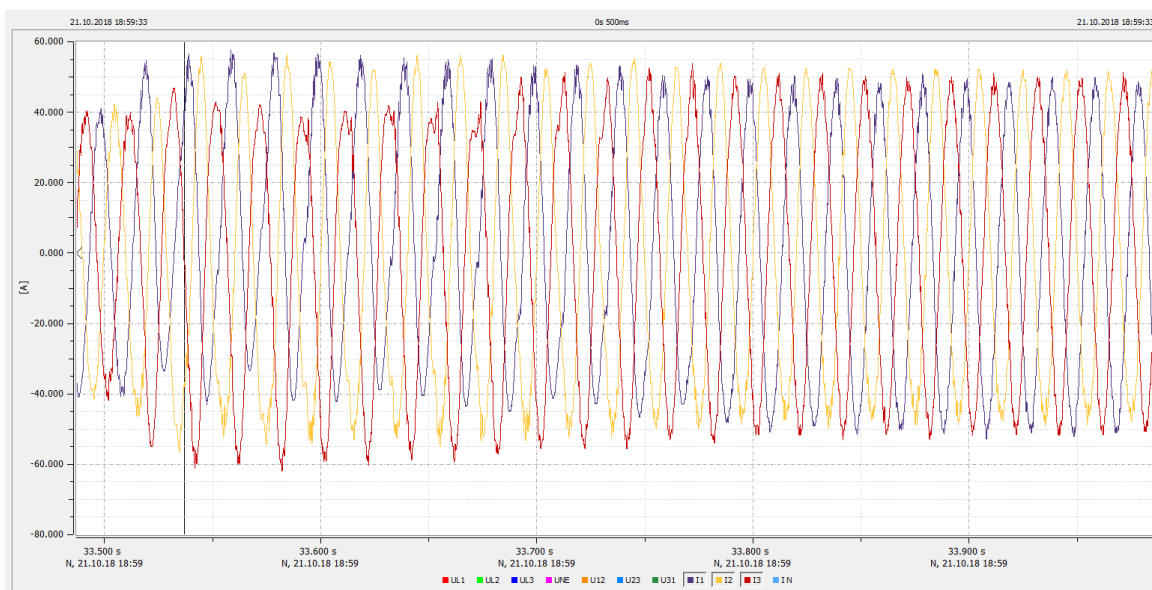


Rys. 4.8. Przebieg mocy czynnej generowanej przez jednostkę wytwórczą w czasie eksperymentu

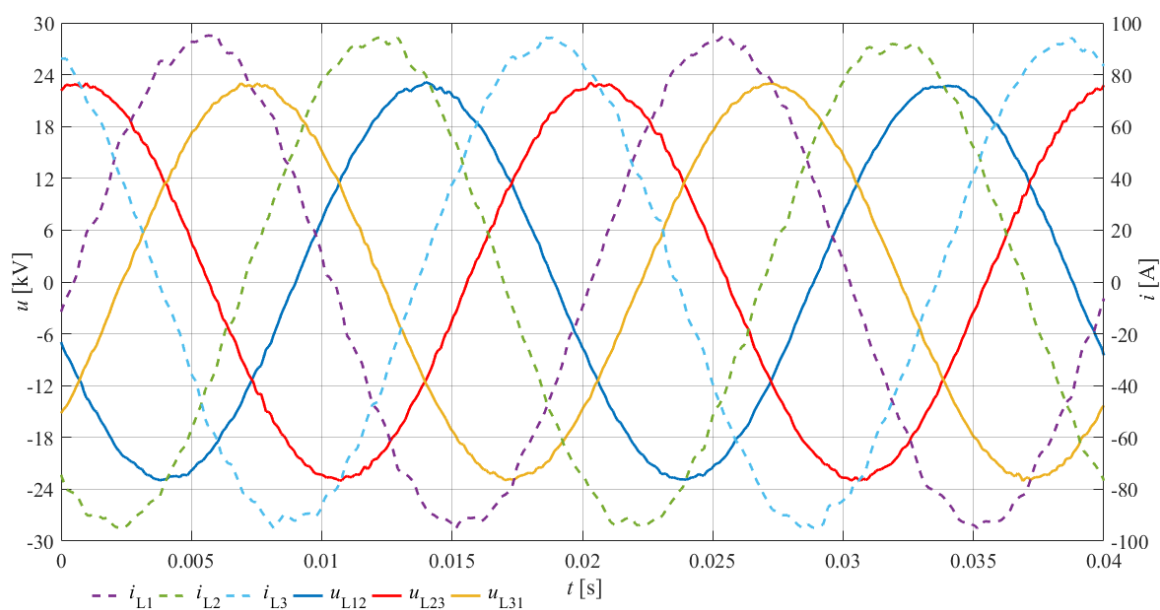
Na rysunkach 4.9 i 4.10 przedstawiono przebiegi wartości chwilowych napięć i prądów zarejestrowane podczas zwarcia międzyfazowego. Na rysunku 4.9 przedstawiono przebiegi napięć międzyfazowych w węźle przyłączenia jednostki wytwórczej, natomiast na rys. 4.10 przebiegi prądów przewodowych transformatora blokowego podczas zwarcia międzyfazowego (pomiędzy fazami L1 i L2) w odbiorze 1 (ODB_1). Wystąpienie zwarcia międzyfazowego w ODB_1 spowodowało wzrost prądu przewodowego w uzwojeniach górnego napięcia transformatora jednostki wytwórczej w fazach L1 oraz L2. Z uwagi na stosunkowo krótki czas zwarcia, na rysunkach widać przebiegi charakteryzujące cały ten proces.

Na rysunku 4.11 przedstawiono przebiegi czasowe napięć międzyfazowych w PCC oraz prądów przewodowych transformatora elektrowni wiatrowej po stronie górnego napięcia podczas normalnej pracy (stan ustalony). Jednostka wytwórcza pracuje z mocą

znamionową. Kąt przesunięcia między napięciem międzyfazowym a prądem jest równy około 150° . Maszyna asynchroniczna pierścieniowa pracuje jako generator.



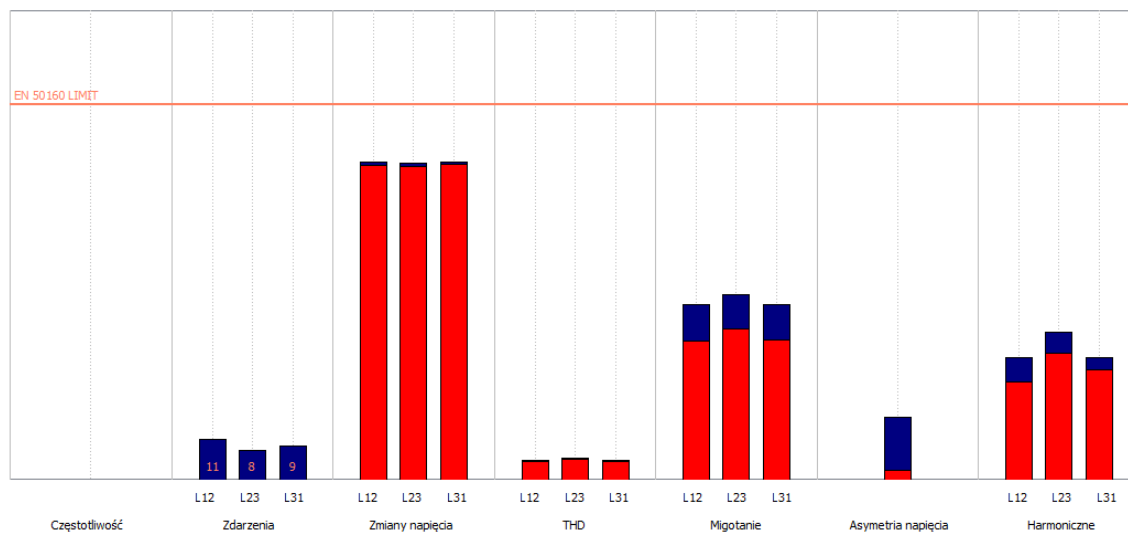
Rys. 4.10. Przebiegi wartości chwilowych prądów przewodowych transformatora blokowego jednostki wytwórczej w momencie wystąpienia zmiany amplitudy napięcia zasilającego w trzech fazach



Rys. 4.11. Przebiegi wartości chwilowych napięć i prądów przewodowych transformatora blokowego jednostki wytwórczej dla normalnej pracy (stan ustalony, jednostka wytwórcza pracowała z mocą znamionową)

Na koniec skorzystano z możliwości automatycznego generowania raportu dotyczącego oceny jakości napięcia (energii elektrycznej) w punkcie przyłączenia jednostki wytwórczej do sieci dystrybucyjnej SN, zgodnie z wymaganiami normy PN-EN-50160. Raport ten przedstawiono w formie graficznej na rys. 4.12. Linia pozioma odpowiada wartościom granicznym dla każdego parametru. Słupki o kolorze czerwonym oznaczają wartości parametrów, które nie są przekroczone przez 95% czasu pomiaru,

natomiast słupki o kolorze ciemnoniebieskim oznaczają wartość maksymalną ze zbioru wartości uśrednianych w okresie pomiarowym. Analizując przedstawione wyniki, można stwierdzić, że parametry jakościowe energii elektrycznej zgodnie z normą są spełnione w węźle przyłączenia jednostki wytwórczej do sieci SN (jak już zaznaczano, symulator pracował z założonym sinusoidalnym napięciem w zastępczym źródle, a przekształtniki energoelektroniczne modelowane były z uproszczeniem nieuwzględniającym bezpośredniego przełączania kluczy).



Rys. 4.12. Końcowy raport oceny jakości napięcia w PCC zgodnie z normą PN-EN 50160

5. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzona przez autora rozprawy analiza literatury o zasięgu światowym, dotyczącej konstruowania i stosowania symulatorów PwCR, prowadzi do wniosku, że potencjał badań naukowych związanych z modelowaniem matematycznym złożonych układów elektrycznych (w tym: elektroenergetycznych, elektromechanicznych) oraz algorytmów symulacji ich pracy w czasie rzeczywistym nie jest jeszcze wyczerpany.

W rozprawie doktorskiej, autor osiągnął założone cele: zaproponował model matematyczny układu elektrownia wiatrowa – sieć elektroenergetyczna SN, a także opisał algorytm symulacji wybranych stanów pracy tego układu, który umożliwi jego stabilną symulację w czasie rzeczywistym. Ponadto autor przedstawił propozycję rozwiązania symulatora PwCR opartego na bazie komputera osobistego, jako rozwiązania konkurencyjnego względem propozycji komercyjnych. Zaletą proponowanego rozwiązania są zdecydowanie niższe koszty, lecz jego wadą jest ograniczenie zakresu zastosowania symulatora w aspekcie liczby węzłów (złożoności układu) a także możliwych do odwzorowania procesów i zjawisk fizycznych zachodzących w symulowanym układzie elektrycznym.

Autor wykazał w rozprawie, że możliwe jest zastosowanie takiego modelu matematycznego i takiego algorytmu symulacji układu elektrownia wiatrowa – elektroenergetyczna sieć dystrybucyjna SN, aby w czasie rzeczywistym stabilnie i adekwatnie odwzorowywać jego właściwości z zastosowaniem platformy cyfrowej opartej na bazie komputera osobistego.

Przeprowadzone eksperymenty badawcze, których wybrane wyniki przedstawiono w rozprawie doktorskiej pozwalają na sprecyzowanie następujących wniosków:

- Przedstawiony model matematyczny układu elektrownia wiatrowa – sieć elektroenergetyczna SN pozwala na adekwatne odtwarzanie procesów i zjawisk fizycznych w sieci elektroenergetycznej SN ze stosunkowo długim krokiem całkowania równań różniczkowych ($200 \mu\text{s}$). Autor skutecznie połączył sposób modelowania złożonych układów elektrycznych z zastosowaniem wielobiegowników elektrycznych oraz modyfikacją prezentowanego w literaturze sposobu modelowania obwodów elektrycznych z zastosowaniem wartości średnich napięć na kroku całkowania.
- Opracowane przez autora modele matematyczne elementów strukturalnych układów elektroenergetycznych: maszyna indukcyjna z wirnikiem pierścieniowym, przekształtnik energoelektroniczny, trójfazowy transformator trójzwojeniowy oraz modele podstawowych elementów elektrycznych typu ERLC, ERL, R, C i RL pozwalają tworzyć adekwatne modele matematyczne typowych rozwiązań układów elektroenergetycznych z generacją rozproszoną w sieciach średniego napięcia.
- Predykcja kąta elektrycznego obrotu wirnika maszyny indukcyjnej na końcu kroku całkowania, predykcja indukcyjności magnesowania obwodu magnetycznego transformatora na końcu kroku całkowania oraz wprowadzenie poprawki w obliczaniu prądu magnesującego są znaczącymi elementami modeli

matematycznych, które są skuteczne przy rozwiązywaniu układów równań ze stosunkowo długim krokiem całkowania (200 μ s).

- Opracowany przez autora rozprawy algorytm symulacji komputerowej pracy układu elektrownia wiatrowa – sieć elektroenergetyczna SN, wykorzystujący adekwatny model matematyczny, który został zaimplementowany w specjalnie przygotowanej strukturze sprzętowej opartej na bazie komputera osobistego, zapewnia stabilną symulację w czasie rzeczywistym w stosunkowo długim okresie czasu (zbadana została wielokrotnie stabilność symulacji w ciągu pełnych siedmiu dni, z uwzględnieniem wymiany danych z otoczeniem i właściwą reakcją na zdarzenia losowe).
- Symulator złożonego układu elektrownia wiatrowa – sieć elektroenergetyczna SN, oparty na bazie komputera osobistego z systemem operacyjnym Microsoft Windows spełnia wymagania stawiane symulatorom pracującym w czasie rzeczywistym.
- Opracowany symulator PwCR, ma pewne ograniczenia w zastosowaniu. Jednym z nich jest liczba węzłów modelowanego układu elektrycznego, która przy uwzględnianiu nieliniowości charakterystyk magnesowania w głównych elementach struktury (maszyny elektryczne, transformatory) nie może przekraczać ok. 30 (wpływa to zasadniczo na zwiększenie czasu rozwiązywania układów równań). Przyjęte założenia upraszczające przy modelowaniu przekształtników energoelektronicznych uniemożliwiają analizę procesów i zjawisk fizycznych zachodzących wewnątrz przekształtnika (nie można np. odwzorować pracy kluczy energoelektronicznych).

Literatura (wybór ze spisu w rozprawie)

1. Abdulsalam S.G., Xu W., Neves W.L.A., Liu X., Estimation of Transformer Saturation Characteristics From Inrush Current Waveforms. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 21, Issue 1, January 2006, pp. 170-177.
2. Anjana A.R., Sindhura M., Tarun C.H., Sujith M., Solar powered IFO converter fed three phase induction motor for water pumping system. 2017 International Conference on Inventive Systems and Control, IEEE, Coimbatore, India, January 2017.
3. Bieliński K.S., Monitorowanie czynne procesu oświetlania ulicznego. *Rynek Energii*, nr 4 (119), 2015, str. 57-61.
4. Cha S.T., Wu Q., Nielsen A.H., Østergaard J., Park I.K., Real-Time Hardware-In-The-Loop (HIL) Testing for Power Electronics Controllers. 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, IEEE, Shanghai, China, September 2012.
5. Chua L.C., Pen-Min L., Komputerowa analiza układów elektronicznych. Algorytmy i metody obliczeniowe. WNT, Warszawa, 1981.
6. Cieślik S., A PC-based real-time computer simulator of electric power system cooperated with real excitation system. *Proceedings of XIX Symposium Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits*, Maribor, Slovenia, 2006, pp. 171-172.
7. Cieślik S., Dębowski L., Drechny M., Cyfrowy symulator układu kompensacji mocy biernej współpracujący z rzeczywistym regulatorem. *Materiały konferencji „Modelowanie i symulacja”*, Kościelisko, 21-25 Czerwca 2010, s. 299-302.
8. Cieślik S., Dębowski L., Drechny M., Koncepcja uwzględniania rzeczywistych charakterystyk regulatorów w symulacji układów elektroenergetycznych na przykładzie układu kompensacji mocy biernej, *Przegląd Elektrotechniczny*, Kościelisko, 86, nr 12, 2010, s. 212-215.
9. Cieślik S., Modelowanie matematyczne i symulacja układów elektroenergetycznych z generatorami indukcyjnymi. Wydawnictwo uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, Bydgoszcz, 2008.
10. Cieślik S., Obwodowe modele układów elektrycznych w cyfrowych symulatorach pracujących w czasie rzeczywistym. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2013.
11. Derouich A., Lagrioui A., Real-Time Simulation and analysis of the induction machine performances operating at flux constant. *(IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, Volume 5, Number 4, 2014, pp. 59-64.
12. Fajfer M., Analiza stabilności symulacji układu elektrycznego w czasie rzeczywistym, *Poznań Uniwersytet of Technology Academic Journals – Electrical Engineering*, vol. 81, 2015, s. 101-111.
13. Fajfer M., Cieślik S., Badanie wybranych stanów pracy sieci elektroenergetycznej z generacją rozproszoną z zastosowaniem symulatora pracującego w czasie rzeczywistym. *Poznań Uniwersytet of Technology Academic Journals – Electrical Engineering*, vol. 86, 2016, s. 55-66.
14. Fajfer M., Medium voltage electrical system research using DSP-based real-time simulator. *Computer Applications in Electrical Engineering*, Poznań, vol. 12, 2014, pp. 334-352.
15. Flizikowski J., Bieliński K., *Technology and Energy Sources Monitoring: Control, Efficiency and Optimization*. IGI Global, USA 2013
16. *Glossary of Software Engineering Terminology*. IEEE/ANSI Standard 729, 1983.
17. Goldemberg C, de Arruda Peteado A., Improvements on the inductance matrix inversion simplifying the use of the ABC/abc induction machine model. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference IEMDC'99*, Seattle, USA, 1999, pp. 422-424.
18. Hogan D.J., Gonzalez-Espin F., Hayes J.G., Foley R., Lightbody G., Egan M.G., Load and source electronic emulation using resonant current control for testing in a microgrid laboratory. *5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, IEEE, Galway, Ireland, June 2014.
19. Jankovic Z., Novakovic B., Bhavaraju V., Nasiri A., Average modeling of three-phase inverter for integration in a microgrid. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Pittsburgh, PA, USA, September 2014, pp. 793-799.

20. Jeong S., Kwak Y., Lee W.J., Software-in-the-Loop simulation for early-stage testing of AUTOSAR software component. Eighth International Conference on Ubiquitous and Future Networks, IEEE, Vienna, Austria, July 2016, pp. 59-63.
21. Kang C., Feng X., Yongjie F., Yuehai Y., Comparative simulation of dynamic characteristics of Wind Turbine Doubly-Fed Induction Generator based on RTDS and MATLAB. International Conference on Power System Technology, IEEE, Hangzhou, China, December 2010.
22. Kincaid D., Cheney W., Analiza numeryczna w przekładzie i pod redakcją Stefana Paszkowskiego. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 2002.
23. Kłosowski Z., Analiza możliwości wykorzystania turboszespołu wiatrowego do stabilizacji napięcia w węzle elektroenergetycznej linii SN z wykorzystaniem symulatora pracującego w czasie rzeczywistym, Przegląd Elektrotechniczny, Numer 1, 2015, s. 20-27.
24. Kłosowski Z., Cieślak S. Analiza stabilności symulacji stanów pracy transformatora elektroenergetycznego w czasie rzeczywistym, Aktualne problemy w elektroenergetyce, Jastrzębia Góra, 7-9 czerwiec 2017, s. 292-299.
25. Kłosowski Z., Plakhtyna O., Grugel P., Applying the method of average voltage on the integration step length for the analysis of electrical circuits. Zeszyty Naukowe - Elektrotechnika, vol. 17, no. 264, 2014, pp. 17-31.
26. Kurytnik I.P., Lis S., Drózd T., Telega A., Metoda szybkiego prototypowania w opracowaniu algorytmu sterowania instalacją solarną. Pomiary Automatyka Kontrola, vol. 60, nr. 5, 2014, s. 325-328.
27. Kuznyetsov O., Modeling of electromechanical systems based on induction machine using method of average voltage on the integration step length. Scientific Bulletin - "Politehnica" University of Bucharest. Series C, Electrical engineering and Computer science, Volume 79, Issue 2, 2017, pp. 169-180.
28. Kwon W.H., Choi S.G., Real-time distributed software-in-the-loop simulation for distributed control systems. Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design, IEEE, Kohala Coast, USA, August 1999, pp. 115-119.
29. Lubośny Z., Elektrownie wiatrowe w systemie elektroenergetycznym. WNT, Warszawa 2006.
30. Mohanalakshmi J., Suresh H. N., Sensorless speed estimation and vector control of an Induction Motor drive using model reference adaptive control. 2015 International Conference on Power and Advanced Control Engineering, IEEE, Bangalore, India, August 2015, pp. 377-382.
31. Noureen S.S., Shamim N., Roy V., Bayne S.B., Real-Time Digital Simulators: A Comprehensive Study on System Overview, Application, and Importance, International Journal of Research and Engineering, Volume 4, Number 11, November 2017, pp. 266-277.
32. Oferta komercyjna Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej http://www.i15.p.lodz.pl/pl/pliki_htm/oferta_szczegolowa.htm.
33. Piotuch R., Pałka R., Porównanie wybranych regulatorów prądu w układzie sterowania silnikiem synchronicznym ze wzbudzeniem od magnesów trwałych. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 93, 2011, s. 173-178.
34. Plakhtyna O., Kutsyk A., Semeniuk M., Kuznyetsov O., Object-oriented program environment for electromechanical systems analysis based on the method of average voltages on integration step. 2017 18th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), IEEE, Kutna Hora, Czech Republic, November 2017.
35. Plakhtyna O.G., The digital one-step method for simulation of electric circuits and its use in electromechanical tasks. Visnyk NTU HPI, no. 30, Ukrainian, 2008, pp. 223-225.
36. Plakhtyna O., Kłosowski Z., Żarnowski R., Ocena skuteczności metody napięć średniokrokowych w porównaniu z klasycznymi metodami numerycznymi w modelach matematycznych obwodów elektrycznych. Prace Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice, nr 1, 2011, s. 121-133.
37. Plakhtyna, O. Kłosowski, Z. Żarnowski, R., Model matematyczny napędu prądu stałego w oparciu o metodę średnich napięć na długości kroku całkowania. Przegląd Elektrotechniczny, nr 12a, 2011, s. 51-56.

38. Ponick B., Über den Einfluß der Hauptfeldsättigung auf Ausgleichsvorgänge elektrischer Antriebe und eine einfache Methode zu ihrer Berücksichtigung. *Archiv für Elektrotechnik*, Vol. 76, 1993, pp. 369-376.
39. Qiao W., Dynamic modeling and control of doubly fed induction generations driven by wind turbines. 2009 IEEE/PEC Power Systems Conference and Exposition, IEEE, Seattle, USA, March 2009.
40. Ronkowski M, Circuits-oriented models of electrical machines for simulation of converter systems. *Zeszyty naukowe Politechniki Gdańskiej*, Gdańsk, 1995.
41. Rosołowski E., Komputerowe metody analizy elektromagnetycznych stanów przejściowych. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław, 2009.
42. Sacha K., *Systemy czasu rzeczywistego*. Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2006.
43. Smolarczyk A., Symulator zjawisk dynamicznych w systemie elektroenergetycznym działający w czasie rzeczywistym jako nowoczesne narzędzie do badania blokad kołysaniowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, Numer 12, 2015, s. 249-253.
44. Song Y., Chen Y., Huang S., Xu Y., Yu Z., Xue W., Efficient GPU-Based Electromagnetic Transient Simulation for Power Systems With Thread-Oriented Transformation and Automatic Code Generation. *IEEE Access*, Volume 6, May 2018, pp. 25724-25736.
45. *Standard Computer Dictionary*. IEEE Standard 610, 1990.
46. Sumathy N., Prakash S.L., A novel STATCOM control scheme for grid connected wind driven Induction Generator for power quality improvement. 2012 International Conference on Advances in Power Conversion and Energy Technologies, IEEE, Mylavaram, Andhra Pradesh, India, August 2012.
47. Szczęsny R., *Komputerowa symulacja układów energoelektronicznych*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1999.
48. Tarakanath K., Agarwal V., Yadav P., Hardware in the loop simulation of direct synthesis based two degree of freedom PID control of DC-DC boost converter using Real Time Digital Simulation in FPGA. 2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), IEEE, Mumbai, India, December 2014.
49. Truong N.V., Hardware-in-the-Loop approach to controller design and testing of motion control systems using xPC Target. 2012 4th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS2012), IEEE, Kuala Lumpur, Malaysia, September 2012, pp. 117-121.
50. Wijnhoven T., Tant J., Deconinck G., Inverter modelling techniques for protection studies. 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, IEEE, Aalborg, Denmark, 2012.
51. Wu G., Lee K.Y., Young W., Modeling and control of power conditioning system for grid-connected fuel cell power plant. 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, IEEE, Vancouver, Canada 2013.
52. Zajczyk R., Modele matematyczne systemu elektroenergetycznego do badania elektromechanicznych stanów nieustalonych i procesów regulacyjnych. *Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej*, Gdańsk 2003.
53. Zhou Y., Lin J., Song Y., Cai Y., Liu H., A power hardware-in-loop based testing bed for auxiliary active power control of wind power plants. *Electric Power Systems Research*, Volume 124, July 2015, pp. 10-17.