

Damian PIĘTA, Zbigniew WYSOCKI
Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów,
Politechnika Śląska, Gliwice

KONFIGUROWANIE URZĄDZEŃ CYFROWEJ ELEKTROENERGETYCZNEJ AUTOMATYKI ZABEZPIECZENIOWEJ

Streszczenie. Urządzenia Cyfrowej Elektroenergetycznej Automatyki Zabezpieczeniowej (UCEAZ) umożliwiają realizację następujących funkcji:

- detekcji nienormalnych stanów pracy (nsp) chronionego elementu systemu elektroenergetycznego (se),
- pomiaru wybranych wielkości elektrycznych,
- rejestracji przebiegów i zdarzeń,
- sterowania i sygnalizacji.

Zamierzone wykorzystanie tych funkcji wymaga wykonania szeregu czynności określanych mianem konfigurowania. Zapewniony przez producenta zakres konfigurowania poszczególnych funkcji decyduje o rodzaju tzw. konfigurowalności UCEAZ. Artykuł dotyczy problematyki konfigurowalności zilustrowanej przykładem konfigurowania Cyfrowego Zespołu Automatyki Zabezpieczeniowej bloku energetycznego (generator-transformator) dużej mocy CZAZ-GT, produkowanego przez krajową firmę ZEG Energetyka sp. z o.o.

CONFIGURATION OF DIGITAL PROTECTION SYSTEMS

Summary. Digital Protection Systems (DPS) make possible realization of the following function:

- detection of abnormal states of protective power system element,
- measurement of the chosen electric quantities,
- signals end events recording,
- steering and signaling.

Contemplated application of these functions requires several operations referred to as configuration. The configuration scope of mentioned above functions ensured by a producer, determines the type of DPS configurationability. The paper deals with the configuration problems presented in the example of configuration of DPS for large power unit (generator-transformer) that is produced by Polish Company ZEG Energetyka sp. z o.o.

I. WPROWADZENIE

Detekcja zakłóceń w stanach pracy chronionego elementu see i właściwa nań reakcja UCEAZ, wymagają pozyskania potrzebnych cyfrowych zabezpieczeń z wykorzystaniem niżej wymienionych 'składników':

- kanały fizyczne (wejściowe prądy/napięcia),
- kanały logiczne (liniowe kombinacje, proste i złożone, cyfrowych prądów/napięć),
- sygnały dwustanowe (pierwotne i wtórne),
- funkcje zabezpieczeniowe,
- funkcje logiczno-czasowe,
- układy wejścia/wyjścia.

Zróżnicowane, określone przez producentów UCEAZ możliwości korzystania z wymienionych 'składników' podczas pozyskiwania zabezpieczeń cyfrowych determinują trzy rodzaje konfigurowalności funkcji detekcji nsp elementów se:

- konfigurowalność ograniczona,
- konfigurowalność quasi-pełna,
- konfigurowalność pełna.

Konfigurowalność ograniczona określa możliwość wyłącznie uaktywnienia pewnego zestawu zabezpieczeń cyfrowych z 'biblioteki' zabezpieczeń skonfigurowanych na stałe z ww. 'składników' a priori u producenta UCEAZ. Konfigurowalność ograniczona przypisywana jest z reguły UCEAZ, zbudowanym w oparciu o hardware 'małej mocy', wykorzystujący klasyczne mikroprocesory. Konfigurowalność określana mianem quasi-pełnej i pełnej odnosi się do rozbudowanych z punktu widzenia hardware'u (bazującego na procesorach DSP) UCEAZ, stosowanych głównie do ochrony bloków energetycznych (generator-transformator) dużej mocy. Charakteryzuje się ona możliwością pozyskiwania potrzebnych zabezpieczeń cyfrowych przez użytkownika na podstawie swobodnego konfigurowania 'składników' wyszczególnionych w dokumentacji technicznej UCEAZ. Różnica między konfigurowalnością quasi-pełną i pełną polega na tym, że ta pierwsza wyklucza ze swobodnego konfigurowania analogowe sygnały prądu/napięcia.

2. KONFIGUROWANIE URZĄDZEŃ CYFROWEJ ELEKTROENERGETYCZNEJ AUTOMATYKI ZABEZPIECZENIOWEJ

Konfigurowanie UCEAZ przedstawiono na przykładzie Cyfrowego Zespołu Automatyki Zabezpieczeniowej bloku energetycznego (generator-transformator) dużej mocy CZAZ-GT [1], produkowanego przez krajową firmę ZEG Energetyka sp. z o.o.

Skonfigurowanie CZAZ-GT, który należy do grupy UCEAZ o quasi-pełnej konfigurowalności, wymaga:

- utworzenia z wykorzystaniem IBM PC i zdeponowania w jego pamięci tzw. pliku konfiguracyjnego (pk),
- wprowadzenia pliku pk do pamięci CZAZ-GT,
- sprawdzenia poprawności konfiguracji.

Spełnienie dwu pierwszych wymagań zapewnia program konfiguracyjny o nazwie CZAZ_GT [2], napisany (w środowisku systemu Windows) w ramach prac nad projektem celowym KBN (Nr 8 T10B 034 96C/3325) pt.: 'Kompleksowa, cyfrowa automatyka zabezpieczeniowa bloku generator-transformator', realizowanym przez Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechniki Śląskiej wspólnie z IEn - Warszawa oraz ZEG Tychy.

Utworzenie pliku pk oznacza skompletowanie niżej wymienionych struktur binarnych, które w sposób jednoznaczny określają konfigurację (realizowane funkcje i ich parametry/nastawy) poszczególnych modułów CZAZ-GT:

- struktura zabezpieczeń i pomiarów - moduł DSP,
- struktura logiczno-czasowa - moduł ML,

- struktura sterowań i sygnalizacji - moduł MWE/WY,
- struktura rejestracji sygnałów pomiarowych i dwustanowych oraz zdarzeń - moduł MR.

Wprowadzenie pliku pk do CZAZ-GT powoduje zaprogramowanie wszystkich jego modułów i umożliwia rozpoczęcie pracy zespołu. Należy podkreślić, że rozpoczęcie procesu tworzenia pliku pk powinno być poprzedzone analizą zależności opisujących złożone kanały logiczne, niezbędne do realizacji najważniejszych zabezpieczeń bloku energetycznego, w celu rozeznania możliwości ich kreowania przez CZAZ-GT.

2.1. Proces tworzenia pliku pk

Problematykę tworzenia pliku pk przybliżono na przykładzie konfigurowania stabilizowanego zabezpieczenia różnicowo-prądowego 87TB dla potrzeb ochrony transformatora blokowego o grupie połączeń Yd11 przed zwarciami międzyfazowymi; w celu uproszczenia zapisu równań zastosowano oznaczenia R,S,T dla faz układu trójfazowego. Istotą działania cyfrowego zabezpieczenia elektroenergetycznego jest sprawdzanie znaku obliczanej w każdym okresie próbkowania T_p wartości wyrażenia kryterialnego, które dla zabezpieczenia 87TB ma postać:

$$Wk_{87TB} = [I_{1r(n)}]^2 - \left\{ (I_{r0})^2 + [k_h I_{1h(n)}]^2 \right\}, \quad (1)$$

gdzie:

$I_{1r(n)}$ - estymata amplitudy podstawowej harmonicznej prądu różnicowego,

I_{r0} - początkowy prąd rozruchowy (nastawa),

k_h - współczynnik stabilizacji (nastawa),

$I_{1h(n)}$ - estymata amplitudy podstawowej harmonicznej prądu stabilizującego.

Estymacja amplitudy podstawowej harmonicznej prądu różnicowego i hamującego dokonywana jest na podstawie następujących sekwencji procedur numerycznych:

$$[i_r] [hl] [o] [A] \Rightarrow I_{1r(n)}, \quad (2)$$

$$[i_h] [hl] [o] [A] \Rightarrow I_{1h(n)}, \quad (3)$$

w których:

$[i_r]$ - procedura dla wyznaczania próbek prądu różnicowego,

$[i_h]$ - procedura dla wyznaczania próbek prądu hamującego,

$[hl]$ - procedura dla ekstrakcji składowej podstawowej,

$[o]$ - procedura dla wyznaczania składowych ortogonalnych,

$[A]$ - procedura dla estymacji amplitudy.

W przypadku transformatora blokowego o grupie połączeń Yd11 procedury cząstkowe $[i_r]$ i $[i_h]$ dla fazy R reprezentowane są następującymi zależnościami:

$$i_{rR(n)} = a_2 \frac{i_{2R(n)} - i_{2S(n)}}{\sqrt{3}} - [a_3 i_{3R(n)} + a_1 i_{1R(n)}], \quad (4)$$

$$i_{hR(n)} = 0,5 \left\{ a_2 \frac{i_{2R(n)} - i_{2S(n)}}{\sqrt{3}} + [a_3 i_{3R(n)} + a_1 i_{1R(n)}] \right\}, \quad (5)$$

w których:

$i_{2R(n)}$ - dyskretny prąd fazy R, górnej strony transformatora blokowego,

$i_{2S(n)}$ - dyskretny prąd fazy S, górnej strony transformatora blokowego,

$i_{3R(n)}$ - dyskretny prąd fazy R, górnej strony transformatora odczepowego,

$i_{1R(n)}$ - dyskretny prąd fazy R generatora,

a_1, a_2, a_3 - współczynniki korekcji amplitudowej prądów.

Procedura [hl] filtracji składowej podstawowej działa w oparciu o splot cyfrowy:

$$\hat{i}_{1(n)} = \sum_{k=0}^{m-1} c_k \hat{i}_{1(n-k)}, \quad (6)$$

w którym:

$\hat{i}_{1(n)}$ - odfiltrowana składowa podstawowa,

$i_{1(n)}$ - filtrowany sygnał,

c_k - współczynniki filtru,

m - liczba próbek w okresie składowej podstawowej.

Procedura [o] ortogonalizacji sygnału składowej podstawowej wykorzystuje metodę pojedynczego opóźnienia wyrażoną wzorami:

$$\hat{i}_{a1(n)} = i_{1(n)}, \quad (7)$$

$$\hat{i}_{b1(n)} = -ctg(\varpi_1 T_p) i_{1(n)} + [\sin(\varpi_1 T_p)]^{-1} i_{1(n-1)}, \quad (8)$$

w których:

$\hat{i}_{a1(n)}$ - składowa ortogonalna bezpośrednia,

$\hat{i}_{b1(n)}$ - składowa ortogonalna kwadraturowa,

ϖ_1 - pulsacja składowej podstawowej,

T_p - okres próbkowania.

Procedura [A] estymacji amplitudy składowej podstawowej bazuje na właściwości składowych ortogonalnych opisanej wzorem:

$$I_{1(n)} = \sqrt{\hat{i}_{a1(n)}^2 + \hat{i}_{b1(n)}^2}. \quad (9)$$

Z analizy przedstawionych procedur można wywnioskować, że powodzenie skonfigurowania zabezpieczenia 87TB zależy w głównej mierze od możliwości pozyskania kanałów logicznych, tj. prądu różnicowego i hamującego, na drodze kojarzenia próbek prądu transformatora blokowego i odczepowego oraz generatora zgodnie z procedurami $[i_r]$ i $[i_h]$.

Przeglądając 'bibliotekę' kanałów logicznych środowiska CZAZ-GT, zagwarantowaną przez odpowiedni projekt rozwiązania sprzętowego modułu DSP, zauważa się kanał kl o kryptonimie 'H1COMPLEX', którego opisana poniższą zależnością struktura:

$$S = a(S1 - S2) - [b(S3 - S4) + c(S5 - S6)], \quad (10)$$

gdzie:

a, b, c - parametry,

$S_1 \div S_6$ - wybierane w sposób dowolny (w obrębie danego modułu DSP) dyskretne przebiegi prądu/napięcia (tzw. kanały fizyczne CZAZ-GT),

pozwalają na pozyskanie próbek zarówno prądu różnicowego, jak i hamującego i otwierają tym samym drogę do realizacji przez mikroprocesor modułu DSP wyrażenia kryterialnego (1).

Porównując kolejno równania (4) i (5) z zależnością (10) można określić relacje między odpowiadającymi sobie parametrami i dyskretnymi przebiegami prądów. Przykładowo, dla prądu różnicowego fazy R relacje te są następujące:

$$a = \frac{a_2}{\sqrt{3}}, \quad b = a_3, \quad c = a_1, \quad S1 = i_{2R}, \quad S2 = i_{2S}, \quad S3 = 0, \quad S4 = i_{3R}, \quad S5 = i_{1R}, \quad S6 = 0.$$

Wprowadzając wyznaczone wzory na a_1 , a_2 i a_3 [3], uzyskuje się końcowe zależności dla wyznaczenia parametrów kanału logicznego 'HICOMPLEX':

$$a = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\mathcal{G}_{i2}}{\mathcal{G}_{i1}} \mathcal{G}_{ir}, \quad (11)$$

$$b = \frac{\mathcal{G}_{i3}}{\mathcal{G}_{i1}} \mathcal{G}_{ir}, \quad (12)$$

$$c = \frac{\mathcal{G}_{i1}}{\mathcal{G}_{i1}}, \quad (13)$$

w których:

\mathcal{G}_{i1} - przekładnia przekładnika w torze prądowym generatora,

\mathcal{G}_{i2} - przekładnia przekładnika w torze prądowym górnej strony transformatora blokowego,

\mathcal{G}_{i3} - przekładnia przekładnika w torze prądowym górnej strony transformatora odczepowego,

\mathcal{G}_{ir} - przekładnia transformatora blokowego.

Pewność realizacji zależności (4) i (5) z wykorzystaniem kanału logicznego 'HICOMPLEX' zezwoliła na rozpoczęcie konfigurowania zabezpieczenia różnicowego transformatora blokowego Yd11 z wykorzystaniem programu CZAZ_GT. Opisane niżej kolejne etapy konfigurowania ww. zabezpieczenia zobrazowano za pomocą „okienek dialogowych” programu CZAZ_GT.

Etap 1 - założenie nowego pliku konfiguracyjnego pk

Założenie nowego pliku pk realizowane jest w 'oknie dialogowym' Plik i polega jedynie na uaktywnieniu opcji *Nowa konfiguracja*.

Kolejnych 5 etapów konfigurowania CZAZ-GT realizowanych jest w 'oknie dialogowym' Edycja z wykorzystaniem odpowiednich opcji.

Etap 2 - zdefiniowanie wymaganej konfiguracji modułów CZAZ_GT

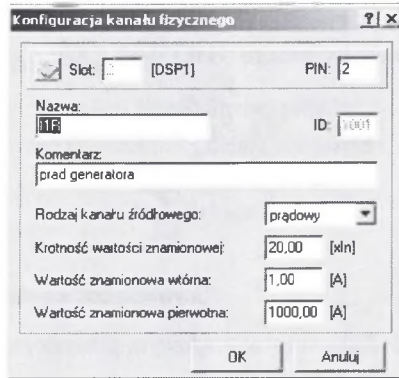
Wymaganą konfigurację sprzętową tj. zestawienie modułów, niezbędnych do realizacji wymaganych zabezpieczeń, uzyskuje się w opcji *Konfiguracja sprzętowa CZAZ-GT.*; dla zabezpieczenia 87TB są to: moduł komunikacyjny MK, moduł DSP, moduł logiki ML, moduł rejestratora MR, moduł MWE/WY.

Etap 3 – skonfigurowanie modułu DSP

Konfigurowanie modułu DSP realizowano w opcji *Moduł DSP* z rozbiciem na trzy podetapy:

- 1) konfigurowanie kanałów fizycznych,
- 2) konfigurowanie kanałów logicznych,
- 3) konfigurowanie funkcji zabezpieczeniowych.

Podetap pierwszy wiązał się z wyborem nazw dla poszczególnych kanałów fizycznych (prądy, na których operuje zabezpieczenie 87TB) oraz zadeklarowaniem wymaganych parametrów; okno dialogowe dla deklarowania parametrów prądu generatora (faza R) przedstawia rys. 1.

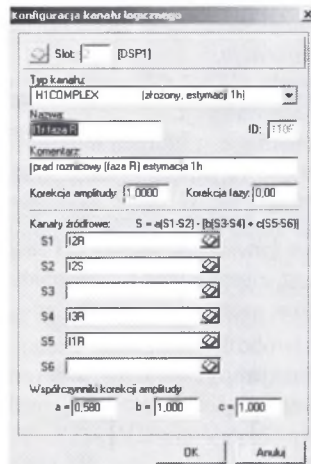


Rys. 1. 'Okno dialogowe' do deklarowania parametrów prądu fazy R generatora
 Fig. 1. 'Dialogue window' for generator, phase R, current parameters setting

Podetap drugi wymagał:

- 1) skompletowania tablicy z nazwami kanałów logicznych,
- 2) określenia typu kanału logicznego dla poszczególnych nazw,
- 3) zadeklarowania właściwych kanałów źródłowych i parametrów dla poszczególnych typów kanałów logicznych.

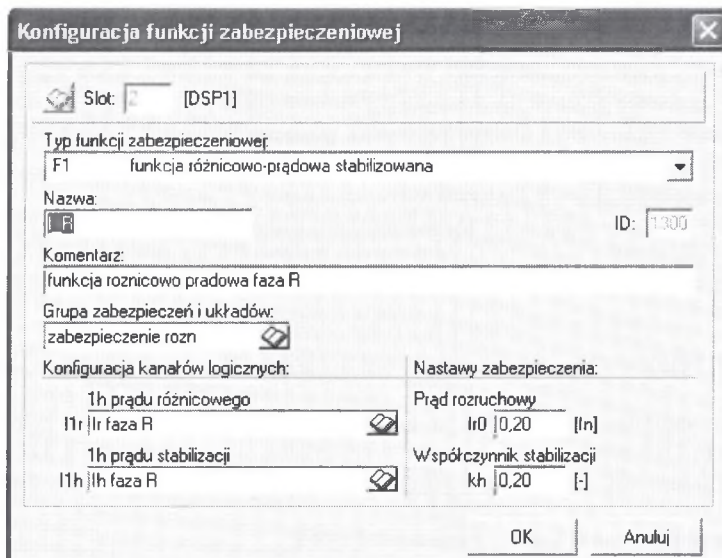
Wyniki działań związanych z punktem 2, w odniesieniu do prądu różnicowego IIRfazaR, obrazowano za pomocą 'okna dialogowego' z rys.2.



Rys. 2. Konfiguracja złożonego kanału logicznego HICOMPLEX dla uzyskania składowej podstawowej prądu różnicowego fazy R
 Fig. 2. Configuration of logical complex canal HICOMPLEX for estimation a fundamental component of phase R differential current

Podetap trzeci polegał na wybraniu funkcji zabezpieczeniowych niezbędnych do zrealizowania zabezpieczenia 87TB (z biblioteki wszystkich funkcji zabezpieczeniowych CZAZ-GT) oraz zadeklarowaniu określonych w podetapie drugim kanałów logicznych i właściwych parametrów.

Przykład deklarowania parametrów dla różnicowo-prądowej stabilizowanej funkcji zabezpieczeniowej z wykorzystaniem stosownego 'okna dialogowego' przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Okno dialogowe dla deklarowania parametrów funkcji różnicowo-prądowej stabilizowanej
 Fig. 3. 'Dialogue window' for differential-current-biased function setting

Etap 4 - skonfigurowanie modułu MWE/WY

Konfigurowanie modułu MWE/WY dokonywane było z wykorzystaniem opcji 'moduł wejść/wyjść IO' i polegało na:

- 1) utworzeniu tablicy sygnałów wejściowych (okno dialogowe - *konfigurowanie fizycznych wejść dwustanowych*),
- 2) utworzeniu tablicy sygnałów wyjściowych wyłączających (okno dialogowe - *konfigurowanie fizycznych wyjść dwustanowych*),
- 3) przypisaniu wybranym sygnałom we/wy odpowiednich numerów PIN slotu modułu MWE/WY.

Etap 5 - skonfigurowanie modułu ML

Na etapie projektowania zabezpieczenia transformatora blokowego przyjęto, że będzie to zabezpieczenie nadprądowe-różnicowe stabilizowane, bezwłocznego-pofazowe; zadziałanie tego zabezpieczenia ma spowodować wygenerowanie następujących sygnałów wyjściowych:

- sygnał do wyłączenia bloku, sygnał do zapalenia diody na płycie czołowej zespołu CZAZ-GT, sygnał do pobudzenia rejestratora (zadziałanie 87TB faza R),
- sygnał do wyłączenia bloku, sygnał do zapalenia diody na płycie czołowej zespołu CZAZ-GT, sygnał do pobudzenia rejestratora (zadziałanie 87TB faza S),
- sygnał do wyłączenia bloku, sygnał do zapalenia diody na płycie czołowej zespołu CZAZ-GT, sygnał do pobudzenia rejestratora (zadziałanie 87TB faza T).

Spełnienie tych wymagań wiąże się ze skonfigurowaniem modułu ML zgodnie z następującą sekwencją działań:

- 1) ustalenie tablicy funkcji logicznych,
- 2) zadeklarowanie dla poszczególnych funkcji logicznych sygnałów wejściowych i klasy sygnałów wyjściowych.

Etap 6 - skonfigurowanie modułu MR

Skonfigurowanie modułu MR polegało na wprowadzeniu do pliku pk w 'oknie dialogowym' *Nastawy rejestratora zakłóceń* poniższych danych wynikających z projektu zabezpieczenia transformatora blokowego:

- rodzaj zapisu; dynamiczny,
- atrybuty rejestracji: całkowity czas zapisu-3000 ms, czas wybiegu-100 ms, czas przedbiegu-100 ms, próg sygnalizacji przepełnienia-75%, stopień rozrzedzenia-0,
- sygnały pobudzenia rejestratora: 87TB_wyl_fR, 87TB_wyl_fS, 87TB_wyl_fT,

- rejestrowane sygnały analogowe,
- rejestrowane sygnały dwustanowe.

Etap 7 - zapisanie pliku pk na twardym dysku komputera IBM PC

Opcja *Zapisz jako* 'Okna dialogowego' Plik pozwala zapisać aktualną konfigurację pliku pk na twardym dysku IBM PC.

Etap 8 - wysłanie pliku pk do CZAZ-GT

Opcja *Wyślij do CZAZ-GT* 'Okna dialogowego' Plik zapewnia wysłanie wybranego pk do aktualnie przyłączonego CZAZ-GT. Możliwość wykonania tej funkcji uzależniona jest od uprawnień operatora; zapisywanie pk do CZAZ-GT powoduje wyłączenie go z pracy na czas transmisji pliku.

3. BADANIE POPRAWNOŚCI KONFIGURACJI CZAZ-GT

Badanie poprawności dokonanego skonfigurowania CZAZ-GT dotyczyło w głównej mierze modułu DSP realizującego wyrażenie kryterialne (1) zabezpieczenia 87TB, a ponadto modułu rejestratora MR zapisującego wybrane sygnały zakłócenia i dwustanowe.

3.1. Badanie poprawności konfiguracji modułu DSP

Poprawność skonfigurowania modułu DSP sprawdzono przez porównanie charakterystyki stabilizacji zabezpieczenia 87TB obliczeniowej z eksperymentalno-obliczeniową.

3.1.1. Charakterystyka stabilizacji obliczeniowa

Obliczeniową charakterystykę stabilizacji, której współrzędne zestawiono w tab. 1, uzyskuje się z wykorzystaniem równania:

$$I_{1r} = \sqrt{I_{ro}^2 + (k_h I_{1h})^2} . \quad (14)$$

Tabela 1

Współrzędne obliczeniowej charakterystyki stabilizacji; $I_{ro} = 0,2 A$, $k_h = 0,2$

$I_{1r} A$	0,206	0,223	0,25	0,28	0,44	0,632	0,82	1,01	1,21	1,4
$I_{1h} A$	0,25	0,5	0,75	1	2	3	4	5	6	7

3.1.2. Charakterystyka stabilizacji eksperymentalno-obliczeniowa

Zapisując równanie (14) z wykorzystaniem wyrażen na prąd różnicowy i hamujący dla fazy R przy założeniu, że prąd odczepu $i_{3R} = 0$, otrzymuje się zależność przydatną do wyznaczenia eksperymentalno-obliczeniowej charakterystyki stabilizacji zabezpieczenia różnicowego transformatora blokowego o grupie połączeń Yd11:

$$\left[\frac{a_2 \underline{I}_{2R} - a_2 \underline{I}_{2S}}{\sqrt{3}} - |a_1 \underline{I}_{1R}| \right] = \sqrt{I_{ro}^2 + \left[k_h 0,5 \left(\frac{a_2 \underline{I}_{2R} - a_2 \underline{I}_{2S}}{\sqrt{3}} + |a_1 \underline{I}_{1R}| \right) \right]^2} . \quad (15)$$

Eksperyment przeprowadzony z wykorzystaniem systemu komputerowego do badania urządzeń elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej MTZ-Lab [4,5] polegał na równoczesnym wymuszeniu prądów i_{2R} , i_{2S} , i_{1R} o parametrach i atrybutach zapewniających:

- quasi-równość stron równania (15); Lewa strona równania reprezentująca moduł prądu różnicowego nieco mniejsza od strony prawej reprezentującej rzędną charakterystyki stabilizacji zabezpieczenia 87TB,
- quasi-statyczne di/dt zwiększanie amplitudy prądu i_{1R} aż do zadziałania zabezpieczenia.

Przeprowadzenie eksperymentu wiąże się z wyznaczeniem z równania (15) parametrów 'startowego prądu równowagi' I_{1R} dla przyjętych poniżej parametrów prądu I_{2R} i I_{2S} :

$$|I_{2R}| = I_k = idem, \arg I_{2R} = 0^\circ = idem, \quad (16)$$

$$|I_{2S}| = I_k = idem, \arg I_{2R} = 240^\circ = idem. \quad (17)$$

W celu wyznaczenia parametrów 'startowego prądu równowagi' I_{1R} :

$$|I_{1R}^{rów}| = \sqrt{\operatorname{Re}\{I_{1R}\}^2 + \operatorname{Im}\{I_{1R}\}^2}, \quad (18)$$

$$\arg I_{1R}^{rów} = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}\{I_{1R}\}}{\operatorname{Re}\{I_{1R}\}}, \quad (19)$$

przekształcamy równanie (15) do postaci:

$$\left[(p_1 p_3 + p_4 \operatorname{Re}\{I_{1R}\})(p_1 p_5 - p_6 \operatorname{Re}\{I_{1R}\}) - (p_2 p_3 + p_4 \operatorname{Im}\{I_{1R}\})(p_2 p_5 - p_6 \operatorname{Im}\{I_{1R}\}) - I_{ro}^2 \right] + i \left[(p_2 p_3 + p_4 \operatorname{Im}\{I_{1R}\})(p_1 p_5 - p_6 \operatorname{Re}\{I_{1R}\}) + (p_1 p_3 + p_4 \operatorname{Re}\{I_{1R}\})(p_2 p_5 - p_6 \operatorname{Im}\{I_{1R}\}) \right] = 0,$$

w której parametry $p_1 \div p_6$ opisane są zależnościami:

$$p_1 = \operatorname{Re}\{I_{2R}\} - \operatorname{Re}\{I_{2S}\}$$

$$p_2 = \operatorname{Im}\{I_{2R}\} - \operatorname{Im}\{I_{2S}\}$$

$$p_3 = \frac{1 + 0,5 k_h}{\sqrt{3}}$$

$$p_4 = 0,5 k_h - 1$$

$$p_5 = \frac{1 - 0,5 k_h}{\sqrt{3}}$$

$$p_6 = 0,5 k_h + 1.$$

Przyrównując część rzeczywistą i urojoną lewej strony ostatniego równania do zera, otrzymujemy układ równań rzeczywistych:

$$(p_1 p_3 + p_4 \operatorname{Re}\{I_{1R}\})(p_1 p_5 - p_6 \operatorname{Re}\{I_{1R}\}) - (p_2 p_3 + p_4 \operatorname{Im}\{I_{1R}\})(p_2 p_5 - p_6 \operatorname{Im}\{I_{1R}\}) - I_{ro}^2 = 0 \quad (20)$$

$$\left[(p_2 p_3 + p_4 \operatorname{Im}\{I_{1R}\})(p_1 p_5 - p_6 \operatorname{Re}\{I_{1R}\}) + (p_1 p_3 + p_4 \operatorname{Re}\{I_{1R}\})(p_2 p_5 - p_6 \operatorname{Im}\{I_{1R}\}) \right] = 0 \quad (21)$$

o dwóch niewiadomych $\operatorname{Re}\{I_{1R}\}$, $\operatorname{Im}\{I_{1R}\}$.

Wyznaczając z (21)

$$\operatorname{Re}\{I_{1R}\} = \frac{\operatorname{Im}\{I_{1R}\}(p_1 p_3 p_6 - p_1 p_4 p_5) - 2 p_1 p_2 p_3 p_5}{-p_2 p_3 p_6 - 2 p_4 p_6 \operatorname{Im}\{I_{1R}\} + p_2 p_4 p_5} \quad (22)$$

i podstawiając do (20), po przekształceniach otrzymuje się równanie:

$$A \operatorname{Im}^4\{I_{1R}\} + B \operatorname{Im}^3\{I_{1R}\} + C \operatorname{Im}^2\{I_{1R}\} + D \operatorname{Im}\{I_{1R}\} + E = 0, \quad (23)$$

w którym:

$$A = 4 p_4^3 p_6^3$$

$$B = (8 p_3 p_4^3 p_6^3 p_2 - 8 p_4^3 p_5 p_6^2 p_2)$$

$$\begin{aligned}
 C &= (p_4^3 p_5^2 p_6 p_1^2 - 4p_4^2 p_6^2 I_{ro}^2 + 2p_3 p_4^2 p_5 p_6^2 p_1^2 + p_3^2 p_4 p_6^3 p_1^2 + 5p_4^3 p_5^2 p_6 p_2^2 - 14p_3 p_4^2 p_5 p_6^2 p_2^2 \\
 &+ 5p_3^2 p_4 p_6^3 p_2^2) \\
 D &= (4p_4^2 p_5 p_6 I_{ro}^2 p_2 - 4p_3 p_4 p_6^2 I_{ro}^2 p_2 - p_4^3 p_5^3 p_1^2 p_5 - p_3 p_4^2 p_5^2 p_6 p_1^2 p_2 + p_3^2 p_4 p_5 p_6^2 p_1^2 p_2 + \\
 &p_3^3 p_6^3 p_1^2 p_2 - p_4^3 p_5^3 p_2^3 + 7p_3 p_4^2 p_5^2 p_6 p_2^3 - 7p_3^2 p_4 p_5 p_6^2 p_2^3 + p_3^3 p_6^3 p_2^3) \\
 E &= (2p_3 p_4 p_5 p_6 I_{ro}^2 p_2^2 - p_4^2 p_5^2 I_{ro}^2 p_2^2 - p_2^2 p_6^2 I_{ro}^2 p_2^2 - p_3 p_4^2 p_5^3 p_1^2 p_2^2 - 2p_3^2 p_4 p_5^2 p_6 p_1^2 p_2^2 - \\
 &p_3^3 p_5 p_6^2 p_1^2 p_2^2 - p_3 p_4^2 p_5^3 p_2^4 + 2p_3^2 p_4 p_5^2 p_6 p_2^4 - p_3^3 p_5 p_6^2 p_2^4).
 \end{aligned}$$

Rozwiązanie równania (23) z wykorzystaniem programu Mathematica [6], dla kilku zestawów parametrów p , i skojarzenie wyników obliczeń z równaniem (22) pozwoliło uzyskać parametry (moduł, argument) 'startowego prądu równowagi' I_{IR}^{row} ; wyniki obliczeń zebrano w tab. 2. Wykorzystując przedstawiony sposób wyznaczania parametrów 'startowego prądu równowagi' przeprowadzono eksperyment wymuszania prądów dla dziesięciu różnych wartości modułów I_k . Pomiar wartości I_k oraz odpowiadających im wartości modułu prądu I_{IR} powodującego zadziałania zabezpieczenia różnicowego, wykonane dla stałej wartości $dl = 0,01 A$ oraz $dt = 0,3 s$, wraz z obliczonymi wartościami prądu różnicowego i hamującego (dla $a_1 = a_2 = 1$, $a_2 = 0,58$) zebrano w tab. 3.

Tabela 2
Pierwiastki układu równań (20), (21) oraz wartości modułu
i argumentu 'startowego prądu równowagi' I_{IR}^{row}

Zestaw parametrów P	$Re\{I_{IR}^{row}\}$	$Im\{I_{IR}^{row}\}$	$ I_{IR}^{row} $	$\arg I_{IR}^{row}$
1	0,70248	0,441	0,829	35
2	2,09685	1,2430	2,43	30,6603
3	3,52548	2,05528	4,08	30,241
4	4,94757	2,87072	5,7	30,1235
5	6,3674	3,68738	7,35	30,075
6	7,7863	4,50456	8,99	30,05
7	9,20461	5,32207	10,6	30,03
8	10,62263	6,13974	12,26	30,027
9	14,87564	8,59336	17,17	30,014

Eksperyment dla uzyskania charakterystyki stabilizacji powtórzono, zgodnie z powyższym scenariuszem, deformując wymuszane prądy wyższymi harmonicznymi w celu sprawdzenia poprawności działania procedury filtracji składowej podstawowej prądu. Uzyskane

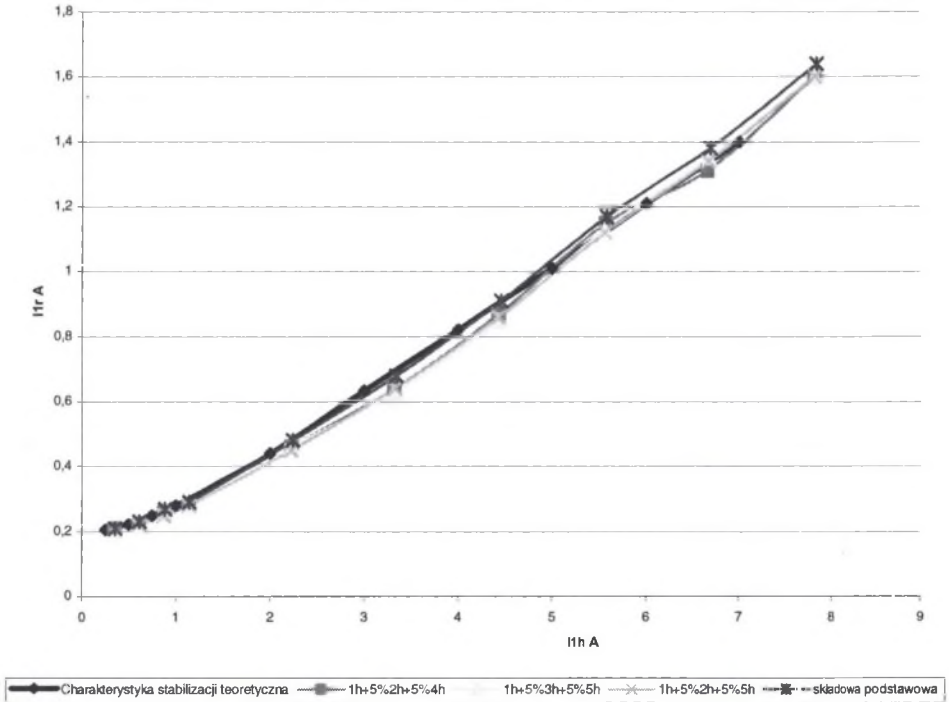
eksperymentalno-obliczeniowe charakterystyki stabilizacji, łącznie z charakterystyką obliczeniową, przedstawiono na rys. 4.

Tabela 3

Wyniki pomiarów i obliczeń dla eksperymentalno-obliczeniowej charakterystyki stabilizacji;

$$I_{ro} = 0,2 A, k_h = 0,2$$

I_{2R}	0,23	0,48	0,72	0,97	1,95	2,95	3,94	4,95	5,93	6,95
I_{2S}	0,26	0,51	0,77	1,02	2,04	3,09	4,11	5,18	6,21	7,27
I_{1R}	0,46	0,72	1,12	1,29	2,45	3,65	4,87	6,13	7,35	8,6
I_{1h}	0,355	0,615	0,885	1,145	2,24	2,34	4,455	4,585	6,69	7,82
I_{1r}	0,21	0,23	0,27	0,29	0,48	0,68	0,91	1,17	1,38	1,64



Rys. 4. Charakterystyki stabilizacji zabezpieczenia różnicowego 87TB

Fig. 4. Characteristics of 87TB biased differential protection

3.2. Badanie poprawności konfiguracji modułu MWE/WY i MR

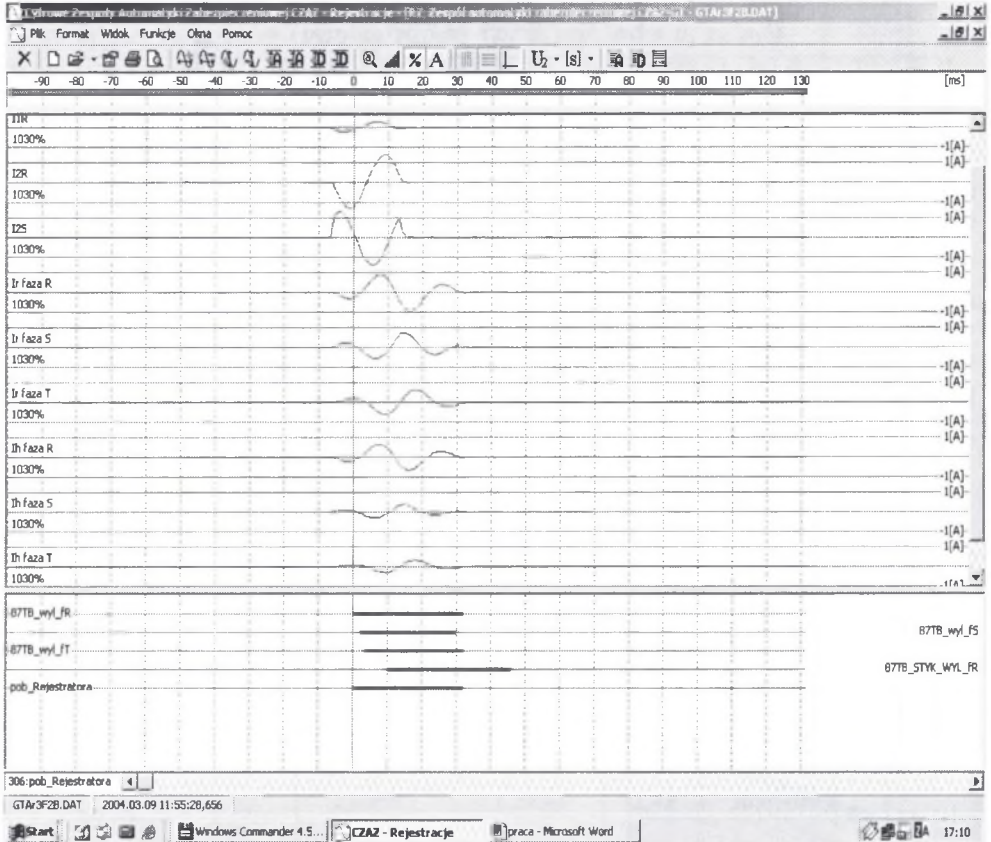
Konfiguracja modułu MWE/WY miała zapewnić:

- pobudzenie trzech przekaźników wyjściowych B, C, D sterowanych odpowiednio sygnałami logicznymi 87TB_wyl_fR, 87TB_wyl_fS, 87TB_wyl_fT, pofazowych przekaźników różnicowych transformatora blokowego,
- obsługę (na poziomie 220V=) pinu 31 listwy zaciskowej CZAZ-GT.

Konfiguracja modułu rejestratora MR dotyczyła:

- 12 sygnałów prądowych (I1R, I2R, I2S, Ir faza R, Ir faza S, Ir faza T, Ih faza R, Ih faza S, Ih faza T, Ih faza R),

- 5 sygnałów dwustanowych (87TB_wyl_fR, 87TB_wyl_fS, 87TB_wyl_fT, 87TB_STYK_WYL_fR, pob_Rejestratora).

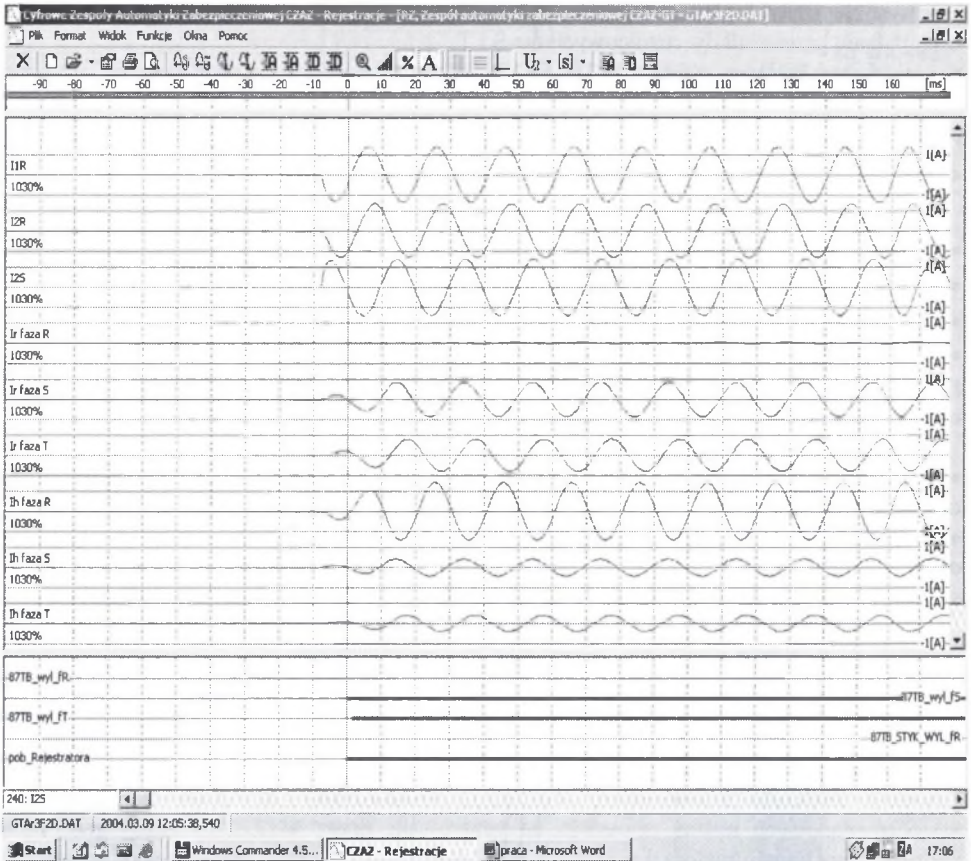


Rys.5. Rejestrogram prądów i sygnałów dwustanowych dla zakłócenia 1 generowanego przez MTZ-Lab
 Fig.5. Currents and binary physical signals recorded during disturbance 1 generated by MTZ-Lab

Sprawdzenie poprawności skonfigurowania modułu MWE/WY i MR polegało na analizie rejestrogramów ww. prądów i sygnałów dwustanowych (zgromadzonych przez moduł MR) uzyskanych dla dwóch przypadków zakłóceń generowanych przez system MTZ-Lab [5]:

- 1 - niepełna gwiazda prądów generatora ($I_{1R} = 0,2 A \arg I_{1R} = 30^0 \quad I_{1S} = 0 \quad I_{1T} = 0$) i górnej strony transformatora ($I_{2R} = 1,0 A \arg I_{2R} = 0^0 \quad I_{2S} = 1,0 A \arg I_{2S} = 240^0 \quad I_{2S} = 0$);
 pobudzenie przekaźników różnicowych wszystkich faz,
- 2 - niepełna gwiazda prądów generatora ($I_{1R} = 1,0 A \arg I_{1R} = 30^0 \quad I_{1S} = 0 \quad I_{1T} = 0$) i górnej strony transformatora ($I_{2R} = 1,0 A \arg I_{2R} = 0^0 \quad I_{2S} = 1,0 A \arg I_{2S} = 240^0 \quad I_{2S} = 0$);
 pobudzenie przekaźników różnicowych faz S i T.

Należy zaznaczyć, że pojawienie się wysokiego stanu sygnału 87TB_STYK_WYL_fR powoduje, z pewnym opóźnieniem, przerwanie generowania prądów przez MTZ-Lab.



Rys. 6. Rejestrogram prądów i sygnałów dwustanowych dla zakłócenia 1 generowanego przez MTZ-Lab
 Fig.6. Currents and binary physical signals recorded during disturbance 2 generated by MTZ-Lab

3.2.1. Rejestrogramy przebiegów prądów zakłóceniovych i sygnałów dwustanowych

Zakłócenia 1 i 2 zaowocowały rejestrogramami uzyskanymi przez moduł MR przedstawionymi, z wykorzystaniem programu REJ_ZAK [7], odpowiednio na rys.5.i 6

3.2.2. Analiza rejestrogramów

Analiza prądów i sygnałów dwustanowych z rys.5 prowadzi do następujących spostrzeżeń:

- generowane przez MTZ-Lab prądy generatora i górnej strony transformatora charakteryzują się wyszczególnionymi wyżej parametrami,
- moduły pofazowych prądów różnicowych i hamujących kształtują się zgodnie z zależnościami (4) i (5) i powodują zadziałanie przekaźników różnicowych faz R, S, T,
- wysokie stany logiczne sygnałów 87TB_wyl_fR, 87TB_wyl_fS, 87TB_wyl_fT poprawnie informują o zadziałaniu przekaźników różnicowych wszystkich trzech faz, równoznacznym z pojawieniem się sygnału WYŁ (+220V=) na zaciskach 4, 7, 10 listwy przyłączeniowej CZAZ-GT,
- zarejestrowanie zmiany stanu logicznego sygnału 87TB_STYK_WYL_fR świadczy o zadziałaniu przekaźnika wyjściowego fazy R i spodziewanej obsłudze wybranego wejścia dwustanowego. W odniesieniu do analizy przebiegów z rys. 6 można powtórzyć pierwsze z powyższych spostrzeżeń, zaś pozostałe artykułować następująco:
- moduły pofazowych prądów różnicowych i hamujących kształtują się zgodnie z zależnościami (4) i (5) i powodują zadziałanie przekaźników różnicowych faz S, T,

- wysokie stany logiczne sygnałów 87TB_wyl_fS, 87TB_wyl_fT poprawnie informują o zadziałaniu przekaźników różnicowych faz S i T,
- niski stan logiczny sygnału 87TB_STYK_WYL_fR świadczy o spodziewanej obsłudze wybranego wejścia dwustanowego i nie powoduje przerwania generowania przez MTZ- Lab prądów.

4. WNIOSKI

Konfiguracja CZAZ-GT obejmowała:

- moduł DSP,
- moduł MWE/WY,
- moduł ML,
- moduł MR

i dotyczyła konfiguracji pofazowego, stabilizowanego zabezpieczenia różnicowego 87TB transformatora blokowego.

Poprawność konfiguracji zweryfikowano:

- dokonując porównania charakterystyki stabilizacji obliczeniowej i eksperymentalno-obliczeniowej,
- analizując wybrane sygnały prądowe oraz dwustanowe zarejestrowane podczas dedykowanych zakłóceń prądowych realizowanych z wykorzystaniem laboratoryjnej wersji systemu MTZ-Lab, przeznaczonego do testowania urządzeń automatyki elektroenergetycznej.

Porównując charakterystyki obliczeniową i eksperymentalno-obliczeniową, przedstawione na rys.4, można stwierdzić, że wzorzec opisany zależnością (14) jest z dużą wiernością odtwarzany przez zabezpieczenie cyfrowe 87TB zarówno w przypadku prądów składowej podstawowej, jak i w przypadku prądów skażonych wyższymi harmonicznymi; pewne zauważalne różnice w przebiegu ww. charakterystyk mogą wynikać z błędów kalibracji MTZ-Lab, przyrządów pomiarowych oraz niedoskonałości procesora DSP i cyfrowych metod estymacji wielkości kryterialnych. Analizując rejestrogramy dotyczące dedykowanych zakłóceń prądowych można zauważyć, że generowane przez MTZ-LAB prądy generatora i górnej strony transformatora o przyjętych parametrach (moduł, faza) skutkują spodziewanymi prądami różnicowymi i hamującymi wynikającymi z zależności (4) i (5) i powodują oczekiwane zadziałanie pofazowych przekaźników różnicowych, udokumentowane stanami logicznymi dedykowanych sygnałów dwustanowych 87TB_wyl_fR, 87TB_wyl_fS, 87TB_wyl_fT. Powyższe konkluzje wynikające z przeprowadzonych badań dają podstawy do stwierdzenia, że konfiguracja ww. modułów CZAZ-GT dla potrzeb zabezpieczenia 87TB z wykorzystaniem specjalistycznego programu CZAZ_GT została wykonana poprawnie.

LITERATURA

1. Wysocki Z.: Cyfrowy zespół automatyki zabezpieczeniowej dla bloku energetycznego dużej mocy. Materiały XIII Beskidzkiego Seminarium Elektryków BSE '99.
2. Przybylski M.: Program CZAZ_GT dla tworzenia pliku konfiguracyjnego. Gliwice 1997.
3. Pieta D.: Konfigurowalność Cyfrowych Urządzeń Elektroenergetycznej Automatyki Zabezpieczeniowej. Praca dyplomowa magisterska Pol. Śl., Wydział Elektryczny, Gliwice 2004.
4. Wysocki Z.: MTZ2 – A Computer Based Relay Test System ICDS'95 Texas USA 1995.
5. Przybylski M.: Program GEN-EXE dla sterowania komputerowym systemem MTZ-Lab. Gliwice 1990.
6. Mathematica: Program do realizacji obliczeń matematycznych i publikowania wyników Wolfram Research, Inc 2002.
7. Przybylski M.: Program REJ_ZAK dla graficznej prezentacji rejestrowanych sygnałów zakłóceń i dwustanowych. Gliwice 1999.
8. Wiszniewski A.: Algorytmy pomiarów cyfrowych w automatyce elektroenergetycznej. WNT, Warszawa 1990.
9. Dokumentacja techniczna CZAZ-GT ZEG-Energetyka sp z o.o. Tychy 1996.