

Robert Dąbrowski

Opracowanie i analiza komputerowego systemu
odtworzenia napięć i prądów

ROZPRAWA DOKTORSKA

Promotor:

Dr hab. inż. Andrzej Olencki, prof. UZ

Wydział Elektrotechniki, Informatyki i Telekomunikacji
Uniwersytet Zielonogórski
Zielona Góra 2006

SPIS TREŚCI

1	WSTĘP	2
1.1	Wprowadzenie	2
1.2	Systemy do sprawdzania mierników z kalibratorem kontrolnym i z miernikiem kontrolnym.....	4
1.3	Systemy odtwarzania napięć i prądów z kalibratorem kontrolnym i z miernikiem kontrolnym.....	10
1.4	Parametry metrologiczne systemów odtwarzania napięć i prądów	13
2	CEL PRACY, TEZA I ZAKRES PRACY	16
3	ANALIZA STRUKTUR I ALGORYTMÓW PRACY SYSTEMÓW ODTWARZANIA NAPIĘĆ I PRĄDÓW	19
3.1	System otwarty z kalibratorem kontrolnym.....	19
3.2	System zamknięty z addytywną korekcją błędów i z miernikiem kontrolnym	24
3.2.1	Opis struktury i algorytmu pracy	24
3.2.2	Model systemu i analiza właściwości statycznych	26
3.2.3	Model systemu i analiza właściwości dynamicznych.....	29
3.3	Wnioski	36
4	BADANIE WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNYCH SYSTEMU PRZY ODPOWIEDZI NA SKOK JEDNOSTKOWY Z ZASTOSOWANIEM SYMULACJI KOMPUTEROWEJ ...	37
4.1	Wprowadzenie i wybór metody badań	37
4.2	Opracowanie modelu systemu dla potrzeb badań symulacyjnych	38
4.3	Badanie symulacyjne odpowiedzi systemu otwartego na skok jednostkowy.....	43
4.4	Badanie możliwości poprawy właściwości dynamicznych systemu zamkniętego przez dobór charakterystyki regulatora całkującego.....	46
4.5	Analiza wyników badań symulacyjnych	72
4.6	Wnioski	73
5	BADANIA MOŻLIWOŚCI POPRAWY WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNYCH SYSTEMU PRZEZ DOBÓR WYMUSZENIA Z ZASTOSOWANIEM SYMULACJI KOMPUTEROWEJ	75
5.1	Opracowanie modeli wymuszeń	75
5.2	Badanie systemu przy <i>wymuszeniu z przeregulowaniem jedno schodkowym</i>	77
5.3	Badanie systemu przy <i>wymuszeniu z przeregulowaniem i wykładniczym opadaniem</i>	81
5.4	Ocena skuteczności metody	84
6	OPRACOWANIE I BADANIE WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNYCH MODELU FIZYCZNEGO SYSTEMU ODTWARZANIA NAPIĘĆ I PRĄDÓW	86
6.1	Opis systemu	86
6.2	Projekt aplikacji komputerowej sterującej systemem.....	87
6.2.1	Wybór środowiska programowego	87
6.2.2	Opis funkcji i struktury programu.....	88
6.3	Badanie właściwości dynamicznych.....	94
6.4	Wnioski	98
7	PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE.....	99
	LITERATURA	102

1 WSTĘP

1.1 Wprowadzenie

Wszystkie przyrządy pomiarowe napięcia i prądu stałego i przemiennego należy adiustować, wzorcować i sprawdzać w procesie produkcji a następnie okresowo wzorcować i sprawdzać w czasie eksploatacji, co wymaga stosowania wzorcowych narzędzi pomiarowych o odpowiednich parametrach metrologicznych. W czasie adiustacji, wzorcowania i sprawdzania, do zacisków badanego przyrządu pomiarowego, dostarczana jest wielkość mierzona przez badany przyrząd i wytwarzana przez kalibrator.

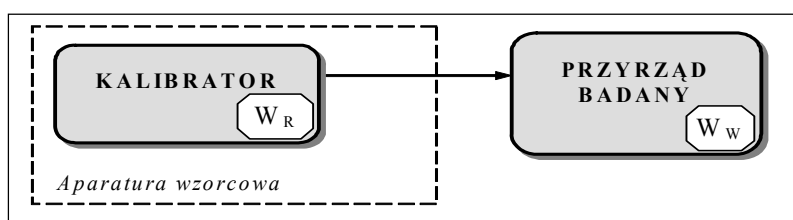
W większości przypadków stosowana jest metoda kalibratora kontrolnego [1], w której kalibrator, oprócz funkcji źródła, wypełnia dodatkowo funkcje wzorca. Na rys.1.1 przedstawiono układ do sprawdzania przyrządów z zastosowaniem metody kalibratora kontrolnego, złożony z przyrządu badanego i kalibratora. Celem sprawdzania przyrządu w układzie przedstawionym na rys.1.1 jest ustalenie [2, 3, 4], czy jest spełniony następujący warunek zgodności z wymaganiem:

$$|W_w - W_R| \leq \Delta W_{DOP} \quad (1.1)$$

gdzie: W_w - wartość wielkości mierzonej wskazana przez przyrząd badany (sprawdzany) – wskazanie przyrządu sprawdzanego,

W_R - wartość rzeczywista wielkości mierzonej określona na podstawie wskazań przyrządu kontrolnego (kalibratora) – wartość wielkości odtwarzana przez wzorec.

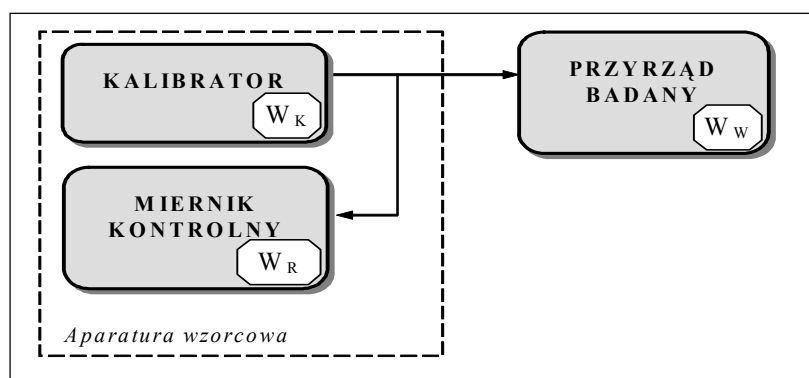
ΔW_{DOP} – dopuszczalny błąd przyrządu sprawdzanego.



Rys.1.1. Układ do sprawdzania przyrządów z zastosowaniem metody kalibratora kontrolnego

Sprawdzanie przyrządów pomiarowych z zastosowaniem metody kalibratora kontrolnego jest wydajne i wygodne do automatyzacji przy sprawdzaniu przyrządów pomiarowych wszystkich wielkości elektrycznych za wyjątkiem liczników energii elektrycznej.

Jednak w niektórych przypadkach, głównie przy niewystarczającej dokładności kalibratora, zestaw aparatury wzorcowej uzupełniany jest o miernik kontrolny odpowiedniej klasy dokładności. W takiej sytuacji stosowana jest metoda miernika kontrolnego, w której kalibrator pełni funkcję precyzyjnego zasilacza pomiarowego. Na rys.1.2 przedstawiono układ do sprawdzania przyrządów z zastosowaniem metody miernika kontrolnego, złożony z przyrządu badanego, kalibratora i miernika kontrolnego. Celem sprawdzania przyrządu w układzie przedstawionym na rys.1.2 jest również ustalenie spełnienia warunku zgodności z wymaganiem (1.1), gdzie W_R - wartość rzeczywista wielkości mierzonej określona na podstawie wskazań przyrządu kontrolnego (miernika) – wartość wielkości odtwarzana przez kalibrator pełniący funkcję zasilacza. Wskazanie kalibratora W_K (nastawa kalibratora) pełni funkcję pomocniczą do ustalania punktu sprawdzania przyrządu i nie występuje w równaniu (1.1) z uwagi na niewystarczającą dokładność wartości sygnałów wyjściowych kalibratora w stosunku do nastaw W_K .



Rys.1.2. Układ do sprawdzania przyrządów z zastosowaniem metody miernika kontrolnego

Sprawdzanie przyrządów pomiarowych z zastosowaniem metody miernika kontrolnego jest, w ogólnym przypadku, bardziej pracochłonne i bardziej trudne do automatyzacji przy sprawdzaniu przyrządów pomiarowych z uwagi na potrzebę obsługi ręcznej czy programowej zamiast jednego urządzenia – kalibratora, dwóch urządzeń – kalibratora i miernika. Wyjątek stanowi zastosowanie metody miernika kontrolnego (metody licznika kontrolnego) do sprawdzania liczników energii elektrycznej – przy sprawdzaniu użytkowych liczników energii metoda ta jest zalecana, a przy sprawdzaniu kontrolnych liczników energii metoda ta jest obligatoryjnie wymagana do stosowania [5]. Metoda licznika kontrolnego jest stosowana w układzie przedstawionym na rys.1.2, w którym jako miernik kontrolny jest stosowany licznik kontrolny.

W procesie sprawdzania przyrządu pomiarowego można wyróżnić następujące operacje:

- odtworzenie wartości wielkości mierzonej W_R na podstawie wskazań przyrządu kontrolnego – w większości przypadków czynności te decydują o pracochłonności całego procesu sprawdzania,
- sprawdzenie spełnienia warunku zgodności z wymaganiem (1.1).

Opisany proces jest charakterystyczny przy sprawdzaniu coraz bardziej rozpowszechnionych cyfrowych multimetrów (DMM) – przyrządów umożliwiających pomiar napięć i prądów stałych i przemiennych – badania publikowane w [6] wskazują, że już prawie 50% klientów urzędzeń kontrolno-pomiarowych deklaruje zakup przenośnego lub stacjonarnego DMM. W czasie sprawdzania multimetrów zachodzi potrzeba zadawania dużej liczby nastaw wartości napięć i prądów i porównywania wskazań badanych przyrządów z zadanymi nastawami. Proces ten jest długotrwały, pracochłonny i monotony, a zatem obarczony dużym ryzykiem popełnienia błędu przez operatora. W celu usprawnienia procesu adjustacji, wzorcowania i sprawdzania mierników oferowane są szeroko zakresowe programowane źródła napięć i prądów stałych i przemiennych zwane kalibratorami uniwersalnymi [7, 8, 9].

1.2 Systemy do sprawdzania mierników z kalibratorem kontrolnym i z miernikiem kontrolnym

Termin „kalibrator napięć i prądów” ugruntował się w kraju od kilkunastu lat [7, 10, 11, 12]. Kalibratory napięcia (prądu) są to elektroniczne sterowane źródła napięcia (prądu) stałego lub przemiennego, umożliwiające otrzymywanie żądanej wartości napięcia (prądu) z określoną dokładnością bez konieczności mierzenia i ręcznego korygowania nastawień. Sterowanie kalibratorów może odbywać się przez operatora (sterowanie ręczne) lub z zastosowaniem komputera. Przy sterowaniu ręcznym, do dyspozycji operatora, kalibratory wyposażane są w dodatkowe funkcje programowe, usprawniające obsługę kalibratora [13, 14]. Kalibratory wyposażane są również w interfejsy [15, 16] umożliwiające budowę systemów pomiarowych do zautomatyzowanego testowania (sprawdzania) mierników [17, 18, 19, 20]. Niezależnie od sposobu sterowania i stopnia automatyzacji pomiarów, kalibratory stosowane są jako wzorce i w układzie sprawdzeń zatwierdzonym w [21, 22] służą do odtwarzania napięć i prądów jako wzorce kontrolne lub użytkowe stanowiąc podstawę piramidy hierarchicznej wzorców [23, 24, 25].

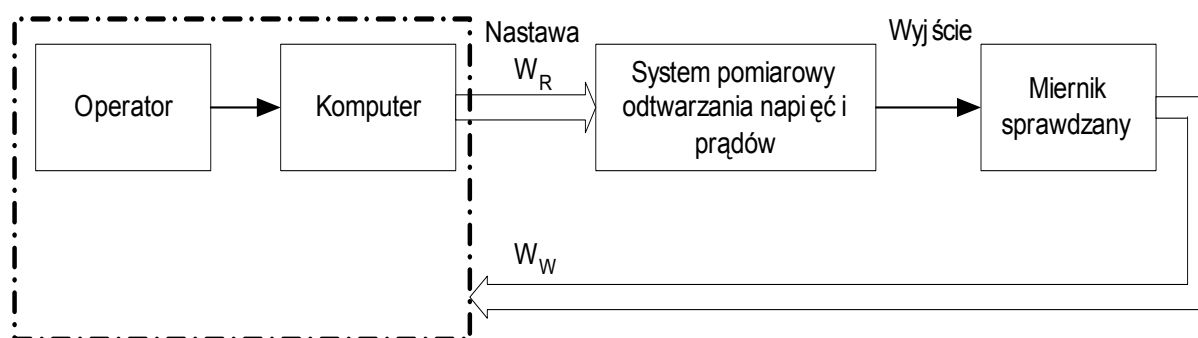
Na rys.1.3 przedstawiono strukturę systemu do zautomatyzowanego sprawdzania mierników z zastosowaniem metody kalibratora kontrolnego. System składa się z operatora, komputera, systemu pomiarowego odtwarzania napięć i prądów oraz sprawdzanego miernika. Podział zadań między operatorem i komputerem jest zależny od stopnia automatyzacji systemu. W ogólnym przypadku operator i komputer:

- zadają nastawy W_R do systemu odtwarzania napięć i prądów,
- odczytują wskazania W_W sprawdzanego miernika,
- sprawdzają spełnienie warunku zgodności z wymaganiem (1.1).

System pomiarowy odtwarzania napięć i prądów pełni funkcję kalibratora kontrolnego i przetwarza sterownia podawane przez operatora i/lub komputer na napięcia i prądy o wymaganych parametrach metrologicznych – sygnały wyjściowe systemu są podawane na sprawdzany miernik. Wskazania W_W miernika są odczytywane przez operatora lub przez komputer. Odczyt wskazań sprawdzanego miernika przez komputer znacznie automatyzuje pracę systemu i jest możliwy przez:

- wykorzystanie wyjścia cyfrowego miernika i interfejsu między miernikiem i komputerem do transmisji wyników pomiarów – możliwości te występują przy sprawdzaniu mierników z wyjściem cyfrowym,
- budowę systemów optycznych rozpoznawania obrazów do identyfikacji wskazań mierników – rozwiązania te są preferowane do zastosowań głównie przy sprawdzaniu mierników analogowych.

Na podstawie odczytu wskazań miernika jest sprawdzany warunek (1.1) i jest podejmowana przez operatora decyzja o przydatności miernika.



Rys.1.3. System do sprawdzania mierników z zastosowaniem metody kalibratora kontrolnego

Automatyzacja sprawdzania mierników w systemach z kalibratorem kontrolnym odbywa się również przez stosowanie specjalistycznego oprogramowania do sterowania pracą kalibratora i wspomaganie procedur pomiarowych – przykładem może być opracowany przez autora program komputerowy *Calpro 101* [26] przeznaczony do sterowania krajowym kalibratorem uniwersalnym napięć i prądów stałych i przemiennych typu *C101* [27, 28]. Program *Calpro 101* umożliwia:

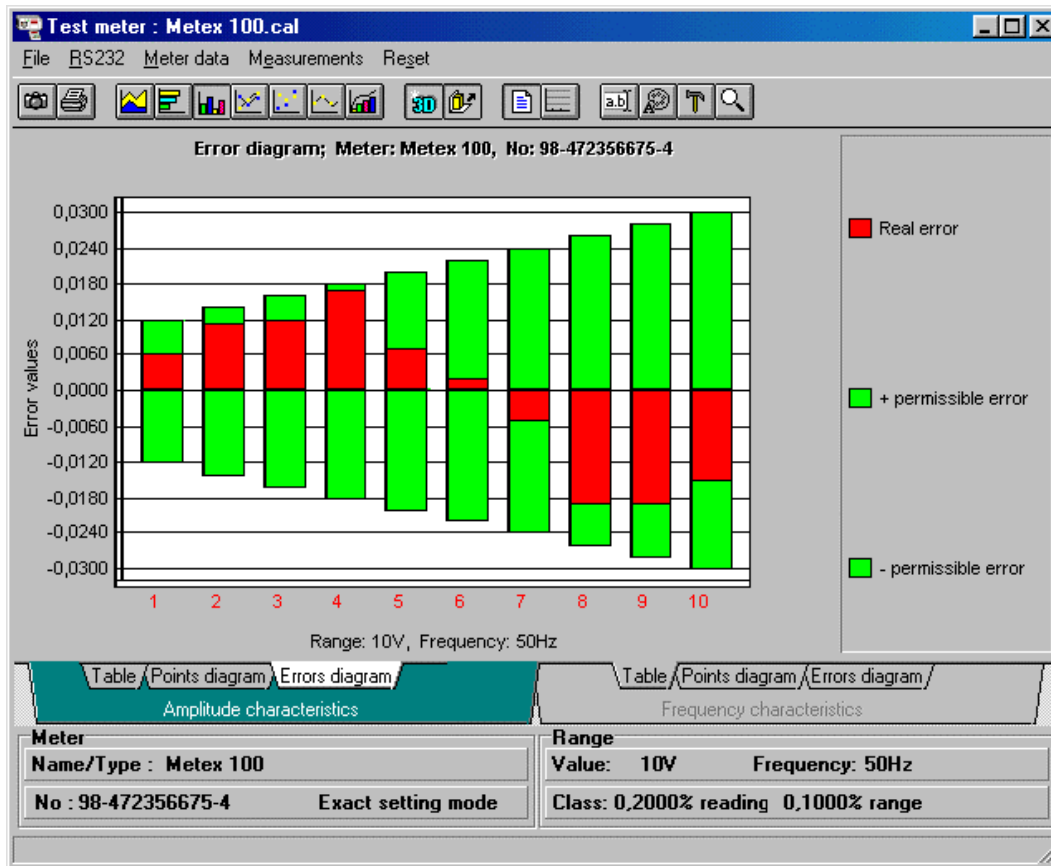
- sterowanie funkcjami kalibratora *C101* za pomocą komputera – komputerowa symulacja funkcji pulpitu kalibratora na ekranie monitora za pomocą klawiatury i/lub myszki,
- wspomaganie badania przyrządów analogowych i cyfrowych – procedury pomiarowe, redakcja tablic wyników badań (zapiski) z automatycznym obliczaniem błędów badanych przyrządów, tworzenie bazy danych,
- graficzną wizualizację wyników pomiarów w postaci tablic i różnorodnych wykresów.

Na rys.1.4 i 1.5 przedstawiono widoki przykładowych okien opracowanego programu, przeznaczonych do redakcji tablic pomiarowych ze zautomatyzowanym obliczaniem dopuszczalnego błędu sprawdzanego miernika i niepewności pomiaru (*błędu kalibratora*) oraz do graficznej prezentacji wyników pomiarów.

The screenshot shows a software window titled "Test meter : Metex 100.cal". It features a menu bar with "File", "RS232", "Meter data", "Measurements", and "Reset". Below the menu is a table with columns for "Range", "Calibrator frequency setting", "Meter class" (subdivided into "% reading" and "% range"), "Meter readout", "Calibrator amplitude setting", "Meter error" (subdivided into "real" and "permissible"), "Calibrator error", "unit", and "ON/OFF" buttons. The table contains 10 rows of data. At the bottom, there are two control panels: "Amplitude characteristics" and "Frequency characteristics", each with sub-menus for "Table", "Points diagram", and "Errors diagram". The "Amplitude characteristics" panel shows "Meter Name/Type : Metex 100" and "No : 98-472356675-4 Exact setting mode". The "Frequency characteristics" panel shows "Range Value: 10V Frequency: 50Hz" and "Class: 0,2000% reading 0,1000% range".

Range	Calibrator frequency setting	Meter class		Meter readout	Calibrator amplitude setting	Meter error		Calibrator error	unit	ON	OFF
		% reading	% range			real	permissible				
10V	50Hz	0,2000	0,1000	1,006000	1,000000	0,006000	0,012012	0,000600	V	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				2,011000	2,000000	0,011000	0,014022	0,001100	V	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				3,01200	3,00000	0,01200	0,01602	0,00205	V	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				4,01700	4,00000	0,01700	0,01803	0,00255	V	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				5,00700	5,00000	0,00700	0,02001	0,00305	V	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				6,00200	6,00000	0,00200	0,02200	0,00355	V	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				6,99500	7,00000	-0,00500	0,02399	0,00405	V	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				7,98100	8,00000	-0,01900	0,02596	0,00455	V	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				8,98100	9,00000	-0,01900	0,02796	0,00505	V	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				9,98500	10,00000	-0,01500	0,02997	0,00555	V	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Rys.1.4. Widok okna redakcji tablicy pomiarowej programu Calpro 101 [26]

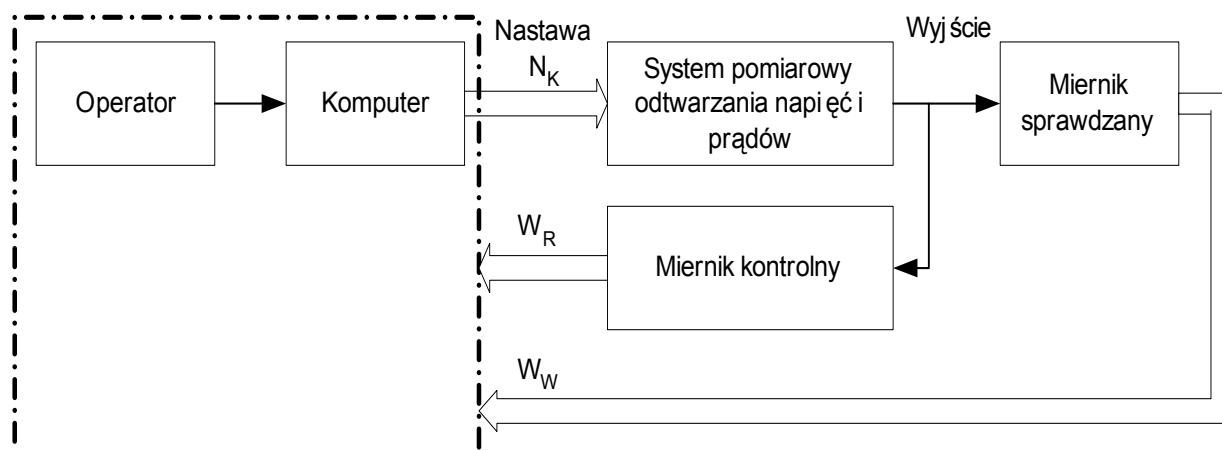


Rys.1.5. Widok okna prezentacji wyników pomiarów programu Calpro 101 [26]

Na rys.1.6 przedstawiono strukturę systemu do zautomatyzowanego sprawdzania mierników z zastosowaniem metody miernika kontrolnego. System składa się z operatora, komputera, systemu pomiarowego odtwarzania napięć i prądów, miernika kontrolnego oraz sprawdzanego miernika. Podział zadań między operatorem i komputerem również jest zależny od stopnia automatyzacji systemu. W ogólnym przypadku operator i komputer:

- zadają nastawy N_K do systemu odtwarzania napięć i prądów,
- odczytują wskazania W_W sprawdzanego miernika,
- odczytują wskazania W_R miernika kontrolnego – jest to dodatkowa operacja w stosunku do pracy w systemie z kalibratorem kontrolnym (rys.1.3),
- sprawdzają spełnienie warunku zgodności z wymaganiem (1.1).

System pomiarowy odtwarzania napięć i prądów pełni funkcję zasilacza pomiarowego i przetwarza sterownia podawane przez operatora i/lub komputer na napięcia i prądy o wymaganych parametrach metrologicznych ale z niekoniecznie wysoką klasą dokładności – sygnały wyjściowe systemu są podawane na sprawdzany miernik. Wskazania W_W miernika są odczytywane przez operatora lub przez komputer.

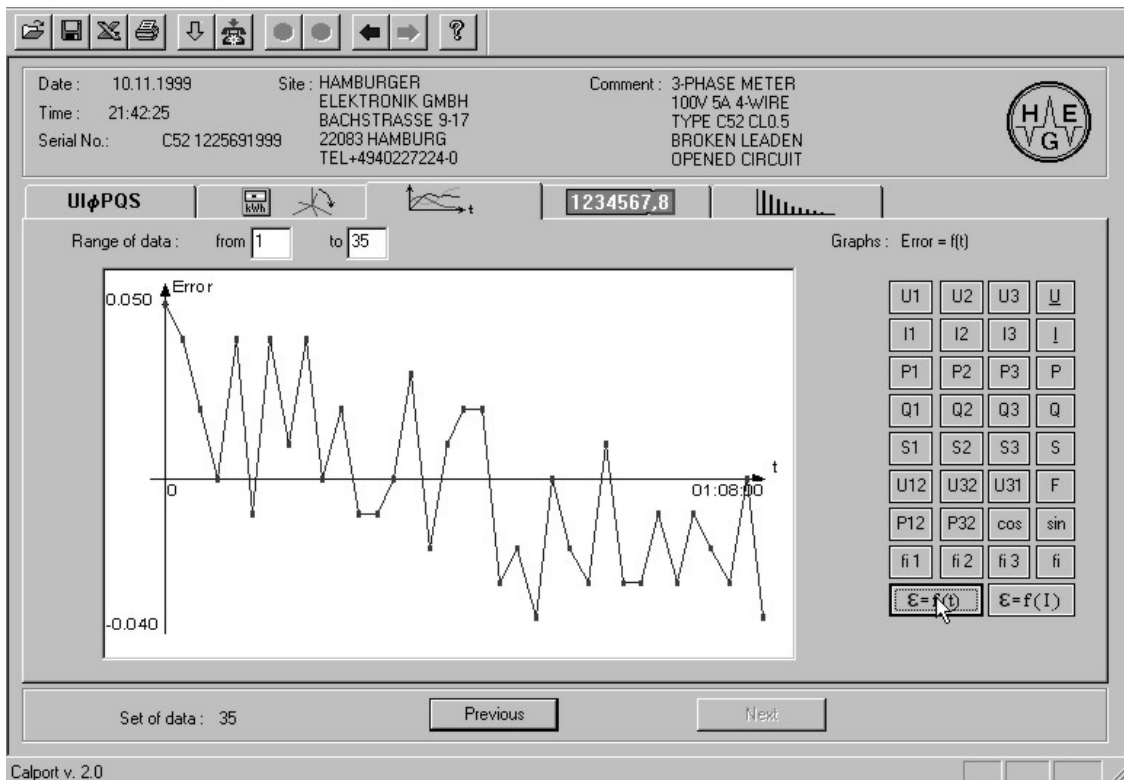


Rys.1.6. System do sprawdzania mierników z zastosowaniem metody miernika kontrolnego

Automatyzacja sprawdzania mierników w systemach z miernikiem kontrolnym odbywa się przez stosowanie komputerowego odczytu wskazań W_W sprawdzanego miernika i wskazań W_R miernika kontrolnego oraz przez stosowanie specjalistycznego oprogramowania do sterowania pracą kalibratora i wspomagania procedur pomiarowych – przykładem może być opisana przez autora koncepcja systemu do sprawdzania liczników energii [29] lub opracowany program komputerowy *Calsoft 100* [30] przeznaczony do automatyzacji sprawdzania liczników energii z zastosowaniem analizatora parametrów sieci i testera liczników typu Calport 100 [31] jako licznika kontrolnego. Program *Calsoft 100* umożliwia [32]:

- odczyt bieżących wyników pomiarów z analizatora Calport 100 i ich wizualizację na ekranie komputera. Odczyty mogą być wykonywane automatycznie w odcinkach czasu zadanych przez użytkownika,
- odczyt wcześniej zapamiętanych w pamięci analizatora danych (do 40-tu kompletów danych) i ich wizualizacja na ekranie komputera,
- wizualizacja trójfazowego wskaźnika wektorowego,
- export danych do programu Microsoft Excel celem ich dalszej obróbki wg wymagań użytkownika,
- drukowanie danych i wykresów na drukarce,
- zapis i odczyt danych na plik w celu archiwizacji.

Na rys.1.7 przedstawiono widok przykładowego okna z wykresem błędu sprawdzanego licznika energii w funkcji czasu i z możliwością wizualizacji wykresów czasowych parametrów zasilania licznika: napięć, prądów, mocy, kątów i częstotliwości.



Rys.1.7. Widok okna z wykresem błędu sprawdzanego licznika w funkcji czasu programu Calsoft 100 [30]

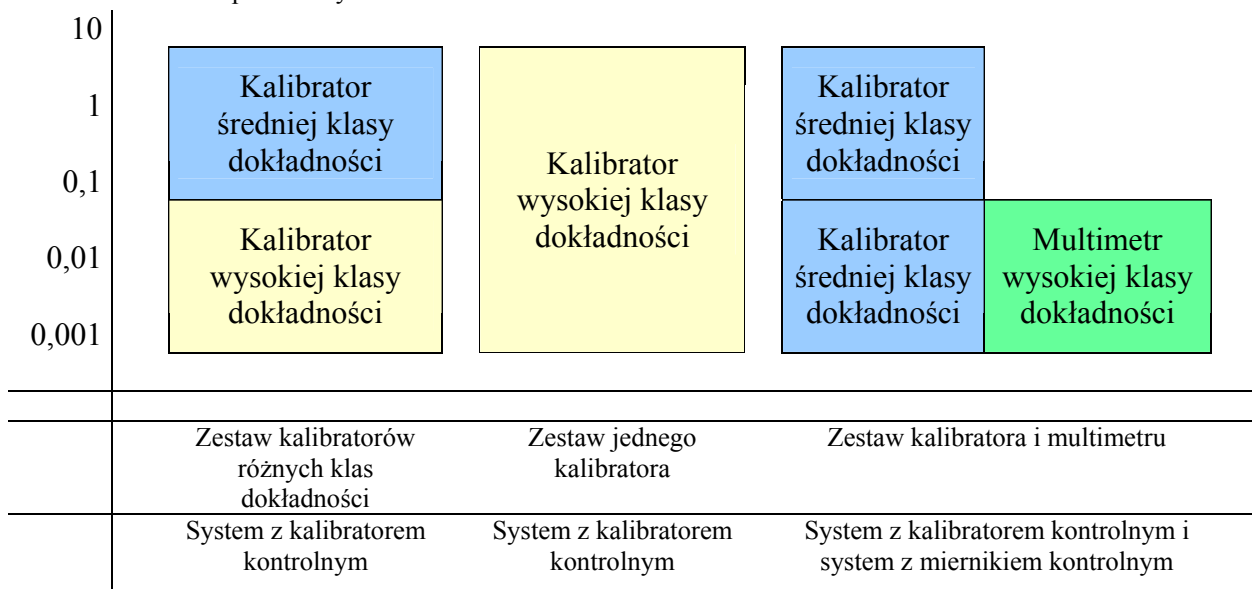
1.3 Systemy odtwarzania napięć i prądów z kalibratorem kontrolnym i z miernikiem kontrolnym

Przy sprawdzaniu cyfrowych multimetrów są stosowane systemy do sprawdzania mierników z zastosowaniem metody kalibratora kontrolnego, przedstawione na rys.1.3, z uwagi na większą wydajność i łatwiejszą automatyzację procesu sprawdzania – brak konieczności uwzględniania wskazań miernika kontrolnego, co jest wymagane w systemie przedstawionym na rys.1.6. System pomiarowy odtwarzania napięć i prądów przedstawiony na rys.1.3, w ogólnym przypadku, jest zestawem wzorcowych narzędzi pomiarowych, których dokładność powinna być przynajmniej trzykrotnie wyższa niż klasa dokładności sprawdzanych mierników [33, 34]. W laboratoriach pomiarowych są sprawdzane mierniki napięć i prądów stałych i przemiennych w szerokim zakresie wartości napięć do tysiąca woltów i prądów do kilkudziesięciu amperów i w szerokim zakresie klas dokładności od 0,001% (laboratoryjne multimetry cyfrowe) do 1...5% (mierniki analogowe). O koszcie systemu do sprawdzania mierników przedstawionego na rys.1.3 decyduje koszt systemu pomiarowego odtwarzania napięć i prądów, dlatego duże znaczenie ekonomiczne ma optymalizacja wyboru zestawu wzorcowych narzędzi pomiarowych w celu pokrycia potrzeb sprawdzania wymaganego asortymentu mierników.

W [35, 36] i na rys. 1.8 przedstawiono trzy zestawy wzorcowych narzędzi pomiarowych do sprawdzania multimetrów różnych klas dokładności:

- kosztowny zestaw kalibratorów różnych klas dokładności złożony z kalibratorów średniej i wysokiej klasy dokładności, który umożliwia racjonalny dobór klasy dokładności kalibratora do klasy sprawdzanego miernika i który jest stosowany w systemach z kalibratorem kontrolnym przedstawionym na rys.1.9,
- „zestaw” jednego kalibratora wysokiej klasy dokładności stosowanego w systemach z kalibratorem kontrolnym, który jest tańszy od poprzedniego, ale przy sprawdzaniu mierników niskich klas dokładności może mieć niewystarczającą obciążalność wyjścia,
- zestaw kalibratora średniej klasy dokładności i multimetru wysokiej klasy dokładności, który przy sprawdzaniu mierników niskich i średnich klas dokładności pracuje w systemie z kalibratorem kontrolnym (rys.1.9), a przy sprawdzaniu mierników wysokiej klasy dokładności pracuje w systemie z miernikiem kontrolnym (rys.1.10). Zestaw ten jest ekonomiczny kosztowo z uwagi na fakt, że cena multimetru jest kilkukrotnie niższa niż cena kalibratora uniwersalnego równorzędnej klasy dokładności [37, 38, 39, 40].

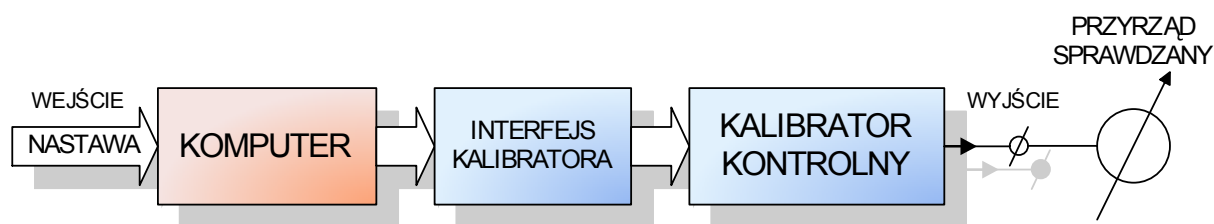
Klasa dokładności sprawdzanych mierników



Rys.1.8. Zestawy narzędzi pomiarowych do sprawdzania multimetrów różnych klas

Na rys.1.9 przedstawiono system pomiarowy odtwarzania napięć i prądów z kalibratorem kontrolnym, złożony z komputera, interfejsu kalibratora i kalibratora kontrolnego. System jest zbudowany w oparciu o strukturę otwartą bezpośredniego przetwarzania [41] i charakteryzuje się następującymi właściwościami:

- brakiem strukturalnej i algorytmicznej nadmiarowości,
- dokładnością równą dokładności kalibratora kontrolnego [42],
- właściwościami dynamicznymi opisanymi czasem odpowiedzi kalibratora [7],
- brakiem problemów wzbudzeń z uwagi na brak sprzężeń zwrotnych.

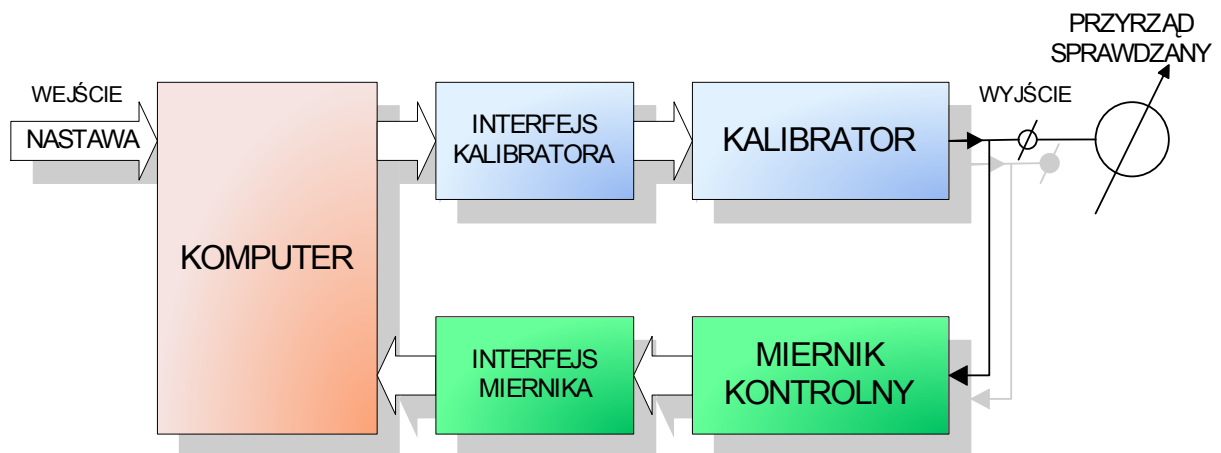


Rys.1.9. System z kalibratorem kontrolnym

Na rys.1.10 przedstawiono system pomiarowy odtwarzania napięć i prądów z miernikiem kontrolnym, złożony z komputera, interfejsu kalibratora, kalibratora, interfejsu miernika i miernika kontrolnego. System jest zbudowany w oparciu o strukturę zamkniętą z

miernikiem kontrolnym w torze sprzężenia zwrotnego [42] charakteryzuje się następującymi właściwościami:

- strukturalną nadmiarowością – w strukturze trzeba dodatkowo zastosować interfejs miernika i miernik kontrolny,
- algorytmiczną nadmiarowością – w algorytmie pracy systemu trzeba dodatkowo obsłużyć miernik kontrolny z interfejsem miernika oraz w komputerze dodatkowo wykonywać:
 - funkcję sumatora sygnału nastawy z sygnałem sprzężenia zwrotnego,
 - funkcję regulatora,
 - funkcję modulatora sygnału podawanego na kalibrator,
- dokładnością równą dokładności miernika kontrolnego w przypadku stosowania odpowiednich algorytmów pracy systemu,
- właściwościami dynamicznymi zależnymi od czasu odpowiedzi kalibratora, czasu pomiaru miernika kontrolnego i algorytmu pracy systemu – generalnie właściwości dynamiczne systemu z miernikiem kontrolnym są gorsze niż właściwości dynamiczne systemu z kalibratorem kontrolnym,
- możliwością wzbudzeń charakterystyczną dla systemów zamkniętych.



Rys.1.10. System z miernikiem kontrolnym

1.4 Parametry metrologiczne systemów odtwarzania napięć i prądów

Aby system przedstawiony na rys.1.10 mógł być stosowany jako system pomiarowy odtwarzania napięć i prądów w systemie przedstawionym na rys.1.3, powinien charakteryzować się parametrami metrologicznymi takimi, jak parametry kalibratora kontrolnego. W [43] wyspecyfikowano następujące trzy grupy parametrów metrologicznych kalibratorów uniwersalnych:

- „*parametry wejścia-wyjścia*” opisujące zakres i rozdzielczość nastawianej wielkości oraz dodatkowe właściwości odtwarzanej wielkości, jak zakres i rozdzielczość nastaw częstotliwości, kształt przebiegów czy obciążalność wyjścia,
- „*parametry dokładnościowe*” opisujące dopuszczalne różnice między wartością wielkości wyjściowej i nastawionej,
- „*parametry dynamiczne*” opisujące proces przejściowy na wyjściu kalibratora spowodowany określoną zmianą wymuszenia, w szczególności zmianą nastawy.

Niezależnie od sposobu użytkowania kalibratora, jako kalibratora kontrolnego w systemie z kalibratorem kontrolnym (rys.1.9) lub jako zasilacza pomiarowego w systemie z miernikiem kontrolnym (rys.1.10), jednakowe wymagania są na następujące parametry kalibratora:

- wszystkie *parametry wejścia-wyjścia*,
- *parametry dokładnościowe* takie jak:
 - PARD określany jako wartość skuteczna składowej zmiennej napięć i prądów stałych,
 - szum wysokoczęstotliwościowy,
 - całkowity współczynnik zniekształceń THD napięć i prądów przemiennych,
- wszystkie *parametry dynamiczne*.

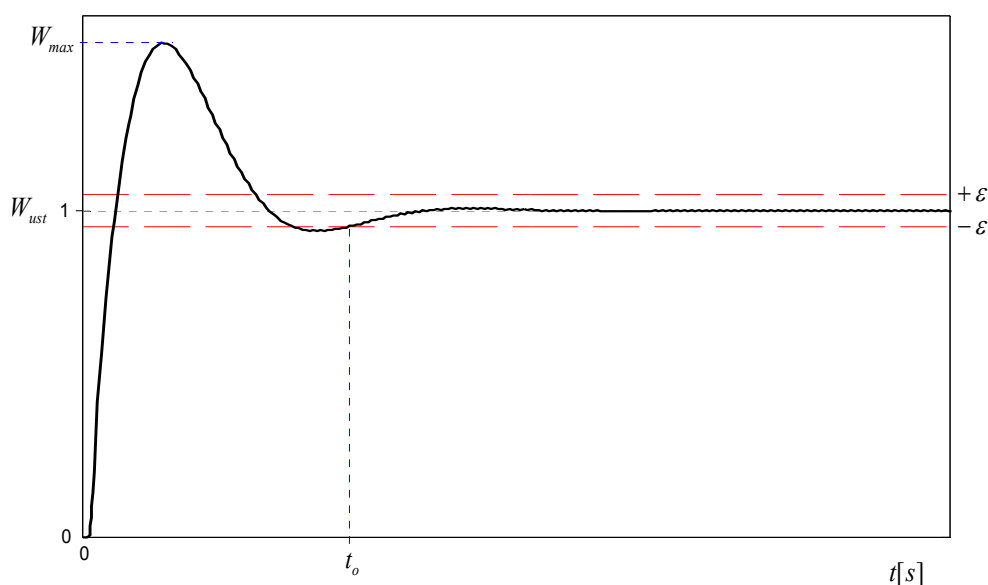
W przypadku stosowania kalibratora jako zasilacza pomiarowego, zdecydowanie niższe wymagania są na następujące *parametry dokładnościowe*:

- błąd podstawowy,
- dryfty krótkoczasowe,
- błędy dodatkowe spowodowane zmianą temperatury otoczenia, napięcia zasilania czy obciążenia.

Aby bardziej ekonomiczny system z miernikiem kontrolnym (rys.1.10) mógł być zastosowany zamiast systemu z kalibratorem kontrolnym (rys.1.9) w systemie do sprawdzania mierników (rys.1.3) jako równorzędny, powinien charakteryzować się równorzędnymi

właściwościami statycznymi (jednakowe błędy i dryfty) oraz równorzędnymi właściwościami dynamicznymi (jednakowe czasy odpowiedzi i przeregulowania). Parametry statyczne decydują o możliwości dopuszczenia systemu do sprawdzania przyrządów pomiarowych, natomiast parametry dynamiczne decydują o wydajności procesu sprawdzania przyrządów.

Parametry dynamiczne opisują proces przejściowy na wyjściu systemu pomiarowego odtwarzania napięć i prądów spowodowany określoną zmianą wymuszenia. Rys.1.11 przedstawia przykładowy proces przejściowy odpowiedzi na wymuszenie w postaci skoku jednostkowego – np. zmiany nastawy.



Rys.1.11. Parametry dynamiczne procesu przejściowego

Symbolem W_{ust} oznaczono na rysunku wartość ustaloną wskazania W_R , a symbolem W_{max} największą (lub najmniejszą) wartość wskazania W_R w czasie trwania procesu przejściowego. Najbardziej rozpowszechnioną charakterystyką dynamiczną kalibratora jest czas odpowiedzi t_o (1.2) definiowany, jako przedział czasu od momentu skokowej zmiany wymuszenia do momentu, od którego wartość wielkości wyjściowej różni się od wartości ustalonej nie więcej niż granice dopuszczalnego błędu podstawowego (lub roboczego) ε [44].

$$t_o = \max\{t : t \in \langle 0, +\infty \rangle \wedge |W - W_{ust}| \geq \varepsilon\} \quad (1.2)$$

Zmianą wymuszenia, dla której definiowany jest czas odpowiedzi kalibratora jest zmiana nastawy, rzadziej zmiana zakresu czy obciążenia. W celu zapewnienia jednoznacznej interpretacji czasu odpowiedzi, należy określać przedział zmiany wymuszenia - zaleca się zmieniać wymuszenie w granicach znamionowego zakresu użytkowania. Dla zmiany nastawy zakres ten powinien wynosić 10%-100%-10% wartości umownej zakresu. Proces przejściowy na wyjściu kalibratora opisywany jest także przy pomocy tzw. przeregulowania p (1.3) – jako procentowej miary różnicy między największą (lub najmniejszą) wartością wielkości wyjściowej w czasie procesu przejściowego a ustaloną wartością wielkości wyjściowej [45].

$$p = \left(\frac{W_{max}}{W_{ust}} - 1 \right) * 100\% \quad (1.3)$$

Parametr określający przeregulowanie jest jednym z wyznaczników determinujących stabilność układu. W przypadku, gdy wartość parametru przeregulowania wg wzoru (1.3) osiągnie wartość większą od 0% oznacza to, że w układzie wystąpiły oscylacje, natomiast wartość równa 0% oznacza, że w układzie nie występują oscylacje. Im parametr ten jest bliższy zeru tym bardziej korzystny jest układ. Jako maksymalną dopuszczalną wartość parametru przeregulowania przyjęto 50%. Przy sprawdzaniu mierników często zachodzi potrzeba tzw. dojścia do działki od odpowiedniej strony, więc przeregulowanie powinno być wtedy równe 0%.

2 CEL PRACY, TEZA I ZAKRES PRACY

Znaczne rozpowszechnienie cyfrowych multimetrów obserwowane w ostatnich latach o coraz większej liczbie zakresów i wzrastającej dokładności, wymaga stosowania ekonomicznych cenowo i wydajnych systemów testujących. Zwiększanie wydajności systemów do sprawdzania multimetrów (rys.1.3 i 1.6) przebiega w następujących kierunkach:

- zastosowanie programowanych cyfrowo nowoczesnych źródeł sygnałów wzorcowych w postaci uniwersalnych kalibratorów napięć i prądów stałych i przemiennych o krótkich czasach odpowiedzi [46, 47, 48, 49],
- zastosowanie komputerów wyposażonych w specjalizowane aplikacje programowe i budowa komputerowych systemów testujących [50, 51, 52, 53],
- automatyzacja odczytów wskazań sprawdzanych mierników z zastosowaniem magistrali interfejsowej lub systemu optycznego rozpoznawania obrazów [54, 55, 56, 57].

Dlatego większość prac poświęconych zwiększaniu wydajności systemów do sprawdzania multimetrów jest skierowana na:

- poprawę właściwości dynamicznych kalibratorów, w szczególności skrócenie czasu odpowiedzi [7, 58, 59, 60, 61],
- wyposażenie kalibratorów w funkcje programowe usprawniające ich stosowanie [62, 63, 64, 65],
- opracowanie nowych algorytmów i metod testowania [66, 67].

Zastosowanie kalibratorów o krótkich czasach odpowiedzi i sterowników komputerowych wyposażonych w specjalizowane aplikacje programowe w systemach do sprawdzania multimetrów z zastosowaniem metody kalibratora kontrolnego (rys.1.3), skróciło czas sprawdzania multimetru do tego stopnia, że w wielu przypadkach, ograniczeniem dalszego zwiększania wydajności procesu sprawdzania są właściwości dynamiczne sprawdzanego multimetru. Jednocześnie, głównie ze względu na wysoką cenę kalibratorów wysokich klas dokładności, do sprawdzania multimetrów są stosowane zdecydowanie mniej wydajne systemy z zastosowaniem miernika kontrolnego (rys.1.6). Znane aplikacje programowe dostarczane z kalibratorami, są głównie przydatne przy stosowaniu metody kalibratora kontrolnego i praktycznie nie uwzględniają potrzeby systemów z miernikiem kontrolnym.

Istota pomysłu polega na tym, aby w wydajnym systemie do sprawdzania mierników z zastosowaniem metody kalibratora kontrolnego (rys.1.3), zamiast kalibratora kontrolnego zastosować ekonomiczny system odtwarzania napięć i prądów z miernikiem kontrolnym (rys.1.10) o właściwościach statycznych i dynamicznych zbliżonych do właściwości kalibratora kontrolnego. Z tego powodu zachodzi potrzeba opracowania struktury i algorytmu pracy systemu odtwarzania napięć i prądów z miernikiem kontrolnym.

Wprowadze systemy z miernikiem kontrolnym są stosowane dość często, jednak operacje w nich są wykonywane ręcznie a algorytmy pracy systemów nie są publikowane. Procedury sprawdzania mierników w istotnym stopniu decydują o kosztach produkcji i jakości mierników – z tego powodu algorytmy sprawdzania są objęte tajemnicą producenta lub laboratorium pomiarowego. Laboratorium pomiarowe wykonujące wzorcowanie lub sprawdzanie mierników, w wystawianych świadectwach wzorcowania lub sprawdzania, zgodnie z aktualnymi wymaganiami [69], podaje estymatę, błąd miernika i niepewność pomiaru w wyspecyfikowanych punktach pomiarowych oraz zestaw aparatury pomiarowej stosowanej podczas badań – natomiast nie podaje algorytmu pracy systemu.

Aby system odtwarzania napięć i prądów z miernikiem kontrolnym pełnił funkcje kalibratora kontrolnego, powinien być systemem zamkniętym (rys.1.10). Ponieważ funkcje sumatora, regulatora i modulatora mogą być wykonywane w komputerze, korzystne jest zastosowanie addytywnej korekcji błędów, z uwagi na cyfrową postać sygnałów i w związku z tym łatwość sumowania poprawki z sygnałem nastawy [70]. W celu spełnienia wymagania zmniejszenia wpływu błędu kalibratora na błąd systemu, polecane jest stosowanie regulatora całkującego. Systemy z astatyczną charakterystyką regulacji zazwyczaj mają duże czasy odpowiedzi, jednak intuicyjnie wyczuwa się, że przez odpowiedni dobór parametrów regulatora i dobór kształtu wymuszenia (zmiany nastawy), będzie możliwe poprawienie właściwości dynamicznych omawianego systemu z miernikiem kontrolnym. W związku z powyższym nasuwa się pytanie, jak dobrać parametry regulatora w zależności od parametrów kalibratora i miernika kontrolnego, jak modyfikować kształt zmiany nastawy w stosunku do zmiany skokowej, aby uzyskać możliwie krótki czas odpowiedzi systemu bez istotnego pogorszenia dokładności odtwarzania napięć i prądów w stosunku do dokładności miernika kontrolnego.

Udzielenie odpowiedzi na powyższe pytanie na drodze analityczno-eksperymentalnej powinno umożliwić udowodnienie następującej tezy:

*KOMPUTEROWY SYSTEM Z MIERNIKIEM KONTROLNYM,
PRZEZNACZONY DO ODTWARZANIA NAPIĘĆ I PRĄDÓW,
Z ZASTOSOWANIEM ADDYTYWNEJ KOREKCJI BŁĘDÓW
I ASTATYCZNEJ CHARAKTERYSTYKI REGULACJI,
MOŻE MIEĆ RÓWNORZĘDNE PARAMETRY METROLOGICZNE
JAK SYSTEM Z KALIBRATOREM KONTROLNYM.*

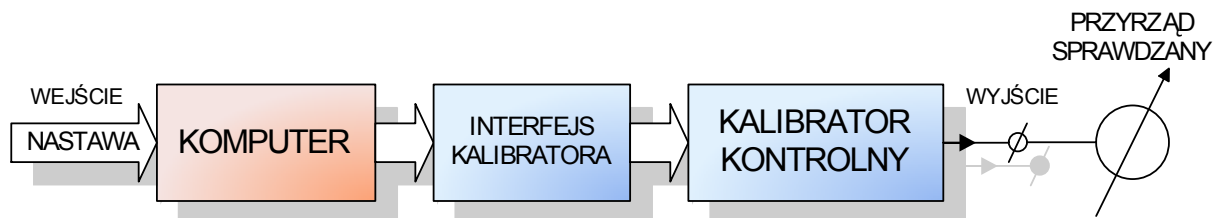
Cel pracy powinien być osiągnięty przez:

- opracowanie struktury i algorytmu pracy systemu odtwarzania napięć i prądów z kalibratorem kontrolnym i z miernikiem kontrolnym,
- opracowanie modelu oraz analizę, z zastosowaniem metod analitycznych, właściwości statycznych systemów z kalibratorem kontrolnym i systemów z miernikiem kontrolnym,
- opracowanie modelu oraz analizę, z zastosowaniem metod symulacyjnych, właściwości dynamicznych systemów z kalibratorem kontrolnym i systemów z miernikiem kontrolnym,
- opracowanie modeli wymuszeń i analizę, z zastosowaniem metod symulacyjnych, możliwości poprawy właściwości dynamicznych systemu przez dobór kształtu wymuszenia,
- opracowanie, budowę i badania właściwości dynamicznych fizycznego modelu systemu z miernikiem kontrolnym.

3 ANALIZA STRUKTUR I ALGORYTMÓW PRACY SYSTEMÓW ODTWARZANIA NAPIĘĆ I PRĄDÓW

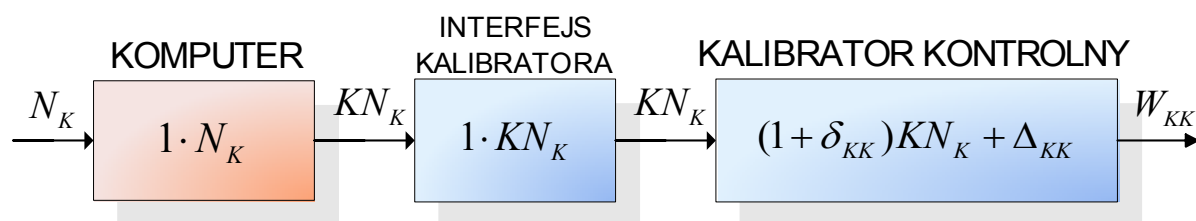
3.1 System otwarty z kalibratorem kontrolnym

System pomiarowy odtwarzania napięć i prądów o strukturze otwartej z kalibratorem kontrolnym przedstawiony na rys.3.1 składa się z: komputera, interfejsu komunikacyjnego kalibratora i kalibratora kontrolnego. Komputer pełni funkcję sterownika systemu, interfejs kalibratora zapewnia medium komunikacyjne komputera z kalibratorem, natomiast kalibrator kontrolny pełni funkcje źródła napięć i prądów oraz wzorca systemu. Na wejście systemu podawana jest nastawa kalibratora, na wyjściu generowana jest wielkość fizyczna odpowiadająca nastawie.



Rys.3.1. System pomiarowy z kalibratorem kontrolnym

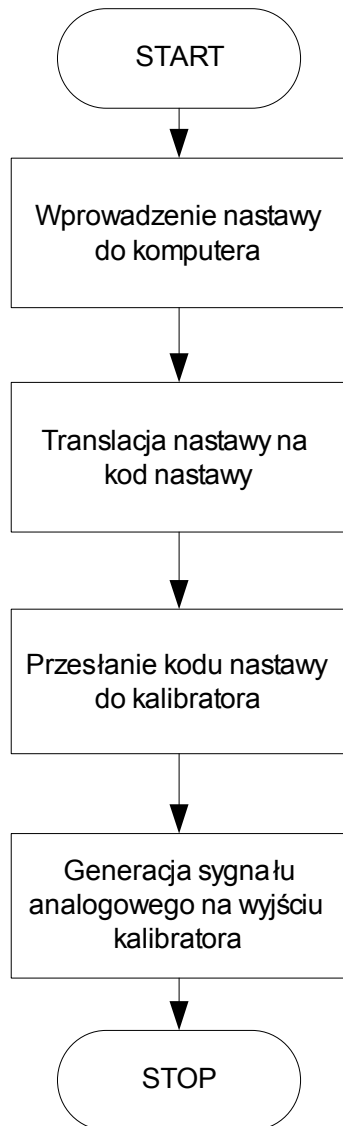
Na rys.3.2 przedstawiono model matematyczny systemu pomiarowego zbudowanego według struktury otwartej. W modelu tym komputer oraz interfejs kalibratora przedstawiono w postaci przetworników kod-kod, natomiast kalibrator kontrolny jako przetwornik kod-napięcie/prąd.



Rys.3.2. System otwarty –model matematyczny

W przedstawionej strukturze dla potrzeb analizy właściwości statycznych przyjęto jednostkowe charakterystyki przetwarzania bloków komputera i interfejsu. W charakterystyce przetwarzania kalibratora uwzględniono multiplikatywną δ_{KK} i addytywną Δ_{KK} składowe błędy.

Algorytm pracy systemu z kalibratorem kontrolnym przedstawiono na rys.3.3. Operator lub program kontrolujący proces pomiarowy podaje na wejście systemu nastawę kalibratora N_K . W bloku komputera nastawa N_K przetwarzana jest na kod nastawy KN_K . Kod ten jest następnie przesyłany poprzez cyfrowy interfejs kalibratora do kalibratora kontrolnego. Kalibrator generuje na wyjściu wielkość fizyczną odpowiadającą nastawie, oznaczoną jako wskazanie kalibratora kontrolnego W_{KK} (wartość rzeczywista W_R .)



Rys.3.3. Algorytm pracy systemu otwartego

System zbudowany jest wg struktury otwartej, i podobnie jak struktury otwarte bezpośredniego przetwarzania znane z teorii budowy przyrządów pomiarowych, charakteryzuje się brakiem strukturalnej i algorytmicznej nadmiarowości.

Równanie przetwarzania systemu opisuje związek między wielkością wyjściową W_{KK} i wielkością wejściową N_K . Znamionowa charakterystyka przetwarzania systemu dana jest wzorem (3.1)

$$W_{KKN} = 1 \cdot N_K \quad (3.1)$$

gdzie: W_{KKN} – wartość nominalna wskazania kalibratora,
 N_K – nastawa kalibratora

i opisuje działanie systemu przy zerowym błędzie systemu (jednostkowych współczynnikach przetwarzania bloków komputer, interfejs kalibratora i kalibrator kontrolny). System o znamionowej charakterystyce przetwarzania umożliwia dokładną identyfikację obiektu, tj. dokładne wyznaczenie błędu odtworzenia napięcia na wyjściu kalibratora. Operacje realizowane w komputerze (funkcje bloku komputer) mogą być wykonywane z wystarczająco dużym zapasem dokładności. Zatem rzeczywista charakterystyka przetwarzania systemu dana jest wzorem (3.2):

$$W_{KKR} = (1 + \delta_{KK}) \cdot N_K + \Delta_{KK} \quad (3.2)$$

gdzie: W_{KKR} – wartość rzeczywista wskazania kalibratora
 δ_{KK} – składowa multiplikatywna błędu kalibratora kontrolnego,
 Δ_{KK} – składowa addytywna błędu kalibratora kontrolnego

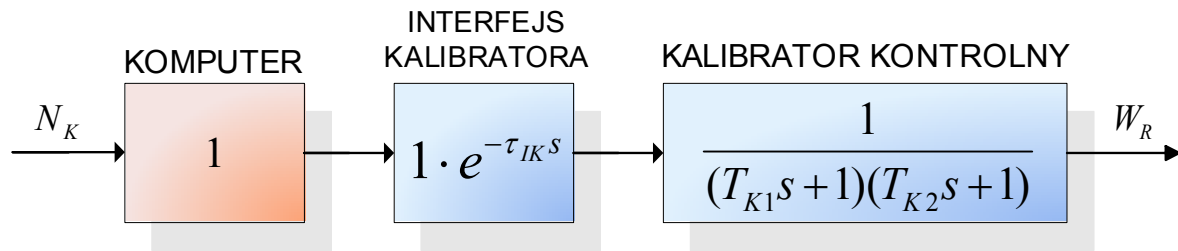
Różnica między rzeczywistą (3.2) a znamionową (3.1) charakterystyką systemu opisuje bezwzględny błąd systemu wyrażony wzorem (3.3):

$$\Delta W_{KK} = \delta_{KK} \cdot N_K + \Delta_{KK} \quad (3.3)$$

gdzie: ΔW_{KK} – bezwzględny błąd systemu

Błąd ten jest liniową funkcją składowych błędów kalibratora, które określone są przez producentów kalibratorów w katalogach wyrobu. Analiza charakterystyki przetwarzania i równania błędu takiego systemu wskazuje, że o metrologicznych parametrach dokładnościowych systemu decydują parametry kalibratora.

Dla potrzeb analizy parametrów dynamicznych zaproponowano model systemu, przedstawiony na rys.3.4.



Rys.3.4. Model dynamiczny systemu z kalibratorem kontrolnym

Bloki występujące w tym modelu opisano równaniami odzwierciedlającymi właściwości dynamiczne poszczególnych jego członów. Opóźnienie wprowadzane przez komputer uznano za pomijalnie małe, i opisano jako człon bezinercyjny o jednostkowej charakterystyce przetwarzania. Interfejs kalibratora opisano jako człon opóźniający o transmitancji:

$$G_{IK}(s) = e^{-s\tau_{IK}} \quad (3.4)$$

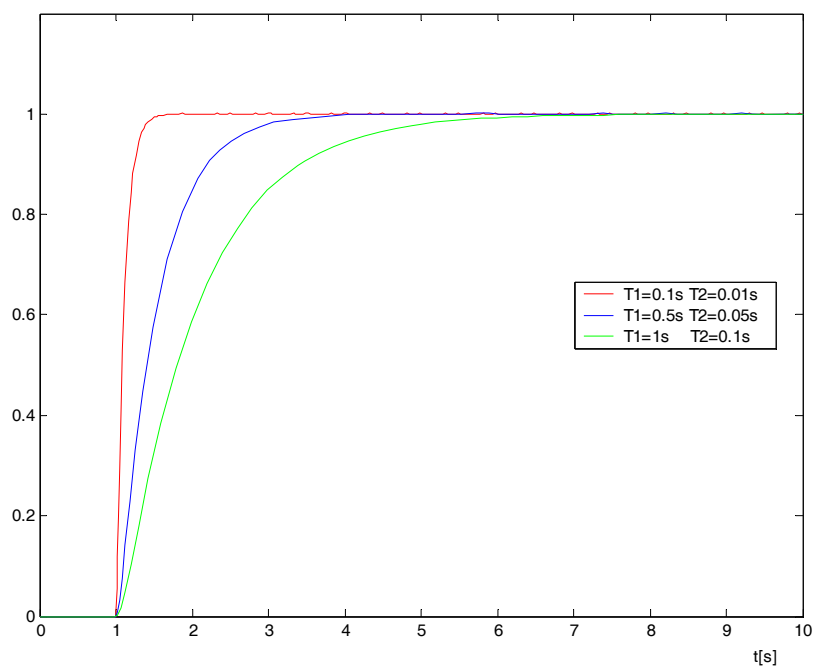
gdzie: τ_{IK} - opóźnienie równe czasowi przesłania nastawy z komputera do kalibratora

Kalibrator napięć i prądów zamodelowano jako człon inercyjny drugiego rzędu o następującej transmitancji [7]:

$$G_K(s) = \frac{1}{(T_{K1}s + 1)(T_{K2}s + 1)} \quad (3.5)$$

gdzie: T_{K1}, T_{K2} - stałe czasowe kalibratora.

W celu zobrazowania właściwości dynamicznych układu otwartego na rys.3.5 przedstawiono wyniki symulacji procesu przejściowego na wyjściu kalibratora w odpowiedzi na sygnał wymuszający w postaci skoku jednostkowego. Ilustracja przedstawia procesy przejściowe dla trzech różnych zestawów stałych czasowych kalibratora T_{K1} i T_{K2} , przy stałym opóźnieniu interfejsu $\tau_{IK} = 1$ s.

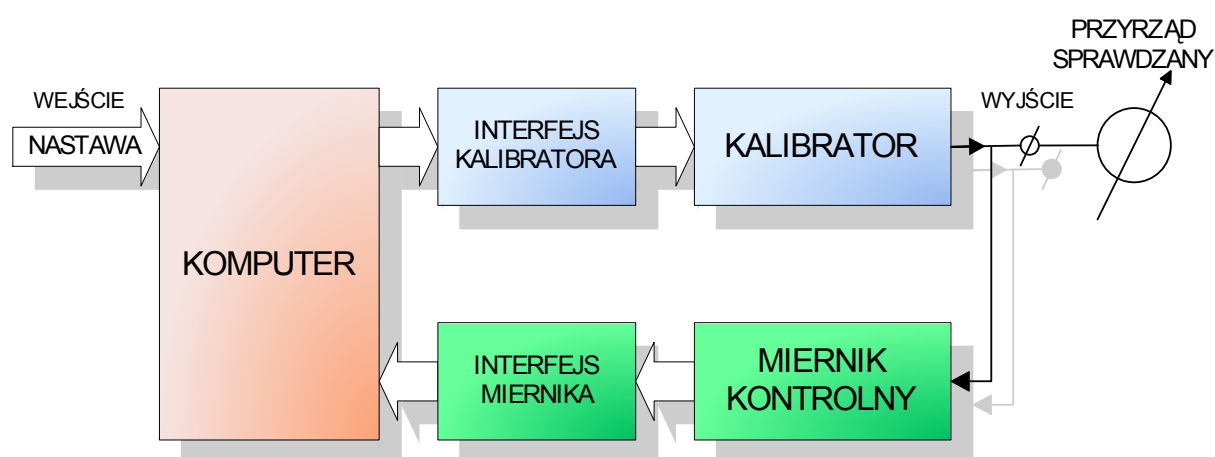


Rys.3.5. Procesy przejściowe na wyjściu systemu otwartego (dla $\tau_{IK} = 1s$)

3.2 System zamknięty z addytywną korekcją błędów i z miernikiem kontrolnym

3.2.1 Opis struktury i algorytmu pracy

Schemat blokowy systemu pomiarowego odtwarzania napięć i prądów z miernikiem kontrolnym przedstawiono na rys.3.6. System składa się z połączonych w strukturze zamkniętej bloków: komputera, interfejsu kalibratora, kalibratora oraz miernika kontrolnego i interfejsu miernika. Komputer pełni funkcję sterownika systemu. Kalibrator pełni funkcję precyzyjnego źródła napięć i prądów, natomiast miernik kontrolny przejmuje rolę wzorca systemu. Interfejs kalibratora oraz interfejs miernika zapewniają komunikację komputera z kalibratorem i miernikiem kontrolnym.

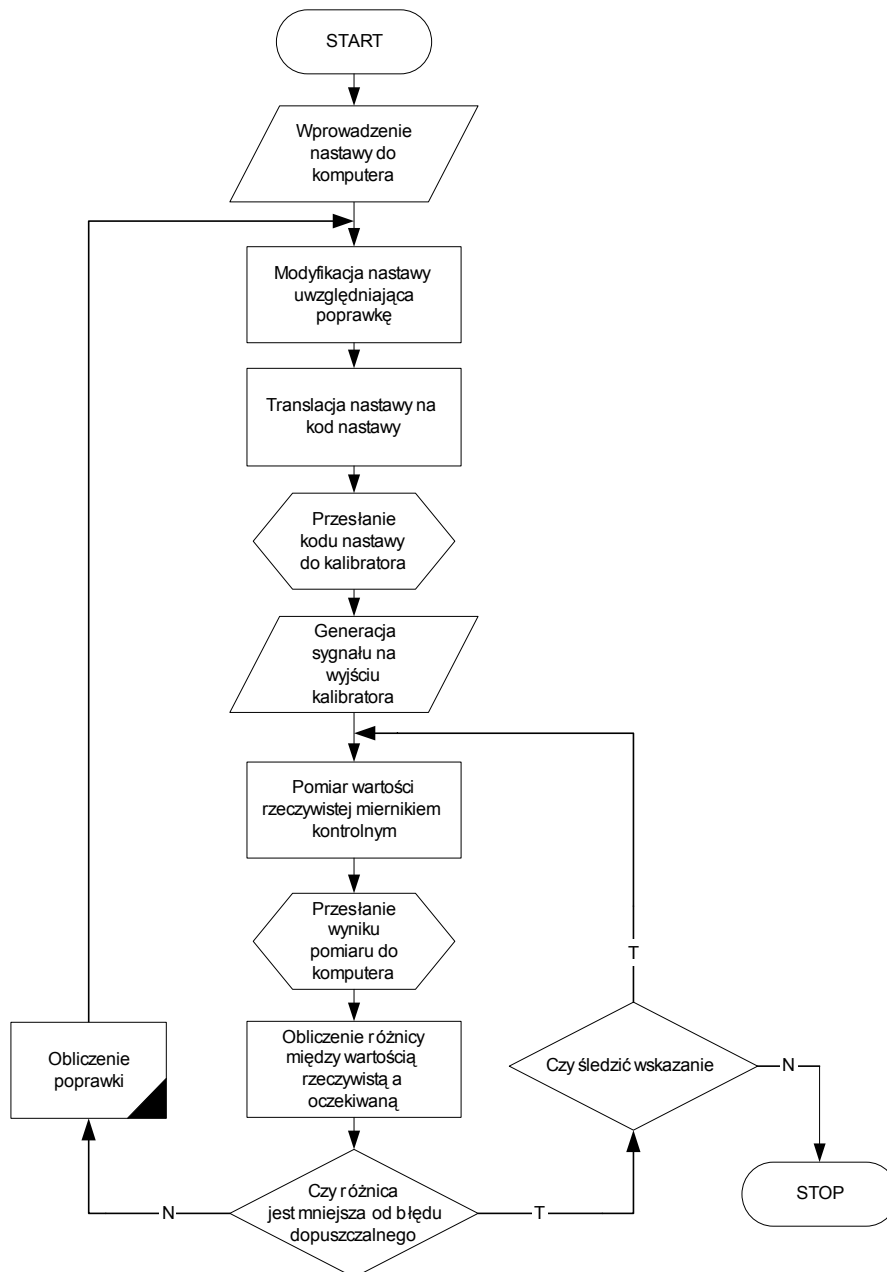


Rys.3.6. System zamknięty z miernikiem kontrolnym – schemat blokowy

Na wejście systemu podawana jest nastawa kalibratora N_K . Na wyjściu systemu generowana jest wielkość fizyczna odpowiadająca nastawie, oznaczona jako wskazanie kalibratora W_K .

Zaproponowany przez autora algorytm pracy systemu z miernikiem kontrolnym przedstawia rys.3.7. Po rozpoczęciu pracy systemu, zmiennej P przechowującej wartość poprawki przypisywana jest zerowa wartość początkowa. Operator, lub nadrzędny program kontrolujący przebieg pomiarów, wprowadza do systemu nastawę kalibratora N_K inicjując proces odtwarzania wielkości wyjściowej. Po zadaniu nastawy następuje ewentualna korekta wartości nastawy o wartość poprawki P . Następnie dokonywana jest w komputerze translacja skorygowanej wartości nastawy na kod nastawy KN_K zgodny z interfejsem kalibratora. Poprzez

interfejs komunikacyjny kod ten jest wysyłany do kalibratora, czego skutkiem jest rozpoczęcie generacji wielkości fizycznej (napięcia lub prądu) na wyjściu kalibratora zwanej wskazaniem kalibratora W_K .



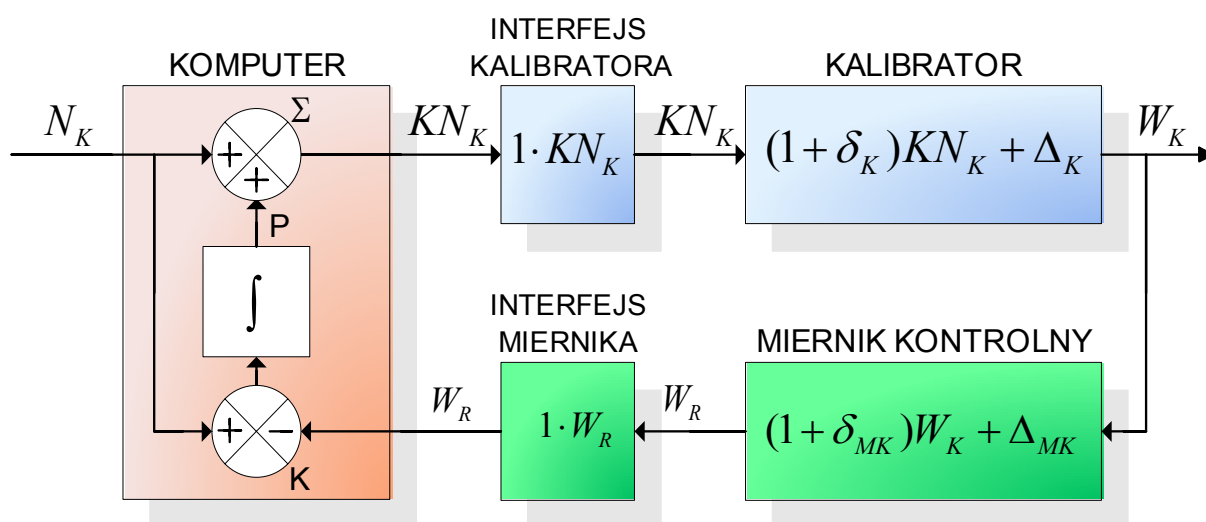
Rys.3.7. Algorytm pracy systemu z miernikiem kontrolnym

W następnym kroku program sterownika systemu wysyła do miernika kontrolnego poprzez jego interfejs komunikacyjny żądanie wykonania pomiaru wskazania kalibratora. Wynik pomiaru (zwany wskazaniem miernika kontrolnego) przesyłany jest zwrotnie interfejsem miernika do sterownika, który oblicza różnicę pomiędzy wskazaniem miernika kontrolnego W_R a nastawą kalibratora N_K i sprawdza czy jej wartość bezwzględna jest mniejsza (lub równa) od

dopuszczalnej wartości błędu ε wyznaczającej dokładność systemu. Jeżeli NIE, to następuje obliczenie poprawki i po modyfikacji nastawy ponowne przejście drogi od translacji zmodyfikowanej nastawy do weryfikacji pomiaru. Jeżeli TAK to proces odtwarzania wielkości wyjściowej zatrzymuje się, lub cyklicznie wykonuje próbne pomiary wartości wyjściowej, w zależności od przyjętej strategii: docelowego lub ciągłego śledzenia odtwarzanej wartości W_R

3.2.2 Model systemu i analiza właściwości statycznych

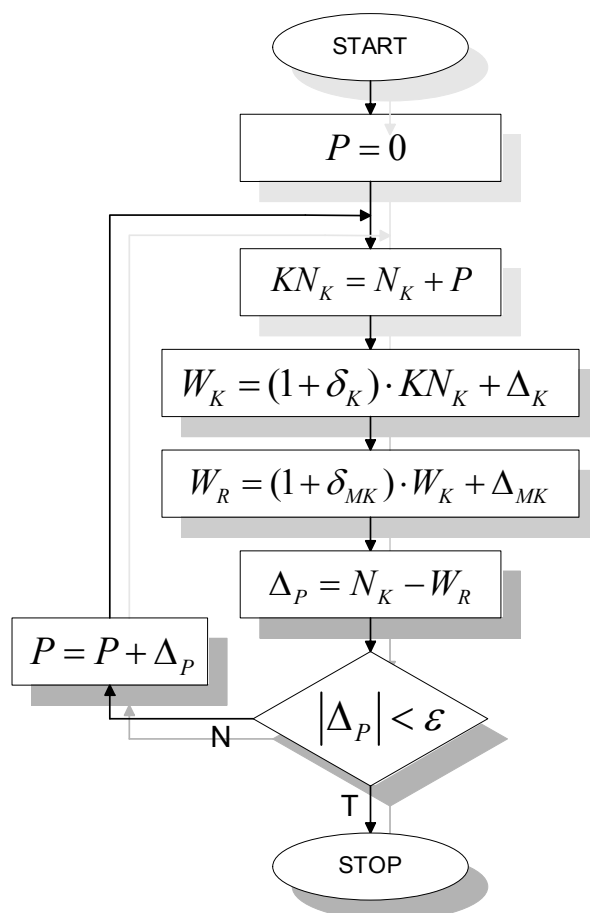
Na rys.3.8. przedstawiono model matematyczny systemu pomiarowego zbudowanego według struktury zamkniętej. W modelu tym komputer oraz interfejs kalibratora i interfejs miernika przedstawiono w postaci przetworników kod-kod, kalibrator przedstawiono jako przetwornik kod-napięcie/prąd, natomiast miernik kontrolny jako przetwornik napięcie/prąd-kod.



Rys.3.8. System zamknięty z miernikiem kontrolnym – model matematyczny

Kalibrator opisano równaniem przetwarzania, w którym uwzględniono składowe błędy kalibratora - multiplikatywną δ_K i addytywną Δ_K . W równaniu przetwarzania miernika kontrolnego uwzględniono składowe błędy miernika - multiplikatywną δ_{MK} i addytywną Δ_{MK} . Podstawowe elementy reprezentujące algorytm pracy komputera oznaczono jako komparator K kodu nastawy N_K i kodu wskazania miernika kontrolnego W_R , człon całkujący \int oraz sumator Σ nastawy N_K i poprawki P . Interfejsy komunikacyjne kalibratora i miernika opisano jednostkowymi równaniami przetwarzania jako elementy nie wnoszące błędów w tor przetwarzania systemu.

Na rys.3.9 przedstawiono, przygotowany dla potrzeb analizy właściwości statycznych, algorytm wyznaczania poprawki w procesie ustalania optymalnej nastawy.



Rys.3.9. Algorytm wyznaczania poprawki w systemie z miernikiem kontrolnym

Algorytm ten opisuje działanie systemu w następujących krokach:

1. wyzerowanie poprawki P ,
2. wygenerowanie kodu KN_K odpowiadającemu sumie wartości żądanej N_K i poprawki P , oraz przesłanie go do kalibratora,
3. wygenerowanie na wyjściu kalibratora sygnału W_K obciążonego błędami kalibratora,
4. pobranie przez komputer wskazania miernika kontrolnego W_R obciążonego błędami miernika,
5. obliczenie przyrostu poprawki Δ_p jako różnicy między wskazaniem miernika kontrolnego W_R , a nastawą kalibratora N_K ,
6. sprawdzenie warunku $|\Delta_p| < \varepsilon$ określającego czy aktualny przyrost poprawki jest mniejszy od dopuszczalnego błędu ε określonego dokładnością systemu. Jeżeli

warunek jest spełniony następuje zakończenie procesu ustalania, w innym przypadku następuje aktualizacja poprawki P o bieżący przyrost poprawki Δ_p , a następnie przejście do punktu 2.

Teoretyczny warunek stanu ustalonego w postaci (3.6) jest podstawą dla analizy właściwości statycznych systemu z miernikiem kontrolnym.

$$\Delta_p = 0 \quad (3.6)$$

Analizę właściwości statycznych modelu przedstawionego na rys.3.8 przeprowadzono w oparciu o algorytm wyznaczania poprawki z rys.3.9. Uwzględniając teoretyczny warunek stanu ustalonego (3.6) przedstawiono równanie poprawki P :

$$P = KN_K - (1 + \delta_{MK}) \cdot [(1 + \delta_K) \cdot KN_K + \Delta_K] - \Delta_{MK} \quad (3.7)$$

po rozwinięciu:

$$P = -(\delta_{MK} + \delta_K + \delta_{MK} \cdot \delta_K) \cdot KN_K - \Delta_K - \Delta_{MK} - \Delta_{MK} \cdot \Delta_K \quad (3.8)$$

Zredukowano iloczyny błędów niemal nie wpływające na wartość poprawki, stąd:

$$P \approx -(\delta_{MK} + \delta_K) \cdot KN_K - \Delta_K - \Delta_{MK} \quad (3.9)$$

Wykorzystując założenie, że klasa dokładności miernika kontrolnego jest znacznie większa od klasy dokładności kalibratora, pominięto składowe błędów miernika kontrolnego jako znikomo małe w porównaniu do składowych błędów kalibratora, stąd:

$$P \approx -\delta_K \cdot KN_K - \Delta_K \quad (3.10)$$

Ze wzoru (3.10) wynika, że w stanie ustalonym (spełniony warunek 3.6) poprawka P niemal całkowicie eliminuje wpływ błędu kalibratora.

Znamionowa charakterystyka przetwarzania systemu z miernikiem kontrolnym określona jest wzorem:

$$W_{KN} = 1 \cdot N_K \quad (3.11)$$

Zależność (3.11) opisuje działanie modelu systemu przedstawionego na rys.3.8 przy zerowym błędzie systemu (jednostkowym współczynniku przetwarzania miernika wzorcowego).

Natomiast rzeczywista charakterystyka przetwarzania $W_{KR} = f(N_K)$ opisana jest równaniem:

$$W_{KR} = (1 - \delta_{MK})N_K - \Delta_{MK} \quad (3.12)$$

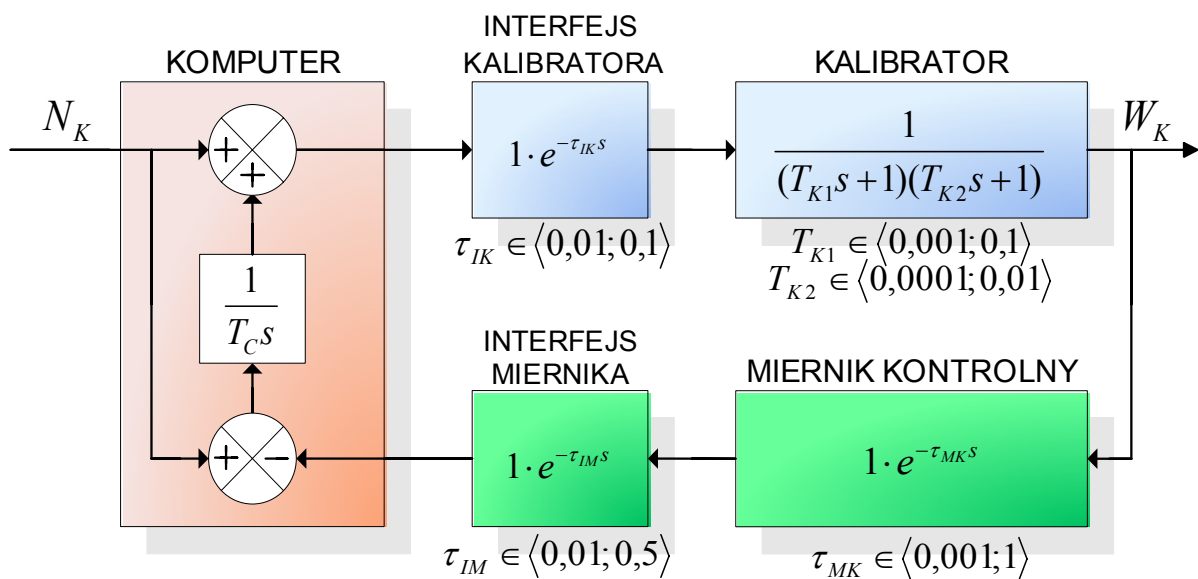
Różnica między wzorami (3.12) i (3.11) stanowi równanie błędu systemu:

$$\Delta = -\delta_{MK}N_K - \Delta_{MK} \quad (3.13)$$

Analiza powyższych równań pozwala stwierdzić, że o dokładności systemu decyduje dokładność miernika kontrolnego.

3.2.3 Model systemu i analiza właściwości dynamicznych

Na rys.3.10. przedstawiono model systemu zamkniętego przygotowany dla potrzeb analizy właściwości dynamicznych. Zawiera on bloki opisujące przetwarzanie sygnału w dziedzinie czasu [101].



Rys.3.10. Model systemu zamkniętego dla analizy właściwości dynamicznych

Kalibrator napięć i prądów zamodelowano jako człon inercyjny drugiego rzędu o następującej transmitancji [7]:

$$G_K(s) = \frac{1}{(T_{K1}s + 1)(T_{K2}s + 1)} \quad (3.14)$$

gdzie: T_{K1}, T_{K2} - stałe czasowe kalibratora.

Miernik kontrolny opisano jako człon opóźniający o transmitancji:

$$G_{MK}(s) = e^{-s\tau_{MK}} \quad (3.15)$$

gdzie: τ_{MK} - opóźnienie równe czasowi pomiaru miernika kontrolnego.

Bloki interfejsów komunikacyjnych kalibratora i miernika przedstawiono również jako człony opóźniające o transmitancji odpowiednio dla interfejsu kalibratora:

$$G_{IK}(s) = e^{-s\tau_{IK}} \quad (3.16)$$

gdzie: τ_{IK} - opóźnienie równe czasowi przesyłu nastawy z komputera do kalibratora.

i dla interfejsu miernika:

$$G_{IM}(s) = e^{-s\tau_{IM}} \quad (3.17)$$

gdzie: τ_{IM} - opóźnienie równe czasowi przesyłu danych z miernika do komputera.

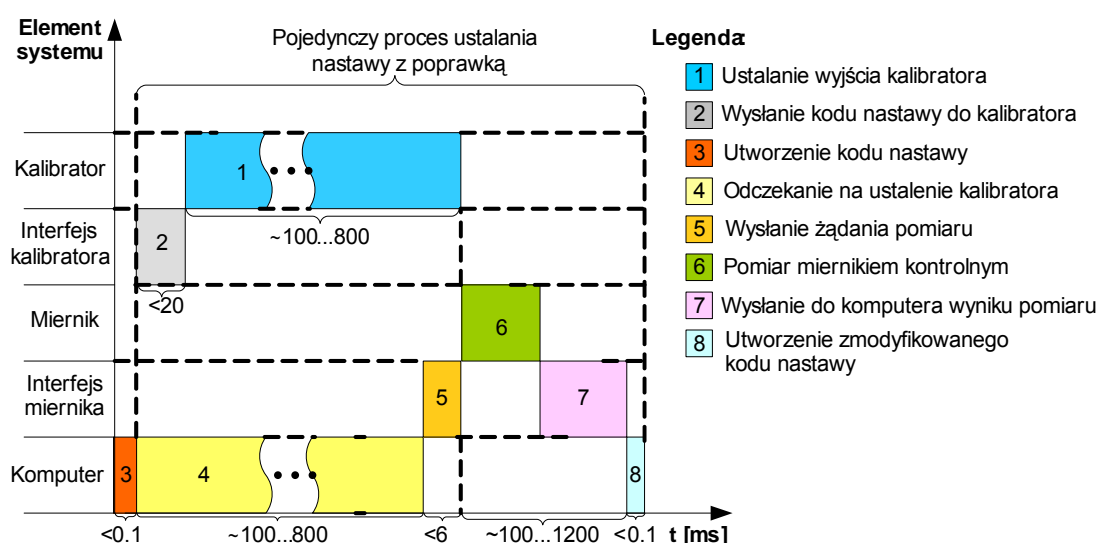
Zastosowany w algorytmie pracy komputera regulator przedstawiono jako człon całkujący o transmitancji:

$$G_A(s) = \frac{1}{T_C s} \quad (3.18)$$

gdzie: T_C - stała czasowa układu całkującego.

Zależności czasowe poszczególnych elementów systemu przedstawione są na rys.3.11. Rysunek ten przedstawia poglądowy wykres, na którym pokazane są współzależności czasowe

elementów systemu w obrębie pojedynczego procesu ustalania. Długości odcinków czasowych przedstawione są w przybliżeniu, jednak z zachowaniem proporcji dla kalibratora o stałej czasowej od $T_{K1}=0,02s$ do $T_{K1}=0,1s$ i dla miernika kontrolnego o czasie przetwarzania τ_{MK} w granicach od 0,1s do 1s. Ukazują one wpływ opóźnień poszczególnych elementów systemu na właściwości dynamiczne całego toru przetwarzania sygnałów w systemie pomiarowym. Komputer sterujący systemem musi odpowiednio uwzględnić parametry czasowe poszczególnych elementów tego systemu.



Rys.3.11. Zależności czasowe elementów w pojedynczym procesie ustalania wartości wyjściowej.

Parametry czasowe kalibratorów podawane są przez producentów w katalogach wyrobów w postaci czasu odpowiedzi lub stałych czasowych T_{K1} i T_{K2} . Stała czasowa T_{K1} kalibratora na ogół nie jest wyższa od 100 ms, zaś stała czasowa T_{K2} od 10 ms [7], przy czym ze względów konstrukcyjnych zazwyczaj $T_{K2} \approx \frac{T_{K1}}{10}$. W celu rozszerzenia możliwości zastosowania kalibratorów o gorszych parametrach dynamicznych do badań przyjęto 1 s jako górny zakres stałej czasowej kalibratora.

W omawianym systemie zastosowany powinien być miernik kontrolny w postaci cyfrowego multimetru napięć i prądów stałych i przemiennych wyposażony w standardową magistralę interfejsową do przesyłania wyników pomiarów [54, 71]. Multimetry cyfrowe przesyłają wyniki pomiaru w określonych odstępach czasu określonych wybranym czasem pomiaru, który przyjmuje wartości z przedziału 1ms...1s. Mniejsze wartości czasu pomiaru stosowane są przy pomiarach napięć i prądów stałych, większe wartości czasu pomiaru

stosowane są przy pomiarach napięć i prądów przemiennych. Ze wzrostem wymagań na dokładność wykonywanych pomiarów, stosowane jest zwiększanie czasu pomiaru. Większą dokładność można uzyskać wykonując określoną ilość pomiarów a następnie dokonując ich statystycznej obróbki. Z tego względu do dalszych badań przyjęto, iż czas pomiaru miernika kontrolnego może zawierać się w przedziale od 1 ms do 10 s.

Organizacja cyfrowego systemu pomiarowego jest zdeterminowana przez zastosowany interfejs komunikacyjny, który decyduje o konfiguracji systemu oraz sposobie i szybkości transmisji danych. Interfejs jest przy tym na ogół najmniej znanym elementem systemu. W zastosowaniach metrologicznych najczęściej stosowane media komunikacyjne to równoległy interfejs cyfrowy IEEE 488 [72] oraz szeregowy interfejsy komunikacyjne pracujące zgodnie ze standardami RS232C, RS422A, RS423A, RS485 [73, 74, 75]. Coraz szerzej, również w zastosowaniach metrologicznych, stosowane są takie interfejsy jak USB[76] czy Ethernet [77].

IEEE 488 [73] (znany również pod nazwą IEC-625 lub GPIB) to standard połączenia równoległego o 16 liniach sygnałowych podzielonych na 8 dwukierunkowych linii danych, 5 linii kontrolnych, i 3 linie „handshake”. Dokładną specyfikację warstwy sprzętowej podaje norma IEEE488.1, a warstwy logicznej IEEE488.2 [79]. Liczba urządzeń jednocześnie podłączonych do wspólnej magistrali nie powinna przekraczać 15, a odległość między sąsiadującymi urządzeniami nie może być większa niż 4m. Maksymalna prędkość przesyłu zależy od ilości podłączonych urządzeń, ale generalnie przyjmuje się ją za 1Mbit/s;

RS-232C [74,75] to popularny szeregowy standard komunikacyjny, objęty specyfikacją EIA/TIA-232-E. Jest prostym i uzgodnionym standardem komunikacyjnym dla danych pomiędzy urządzeniem nadrzędnym (DTE) i peryferyjnym systemem (DCE). Zastosowanie interfejsu RS-232C w warunkach przemysłowych jest ograniczone. Przyczyną tego jest brak dostatecznych zabezpieczeń przed zakłóceniami oraz ograniczona szybkość i odległość transmisji, co wynika m.in. z niesymetrycznego przesyłania danych. Wady tego standardu jednocześnie przy sporej przydatności interfejsów szeregowych do transmisji danych zarówno w systemach teletransmisyjnych, jak i pomiarowych spowodowały powstanie nowych rozwiązań, spośród których część uzyskała status standardów, jak: RS-422A, RS-423A i RS-485. W celu zwiększenia szybkości transmisji, zasięgu, jak również ochrony przed zakłóceniami wprowadzono w nich dwuprzewodowe obwody transmisyjne;

RS-422A [74, 75] – Standard ten dotyczy obwodów transmisyjnych symetrycznych. Jest to rozwiązanie dla szybkiej transmisji na duże odległości. Różnicowy nadajnik, dwuprzewodowy zrównoważony tor przesyłowy oraz odbiornik o różnicowym obwodzie wejściowym zapewnia prędkość transmisji od 100 kbit/s do 10 Mbit/s, w zależności od

długości linii transmisyjnej. Istotną cechą omawianego standardu jest możliwość dołączania do nadajnika aż 10 odbiorników;

RS-423A [74, 75] – Standard ten dotyczy obwodów transmisyjnych niesymetrycznych. Zasięg transmisji sygnałów po magistrali RS-423A zależy wyraźnie od szybkości transmisji. Przy szybkości 3 kbit/s wynosi on maksymalnie 1200 metrów, a przy 100 kbit/s spada do 30 metrów. Podobnie jak w RS-422A do jednego nadajnika może być jednocześnie podłączonych do 10 odbiorników;

RS-485 [74, 75] został wprowadzony jako rozwinięcie standardu RS-422A. Łącze RS-485 jest symetryczne i zrównoważone, przy czym dopuszcza nie tylko podłączenie do wspólnej linii wielu odbiorników, ale i nadajników. Nadajniki muszą być trójstanowe, w danym przedziale czasu może nadawać tylko jedno urządzenie, a pozostałe muszą znajdować się w stanie wysokiej impedancji. Jeden nadajnik może sterować do 32 odbiorników. Maksymalna długość magistrali wynosi 1200 m i może być zwiększona do 4800 m po zastosowaniu wzmacniaczy.

Ethernet [80, 81, 82] – jest standardem komunikacji szeregowej na średnie i duże odległości. Opisuje jest przez normę IEEE 802.3 (w europe ISO 8802/3). Do jednego węzła Ethernet można przyłączyć setki urządzeń. Każde urządzenie w sieci Ethernet ma swój unikalny adres ethernetowy (MAC). Istnieje kilka rodzajów Ethernetu, różnią się one między innymi prędkością transmisji. W klasycznej sieci Ethernet prędkość przesyłania danych wynosi 10 Mbit/s, w sieci *Fast Ethernet* jest to 100 Mbit/s, zaś w *Gigabit Ethernet* 1 Gbit/s. Maksymalny zasięg sieci to 2,5 km. W systemach pomiarowych stosuje się urządzenia pracujące z prędkością: 10 Mbit/s lub 100 Mbit/s [76, 78].

USB (Universal Serial Bus) [83, 84] - jest to uniwersalny interfejs szeregowy wbudowany w architekturę komputerów PC przeznaczony do współpracy komputerów z urządzeniami: przemysłowymi, pomiarowymi, powszechnego użytku oraz do integracji z sieciami telekomunikacyjnymi. Zapewnienia prędkości przesyłania danych w standardzie USB1.1 do 12[Mbitów/s] a w nowszym standardzie USB2.0 do 480 Mbit/s na odległość do 5 m. Przyjęto w tym standardzie następującą topologię systemu: jeden *host* (komputer zarządzający) połączony jest z pierwszym *hubem* (rozgałęźnik), do którego można podłączyć na zasadzie drzewa następne *huby* lub urządzenia. Ograniczeniem ilości podłączonych urządzeń jest suma pobieranej przez nie mocy.

Tabela 3.1 przedstawia porównanie wybranych parametrów interfejsów które mogą mieć zastosowanie w omawianym systemie pomiarowym.

Tabela 3.1. Wybrane parametry interfejsów komunikacyjnych

Nazwa standardu	Rodzaj interfejsu	Maksymalna prędkość transmisji / maksymalna odległość między urządzeniami[m]
IEEE-488	równoległy	1 Mbit/s / 4 m
RS-232C	szeregowy	115 kbit/s / 15 m
RS-422A	szeregowy	10 Mbit/s / 100 m spada wraz z odległością 100 kbit/s / 1200 m
RS-423A	szeregowy	100 kbit/s / 30 m spada wraz z odległością 3 kbit/s / 1200 m
RS-485	szeregowy	10 Mbit/s / 1200 m
Ethernet	szeregowy	100 Mbit/s / 100 m
USB	szeregowy	480 Mbit/s / 5 m

Komunikacja z kalibratorem odbywa się zazwyczaj tylko w jednym kierunku (z komputera do kalibratora), a ilość przesyłanych danych jest niewielka (kilka do kilkunastu znaków), stąd można zakładać, iż może przebiegać bardzo szybko. Z drugiej strony, prędkości interfejsów szeregowych najczęściej stosowanych w kalibratorach, zwłaszcza RS232C nie przekracza 9600 bit/s, a w zastosowaniach przemysłowych często jeszcze spotyka się urządzenia pracujące z prędkością 4800 bit/s [27] lub niższą [85].

Komunikacja z miernikiem przebiega w dwóch etapach, komputer kontrolujący przebieg pomiarów musi zainicjować pomiar przesyłając do miernika odpowiedni, zazwyczaj kilkunastoznakowy rozkaz. Odbiór następuje zaraz po zakończeniu pomiaru automatycznie lub w odpowiedzi na kolejny rozkaz czytania danych. Liczba przesyłanych znaków w całym procesie pomiaru jest zróżnicowana w zależności od protokołu i konfiguracji przyrządu pomiarowego (np. pomiar jednofazowy lub trójfazowy) jednak na ogół mieści się w przedziale od kilku do kilkudziesięciu znaków. Zdarzają się jednak urządzenia, w których protokół transmisji zaprojektowano tak, że na komendę odczytu odpowiada cały pakiet wartości np. wartości napięcia i prądu oraz mocy w trzech fazach, kątów fazowych i międzyfazowych, częstotliwości i harmonicznych [86] co znacznie wydłuża proces odczytu.

Na podstawie przeglądu parametrów dynamicznych sporządzono tabelę 3.2 przedstawiającą przedziały zmian parametrów dynamicznych urządzeń które można zastosować w proponowanym systemie pomiarowym odtwarzania napięć i prądów. Tabela 3.2 zawiera również zakresy parametrów poddane badaniom w dalszej części pracy.

Tabela 3.2. Zakresy zmian badanych parametrów

badane parametry		zakresy wartości badanych parametrów [s]	
nazwa	symbol	rzeczywistych przyrządów	przyjęte do symulacji
Stała czasowa kalibratora	T_{K1} [s]	0,01 .. 1	0,001 .. 1
Stała czasowa kalibratora	T_{K2} [s]	0,001 .. 0,1	0,001 .. 0,1
Opóźnienie miernika kontrolnego	τ_{MK} [s]	0,001 .. 1	0,001 .. 10
Opóźnienie interfejsu kalibratora	τ_{IK} [s]	0,005 .. 0,1	0,001 .. 1
Opóźnienie interfejsu miernika	τ_{IM} [s]	0,001 .. 0,5	0,0001 .. 1

W kolumnie *przyjęte do symulacji* umieszczono zakresy wartości parametrów wykorzystane przy badaniach. Zostały one rozszerzone w stosunku do parametrów *rzeczywistych przyrządów*, w celu przebadania zachowania układu dla urządzeń, które nie są nam w chwili obecnej znane lub takich, które będą wyprodukowane w przyszłości.

Z uwagi na strukturę i algorytm działania systemu zamkniętego spodziewać się należy znacznego wydłużenia czasu odpowiedzi systemu zamkniętego w stosunku do czasu odpowiedzi systemu otwartego. Występować mogą również inne niedogodności jak duże wartości przeregulowania lub wzbudzenie układu, uniemożliwiające wygenerowanie stabilnej wartości wskazania kalibratora. Może to w znacznym stopniu ograniczać wydajność, zawęzić zakres stosowania, lub uniemożliwić zastosowanie tak zbudowanego systemu.

Parametry dynamiczne systemu zamkniętego są jednak wielkościami, na które można mieć wpływ. Polem, na którym prowadzone są poszukiwania możliwości poprawy parametrów dynamicznych systemu jest ich zależność od algorytmu pracy programu komputerowego zarządzającego procesem dopasowania wartości wskazania kalibratora do nastawy.

Jedną z rozważanych przez autora możliwości do wykorzystania właściwości jest zależność czasu odpowiedzi systemu i przeregulowania od doboru wartości stałej czasowej bloku całkującego algorytmu programu sterującego komputera. Innym sposobem na poprawę właściwości dynamicznych systemu jest zastosowanie specjalnie skonstruowanego sygnału wymuszającego.

Głównym celem badań jest wyznaczenie zależności, dzięki którym możliwe będzie takie dopasowanie algorytmu działania części programowej systemu do parametrów zastosowanych w nim urządzeń, aby zapewnić optymalne (pod względem dynamicznym) warunki pracy.

Celem pośrednim jest określenie jakościowe oraz ilościowe wpływu parametrów dynamicznych poszczególnych urządzeń wchodzących w skład systemu na właściwości dynamiczne całego systemu.

3.3 Wnioski

Struktura zamknięta systemu pomiarowego z miernikiem kontrolnym umożliwia zredukowanie wartości błędu systemu do wielkości w przybliżeniu równej błędowi miernika kontrolnego. Klasa dokładności kalibratora nie ma znaczącego wpływu na dokładność toru przetwarzania systemu określonego wzorem (3.13), gdyż wartość poprawki, opisana wzorem (3.10) eliminuje wpływ błędu kalibratora. O błędzie sygnału wyjściowego decyduje błąd miernika kontrolnego.

Aby dokładność systemu z miernikiem kontrolnym była porównywalna do dokładności systemu z kalibratorem kontrolnym, należy zapewnić, aby dokładność miernika kontrolnego była zbliżona do dokładności kalibratora kontrolnego.

Wykorzystanie komputera w systemie pomiarowym z miernikiem kontrolnym pozwala na automatyzację procesów pomiarowych oraz uniknięcie błędów pomiaru wprowadzanych przez użytkownika.

Aplikacja komputerowa, w swoim algorytmie musi uwzględniać parametry dynamiczne poszczególnych urządzeń pomiarowych jak i opóźnienia powodowane wymianą danych między nimi a komputerem, zwłaszcza w przypadku zastosowania wolnych interfejsów komunikacyjnych, do jakich należy RS-232C często stosowany w systemach automatyki pomiarowej.

4 BADANIE WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNYCH SYSTEMU PRZY ODPOWIEDZI NA SKOK JEDNOSTKOWY Z ZASTOSOWANIEM SYMULACJI KOMPUTEROWEJ

4.1 Wprowadzenie i wybór metody badań

Badanie właściwości dynamicznych komputerowego systemu odtwarzania napięć i prądów przeprowadzono metodą symulacji komputerowej z wykorzystaniem programu *MATLAB* [87, 88, 89, 90, 91] firmy *MathWorks, Inc.* z nakładką *Simulink* oraz z zastosowaniem programów napisanych w środowisku *MATLAB* przez autora pracy przedstawionych w załącznikach A, B.

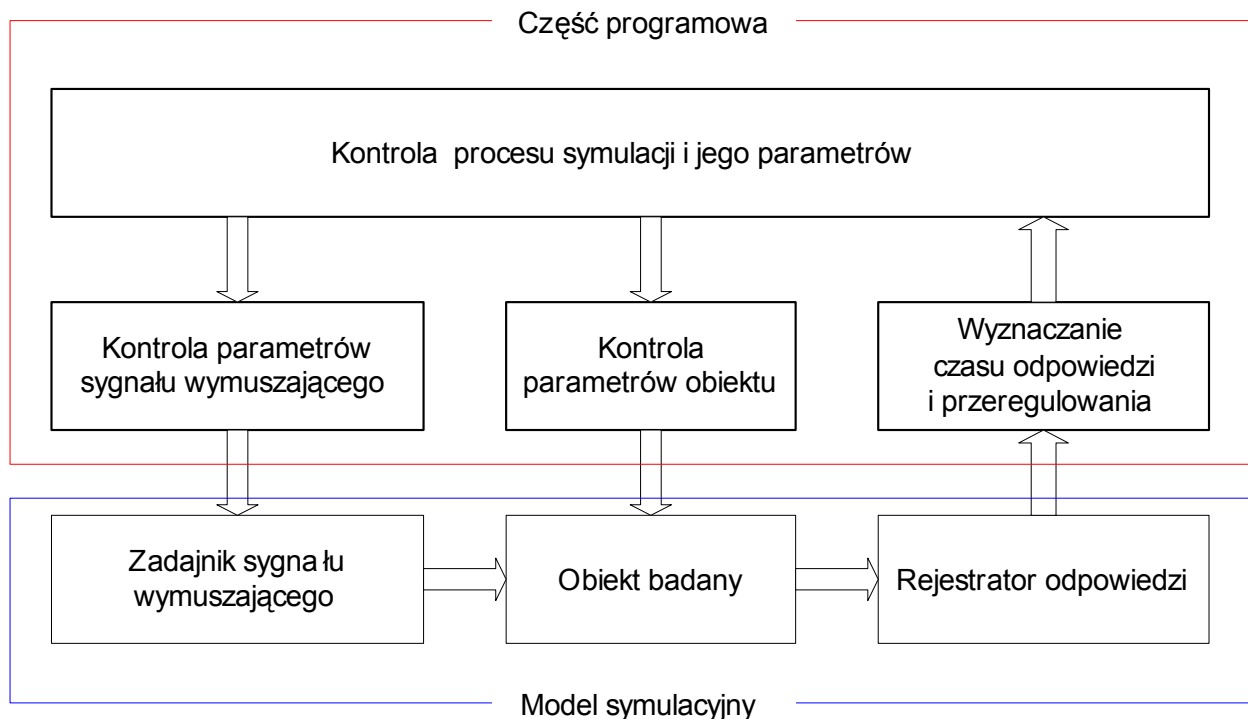
Do badań zastosowano optymalne pod względem dokładności metodę symulacyjną ze zmiennym krokiem o nazwie *ode23 (Bogacki-Shampine)*[92], *ode15s (stiff/NDF)* - oraz system akceleracji obliczeń symulacyjnych: *Real Time Workshop* [93].

Ze względu na ograniczone możliwości edycyjne programu *MATLAB*, na rysunkach przedstawiających modele oraz na ilustracjach wyników symulacji przyjęto następujące symbole i oznaczenia:

- Tk1 – T_{K1} stała czasowa bloku inercyjnego kalibratora,
- Tk2 – T_{K2} stała czasowa bloku inercyjnego kalibratora,
- Tmk – τ_{MK} czas opóźnienia miernika kontrolnego,
- Tik – τ_{IK} czas opóźnienia interfejsu kalibratora,
- Tim – τ_{IM} czas opóźnienia interfejsu miernika kontrolnego,
- Tc – T_C stała czasowa regulatora całkującego,
- Em – δ_K składowa multiplikatywna błędu kalibratora,
- Ea – Δ_K składowa addytywna błędu kalibratora.

4.2 Opracowanie modelu systemu dla potrzeb badań symulacyjnych

Ze względu na czasochłonność dużej liczby przeprowadzanych procesów symulacyjnych, opracowano zautomatyzowane stanowisko do badań symulacyjnych, którego model funkcjonalny przedstawia rys.4.1.



Rys.4.1. Model funkcjonalny stanowiska do badań symulacyjnych

Stanowisko do badań symulacyjnych składa się z *modelu symulacyjnego*, będącego modelem systemu wykonanym w środowisku MATLAB Simulink, odzwierciedlającego zachowania dynamiczne i powiązania poszczególnych elementów systemu, oraz z *części programowej* obejmującej sekwencje i algorytmy procesów symulacyjnych wykonywanych na *modelu symulacyjnym*.

Model symulacyjny obejmuje:

- *zadajnik sygnału wymuszającego* - blok odpowiedzialny za generację sygnału wejściowego o żądanym kształcie;
- *obiekt badany* - zespół bloków transmitacyjnych odzwierciedlających zachowanie dynamiczne fizycznego systemu odtwarzania napięć i prądów podlegającego analizie;

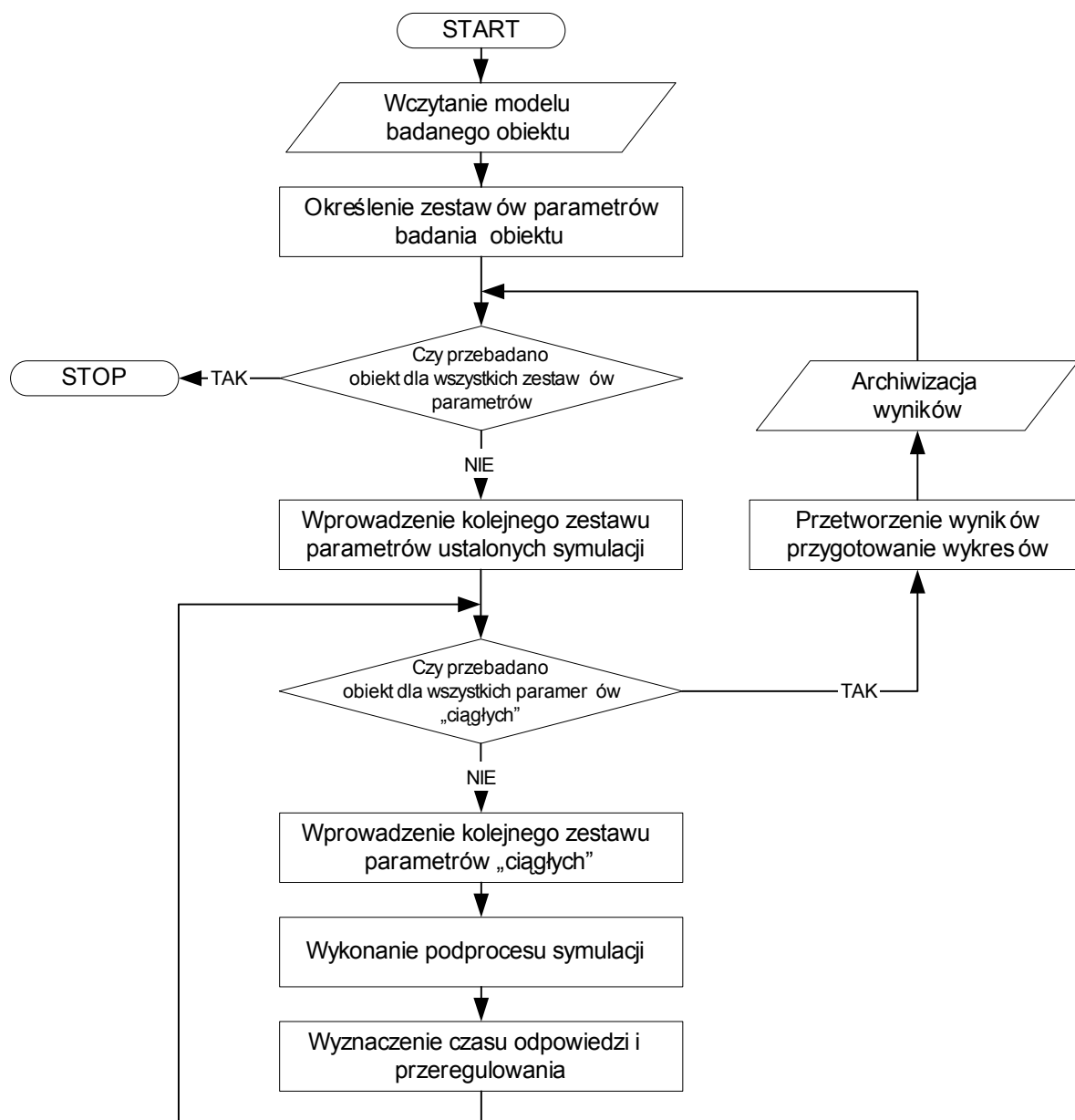
- *rejestrator odpowiedzi* – którego zadaniem jest pobieranie i przechowywanie próbek przebiegu czasowego odpowiedzi badanego obiektu na przebieg pochodzący z zadajnika sygnału wymuszającego;

Część programowa obejmuje:

- blok *kontroli parametrów sygnału wymuszającego* - nadzorujący odpowiednie sterowanie zadajnika sygnału wymuszającego;
- blok *kontroli parametrów obiektu* - przyporządkowujący kolejnym iteracjom procesu symulacji, kolejne uszeregowane zestawy parametrów badanego obiektu;
- blok *wyznaczania czasu odpowiedzi i przeregulowania* - analizujący i przetwarzający dane pobierane z rejestratora odpowiedzi;
- blok *kontroli procesu symulacji*, który jako program nadrzędny obejmuje:
 - zarządzanie modelem obiektu podlegającym symulacji,
 - ustalanie zakresu zmian parametrów sygnału wymuszającego,
 - ustalanie zakresu zmian parametrów obiektu badanego,
 - przekazywanie parametrów podprocesowi wykonującemu symulację,
 - inicjowanie podprocesu wykonującego symulację,
 - przetwarzanie wyników procesu symulacji,
 - wykonanie wykresów zależności wielkości badanych od parametrów obiektu i wymuszenia,
 - archiwizację wyników.

Algorytm badań symulacyjnych przeprowadzonych z użyciem powyższego stanowiska przedstawia rys.4.2. Praca systemu rozpoczyna się od wprowadzenia modelu podlegającego symulacji. Następnie określone są zestawy parametrów, dla których będą przeprowadzane badania symulacyjne. Zestawy parametrów obejmują dwie grupy wartości podzielone pod względem sposobu określenia przebiegu zmienności funkcji. Ponieważ niemal wszystkie wykresy w pracy przedstawiają trójwymiarowe ilustracje funkcji dwóch zmiennych, najczęściej zmieniające się dwie wielkości podstawowe należą do pierwszej grupy zmiennych. Zmienne tego typu przyjmują wartości z bardzo małym przyrostem w całym określonym dla nich zakresie, W niniejszej pracy określono je jako zmienne „ciągłe”. Druga grupa zmiennych określona mianem „ustalonych” to wartości, które traktowane są jako parametr odniesienia i podane są jako pojedyncza wartość lub zestaw kilku typowych wartości. Przy zmianie tego typu wartości ponownie wykonywany jest zestaw symulacji dla pełnych zakresów parametrów „ciągłych”. Po określeniu zestawów i zakresów zmienności parametrów następuje przejście do

iteracyjnego procesu wyznaczania charakterystyk czasu odpowiedzi i przeregulowania w funkcji zmiennych „ciągłych” przy kolejnych wartościach parametrów „ustalonych”.

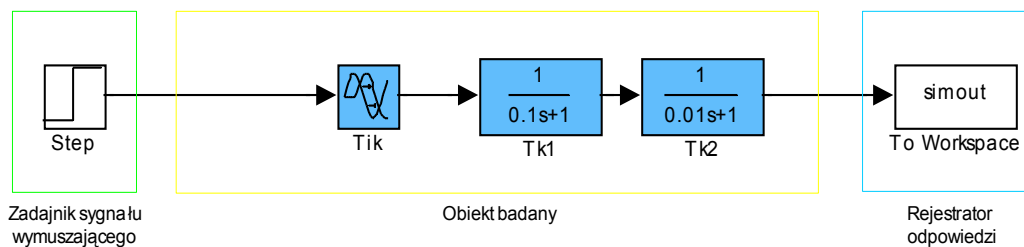


Rys.4.2. Algorytm badań symulacyjnych

Proces ten rozpoczyna wprowadzenie kolejnego zestawu parametrów ustalonych, po czym dla pełnych zakresów parametrów „ciągłych” wykonywane są symulacje odpowiedzi obiektu badanego na wymuszenie podane na jego wejście. Po każdej pojedynczej symulacji, na podstawie danych zapamiętanych w rejestratorze odpowiedzi, określone są wartości czasu odpowiedzi i przeregulowania. Dane te zapisywane są w dwuwymiarowych tablicach wynikowych, których indeksami są kolejne numery wartości zmiennych zestawów parametrów

ciągłych. Po przeprowadzeniu symulacji dla wszystkich wartości „ciągłych” (przy bieżącym zestawie wartości „ustalonych”) zgromadzone w tablicach wynikowych dane wizualizowane są w postaci trójwymiarowych wykresów. Dane te oraz wykresy wraz z wartościami parametrów „ustalonych” są następnie zapisywane do plików dyskowych. Proces ponownie powraca do miejsca wprowadzania kolejnego zestawu parametrów ustalonych aż od wyczerpania wszystkich określonych na wstępie zestawów.

Korzystając z możliwości programowych pakietu *MATLAB* z nakładką *Simulink*, dla potrzeb badań symulacyjnych, sporządzono modele badanych systemów. Na rys.4.3 przedstawiono model symulacyjny systemu z kalibratorem kontrolnym (system otwarty). Budowę modelu oparto na właściwościach dynamicznych poszczególnych bloków systemu opisanych równaniami(3.4) i (3.5).



Rys.4.3. Model symulacyjny systemu z kalibratorem kontrolnym

Model składa się z:

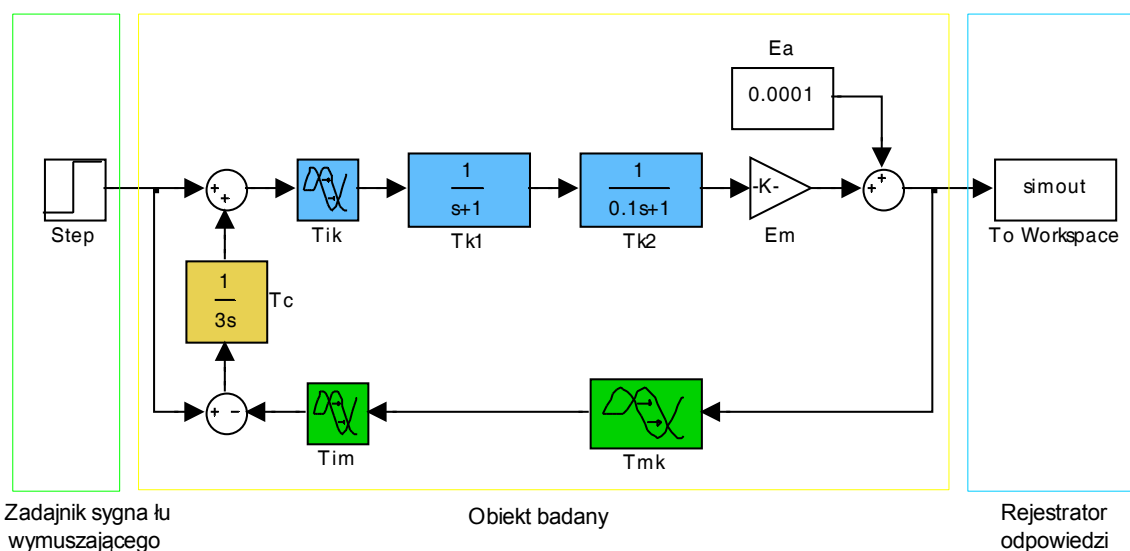
- zadajnika sygnału wymuszającego,
- badanego obiektu,
- rejestratora odpowiedzi.

Jako zadajnik sygnału wymuszającego użyty został blok ze zbioru *sources* pakietu *Simulink* o nazwie *Step*. Blok ten pozwala na zamodelowanie sygnału wymuszającego w postaci skoku jednostkowego o zadanym czasie wyzwolenia skoku, oraz sparametryzowanie wartości amplitud sygnału początkowej i końcowej.

Obiekt badany zawiera bloki modelujące właściwości dynamiczne poszczególnych elementów składowych systemu. Interfejs kalibratora zamodelowany został w postaci bloku opóźniającego (*Transport Delay*) i oznaczony na rysunku jako *Tik*. Kalibrator, jako człon inercyjny drugiego rzędu, zamodelowano w postaci dwóch bloków inercyjnych pierwszego rzędu (*Transfer Function*) oznaczonych na rysunku jako *Tk1* i *Tk2*.

Jako rejestrator odpowiedzi użyty został blok ze zbioru *sinks* o nazwie *simout*. Jest to programowa struktura, do której w czasie symulacji zbierane są dane cząstkowe odpowiedzi badanego obiektu na zadane wymuszenie.

Na rys.4.4 przedstawiono model systemu z miernikiem kontrolnym. Budowę modelu oparto na właściwościach dynamicznych poszczególnych bloków systemu z miernikiem kontrolnym opisanych równaniami: (3.14), (3.15), (3.16), (3.17), (3.18).



Rys.4.4. Model symulacyjny systemu z miernikiem kontrolnym

Model symulacyjny systemu składa się z:

- zadajnika sygnału wymuszającego,
- badanego obiektu,
- rejestratora odpowiedzi.

Przy czym badany obiekt odzwierciedla strukturę opisywanego systemu z miernikiem kontrolnym, a w jego skład wchodzi:

- dwa sumatory i blok całkujący T_c , reprezentujące algorytm pracy aplikacji komputerowej,
- blok opóźniający T_{ik} reprezentujący opóźnienie wnoszone przez transmisję kodu nastawy do kalibratora (τ_{IK}),
- bloki T_{k1} i T_{k2} reprezentujące właściwości dynamiczne kalibratora (T_{K1} i T_{K2}),
- blok opóźniający T_{mk} reprezentujący czas pomiaru miernika kontrolnego (τ_{MK}),
- blok opóźniający T_{im} reprezentujący opóźnienie wnoszone przez transmisję wyniku pomiaru do komputera (τ_{IM}),
- blok wzmocnienia E_m reprezentujący składową multiplikatywną błędą kalibratora (δ_K),

- blok stałej Ea i sumator reprezentujące składową addytywną błędu kalibratora (Δ_K).

4.3 Badanie symulacyjne odpowiedzi systemu otwartego na skok jednostkowy

Badania symulacyjne odpowiedzi systemu z kalibratorem kontrolnym na skok jednostkowy przeprowadzono wykorzystując model symulacyjny tego systemu przedstawiony na rys.4.3, przy pomocy napisanych przez autora pracy skryptów umieszczonych w dodatku A odzwierciedlających algorytm badań symulacyjnych przedstawiony na rys.4.2.

Badania przeprowadzono dla obiektów różniących się wartościami stałych czasowych kalibratora oraz wartościami czasu opóźnienia interfejsu kalibratora. W tabeli 4.1 przedstawiono wartości stałych czasowych T_{K1} i T_{K2} kalibratora oraz czasu opóźnienia interfejsu kalibratora τ_{IK} przyjęte do symulacji komputerowej, przy czym stała czasowa kalibratora $T_{K2} = \frac{T_{K1}}{10}$.

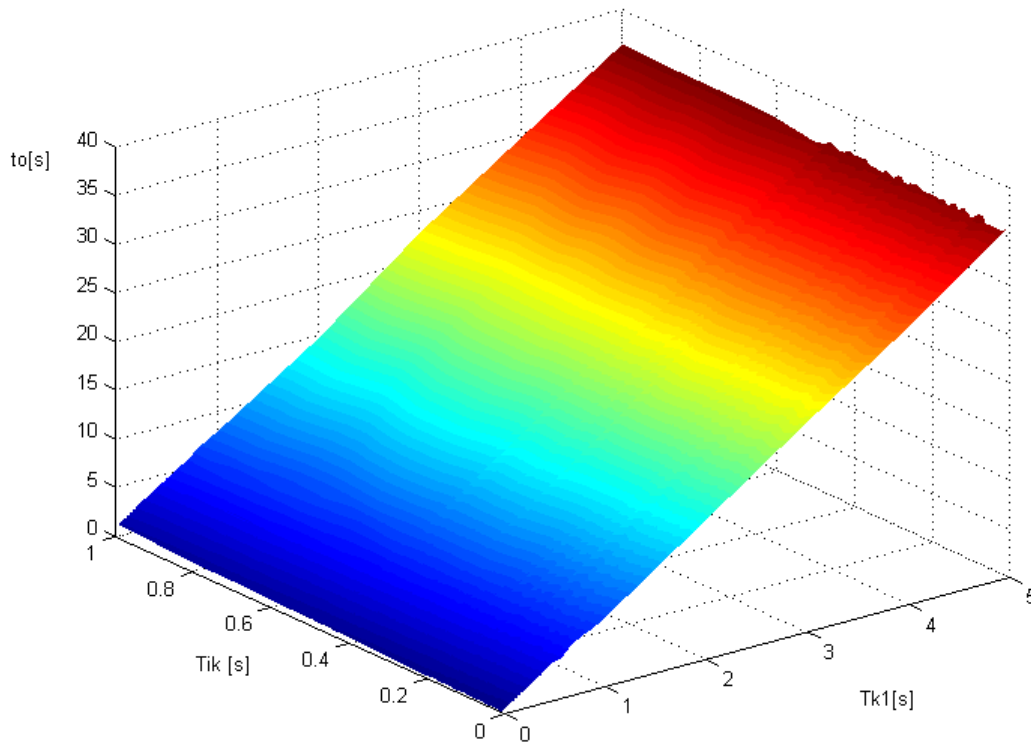
$$T_{K2} = \frac{T_{K1}}{10}.$$

Tabela 4.1. Zakresy wartości parametrów przyjętych do symulacji komputerowej

nazwa parametru	symbol	zakres
stała czasowa kalibratora	T_{K1}	0,01 s .. 5 s
stała czasowa kalibratora	T_{K2}	0,001 s .. 0,5 s
czas opóźnienia interfejsu kalibratora	τ_{IK}	0,001 s .. 1 s

Wartości czasu odpowiedzi t_o określono według wzoru (1.2) przy wartości błędu dopuszczalnego $\varepsilon = 0,1\%$ wartości nastawionej. Wartości przeregulowania p wyznaczono według wzoru (1.3).

Wyniki badań czasu odpowiedzi przedstawia rys.4.5. Na osiach poziomych opisano czas interfejsu kalibratora τ_{IK} oraz wartość stałej czasowej kalibratora T_{KI} . Wartości osi pionowej określają czas odpowiedzi t_o .



Rys.4.5. Czas odpowiedzi t_o w funkcji czasu opóźnienia interfejsu oraz stałych czasowych kalibratora

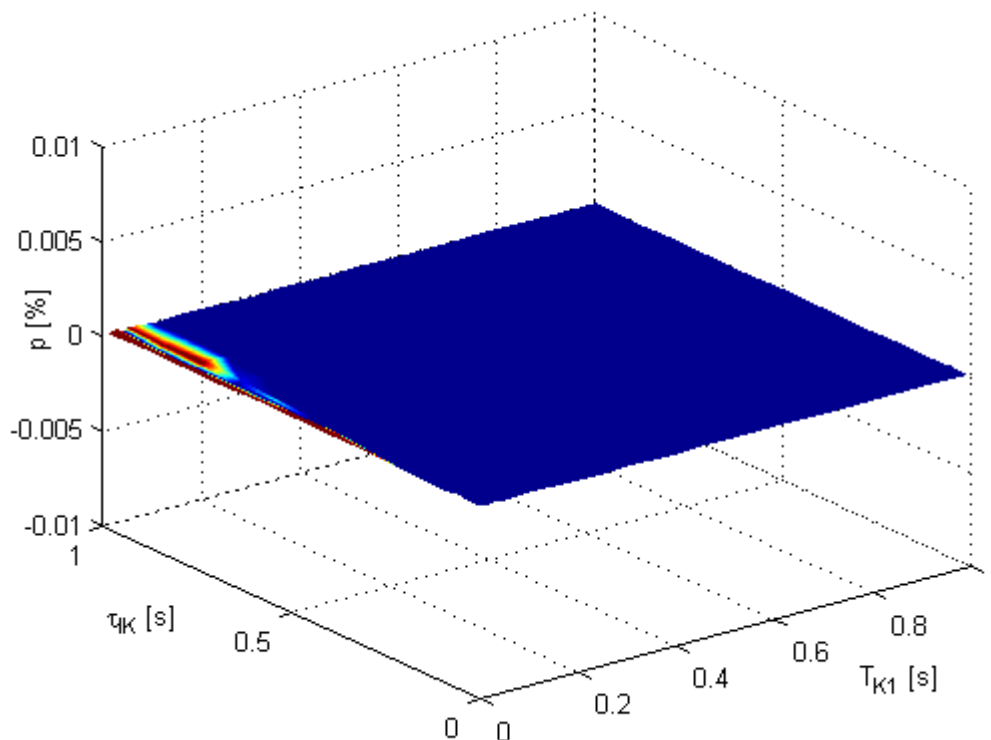
Czas odpowiedzi systemu otwartego jest wprost proporcjonalny do stałych czasowych kalibratora, a także wzrasta wraz ze wzrostem czasu przesyłu nastawy poprzez interfejs kalibratora. Na podstawie wyników symulacji wyznaczono empiryczną zależność czasu odpowiedzi od parametrów dynamicznych elementów składowych systemu otwartego i przedstawiono ją w postaci (4.1):

$$t_o = 7.12 \cdot T_{KI} + \tau_{IK} \quad (4.1)$$

gdzie: T_{KI} – stała czasowa kalibratora.
 τ_{IK} – opóźnienie równe czasowi przesyłu nastawy z komputera do kalibratora.

W powyższym wzorze wartości czasu odpowiedzi, stałej czasowej kalibratora oraz opóźnienia interfejsu kalibratora wyrażone są w sekundach.

Wyniki badań przeregulowania przedstawia rys.4.6. Na osiach poziomych opisano czas interfejsu kalibratora τ_{IK} oraz wartość stałej czasowej kalibratora T_{KI} . Na osi pionowej opisano przeregulowanie p .



Rys.4.6 Przeregulowanie w funkcji czasu interfejsu oraz stałych czasowych kalibratora

Wartości przeregulowania w całym zakresie badań były bardzo bliskie zero. Zauważalne na powyższym rysunku dodatnie przeregulowanie dla $T_{KI} \approx 0.01s$, i $\tau_{IK} > 0,3s$ spowodowane jest błędem symulacji wynikającym z wpływu długiego czasu symulacji uwzględniającego stosunkowo duży czas opóźnienia interfejsu w stosunku do małej stałej czasowej kalibratora. Objawia się to mniejszą rozdzielczością procesu symulacji, która prowadzi do większego błędu obliczeń wybranej metody symulacyjnej. W tym przypadku zastosowano, jako dokładniejszą, metodę obliczeń symulacyjnych - *ode15s (stiff/NDF)*.

4.4 Badanie możliwości poprawy właściwości dynamicznych systemu zamkniętego przez dobór charakterystyki regulatora całkującego

Badania symulacyjne odpowiedzi systemu z miernikiem kontrolnym na skok jednostkowy przeprowadzono wykorzystując model symulacyjny systemu zamkniętego przedstawiony na rys.4.4, przy pomocy napisanych przez autora pracy skryptów przestawionych w dodatku B, w których zaimplementowano algorytm badań symulacyjnych zobrazowany na rys.4.2.

Wartości czasu odpowiedzi t_o określono według wzoru (1.2) przy wartości błędu dopuszczalnego $\varepsilon = 0,1\%$ wartości nastawionej. Wartości przeregulowania p wyznaczono według wzoru (1.3).

Z uwagi na dużą liczbę parametrów wpływających na właściwości dynamiczne zamkniętego systemu odtwarzania napięć i prądów wprowadzono kilka zależności upraszczających procedury badań:

- określono dodatkowy parametr τ_M (czas opóźnienia pomiaru) będący sumą czasu opóźnienia miernika kontrolnego τ_{MK} i czasu opóźnienia interfejsu miernika kontrolnego τ_{IM} . Zastosowano to uproszczenie, ponieważ pomiar wartości wskazania kalibratora przez miernik kontrolny oraz przesył danych pomiarowych poprzez interfejs miernika do komputera następują po sobie w nierozłącznej sekwencji;
- parametry dynamiczne kalibratora powiązано zależnością $T_{K2} = T_{K1}/10$ wynikającą z budowy fizycznych urządzeń [7]. W trakcie badań posługiwano się dalej tylko parametrem T_{K1} , wartości parametru T_{K2} obliczane były automatycznie (według wyżej przyjętej zależności) przez skrypty zarządzające procesem symulacyjnym;
- przyjęto, że wartość składowej addytywnej błędu kalibratora jest dziesięciokrotnie mniejsza od wartości składowej multiplikatywnej odniesionej do wartości zakresu.

Badania właściwości dynamicznych systemu zamkniętego przeprowadzono wykonując badania zależności czasu odpowiedzi t_o oraz przeregulowania p w funkcji czasu opóźnienia pomiaru τ_M oraz stałej czasowej regulatora całkującego T_C , dla innych wartości przyjętych jako parametr. Badania podzielono na trzy etapy, w każdym wprowadzając kolejny parametr. W pierwszym etapie przeprowadzono badania systemu dla parametrycznie zmiennych wartości stałych czasowych zastosowanego kalibratora. W drugim etapie dodano jako parametr czas opóźnienia interfejsu kalibratora. Ostatni, trzeci etap miał na celu określenie wpływu wprowadzonych jako parametr wartości błędu wnoszonego przez kalibrator.

Etap I. Badania przebiegu zmienności funkcji: $t_o = f(\tau_M, T_C)$ oraz $p = f(\tau_M, T_C)$ przy sparаметryzowanych wartościach stałych czasowych kalibratora T_{K1} i T_{K2} i ustalonych wartościach innych parametrów systemu.

W tabeli 4.2 przedstawiono wartości parametrów dla których model systemu z miernikiem kontrolnym poddano badaniom symulacyjnym w pierwszym etapie.

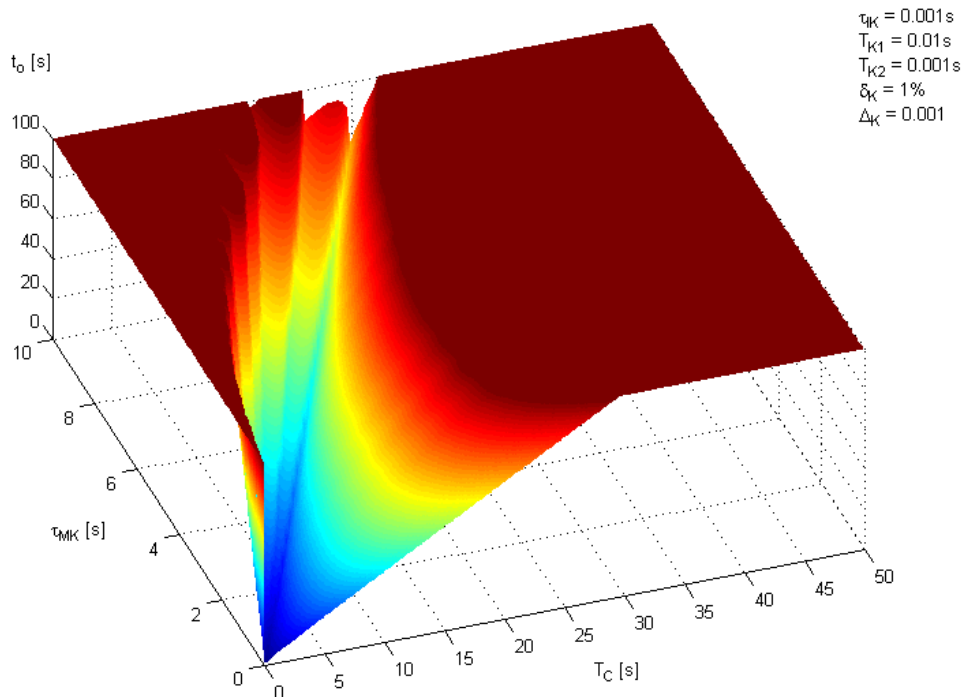
Tabela 4.2. Wartości parametrów dla badań symulacyjnych systemu zamkniętego (etap I).

Id. badania	Parametry zmienne				Parametry stałe		
	τ_M [s]	T_C [s]	T_{K1} [s]	T_{K2} [s]	τ_{IK} [s]	δ_K [%]	Δ_K
I-a	0,001..10	0,001..50	0,01	0,1	0,001	1	0,001
I-b			0,05	0,05			
I-c			0,1	0,01			
I-d			0,5	0,005			
I-e			1	0,001			

Pierwsza kolumna zawiera wprowadzony w celu porządkowym identyfikator badania. Cztery kolejne kolumny pod wspólną nazwą *parametry zmienne* zawierają wartości parametrów podlegających zmianie w czasie procesów symulacyjnych. Druga kolumna podaje zakres czasu opóźnienia pomiaru τ_M , którego wartość zmieniano w zakresie od 0,001s do 10s ze zmienną rozdzielczością w granicach od 0,001s do 0,1s. Trzecia kolumna zawiera zakres stałej czasowej T_C regulatora całkującego, której wartość zmieniano w zakresie od 0,001s do 50s ze zmienną rozdzielczością w granicach od 0,001s do 1s. Czwarta kolumna opisuje wartości stałej czasowej T_{K1} kalibratora, dla których wykonano badania w zakresie od 0,01s do 1s w pięciu reprezentatywnych punktach. Piąta kolumna zawiera wartości stałej czasowej T_{K2} kalibratora odpowiadające wcześniej zdefiniowanym wartościom stałej czasowej T_{K1} . Ostatnie trzy kolumny zawierają parametry o wartościach przyjętych w tym etapie badań jako stałe. Parametry te to: opóźnienie interfejsu kalibratora τ_{IK} , składowa multiplikatywna błędu kalibratora δ_K , oraz składowa addytywna błędu kalibratora Δ_K . Wartość tej ostatniej przyjęto w odniesieniu do nastawy N_K o wartości 1V dla napięcia i 1A dla prądu.

W niniejszym rozdziale pracy zilustrowano na wykresach wyniki badań (I-a, I-c, I-e) uznane za najbardziej obrazowe dla badanych zależności.

Wyniki badań czasu odpowiedzi $t_o = f(\tau_M, T_C)$ dla wartości parametrów przedstawionych w tabeli 4.2 (I-a $T_{KI}=0,01s$) ilustruje rys.4.7. Na osiach poziomych opisano czas pomiaru miernika kontrolnego τ_M oraz wartości stałej czasowej regulatora całkującego T_C . Na osi pionowej oznaczono wartości czasu odpowiedzi systemu t_o . Wartości pozostałych parametrów podane są na rysunku.

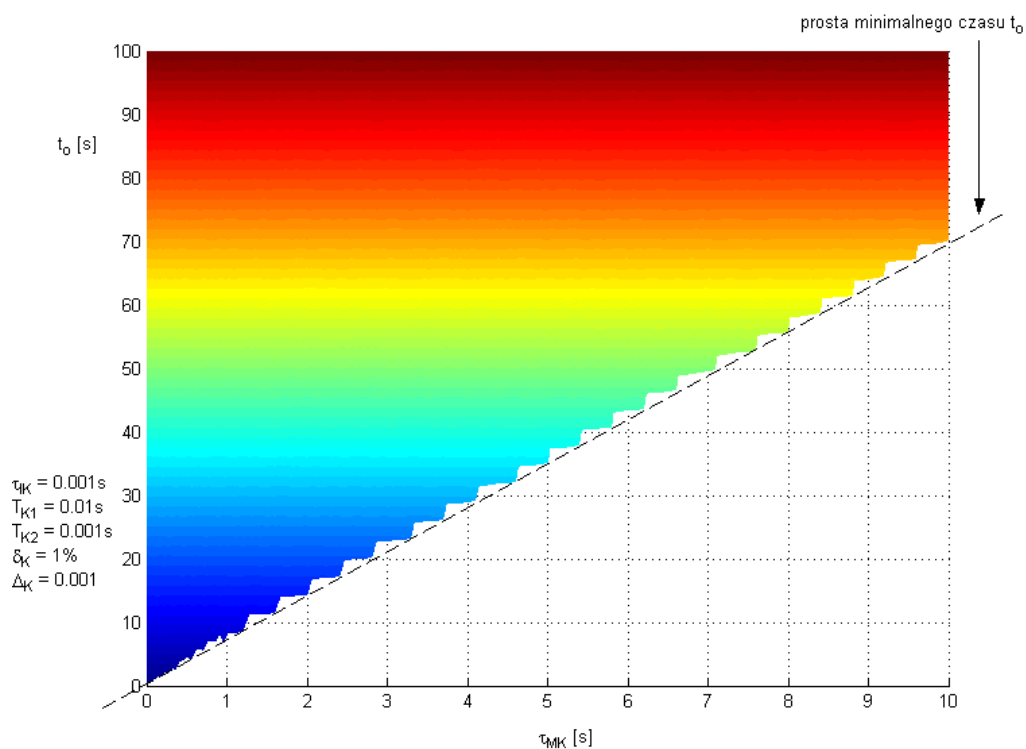


Rys.4.7. Czas odpowiedzi $t_o = f(\tau_M, T_C)$ dla $T_{KI}=0,01s$ (badanie I-a)

Na powyższym wykresie zaobserwować można, że wartości czasu odpowiedzi zależne są od wartości obydwu parametrów, i zależności te są nieliniowe. Proces symulacji ograniczono do badań zachowania systemu w czasie 100 s. Powodem tego ograniczenia były małe wartości parametrów T_{K1} i T_{K2} . Aby w pełni przeanalizować zachowanie systemu wykonano dodatkowo szereg symulacji obszarów ograniczonych płaszczyzną $t_o=100$ s w szerszej skali czasu i opisano we wnioskach. Pod względem warunków pracy systemu wyróżniono trzy obszary. Lewa część wykresu (część płaszczyzny w kolorze brązowym), to obszar, w którym system pracuje w stanie wzbudzenia lub w warunkach bliskich wzbudzeniu. Środkowa część wykresu w kolorze niebieskim to obszar, w którym obserwuje się względnie małe czasy odpowiedzi. Obszar ten stanowi przedmiot rozważań dalszej części pracy. Prawa

część wykresu to obszar, w którym układ pracuje stabilnie, jednak z uwagi na nieoptymalnie dobraną wartość stałej czasowej T_C regulatora całkującego, wartości czasu odpowiedzi systemu są względnie duże.

W środkowej części wykresu wyodrębnić można pewien obszar, dla którego można wyznaczyć liniową zależność czasu odpowiedzi od obydwu parametrów systemu. Łącząc odcinkami wartości minimalne czasu odpowiedzi wzdłuż kolejnych wartości czasu opóźnienia miernika kontrolnego otrzymano *prostą minimalnego czasu* t_o zilustrowaną na rys.4.8, który jest rzutem wykresu czasu odpowiedzi z rys.4.7 na płaszczyznę $\tau_M t_o$.



Rys. 4.8. Czas odpowiedzi $t_o = f(\tau_M, T_C)$ - rzut na płaszczyznę t_o, τ_M dla $T_{KI}=0,01s$ (I-a)

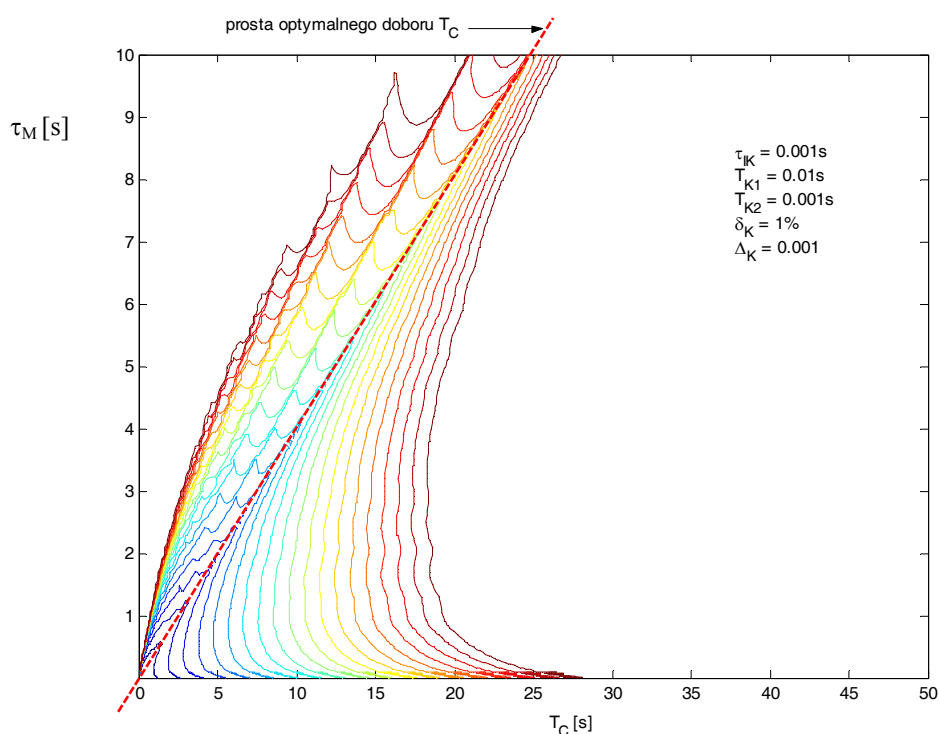
Wyznaczono równanie *prostej minimalnego czasu* t_o w postaci (4.2):

$$t_{O(MIN)} = 6,94 \cdot \tau_M + 0,64 \quad (4.2)$$

dla: $\tau_{IK} = 0,001s$, $T_{KI} = 0,01s$, $T_{K2} = 0,001s$, $\delta_K = 1\%$, $\Delta_K = 0,001$

Minimalne wartości czasu t_o uzyskiwane są tylko w przypadku doboru optymalnych wartości stałej czasowej regulatora całkującego T_C dla każdej wartości opóźnienia pomiaru τ_M .

Rys.4.9 przedstawia rzut poziomic wartości czasu odpowiedzi t_o na płaszczyznę poziomą τ_M, T_C . Kolory poziomic odzwierciedlają wartości czasu t_o zgodnie z rys.4.7.



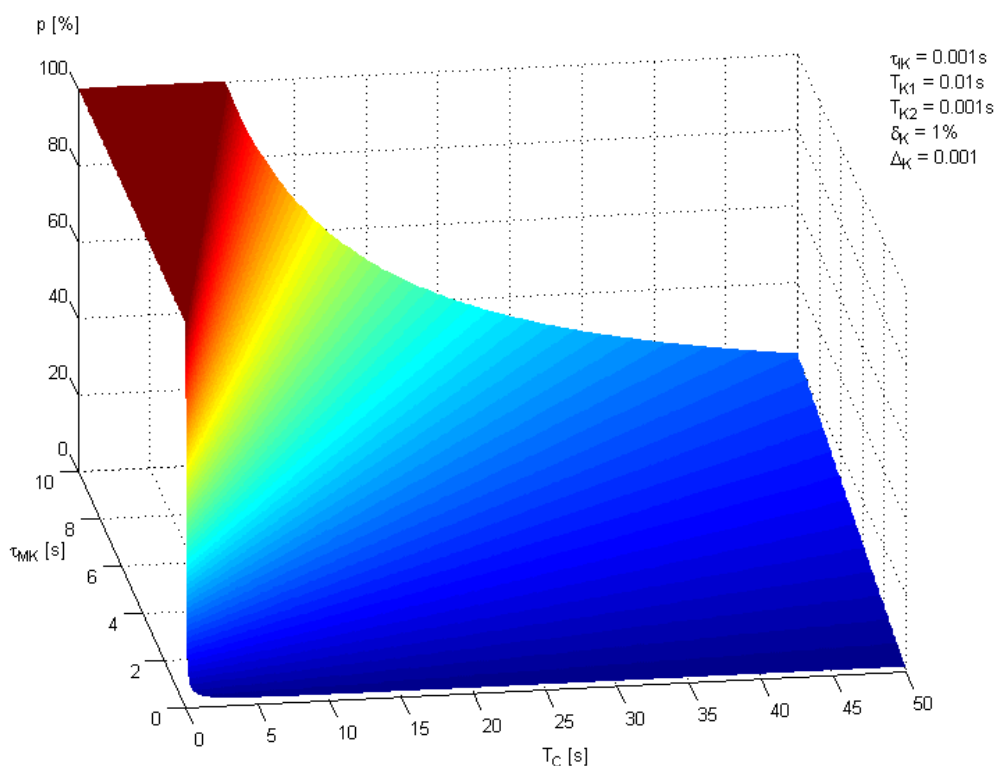
Rys. 4.9. Czas odpowiedzi $t_o = f(\tau_M, T_C)$ - widok poziomicowy t_o na płaszczyźnie $\tau_M T_C$

Na wykresie zauważyć można, że również w tej płaszczyźnie minimalne czasy odpowiedzi dla każdego czasu opóźnienia miernika kontrolnego τ_M układają się regularnie wzdłuż linii prostej oznaczonej na rysunku czerwoną przerywaną linią i opisaną jako *prosta optymalnego doboru T_C* . Dla tej prostej również wyznaczono równanie w postaci:

$$T_{C(OPT)} = 2,42 \cdot \tau_M + 0,14 \quad (4.3)$$

dla: $\tau_K = 0,001$ s, $T_{K1} = 0,01$ s, $T_{K2} = 0,001$ s, $\delta_K = 1\%$, $\Delta_K = 0,001$

Rys.4.10 przedstawia wyniki badań przeregulowania $p = f(\tau_M, T_C)$ dla wartości parametrów przedstawionych w tabeli 4.2 (I-a).



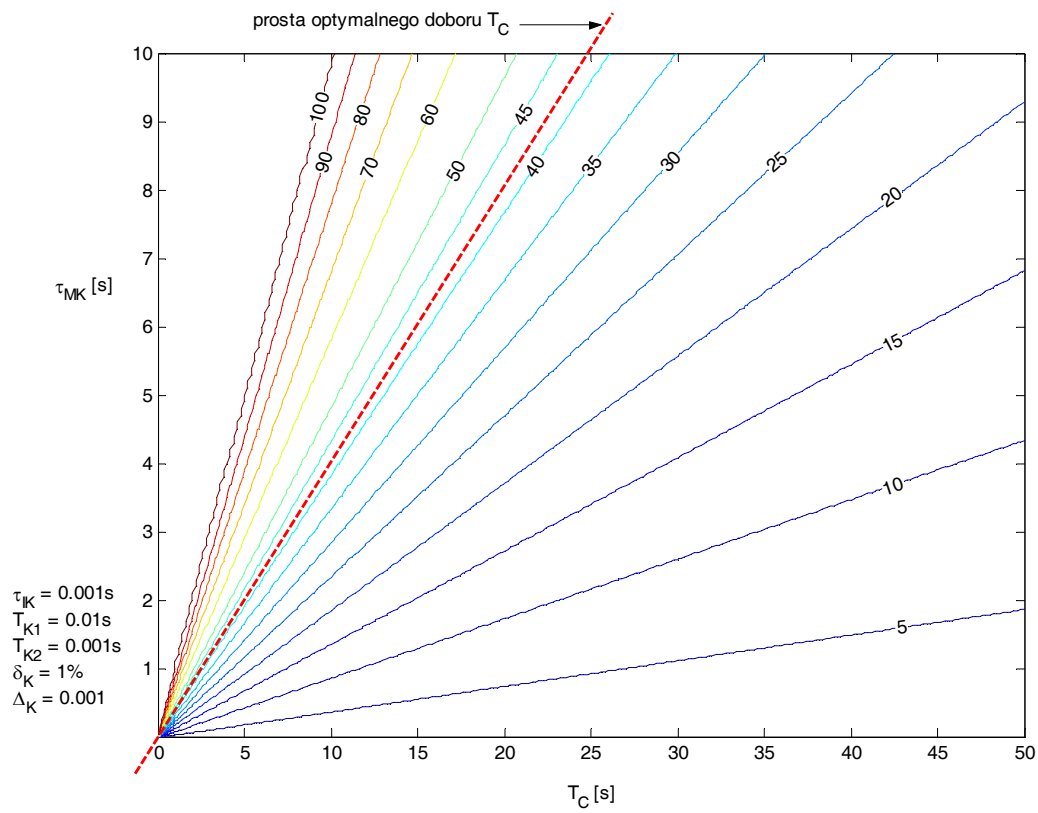
Rys.4.10. Przeregulowanie $p = f(\tau_M, T_C)$ dla $T_{KI}=0,01\text{ s}$ (I-a)

Na osiach poziomych opisano czas opóźnienia miernika kontrolnego τ_M oraz wartości stałej czasowej regulatora całkującego T_C . Na osi pionowej oznaczono wartości przeregulowania p . Wartości pozostałych parametrów podane są na rysunku.

Przedstawiony wykres $p = f(\tau_M, T_C)$ pokazuje wzrost wartości przeregulowania wraz ze wzrostem czasu opóźnienia miernika kontrolnego. Jednocześnie przeregulowanie zmniejsza się przy większych wartościach stałej czasowej regulatora całkującego. Obszar w lewej części rysunku (część płaszczyzny w kolorze brązowym) obejmuje wartości przeregulowania większe od 100% odpowiadające obszarom pracy systemu w warunkach wzbudzenia lub bliskich wzbudzeniu systemu.

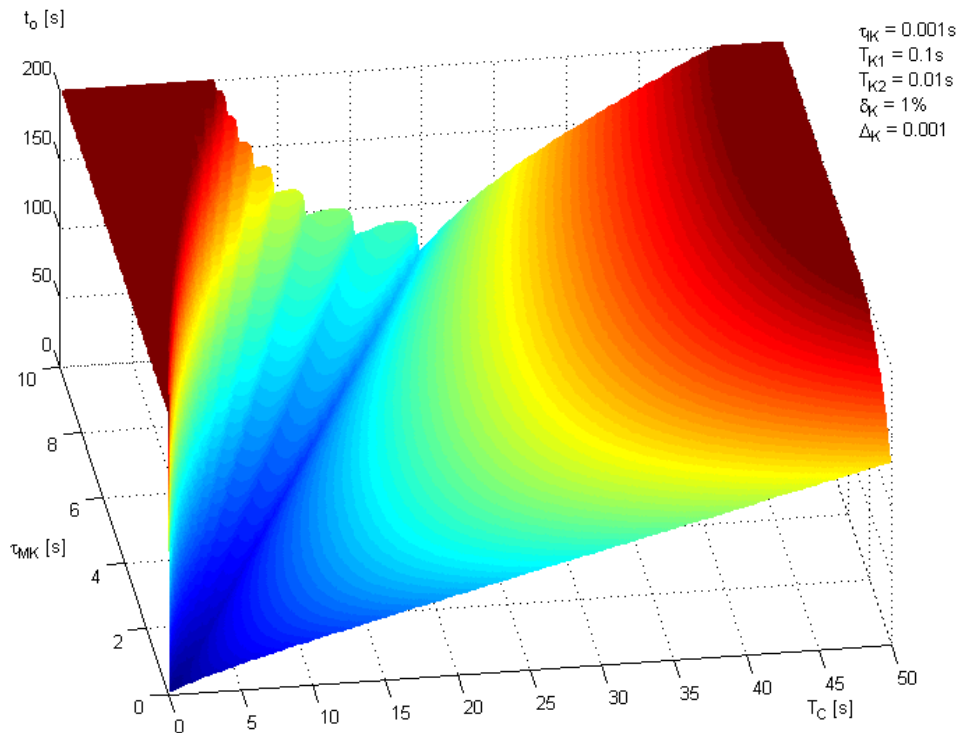
Rys.4.11 przedstawia rzut poziomic wartości przeregulowania p na płaszczyznę τ_M, T_C . Kolory poziomic odzwierciedlają wartości przeregulowania p . Na rysunku tym czerwoną przerywaną linią oznaczono przedstawioną wcześniej *prostą optymalnego doboru* T_C .

Zauważyć można, że dla wartości τ_M należących do tej prostej wartość przeregulowania jest względnie stała na poziomie 42%.



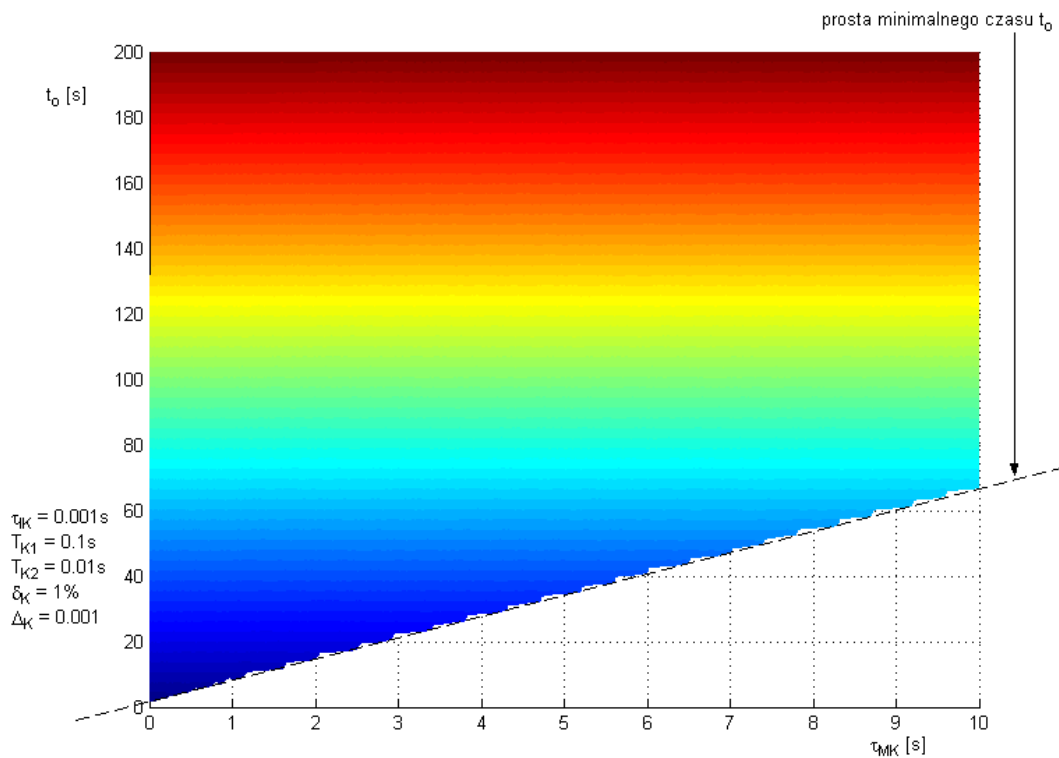
Rys.4.11. Przeregulowanie $p = f(\tau_M, T_C)$ - widok poziomicowy p na płaszczyźnie τ_M, T_C

Wyniki badań czasu odpowiedzi $t_o = f(\tau_M, T_C)$ dla wartości parametrów przedstawionych w tabeli 4.2 (I-c $T_{KI}=0,1s$) ilustruje rys.4.12. Na osiach poziomych opisano czas opóźnienia miernika kontrolnego τ_M oraz wartości stałej czasowej regulatora całkującego T_C . Na osi pionowej oznaczono wartości czasu odpowiedzi systemu t_o . Wartości pozostałych parametrów podane są w prawej części rysunku.



Rys.4.12. Czas odpowiedzi $t_o = f(\tau_M, T_C)$ dla $T_{KI}=0,1s$ (I-c)

Większe wartości parametrów T_{K1} i T_{K2} pozwoliły w tym przypadku na zwiększenie czasu symulacji. Z tego względu zakres obserwowanych czasów odpowiedzi zwiększono do 200s. Wyniki przedstawione na powyższym rysunku pokazują, że system zachowuje się podobnie jak przy poprzednio opisanych badaniach dla $T_{KI}=0,01s$. Zauważono, że minimalne wartości czasu odpowiedzi dla kolejnych wartości czasu opóźnienia miernika również układają się wzdłuż linii prostej. Na rys.4.13 przedstawiono rzut wartości czasu odpowiedzi t_o na płaszczyznę τ_M, T_C , na którym oznaczono wspomnianą prostą czarną przerywaną linią i opisano jako *prosta minimalnego czasu* t_o .



Rys.4.13. Czas odpowiedzi $t_o = f(\tau_M, T_C)$ - rzut na płaszczyznę t_o, τ_M (I-c)

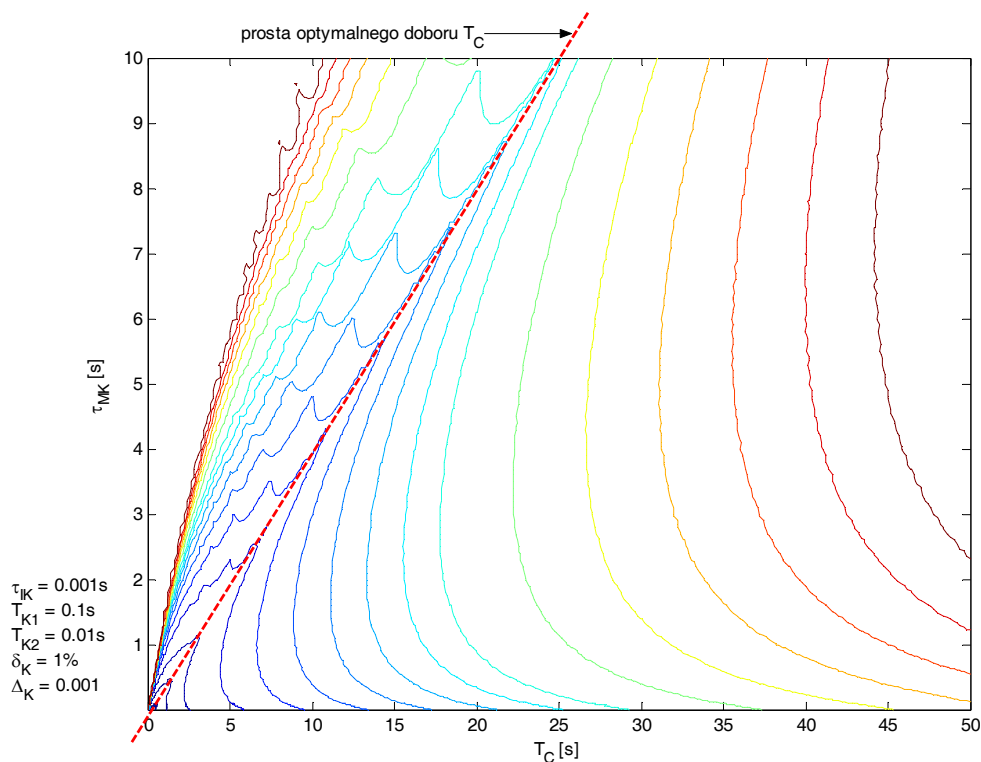
Wyznaczono równanie *prostej minimalnego czasu* t_o w postaci (4.4).

$$t_{O(MIN)} = 6,51 \cdot \tau_M + 1,92 \tag{4.4}$$

dla: $\tau_{IK} = 0,001 \text{ s}$, $T_{KI} = 0,1 \text{ s}$, $T_{K2} = 0,01 \text{ s}$, $\delta_K = 1\%$, $\Delta_K = 0,001$

Minimalne wartości czasu t_o uzyskiwane są tylko w przypadku doboru optymalnych wartości stałej czasowej T_C regulatora całkującego dla każdej wartości opóźnienia pomiaru τ_M .

Rys.4.14 przedstawia rzut poziomoc wartości czasu odpowiedzi t_o na płaszczyznę poziomą τ_M, T_C . Kolory poziomoc odzwierciedlają wartości t_o zgodnie z rys.4.12.



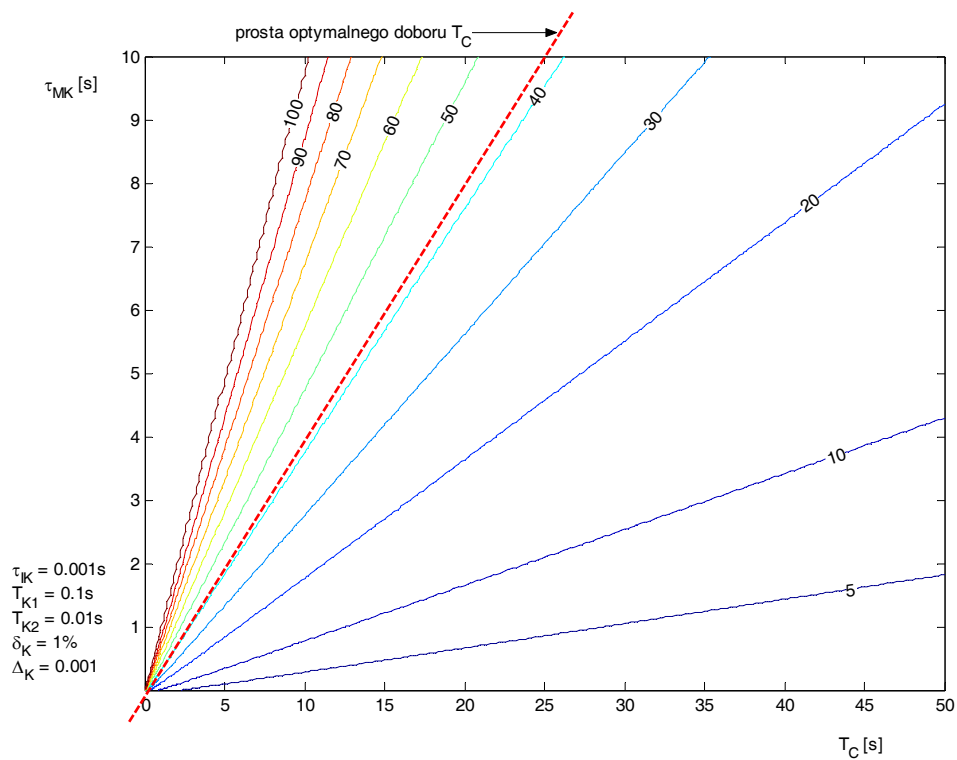
Rys 4.14. Czas odpowiedzi $t_o = f(\tau_M, T_C)$ - widok poziomicowy t_o na płaszczyźnie τ_M, T_C

Podobnie jak poprzednio, również w tej płaszczyźnie wartości minimalnych czasów odpowiedzi układają się wzdłuż linii prostej oznaczonej na powyższym rysunku czerwoną przerywaną linią i opisanej jako *prosta optymalnego doboru T_C* , dla której w tym przypadku wyznaczono równanie (4.5):

$$T_{C(OPT)} = 2,42 \cdot \tau_M + 0,31 \quad (4.5)$$

dla: $\tau_{IK} = 0,001\text{ s}$, $T_{K1} = 0,1\text{ s}$, $T_{K2} = 0,01\text{ s}$, $\delta_K = 1\%$, $\Delta_K = 0,001$

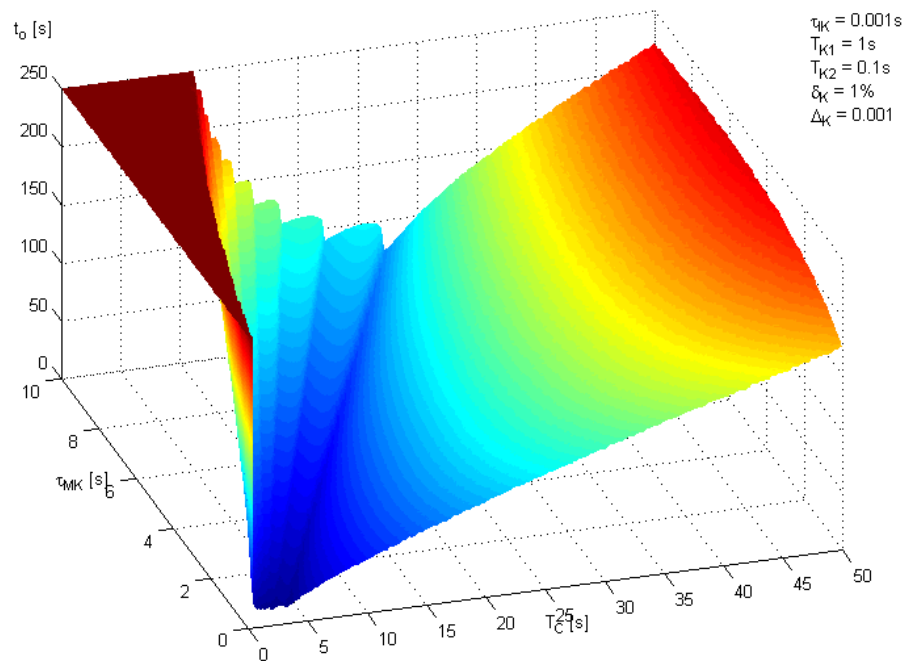
W stosunku do prostej opisanej równaniem (4.3) prosta opisana równaniem (4.5) charakteryzuje się nieco mniejszym kątem nachylenia, i znacząco większą składową stałą, z czego wnioskować można iż dobór optymalnej wartości T_C może być liniowo zależny od stałych czasowych T_{K1} i T_{K2} kalibratora.



Rys.4.15. Przeregulowanie $p = f(\tau_{MK}, T_C)$ - widok poziomicowy p na płaszczyźnie $\tau_{MK} T_C$

W czasie analizy wyników badań przeregulowania, przedstawionych na rys.4.15 stwierdzono duże podobieństwo do poprzednich wyników, z tą różnicą, że w dolnej części skali τ_M (dla wartości $\tau_M \approx 0,1$ s), *prosta optymalnego doboru T_C* przecina się z poziomą przeregulowania o wartości 30%.

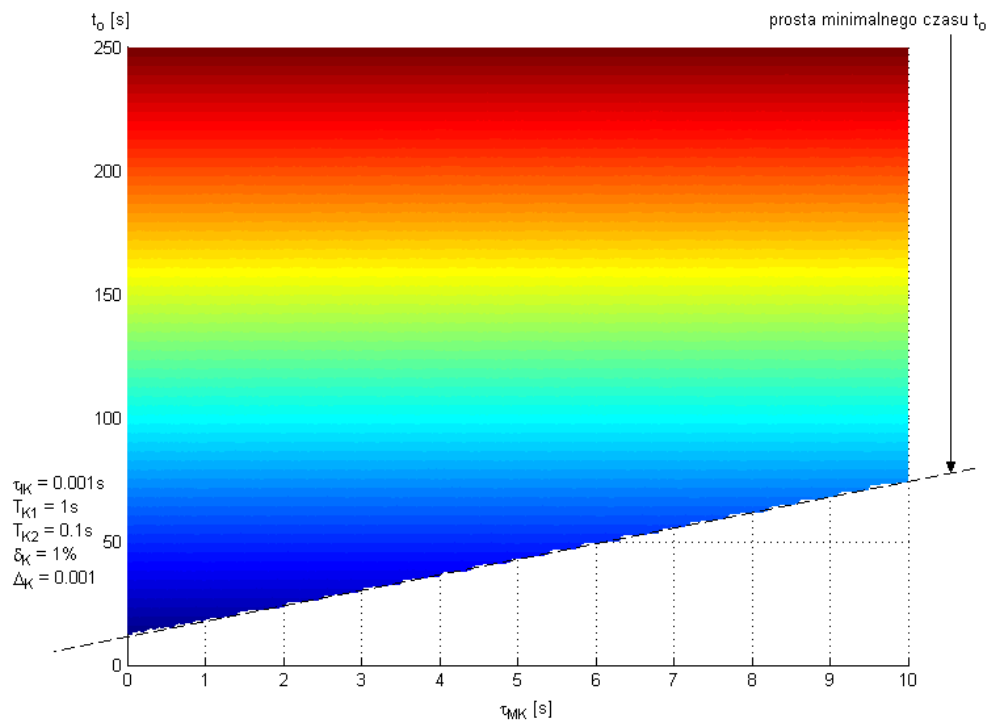
Wyniki badań czasu odpowiedzi $t_o = f(\tau_M, T_C)$ dla wartości parametrów przedstawionych w tabeli 4.2 (I-e $T_{KI}=1s$) ilustruje rys.4.16. Na osiach poziomych opisano czas pomiaru τ_M oraz wartości stałej czasowej regulatora całkującego T_C . Na osi pionowej oznaczono wartości czasu odpowiedzi systemu t_o . Wartości pozostałych parametrów podane są w prawej części rysunku.



Rys.4.16. Czas odpowiedzi $t_o = f(\tau_M, T_C)$ dla $T_{KI}=1s$ (badanie I-e)

Zakres czasowy badań ograniczono w tym przypadku do wartości 250 s, co pozwoliło na całościowe spojrzenie na prawą część wykresu, w której system pracuje stabilnie, lecz czasy odpowiedzi są większe od minimalnych dla danego czasu pomiaru τ_M z uwagi na nieoptymalnie dobrane wartości stałej czasowej regulatora całkującego. Wartości czasu odpowiedzi w lewej części wykresu (płaszczyzna w kolorze brązowym) wybiegają poza 250s. Jest to obszar, w którym system pracuje w stanie wzbudzenia, lub w warunkach zbliżonych do wzbudzenia, a więc nie osiąga stabilnej wartości ustalonej na wyjściu systemu. Tym razem środkowa część wykresu (obszar w kolorze niebieskim) jest szersza, co oznacza mniejszą czułość czasu odpowiedzi systemu na niedokładności przy doborze optymalnej wartości stałej

czasowej regulatora całkującego. Zależność minimalnych czasów odpowiedzi od czasu pomiaru zastosowanego miernika kontrolnego i jego interfejsu przedstawiona jest na rys.4.17.



Rys.4.17. Czas odpowiedzi $t_o = f(\tau_M, T_C)$ - rzut na płaszczyznę t_o, τ_M (badanie I-e)

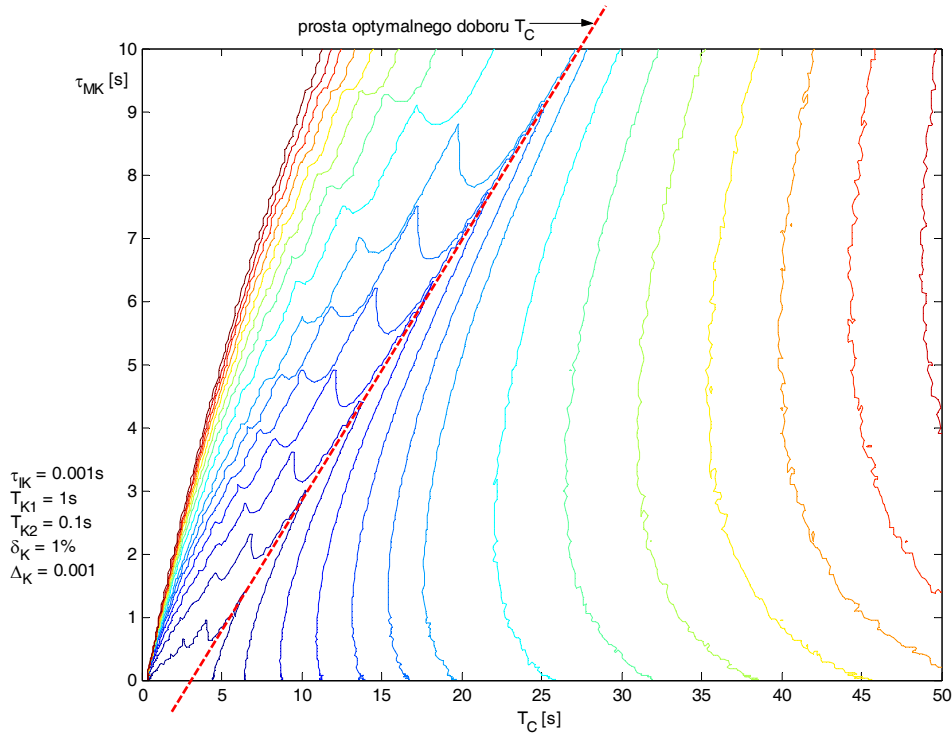
Rysunek ten przedstawia rzut wykresu czasu odpowiedzi z rys.4.16 na płaszczyznę pionową τ_M, t_o . Na wykresie widoczna jest liniowa zależność minimalnych wartości czasu odpowiedzi t_o od czasu pomiaru τ_M , jednak wartości te są wyższe od obserwowanych na poprzednich wykresach (rys. 4.8 i 4.13) o stosunkowo dużą wartość stałą, przy niewielkiej zmianie kąta nachylenia *prostej minimalnego czasu t_o* , której równanie przedstawia zależność (4.6).

$$t_{O(MIN)} = 6,17 \cdot \tau_M + 12,17 \quad (4.6)$$

dla: $\tau_{IK} = 0,001 \text{ s}$, $T_{KI} = 1 \text{ s}$, $T_{K2} = 0,1 \text{ s}$, $\delta_K = 1\%$, $\Delta_K = 0,001$

Rys.4.18 przedstawia rzut poziomicy wartości czasu odpowiedzi t_o na płaszczyznę poziomą $\tau_{MK} T_C$. Kolory poziomicy odzwierciedlają wartości t_o zgodnie z rys.4.16. Wartości stałej czasowej T_C regulatora całkującego, przy których obserwuje się występowanie

minimalnych wartości czasu odpowiedzi t_o przebiegają na rys 4.18 wzdłuż oznaczonej czerwoną przerywaną linią *prostej optymalnego doboru* T_C .



Rys.4.18. Czas odpowiedzi $t_o = f(\tau_M, T_C)$ - widok poziomicowy t_o na płaszczyźnie τ_M, T_C

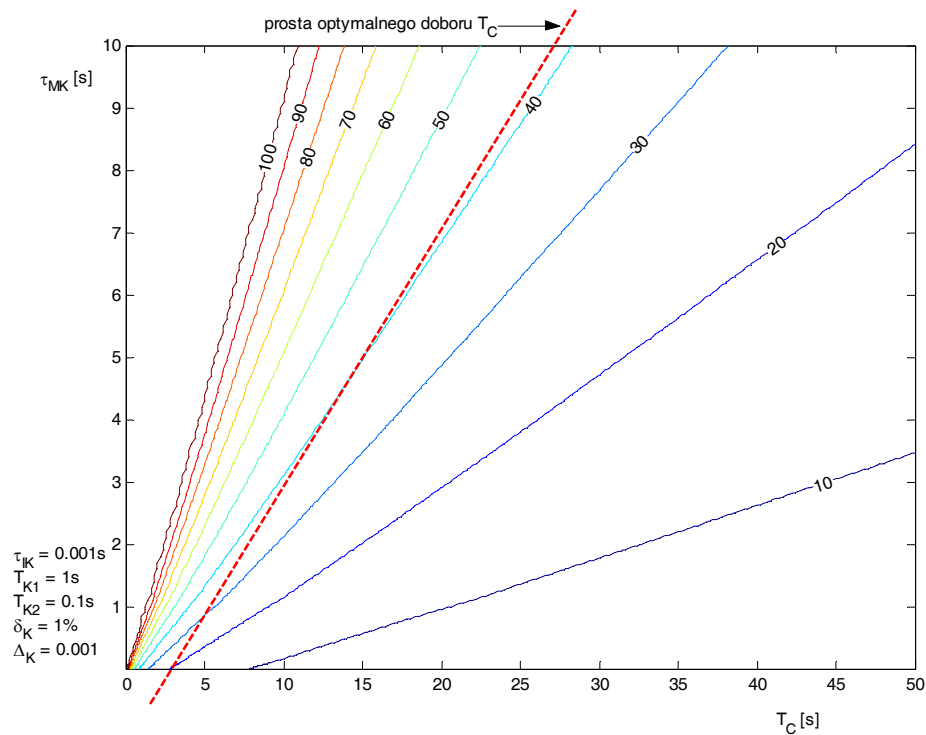
Również w tym przypadku dla *prostej optymalnego doboru* T_C wyznaczono równanie w postaci (4.7):

$$T_{C(OPT)} = 2,42 \cdot \tau_M + 3,16 \quad (4.7)$$

dla: $\tau_{IK} = 0,001\text{ s}$, $T_{K1} = 1\text{ s}$, $T_{K2} = 0,1\text{ s}$, $\delta_K = 1\%$, $\Delta_K = 0,001$

W porównaniu do poprzednich równań opisujących zależność $T_{C(OPT)} = f(\tau_M)$ wyraźny w tym przypadku jest duży wzrost składowej stałej przy niewielkim spadku współczynnika nachylenia *prostej optymalnego doboru* T_C .

Rys 4.19 przedstawia wyniki badań przeregulowania $p = f(\tau_M, T_C)$ dla wartości parametrów przedstawionych w tabeli 4.2 (I-e). Wyniki te są przedstawione w postaci rzutu poziomic wartości przeregulowania p na płaszczyznę τ_M, T_C .



Rys.4.19. Przeregulowanie $p = f(\tau_M, T_C)$ - widok poziomicowy p na płaszczyźnie τ_M, T_C

Na powyższym rysunku czerwoną przerywaną linią oznaczono *prostą optymalnego doboru T_C* . Zauważyć można, że dla wartości stałej czasowej T_C regulatora całkującego należących do tej prostej wartość przeregulowania wzrasta wraz ze wzrostem czasu pomiaru. Wzrost ten jest szczególnie widoczny w dla małych wartości czasu pomiaru.

Porównując powyższe wyniki zauważono, iż wartości przeregulowania korelujące z minimalnymi czasami odpowiedzi zależne są od stosunku stałej czasowej kalibratora i czasu pomiaru. Im szybszy jest pomiar w stosunku do czasu ustalania wyjścia kalibratora tym mniejsze wartości przeregulowania towarzyszą minimalnemu czasowi odpowiedzi systemu.

Etap II. Badania przebiegu zmienności funkcji: $t_o = f(\tau_M, T_C)$ oraz $p = f(\tau_M, T_C)$ przy sparametryzowanych wartościach: stałych czasowych kalibratora T_{K1} i T_{K2} oraz czasu opóźnienia interfejsu kalibratora τ_{IK} dla ustalonych wartości składowych błędu kalibratora.

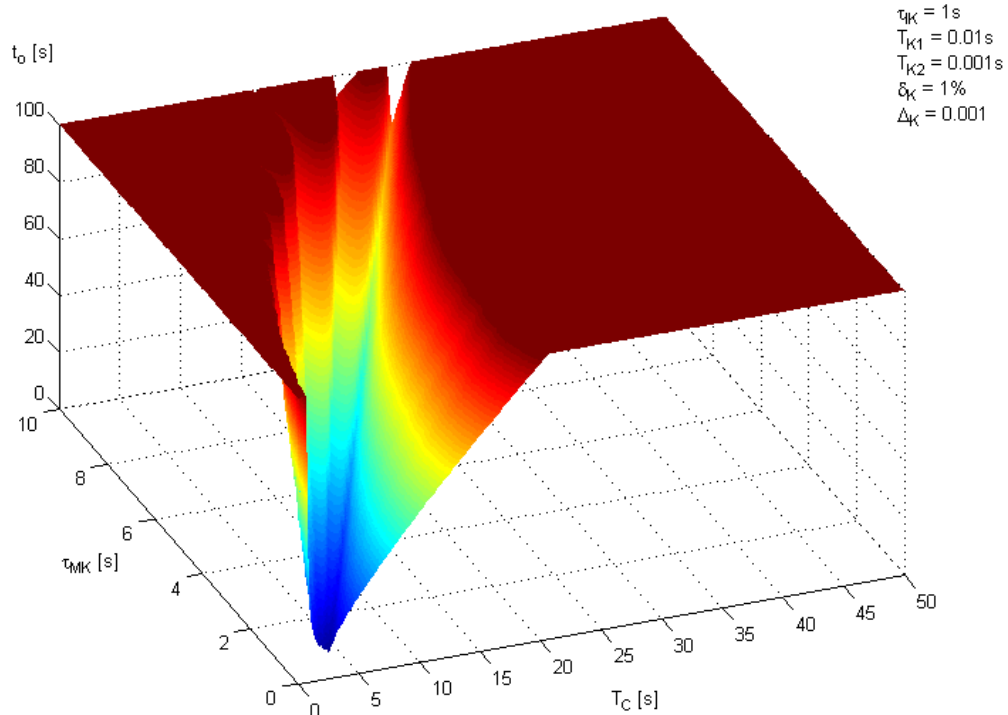
Tabela 4.3 przedstawia wartości parametrów dla których zachowanie systemu poddano badaniom symulacyjnym w etapie II.

Tabela 4.3. Wartości parametrów dla badań symulacyjnych systemu zamkniętego (etap II).

Parametry zmienne								Parametry stałe	
τ_M [s]	T_C [s]	T_{K1} [s]	T_{K2} [s]	τ_{IK} [s]				δ_K [%]	Δ_K
				0,001	0,01	0,1	1		
od 0,001 do 10	od 0,001 do 50	0,01	0,001	I-a *	II-a1	II-a2	II-a3 **	1	0,001
		0,05	0,005	I-b	II-b1	II-b2	II-b3		
		0,1	0,01	I-c *	II-c1	II-c2	II-c3		
		0,5	0,05	I-d	II-d1	II-d2	II-d3		
		1	0,1	I-e *	II-e1	II-e2	II-e3 **		
Identyfikator badania									

W tabeli, dla łatwiejszej identyfikacji zestawów parametrów poddanych badaniom *identyfikator badania* umieszczono w miejscach przecięcia parametrów czasowych kalibratora i czasu opóźnienia interfejsu kalibratora. Pojedynczą gwiazdką zaznaczono badania przedstawione w I etapie. W II etapie przeanalizowano wyniki badań oznaczonych identyfikatorem II, i zilustrowano na wykresach dwa reprezentatywne wyniki o identyfikatorach II-a3 i II-e3 oznaczone w tabeli dwoma gwiazdkami.

Wyniki badań czasu odpowiedzi $t_o = f(\tau_M, T_C)$ dla wartości parametrów przedstawionych w tabeli 4.3 (II-a3) ilustruje rys.4.20.

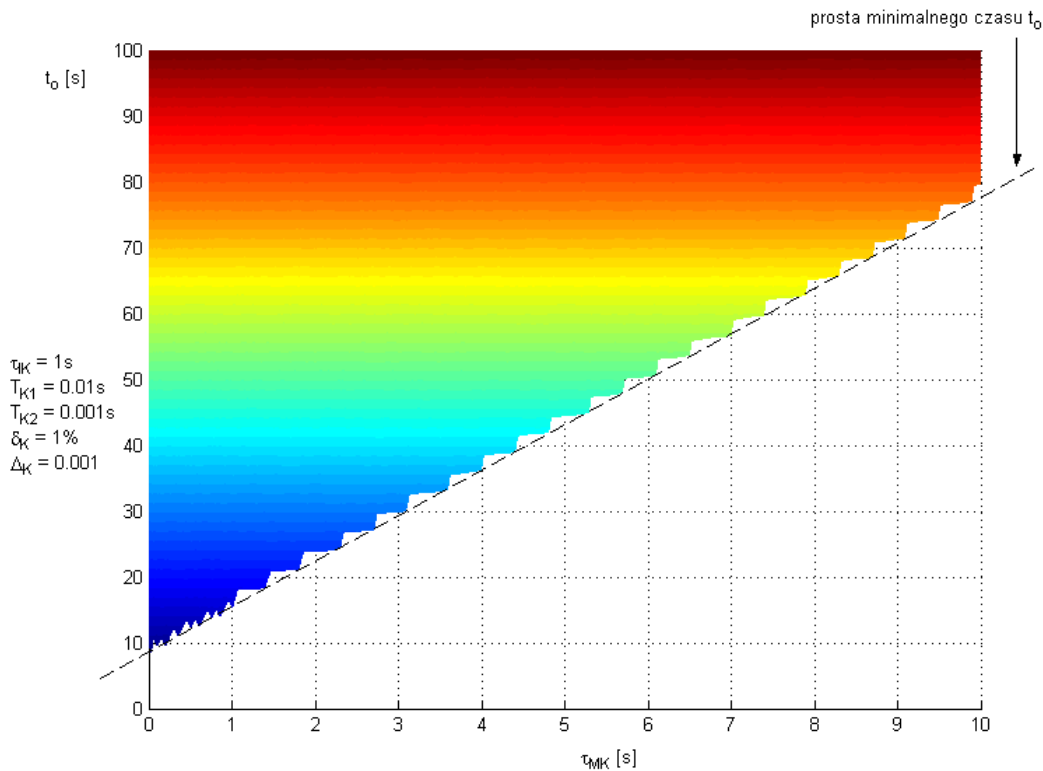


Rys.4.20. Czas odpowiedzi $t_o = f(\tau_M, T_C)$ (II-a3)

Na osiach poziomych opisano czas pomiaru τ_M oraz wartości stałej czasowej T_C regulatora całkującego. Na osi pionowej opisano wartości czasu odpowiedzi t_o systemu. Wartości pozostałych parametrów podane są w prawej części rysunku.

Z uwagi na małą wartość stałych czasowych kalibratora czas symulacji systemu ograniczono do wartości 100s.

Na powyższym rysunku wyraźnie widoczna jest silna zależność czasu odpowiedzi systemu od dokładności doboru optymalnej stałej czasowej T_C regulatora całkującego.



Rys.4.21. Czas odpowiedzi $t_o = f(\tau_M, T_C)$ - rzut na płaszczyznę t_o, τ_M (II-a3)

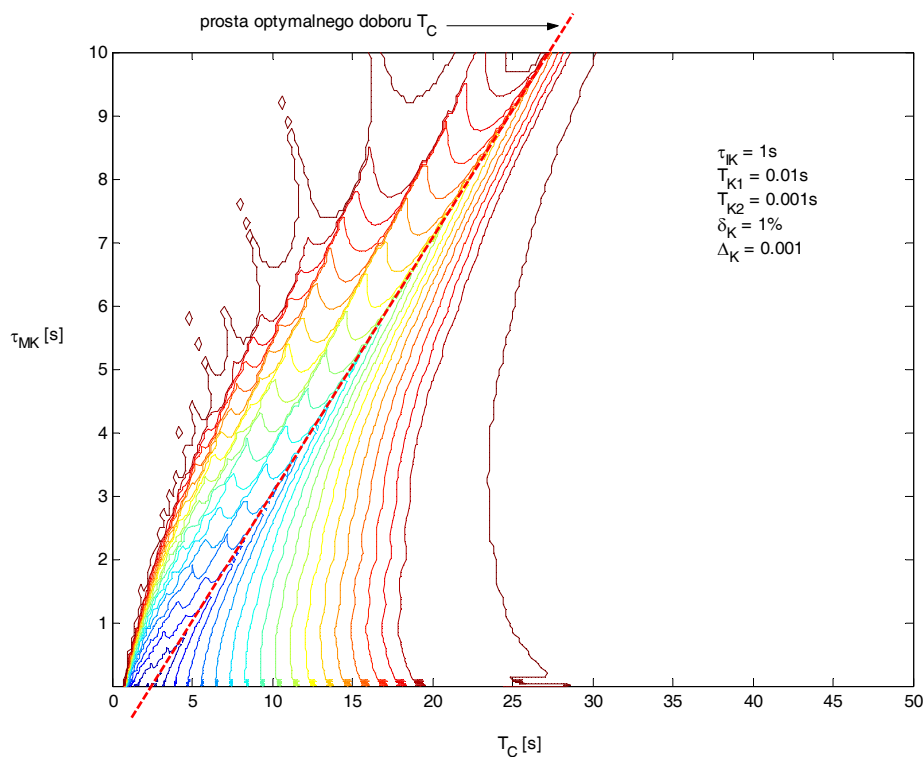
Na rys.4.21, będącym rzutem wykresu czasu odpowiedzi z rys.4.20 na płaszczyznę τ_M, t_o , przedstawiono *prostą minimalnego czasu t_o* , dla której w tym przypadku wyznaczono równanie w postaci (4.8).

$$t_{O(MIN)} = 6,94 \cdot \tau_M + 8,60 \quad (4.8)$$

dla: $\tau_{IK} = 1 \text{ s}$, $T_{K1} = 0,01 \text{ s}$, $T_{K2} = 0,001 \text{ s}$, $\delta_K = 1\%$, $\Delta_K = 0,001$

Porównując z równaniem analogicznej prostej (4.2) wyznaczonej dla badań I-a (dla $\tau_{IK} = 0,001 \text{ s}$ i tych samych wartości innych parametrów systemu) zauważono przesunięcie wartości czasu odpowiedzi o wartość stałą bez zmiany kąta nachylenia do osi τ_M .

Rys.4.22 przedstawia rzut poziomic wartości czasu odpowiedzi t_o na płaszczyznę poziomą τ_M, T_C .



Rys.4.22. Czas odpowiedzi $t_o = f(\tau_M, T_C)$ - widok poziomicowy t_o na płaszczyźnie τ_M, T_C

Podobnie jak w przypadku poprzednio analizowanych wyników badań, wartości stałej czasowej T_C regulatora całkującego odpowiadające minimalnym wartościom czasu odpowiedzi t_o (dla każdego czasu pomiaru τ_M) uszeregowane są w linii prostej pokazanej na powyższym rysunku w postaci czerwonej przerywanej linii.

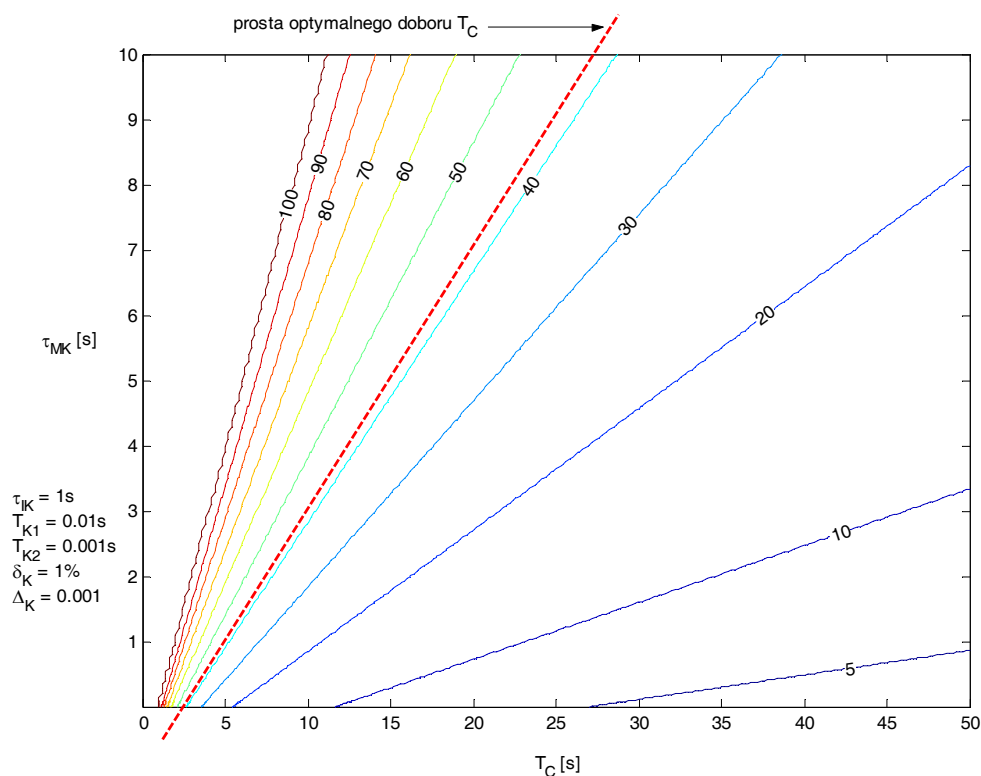
Dla tej *prostej optymalnego doboru* T_C wyznaczono równanie w postaci (4.9):

$$T_{C(OPT)} = 2,422 \cdot \tau_M + 2,40 \quad (4.9)$$

dla: $\tau_{IK} = 1 \text{ s}$, $T_{K1} = 0,01 \text{ s}$, $T_{K2} = 0,001 \text{ s}$, $\delta_K = 1\%$, $\Delta_K = 0,001$

I w tym przypadku, analizując równania (4.9) i (4.3) stwierdzono zwiększenie składowej stałej równania wraz ze zwiększeniem czasu opóźnienia τ_{IK} interfejsu kalibratora, przy niemal niezauważalnej zmianie współczynnika multiplikatywnego, która może wynikać z błędów badań symulacyjnych.

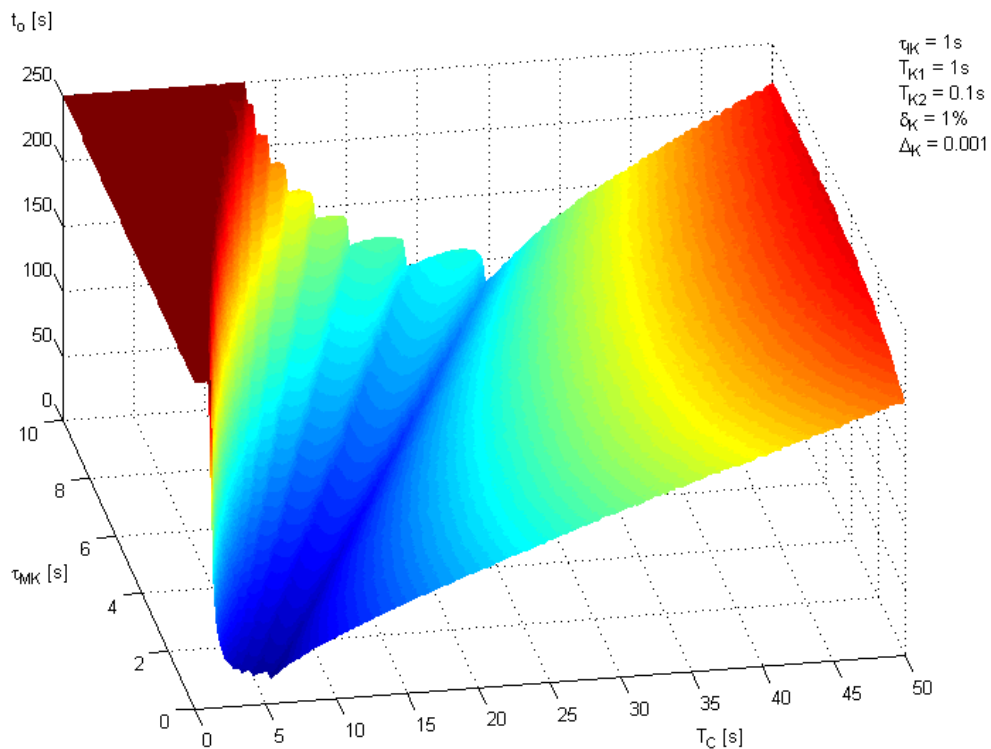
Rys.4.23 ilustruje wyniki badań przeregulowania $p = f(\tau_M, T_C)$ dla wartości parametrów przedstawionych w tabeli 4.3 (II-a3). Wyniki te przedstawione są w postaci rzutu poziomic wartości przeregulowania p na płaszczyznę poziomą τ_M, T_C . Na osiach poziomych opisano czas pomiaru τ_M miernika kontrolnego i jego interfejsu oraz wartości stałej czasowej T_C regulatora całkującego.



Rys.4.23. Przeregulowanie $p = f(\tau_M, T_C)$ - widok poziomicowy p na płaszczyźnie τ_M, T_C

Na rysunku, czerwoną przerywaną linią oznaczono przedstawioną wcześniej *prostą optymalnego doboru* T_C . Zauważyć można, że dla wartości T_C należących do tej prostej wartość przeregulowania pozostaje względnie stała (na poziomie 43%) w całym zakresie τ_M . W porównaniu z wynikami badań dla szybszego interfejsu kalibratora (I-a) zauważyć można przesunięcie rozkładu wartości przeregulowania w stronę większych wartości T_C o wartość zbliżoną do przyrostu składowej stałej między zależnościami (4.3) i (4.9) (czyli ok. 2,45s), a także w stronę ujemnych wartości τ_M o wartość proporcjonalną do przyrostu czasu interfejsu kalibratora (ok. 1s).

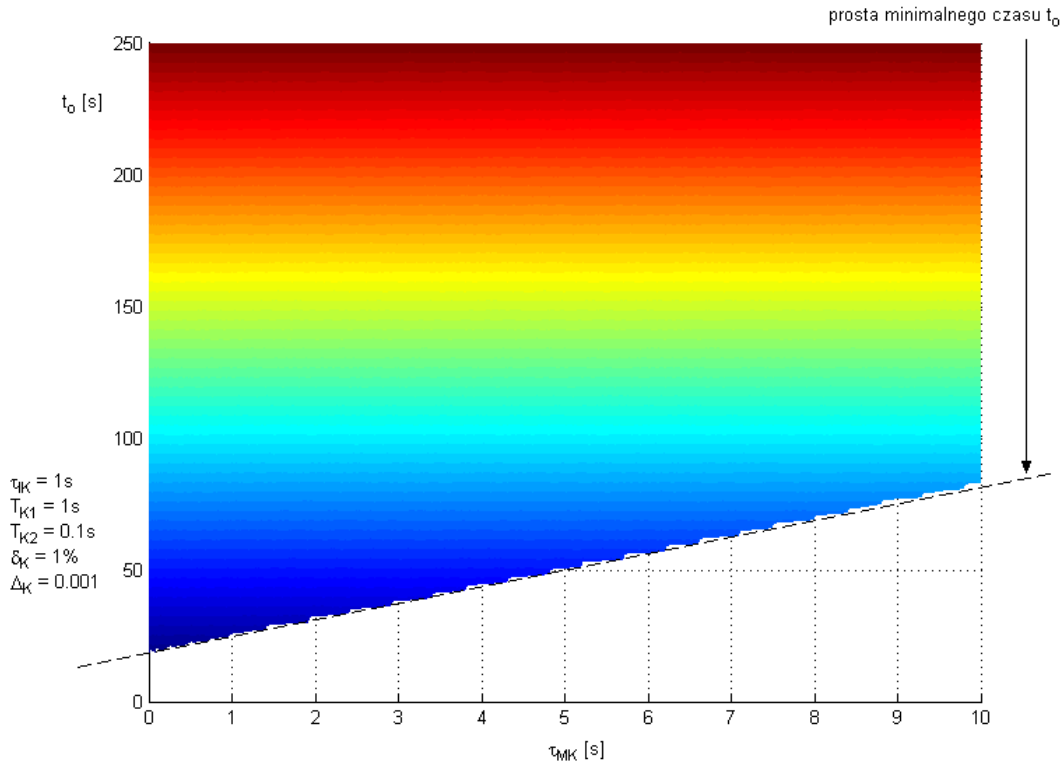
Wyniki badań czasu odpowiedzi $t_o = f(\tau_M, T_C)$ dla wartości parametrów przedstawionych w tabeli 4.3 (II-e3) ilustruje rys.4.24.



Rys.4.24. Czas odpowiedzi $t_o = f(\tau_M, T_C)$ (II-e3)

Na osiach poziomych opisano wartości czasu pomiaru τ_M oraz wartości stałej czasowej T_C regulatora całkującego. Na osi pionowej opisano wartości czasu odpowiedzi t_o systemu. Wartości pozostałych parametrów podane są w prawej części rysunku.

Na uwagę zasługuje stromość wykresu w pobliżu punktów leżących na *prostej optymalnego doboru* T_C . Właściwość ta świadczy o czułości czasu odpowiedzi systemu na odchylenie przy doborze optymalnej wartości T_C . Kształt wykresu w otoczeniu tej prostej pokazuje, że w przypadku niedopasowania T_C , w granicach $\pm 20\%$ w stosunku do wartości należącej do *prostej optymalnego doboru* T_C , wartość czasu odpowiedzi zwiększy się, w stosunku do wartości minimalnej o wartość nie większą od 35%. Właściwość ta jest podobna dla wszystkich opisywanych wyników badań symulacyjnych odpowiedzi na skok jednostkowy.



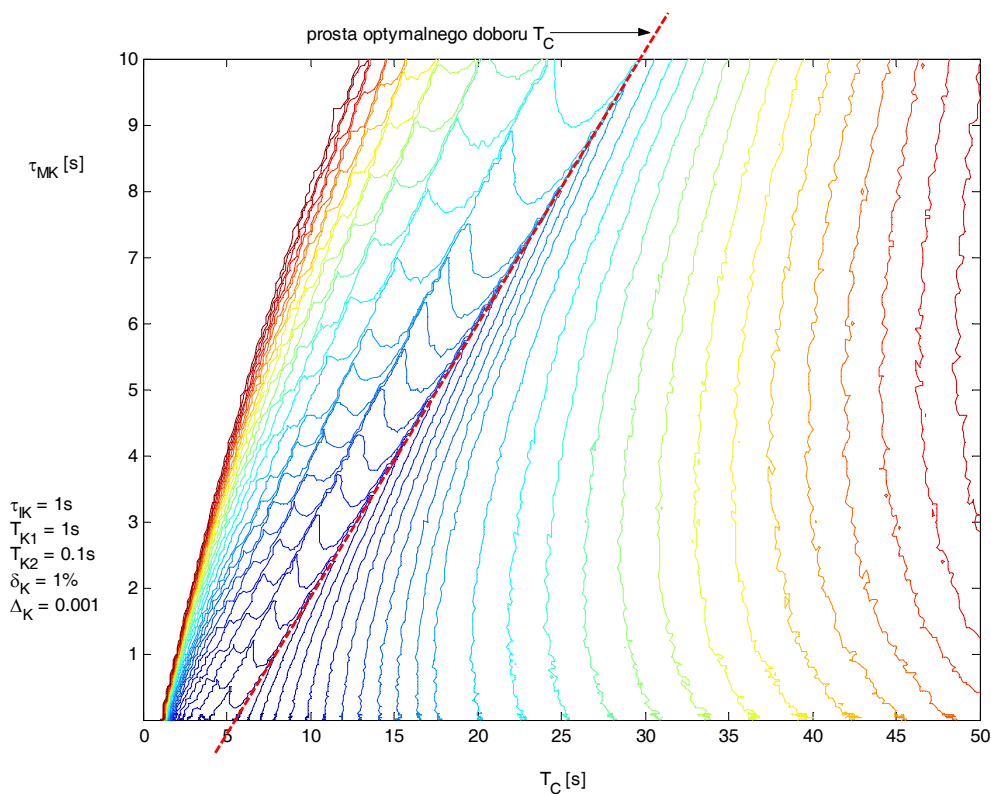
Rys.4.25. Czas odpowiedzi $t_o = f(\tau_M, T_C)$ - rzut na płaszczyznę τ_M, t_o . (II-e3)

Na rys.4.25, który jest rzutem wykresu czasu odpowiedzi z rys.4.24 na płaszczyznę τ_M, t_o , przedstawiono *prostą minimalnego czasu t_o* , dla której w tym przypadku wyznaczono równanie (4.10) w postaci:

$$t_{O(MIN)} = 6,37 \cdot \tau_M + 18,31 \quad (4.10)$$

dla: $\tau_{IK} = 1 \text{ s}$, $T_{K1} = 1 \text{ s}$, $T_{K2} = 0,1 \text{ s}$, $\delta_K = 1\%$, $\Delta_K = 0,001$

Rys.4.26 przedstawia rzut poziomic wartości czasu odpowiedzi t_o na płaszczyznę τ_M, T_C . Podobnie jak w przypadku poprzednio analizowanych wyników badań, wartości stałej czasowej T_C regulatora całkującego odpowiadające minimalnym wartościom czasu odpowiedzi t_o (dla każdego czasu pomiaru τ_M) uszeregowane są w linii prostej przedstawionej na powyższym rysunku w postaci czerwonej przerywanej linii.



Rys.4.26. Czas odpowiedzi $t_o = f(\tau_M, T_C)$ - widok poziomicowy t_o na płaszczyźnie τ_M, T_C

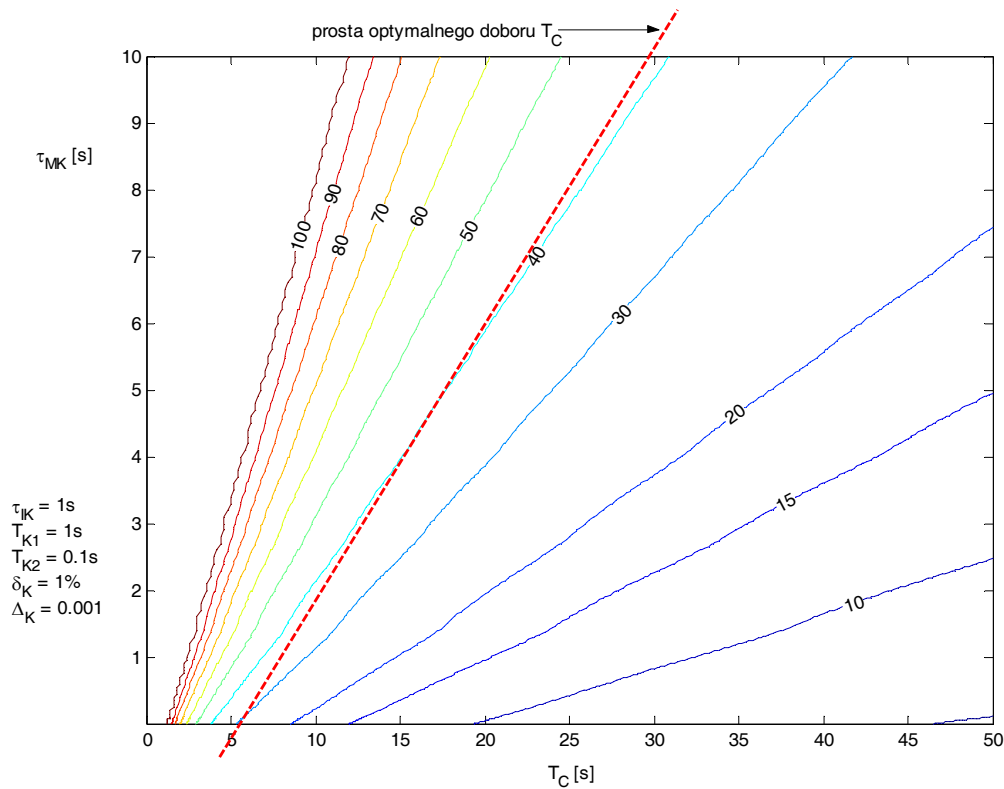
Dla tej *prostej optymalnego doboru* T_C wyznaczono zależność w postaci równania (4.11):

$$T_{C(OPT)} = 2,42 \cdot \tau_M + 5.42 \quad (4.11)$$

dla: $\tau_{IK} = 1 \text{ s}$, $T_{K1} = 1 \text{ s}$, $T_{K2} = 0,1 \text{ s}$, $\delta_K = 1\%$, $\Delta_K = 0,001$

I w tym przypadku, analizując równania (4.11) i (4.7) stwierdzono zwiększenie składowej stałej równania wraz ze zwiększeniem czasu opóźnienia τ_{IK} interfejsu kalibratora, przy niemal niezauważalnej zmianie współczynnika multiplikatywnego która może wynikać z błędów badań symulacyjnych. Ponadto, porównując równania (4.3) i (4.7) opisujące optymalny dobór T_C dla ustalonej wartości $\tau_{IK} = 0,001 \text{ s}$, oraz równania (4.9) i (4.11) opisujące optymalny dobór T_C dla ustalonej wartości $\tau_{IK} = 1 \text{ s}$ zauważono że w obu przypadkach różnica składowych stałych jest taka sama, jak również kąt nachylenia prostej T_C do osi τ_M jest niezmienny.

Rys.4.27 ilustruje wyniki badań przeregulowania $p = f(\tau_M, T_C)$ dla wartości parametrów przedstawionych w tabeli 4.3 (II-e3). Wyniki te przedstawione są w postaci rzutu poziomic wartości przeregulowania p na płaszczyznę poziomą τ_M, T_C . Na osiach poziomych opisano czas pomiaru τ_M oraz wartości stałej czasowej regulatora całkującego T_C .



Rys.4.27. Przeregulowanie $p = f(\tau_M, T_C)$ (II-e3) - widok poziomicowy p na płaszczyźnie τ_M, T_C

Na rysunku, czerwoną przerywaną linią, oznaczono *prostą optymalnego doboru* T_C . W tym przypadku dla wartości T_C należących do tej prostej wartość przeregulowania osiąga wartość 30% dla bardzo małych wartości czasu pomiaru miernika kontrolnego a następnie zwiększa się do wartości 42 % wraz ze wzrostem czasu pomiaru τ_M .

W tabeli 4.4 zebrano, wyznaczone empirycznie, wyrażenia stanowiące prawą stronę równania na dobór optymalnej wartości stałej $T_{C(OPT)}$. W pionie opisano tabelę wartościami stałej czasowej kalibratora T_{KI} , natomiast w poziomie opisano ją wartościami opóźnienia interfejsu kalibratora, dla których wykonano badania w etapach I i II.

Tabela 4.4. Wyrażenia na optymalną wartość stałej czasowej T_C

T_{KI} [s] \ τ_{IK} [s]	0,001	0,01	0,1	1
0,01	$2,42 \tau_M + 0,031$	$2,42 \tau_M + 0,052$	$2,42 \tau_M + 0,27$	$2,42 \tau_M + 2,40$
0,05	$2,42 \tau_M + 0,15$	$2,42 \tau_M + 0,18$	$2,42 \tau_M + 0,39$	$2,42 \tau_M + 2,52$
0,1	$2,42 \tau_M + 0,31$	$2,42 \tau_M + 0,33$	$2,42 \tau_M + 0,54$	$2,42 \tau_M + 2,68$
0,5	$2,42 \tau_M + 1,53$	$2,42 \tau_M + 1,55$	$2,42 \tau_M + 1,76$	$2,42 \tau_M + 3,90$
1	$2,42 \tau_M + 3,05$	$2,42 \tau_M + 3,07$	$2,42 \tau_M + 3,29$	$2,42 \tau_M + 5,42$

Wyrażenia zależności *prostych minimalnego czasu odpowiedzi* t_o od opóźnienia pomiaru τ_M , wyznaczone empirycznie na podstawie wyników badań symulacyjnych przeprowadzonych w etapach I i II, zebrano w tabeli 4.5.

Tabela 4.5. Wyrażenia na minimalny czas odpowiedzi systemu $t_{O(MIN)}$ dla $\delta_K=1\%$, $\Delta_K=0,001$

T_{KI} [s] \ τ_{IK} [s]	0,001	0,01	0,1	1
0,01	$6,94 \tau_M + 0,64$	$6,94 \tau_M + 0,83$	$6,94 \tau_M + 1,53$	$6,94 \tau_M + 8,60$
0,05	$6,73 \tau_M + 1,25$	$6,73 \tau_M + 1,29$	$6,73 \tau_M + 1,99$	$6,73 \tau_M + 8,99$
0,1	$6,51 \tau_M + 1,92$	$6,51 \tau_M + 1,86$	$6,52 \tau_M + 2,26$	$6,57 \tau_M + 9,48$
0,5	$6,34 \tau_M + 6,41$	$6,34 \tau_M + 6,47$	$6,35 \tau_M + 7,10$	$6,46 \tau_M + 13,41$
1	$6,17 \tau_M + 12,17$	$6,17 \tau_M + 12,23$	$6,20 \tau_M + 12,79$	$6,37 \tau_M + 18,31$

Wartości optymalne stałej T_C , minimalny czas odpowiedzi t_o oraz wartości opóźnienia pomiaru τ_M i wartości stałe w tabelach 4.4 i 4.5 wymiarowane są w sekundach.

Etap III. Badania przebiegu zmienności funkcji: $t_o = f(\tau_M, T_C)$ oraz $p = f(\tau_M, T_C)$ przy sparametryzowanych wartościach składowych błędu kalibratora.

Tabela 4.6 zawiera wartości składowych błędu kalibratora, dla których system poddano badaniom symulacyjnym w etapie III. Celem trzeciego etapu badań było określenie zależności parametrów dynamicznych systemu w funkcji wartości błędu kalibratora.

Tabela 4.6. Wartości składowych błędów δ_K oraz Δ_K poddanych badaniom symulacyjnym

parametr	wartość			
δ_K [%]	0,01	0,1	1 *	5
Δ_K	0,00001	0,0001	0,001 *	0,005

* gwiazdką zaznaczono badania przeprowadzone w etapach I i II.

Wyznaczone w wyniku badań wyrażenia na dobór optymalnej wartości stałej czasowej T_C , przedstawiono w tabeli 4.7. Wyrażenia te okazały się niezależne od wartości składowych błędu kalibratora, stąd wyniki przedstawione w tej tabeli ta reprezentują wszystkie przebadane przypadki.

Tabela 4.7. Wyrażenia na optymalną wartość stałej czasowej T_C

T_{KI} [s] \ τ_{IK} [s]	0,001	0,01	0,1	1
0,01	$2,42 \tau_M + 0,031$	$2,42 \tau_M + 0,052$	$2,42 \tau_M + 0,27$	$2,42 \tau_M + 2,40$
0,05	$2,42 \tau_M + 0,15$	$2,42 \tau_M + 0,18$	$2,42 \tau_M + 0,39$	$2,42 \tau_M + 2,52$
0,1	$2,42 \tau_M + 0,31$	$2,42 \tau_M + 0,33$	$2,42 \tau_M + 0,54$	$2,42 \tau_M + 2,68$
0,5	$2,42 \tau_M + 1,53$	$2,42 \tau_M + 1,55$	$2,42 \tau_M + 1,76$	$2,42 \tau_M + 3,90$
1	$2,42 \tau_M + 3,05$	$2,42 \tau_M + 3,07$	$2,42 \tau_M + 3,29$	$2,42 \tau_M + 5,42$

W przypadku wyrażen na minimalny czas odpowiedzi systemu, wyniki dla wartości składowych błędu $\delta_K = 0,01\%$ i $\delta_K = 0,1\%$, praktycznie nie różniły się od wyników badań dla $\delta_K = 1\%$ (przedstawionych wcześniej w tabeli 4.5). Różnice uwidoczniły się dopiero przy wartości $\delta_K = 5\%$. Wyrażenia zależności minimalnego czasu odpowiedzi t_o od opóźnienia pomiaru τ_M , dla $\delta_K = 5\%$, $\Delta_K = 0,005$, prezentuje tabela 4.8.

Tabela 4.8. Wyrażenia na minimalny czas odpowiedzi systemu $t_{O(MIN)}$ dla $\delta_K=5\%$, $\Delta_K=0,005$

$T_{KI}[s] \backslash \tau_{IK}[s]$	0,001	0,01	0,1	1
0,01	$6,94 \tau_M + 0,69$	$6,94 \tau_M + 0,87$	$6,94 \tau_M + 1,61$	$6,94 \tau_M + 8,92$
0,05	$6,73 \tau_M + 1,30$	$6,73 \tau_M + 1,38$	$6,73 \tau_M + 2,10$	$6,73 \tau_M + 9,33$
0,1	$6,51 \tau_M + 1,93$	$6,51 \tau_M + 1,97$	$6,52 \tau_M + 2,52$	$6,57 \tau_M + 9,82$
0,5	$6,31 \tau_M + 6,75$	$6,31 \tau_M + 6,82$	$6,32 \tau_M + 7,48$	$6,42 \tau_M + 14,0$
1	$6,12 \tau_M + 12,7$	$6,12 \tau_M + 12,8$	$6,14 \tau_M + 13,4$	$6,29 \tau_M + 19,2$

4.5 Analiza wyników badań symulacyjnych

Analiza wyników badań symulacyjnych przeprowadzonych w przedstawionych etapach pozwala na stwierdzenie, iż czas odpowiedzi systemu jest ściśle uzależniony od doboru optymalnej wartości stałej czasowej T_C regulatora całkującego. W etapie I i II wykazano iż optymalna wartość tej stałej czasowej zależna jest od parametrów dynamicznych systemu takich jak: stałe czasowe kalibratora T_{K1} i T_{K2} , opóźnienie interfejsu kalibratora τ_{IK} i opóźnienie pomiaru τ_M traktowane jako suma opóźnienia miernika kontrolnego τ_{MK} i opóźnienia interfejsu miernika τ_{IM} . Etap III badań symulacyjnych pokazał, że dobór optymalnej wartości stałej T_C nie jest zależny od wartości błędu kalibratora.

Na podstawie danych zawartych w tabelach 4.4 i 4.7 zaproponowano równanie ogólne uzależniające dobór optymalnej wartości stałej regulatora całkującego $T_{C(OPT)}$ od parametrów dynamicznych elementów systemu.

$$T_{C(OPT)} = 2,42 \cdot \tau_M + 3,05 \cdot T_{K1} + 2,37 \cdot \tau_{IK} \quad (4.12)$$

Powyższe równanie sprawdzone zostało poprzez podstawienie do dwudziestu zestawów parametrów przedstawionych w tabeli 4.7. W każdym przypadku dokonano porównania w dwóch punktach należących do *prostej optymalnego doboru* T_C , wartości obliczonych z wzoru (4.12) z wynikami badań symulacyjnych. Wartość różnicy wyników nie przekraczała 0,2% wartości T_C .

Przy założeniu, że wartość parametru T_C dobrana jest optymalnie dla zadanego zestawu parametrów dynamicznych elementów składowych systemu, czyli zgodnie ze wzorem (4.12) system może osiągnąć minimalny czas odpowiedzi.

Wyniki badań wykonanych w etapach I, II i III pozwalają na stwierdzenie, iż wartość minimalnego czasu odpowiedzi systemu jest zależna nie tylko od parametrów dynamicznych poszczególnych elementów systemu, ale również od wartości błędu kalibratora.

Na podstawie wyników badań zawartych w tabelach 4.5 i 4.8 zaproponowano równanie ogólne (4.13) uzależniające wartość minimalnego czasu odpowiedzi systemu $t_{O(min)}$ od parametrów dynamicznych elementów systemu.

$$t_{O(min)} \approx (6,95 - 0,82 \cdot T_{K1}) \cdot \tau_M + 11,5 \cdot T_{K1} + 8 \cdot \tau_{IK} - 2 \cdot T_{K1} \cdot \tau_{IK} + 0,63 \quad (4.13)$$

dla: $\delta_K = 1\%$, $\Delta_K = 0,001$ (przy $N_K = 1$)

Równanie (4.13) może być traktowane jako przybliżenie dla wartości błędów $\delta_K \leq 1\%$, $\Delta_K \leq 0,001$. Dla przypadku badań przy wartościach błędów $\delta_K = 5\%$, $\Delta_K = 0,005$ wyznaczono przybliżoną wartość czasu odpowiedzi w postaci równania (4.14).

$$t_{O(min)} \approx (6,95 - 0,87 \cdot T_{K1}) \cdot \tau_M + 12 \cdot T_{K1} + 8 \cdot \tau_{IK} - 1,9 \cdot T_{K1} \cdot \tau_{IK} + 0,67 \quad (4.14)$$

dla: $\delta_K = 5\%$, $\Delta_K = 0,005$ (przy $N_K = 1$)

Wartości T_{K1} , τ_{IK} i τ_M we wzorach (4.13) i (4.14) wyrażone są bez jednostki, ale odpowiadają wartościom parametrów czasowych podanych w sekundach. Wartości czasu odpowiedzi wynikające z powyższych wzorów mają wymiar sekund.

4.6 Wnioski

Dla dowolnego zestawu parametrów czasowych kalibratora, miernika kontrolnego, oraz ich interfejsów można dobrać stałą czasową regulatora całkującego tak, aby osiągnąć minimalny, dla tego zestawu parametrów, czas odpowiedzi systemu z miernikiem kontrolnym.

Dla dowolnego zestawu parametrów systemu zachodzi liniowa zależność doboru optymalnej wartości stałej czasowej T_C regulatora całkującego od czasu pomiaru τ_M , a więc od czasu opóźnienia miernika kontrolnego i od opóźnienia interfejsu miernika. Porównując zmiany tej zależności w odniesieniu do zmian wartości kolejnych parametrów systemu wyznaczono szereg równań (tabele 4.4, 4.7) określających zależności doboru optymalnej dla tych parametrów wartości stałej czasowej T_C regulatora całkującego, której odpowiada minimalny czas t_o odpowiedzi systemu. Na podstawie tych równań zaproponowano równanie (4.12) uzależniające dobór optymalnej wartości stałej czasowej T_C od wszystkich

uwzględnionych w badaniach parametrów zamodelowanego systemu odtwarzania napięć i prądów.

Minimalny czas odpowiedzi jest zależny od wszystkich parametrów dynamicznych zamodelowanego systemu oraz od wartości błędu zastosowanego w systemie kalibratora. Wyznaczono empiryczne równania (tabele 4.5, 4.8) minimalnej wartości czasu odpowiedzi przy spełnieniu warunku optymalnego doboru stałej czasowej regulatora całkującego, i na ich podstawie zaproponowano równania ogólne (4.13, 4.14) uzależniające wartość czasu odpowiedzi od wszystkich uwzględnionych w badaniach parametrów zamodelowanego systemu odtwarzania napięć i prądów

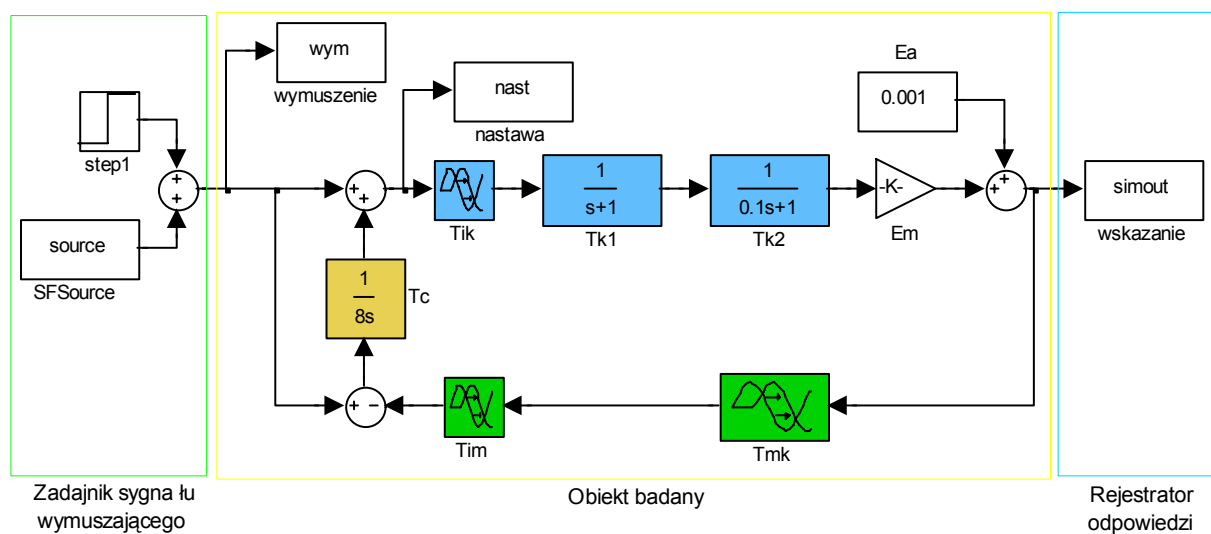
Zauważono również, iż wartość czasu odpowiedzi systemu jest czuła na błąd doboru optymalnej stałej czasowej T_C z uwagi na stromość wykresów czasu odpowiedzi w pobliżu punktów należących do *prostej optymalnego doboru* T_C .

Porównując wyniki badań układu zamkniętego z wynikami badań układu otwartego stwierdzono, że możliwe jest w systemie zamkniętym osiągnięcie czasu odpowiedzi o wartości nie przekraczającej dwukrotnego czasu odpowiedzi systemu otwartego (np. dla $T_{KI}=1$ s i $\tau_{IK}=0,01$ s w systemie otwartym $t_o=7,13$ s, w systemie zamkniętym $t_{o(MIN)}=12,3$ s - przy zastosowaniu szybkiego miernika kontrolnego i jego interfejsu - $\tau_M=0,01$ s).

Przeregulowanie uzależnione jest głównie od szybkości miernika kontrolnego i stałych czasowych kalibratora. Dla optymalnie dobranych wartości stałej czasowej regulatora całkującego przyjmuje wartości nie większe od 43%, i maleje wraz ze wzrostem współczynnika T_{KI}/τ_M . Zależność ta uwidacznia się bardziej przy dużych wartościach tego współczynnika. Mniejsze wartości przeregulowania można uzyskać stosując szybszy miernik kontrolny. Innym sposobem na osiągnięcie mniejszych wartości przeregulowania jest dobór większej od optymalnej wartości stałej czasowej regulatora całkującego, co jednak związane jest z wydłużeniem czasu odpowiedzi systemu.

5 BADANIA MOŻLIWOŚCI POPRAWY WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNYCH SYSTEMU PRZEZ DOBÓR WYMUSZENIA Z ZASTOSOWANIEM SYMULACJI KOMPUTEROWEJ

Celem badań opisanych w niniejszym rozdziale było sprawdzenie czy zastosowanie innych niż skok jednostkowy wymuszeń może prowadzić do skrócenia czasu odpowiedzi systemu i/lub zmniejszenia przeregulowania. Badania możliwości poprawy właściwości dynamicznych systemu przez dobór wymuszenia przeprowadzono przy użyciu stanowiska do badań symulacyjnych (rys.4.1) opisanego w rozdziale czwartym. Model symulacyjny systemu przedstawia rys.5.1. Różni się on w stosunku do modelu symulacyjnego systemu dla badań



Rys.5.1. Model systemu do badań symulacyjnych wpływu kształtu wymuszenia

przedstawionych w poprzednim rozdziale (rys.4.2). Zmieniono zadajnik sygnału wymuszającego, i wprowadzono dodatkowe wyjścia w modelu obiektu badanego. W module zadajnika sygnału wymuszającego wprowadzono blok *SFSource*, pozwalający na definiowanie kształtu sygnału wymuszającego w przy pomocy tzw. S-Funkcji [105], za pomocą reguł zapisanych w języku programu Matlab. Dodatkowe wyjścia obiektu badanego (*wym*, *nast*) pozwoliły na śledzenie kształtu wymuszenia i nastawy w trakcie procesów symulacyjnych.

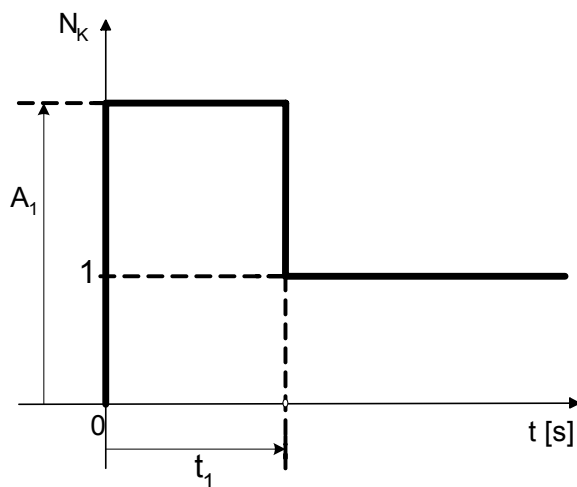
5.1 Opracowanie modeli wymuszeń

Na podstawie wniosków badań odpowiedzi systemu na wymuszenie w postaci skoku jednostkowego, gdzie minimalne czasy odpowiedzi uzyskiwano przy wartościach przeregulowania nie większych od 43%, zaproponowano zwiększenie wartości nastawy w pierwszej fazie procesu ustalania w celu osiągnięcia krótszego czasu odpowiedzi systemu.

Przebadano szereg kształtów wymuszeń, z których przedstawiono dwa dające pozytywne rezultaty w postaci skrócenia czasu odpowiedzi badanego systemu w stosunku do pobudzenia skokiem jednostkowym.

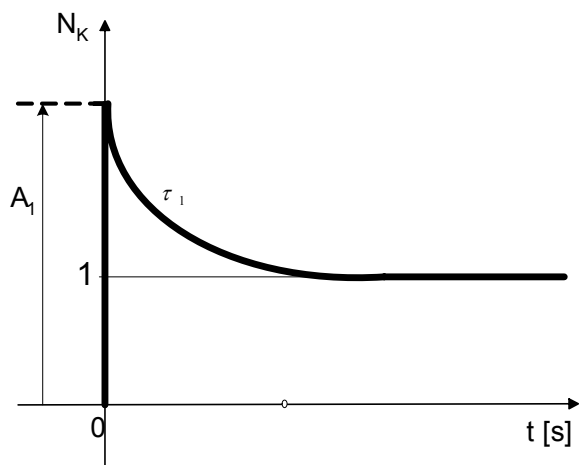
Przedstawione kształty wymuszeń to:

- *wymuszenie z przeregulowaniem jedno schodkowym*[102], w którym sygnał wymuszający w pierwszej fazie przyjmuje wartość amplitudy A_1 większą od wartości ustalonej, następnie po czasie t_1 przyjmuje wartość równą wartości ustalonej. Kształt sygnału z przeregulowaniem jedno schodkowym ilustruje rys.5.2.



Rys.5.2. Model wymuszenia z przeregulowaniem jedno schodkowym

- *wymuszenie z przeregulowaniem i wykładniczym opadaniem*, w którym sygnał wymuszający w pierwszej fazie przyjmuje wartość amplitudy A_1 większą od wartości ustalonej, a następnie opada wykładniczo, ze zmiennym współczynnikiem τ_1 , do wartości ustalonej. Kształt tego typu sygnału zilustrowano na rys.5.3.



Rys.5.3. Model wymuszenia z przeregulowaniem i wykładniczym opadaniem

5.2 Badanie systemu przy wymuszeniu z przeregulowaniem jedno schodkowym

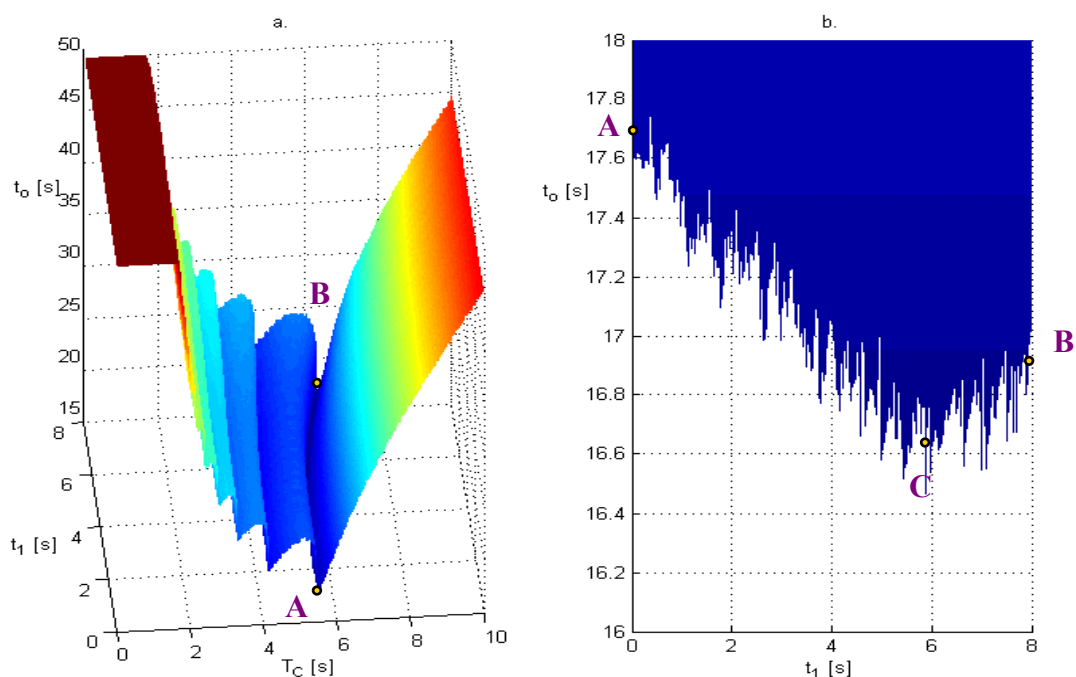
W trakcie badań symulacyjnych systemu pobudzonego wymuszeniem z przeregulowaniem jedno schodkowym poszukiwano minimalnego czasu odpowiedzi t_o i odpowiadającego mu przeregulowania p zmieniając właściwości wymuszenia w zakresie wartości czasu schodka $t_1 \in \langle 0s, 8s \rangle$, poszukując optymalnej wartości stałej czasowej regulatora całkującego w zakresie $T_C \in \langle 0s, 10s \rangle$. Badania wykonano dla dwóch zestawów parametrów systemu, przedstawionych w tabeli 5.1, przy różnym stosunku czasu pomiaru miernika do stałej czasowej kalibratora.

Tabela 5.1. Wartości parametrów systemu dla badań wpływu kształtu wymuszenia.

τ_M [s]	T_{K1} [s]	T_{K2} [s]	τ_{IK} [s]	δ_K [%]	Δ_K
1	1	0,1	0,001	1	0,001
0,1					

Wykresy 5.4, 5.5 i 5.6 przedstawione w dalszej części pracy ograniczono do jednego przypadku $\tau_M = 1s$, ze względu na podobieństwo zaobserwowanych wyników. Badania przeprowadzono dla amplitudy schodka A_I o wartościach 110%, 120% i 130% wartości nastawy kalibratora N_K (oczekiwanej wartości ustalonej).

Wyniki badań czasu odpowiedzi dla wymuszenia z przeregulowaniem o amplitudzie schodka $A_I = 110\% N_K$ przedstawia rysunek 5.4.



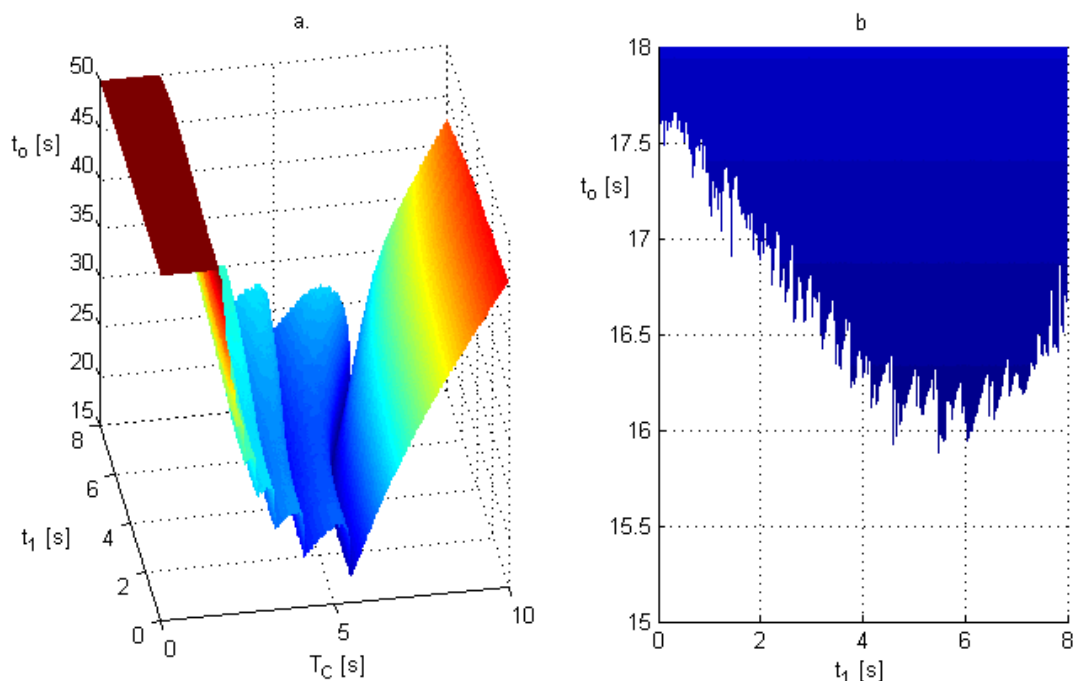
Rys.5.4. Wyniki symulacji dla wymuszenia z przeregulowaniem jedno schodkowym, dla wysokości schodka $A_I = 110\% N_K$, przy $\tau_M = 1s$.

Rysunek 5.4.a przedstawia wykres czasu odpowiedzi systemu w funkcji szerokości schodka t_I i stałej czasowej regulatora całkującego T_C . Skalę czasu odpowiedzi ograniczono do wartości 50s w celu lepszej wizualizacji bardziej interesujących autora obszarów krótkich czasów odpowiedzi. Punktami A i B oznaczono początek i koniec krzywej łączącej minimalne wartości czasu odpowiedzi dla zmiennej wartości szerokości schodka (t_I). Na rysunku 5.4.b ten sam wykres przedstawiono w postaci rzutu czasu odpowiedzi na płaszczyznę (t_o, t_I) z zawężeniem skali czasu odpowiedzi do przedziału (16s,18s). Pokazuje on jakie wartości przybierają minimalne czasy odpowiedzi systemu przy zmianie szerokości schodka (t_I). Czas odpowiedzi w punkcie A odpowiada wartości $t_I=0$ co jest odpowiednikiem wymuszenia skokiem jednostkowym, i traktowany jest jako odniesienie.

Wraz ze wzrostem szerokości schodka (t_I) minimalny czas odpowiedzi systemu zmniejsza się do wartości najmniejszej w okolicach punktu C, po czym ponownie zaczyna wzrastać w kierunku punktu B. Najmniejszy z czasów odpowiedzi odpowiada wartości szerokości schodka $t_I \approx 6s$, przy stałej czasowej regulatora całkującego $T_C=5,9s$. Czas

odpowiedzi systemu przy tej, optymalnej szerokości schodka osiągnął 94% czasu odpowiedzi dla wymuszenia skokiem jednostkowym, a przeregulowanie osiągnęło wartość $p=40,5\%$.

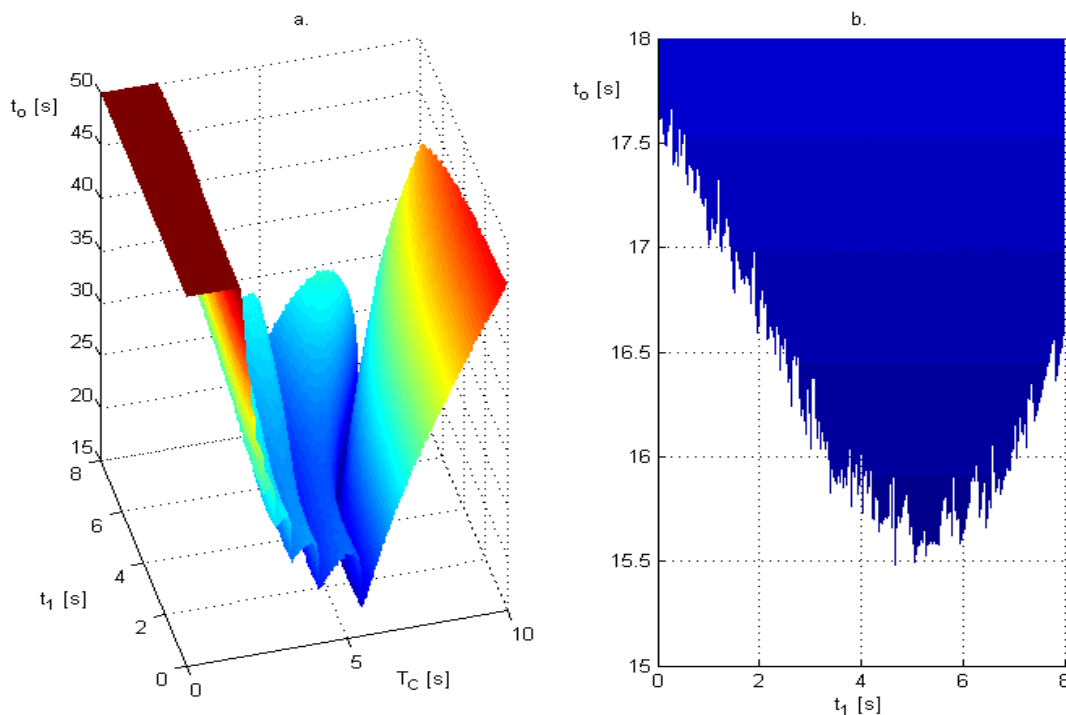
Rysunek 5.5 przedstawia wyniki badań czasu odpowiedzi dla wymuszenia z przeregulowaniem o amplitudzie schodka $A_I = 120\% N_K$.



Rys.5.5. Wyniki symulacji dla wymuszenia z przeregulowaniem jedno schodkowym, dla wysokości schodka $A_I = 120\% N_K$, przy $\tau_M = 1s$.

W tym przypadku, minimalny czas odpowiedzi systemu wystąpił dla optymalnej szerokości schodka $t_1 \approx 5,5s$, przy stałej czasowej regulatora całkującego $T_C = 6,2s$. Zauważono skrócenie minimalnego czasu odpowiedzi do wartości ok. 91% względem minimalnego czasu odpowiedzi systemu dla skoku jednostkowego. Przeregulowanie odpowiadające tej minimalnej wartości czasu odpowiedzi wzrosło do wartości $p = 52,3\%$. □

Wyniki badań dla amplitudy schodka $A_I = 130\% N_K$ przedstawiono na rysunku 5.6. Minimalny czas odpowiedzi systemu wystąpił dla optymalnej szerokości schodka $t_1 \approx 5s$, przy stałej czasowej regulatora całkującego $T_C = 6,5s$. Pobudzenie systemu wymuszeniem o amplitudzie $130\% N_K$ skutkowało tym razem skrócenie minimalnego czasu odpowiedzi systemu do wartości około 88,7% i przeregulowaniem o wartości $p = 63,6\%$.



Rys.5.6. Wyniki symulacji dla wymuszenia z przeregulowaniem jedno schodkowym, dla wysokości schodka $A_I = 130\% N_K$, przy $\tau_M = 1s$.

Zestawienie wyników badań wpływu wymuszenia z przeregulowaniem jedno schodkowym dla $\tau_M = 1s$ przedstawia tabela 5.2. Pierwsza kolumna zawiera wartości amplitudy schodka A_I podane w procentach nastawy kalibratora N_K . Druga kolumna podaje wartości minimalnego czasu odpowiedzi uzyskanego dla danej amplitudy A_I . W trzeciej kolumnie zamieszczono procentową miarę skrócenia minimalnego czasu odpowiedzi w stosunku do czasu odpowiedzi dla wymuszenia skokiem jednostkowym. Kolejna kolumna zawiera wartości przeregulowania występującego przy minimalnych czasach odpowiedzi. W dwóch ostatnich kolumnach zamieszczono wartości czasu szerokości schodka t_I oraz stałej czasowej regulatora całkującego T_C , dla których uzyskano te, minimalne czasy odpowiedzi systemu.

Tabela 5.2. Wyniki badań parametrów dynamicznych systemu dla wymuszenia z przeregulowaniem jedno schodkowym przy $\tau_M = 1s$.

A_I [%]	t_{oMIN} [s]	δ_{iomin} [%]	p [%]	$t_{I opt}$ [s]	$T_{C opt}$ [s]
100	17,7	100	30,2	0	5,5
110	16,6	94	40,5	5,9	5,9
120	16,1	91	52,3	5,5	6,2
130	15,7	88,7	63,6	5	6,5

Przedstawione w tabeli 5.2 dane świadczą, iż możliwe jest skrócenie czasu odpowiedzi systemu dzięki zastosowaniu *wymuszenia z przeregulowaniem jedno schodkowym*. Maksymalne, dopuszczalne przeregulowanie, w granicach 50% występuje już przy wysokości schodka $A_I = 120\% N_K$. Odpowiadający temu przeregulowaniu minimalny czas odpowiedzi systemu, może osiągnąć ok. 91% czasu odpowiedzi systemu pobudzanego wymuszeniem w postaci skoku jednostkowego o amplitudzie N_K .

5.3 Badanie systemu przy wymuszeniu z przeregulowaniem i wykładniczym opadaniem

Badanie zachowania systemu z miernikiem kontrolnym pobudzonego *wymuszeniem z przeregulowaniem i wykładniczym opadaniem* (rys.5.3) przeprowadzono w oparciu o dobór czasów stałej czasowej (τ_I) i stałej czasowej regulatora całkującego (T_C). W trakcie badań poszukiwano minimalnego czasu odpowiedzi t_o i odpowiadającego mu przeregulowania p zmieniając właściwości wymuszenia w zakresie wartości czasu schodka $\tau_1 \in \langle 0s, 10s \rangle$, oraz zmieniając stałą czasową regulatora całkującego w zakresie $T_C \in \langle 0s, 8s \rangle$.

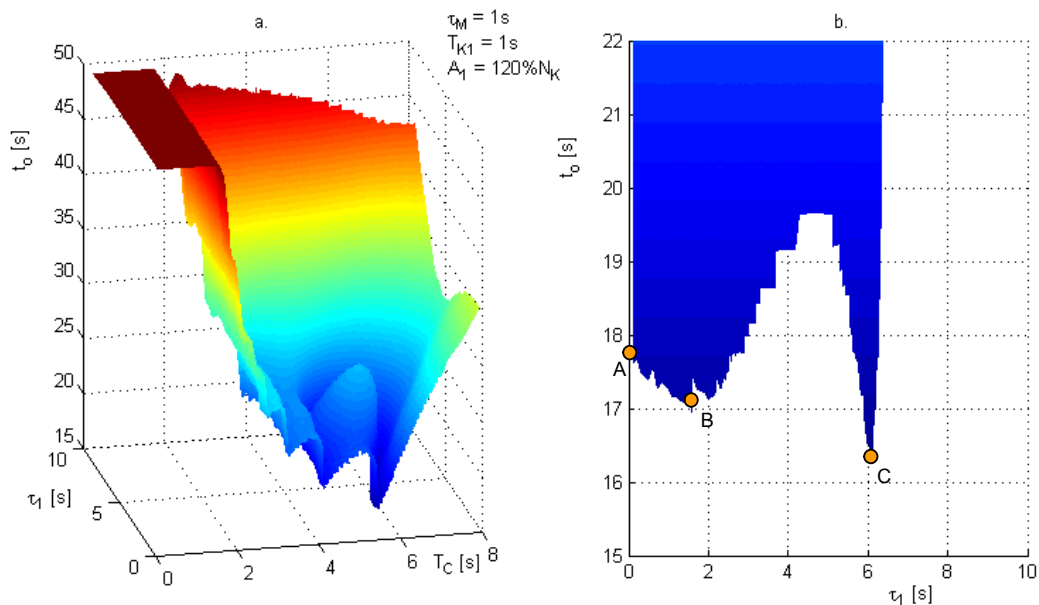
Badania wykonano dla dwóch zestawów parametrów systemu przedstawionych w tabeli 5.3. Dwa zestawy miały na celu sprawdzenie parametrów dynamicznych systemu przy różnym stosunku prędkości miernika i kalibratora.

Tabela 5.3. Wartości parametrów systemu dla badań wpływu *wymuszenia z przeregulowaniem i wykładniczym opadaniem*

τ_M [s]	T_{K1} [s]	T_{K2} [s]	τ_{IK} [s]	δ_K [%]	Δ_K
1	1	0,1	0,002	1	0,002
0,1					

Badania przeprowadzono dla amplitudy przeregulowania A_I o wartościach 120%, 150% i 200% wartości nastawy kalibratora N_K (oczekiwanej wartości ustalonej).

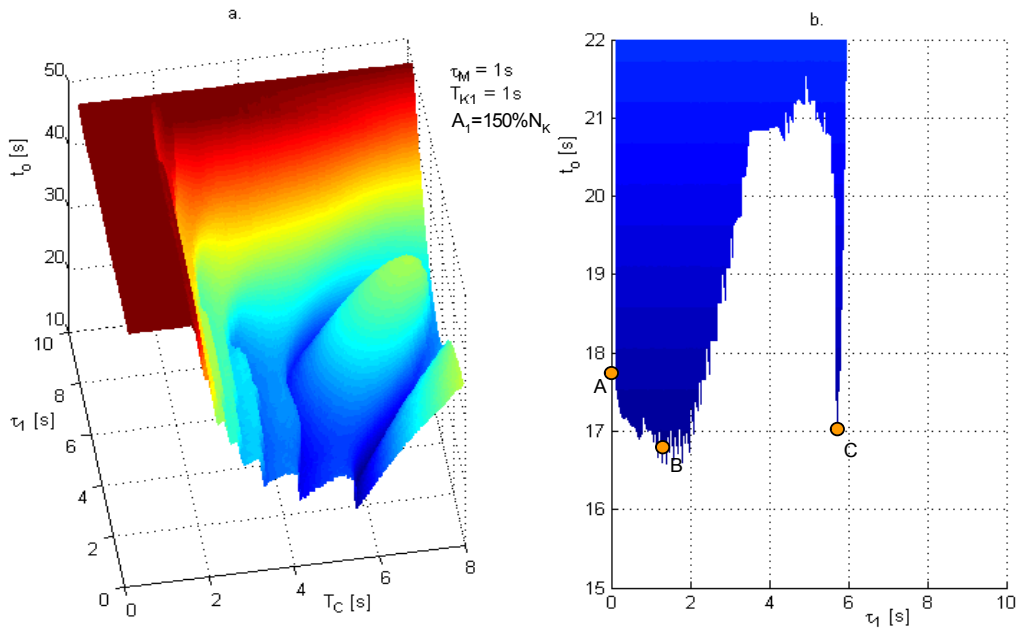
Wyniki badań symulacyjnych czasu odpowiedzi systemu dla czasu miernika $\tau_M = 1s$, przy amplitudzie A_I równej 120% N_K przedstawia rysunek 5.7. Wykres na rys.5.7.a przedstawia czas odpowiedzi w funkcji współczynnika τ_I , oraz stałej czasowej regulatora całkującego T_C . Wykres na rysunku 5.7.b przedstawia rzut wykresu czasu odpowiedzi na płaszczyznę t_o, τ_I . Na rys.5.7.b zawężono skalę czasu odpowiedzi do przedziału obrazującego minimalne jego wartości. Punktem A oznaczono wartość czasu odpowiedzi 17,7s. traktowaną jako odniesienie (uzyskaną przy wymuszeniu skokiem jednostkowym).



Rys.5.7. Wyniki symulacji dla wymuszenia z przeregulowaniem i wykładniczym opadaniem, dla wysokości schodka $A_I = 120\% N_K$, przy $\tau_M = 1\text{s}$.

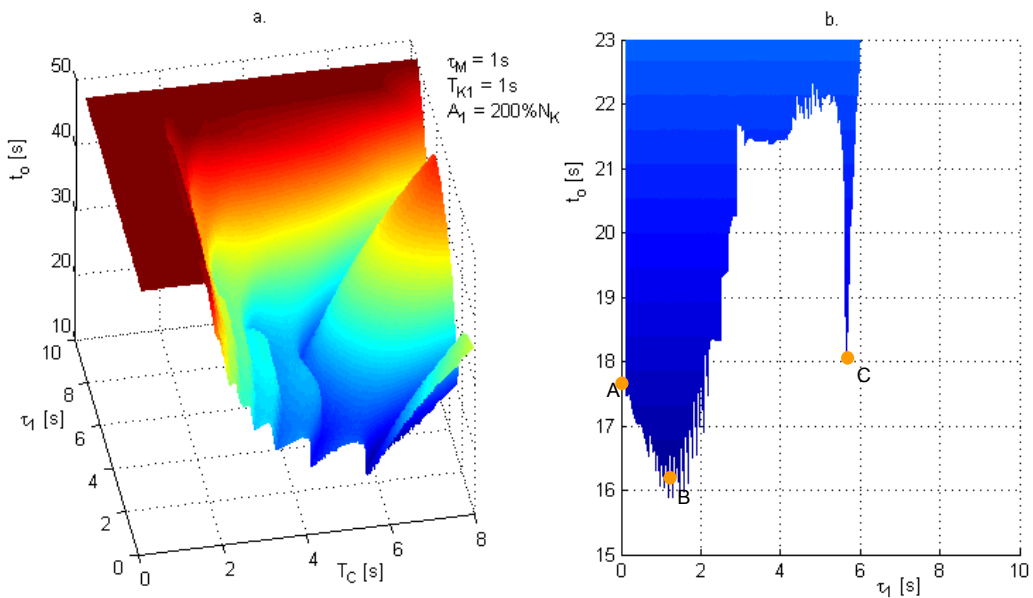
Punkt **B** wskazuje minimum lokalne występujące dla wymuszenia z przeregulowaniem i wykładniczym opadaniem o stałej czadowej $\tau_1 = 1,6\text{s}$. W punkcie **B** czas odpowiedzi systemu osiąga wartość $17,1\text{s}$, a przeregulowanie p nie przekracza wartości $36,7\%$. W punkcie **C** czas odpowiedzi osiąga drugie minimum lokalne o wartości $16,3\text{s}$ będące jednocześnie minimalną wartością w całym badanym zakresie zmiennych wejściowych τ_1 i T_C . Przeregulowanie w punkcie **C** osiąga wartość $48,1\%$ co można traktować jako wartość dopuszczalną, jednak otoczenie punktu **C** jest bardzo strome i nawet nieznaczne odchylenie wartości parametru τ_1 lub T_C skutkuje stosunkowo dużym wzrostem czasu odpowiedzi. Stąd, ze względów praktycznych, punkt **C** nie kwalifikuje się do rozważań pod kontem doboru optymalnych parametrów wymuszenia.

Wyniki badań symulacyjnych czasu odpowiedzi systemu dla czasu miernika $\tau_M = 1\text{s}$, przy amplitudzie A_I równej $150\% N_K$ przedstawia rysunek 5.8. Podobnie jak wcześniej, punktem **A** oznaczono wartość czasu odpowiedzi $17,7\text{s}$, traktowaną jako odniesienie (uzyskaną przy wymuszeniu skokiem jednostkowym). W punkcie **B** czas odpowiedzi osiąga wartość $t_o = 16,8\text{s}$ przy przeregulowaniu $p = 39,4\%$. Kolejne minimum lokalne w punkcie **C** osiąga wartość $t_o = 17\text{s}$, przy przeregulowaniu $p = 71,8\%$. W tym przypadku wartość czasu odpowiedzi jest porównywalna z czasem w punkcie **B**, ale przeregulowanie znacznie przewyższa założony próg 50% .



Rys.5.8. Wyniki symulacji dla wymuszenia z przeregulowaniem i wykładniczym opadaniem, dla wysokości schodka $A_I = 150\% N_K$, przy $\tau_M = 1s$.

Rysunek 5.9. przedstawia wyniki badań symulacyjnych czasu odpowiedzi systemu dla czasu miernika $\tau_M = 1s$, przy amplitudzie A_I równej $200\% N_K$.



Rys.5.9. Wyniki symulacji dla wymuszenia z przeregulowaniem i wykładniczym opadaniem, dla wysokości schodka $A_I = 200\% N_K$, przy $\tau_M = 1s$.

W przypadku zastosowania wymuszenia o amplitudzie $A_I = 200\% N_K$ wartość czasu odpowiedzi w punkcie oznaczonym jako **B** jest wyraźnie najmniejsza i osiąga wartość $t_o = 16,1s$ przy wartości przeregulowania $p = 55,2\%$. Aby nie przekraczać dopuszczalnego progu 50% używając *wymuszenia z przeregulowaniem i wykładniczym opadaniem* należy ograniczyć amplitudę przeregulowania do wartości $A_I \approx 182\% N_K$. Wartość taką uzyskano w wyniku dodatkowych badań.

Zestawienie wyników badań wpływu *wymuszenia z przeregulowaniem i wykładniczym opadaniem* dla $\tau_M = 1s$ przedstawia tabela 5.4. Pierwsza kolumna zawiera wartości amplitudy schodka A_I podane w procentach nastawy kalibratora N_K . Druga kolumna podaje wartości minimalnego czasu odpowiedzi t_{oMIN} , uzyskanego dla danej amplitudy A_I . minimalny czas odpowiedzi podany został jako zgodny z minimum lokalnym oznaczonym na rysunkach 5.7.b., 5.8.b. i 5.9.b. jako punkt **B**. W trzeciej kolumnie zamieszczono δ_{tomin} jako procentową miarę skrócenia minimalnego czasu odpowiedzi w stosunku do czasu odpowiedzi dla wymuszenia skokiem jednostkowym. Kolejna kolumna zawiera wartości przeregulowania występującego przy tych minimalnych czasach odpowiedzi. W dwóch ostatnich kolumnach zamieszczono wartości stałej czasowej τ_I oraz stałej czasowej regulatora całkującego T_C , dla których uzyskano, minimalne czasy odpowiedzi systemu.

Tabela 5.4. Wyniki badań parametrów dynamicznych systemu dla *wymuszenia z przeregulowaniem i wykładniczym opadaniem* przy $\tau_M = 1s$.

A_I [%]	t_{oMIN} [s] (B)	δ_{tomin} [%]	p [%]	$\tau_{I\ opt}$ [s]	$T_{C\ opt}$ [s]
100	17,7	100	30,2	0	5,5
120	17,1	96,6	36,7	1,6	5,7
150	16,8	94,9	39,4	1,5	5,8
200	16,1	90,9	55,2	1,4	6,2

W punktach **C** na powyższych wykresach 5.7.b, 5.8.b oraz 5.9.b przeregulowanie wynosiło odpowiednio 48,1%, 71,8% oraz 122%.

5.4 Ocena skuteczności metody

Na podstawie przedstawionych wyżej wyników badań stwierdzono, że zastosowanie sygnału wymuszającego o kształcie innym niż skok jednostkowy może wpłynąć na skrócenie czasu odpowiedzi modelowanego systemu z miernikiem kontrolnym. Dwa, z szeregu przebadanych kształtów wymuszeń, przyniosły pozytywne rezultaty w postaci skrócenia czasu

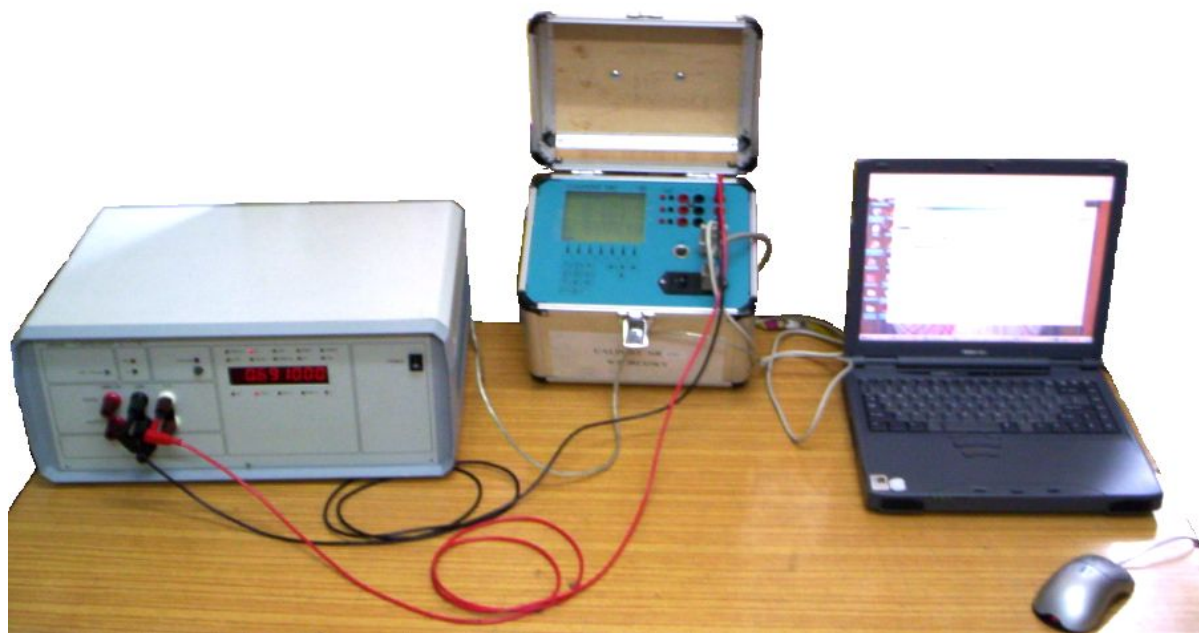
odpowiedzi systemu przy dopuszczalnym wzroście wartości przeregulowania. W przypadku zastosowania *wymuszenia z przeregulowaniem jedno schodkowym*, przedstawionego na rys.5.2, osiągnięto, w czasie badań, skrócenie odpowiedzi systemu w granicach 91% minimalnego czasu odpowiedzi systemu uzyskanego dla wymuszenia skokiem jednostkowym. Zastosowanie *wymuszenia z przeregulowaniem i wykładniczym opadaniem* (rys.5.3) skutkowało skróceniem czasu odpowiedzi modelowanego systemu do poziomu 92%.

Analizując możliwości poprawy właściwości dynamicznych fizycznego systemu z miernikiem kontrolnym stwierdzono, iż korzystniejsze jest wykorzystanie *wymuszenia z przeregulowaniem jedno schodkowym*, nie tylko z uwagi na blisko 9% skrócenie czasu odpowiedzi systemu, ale również ze względu na potrzebne do tego celu dużo mniejsze wartości nastaw generowane w trakcie sterowania procesem przejściowym niż w przypadku zastosowania *wymuszenia z przeregulowaniem i wykładniczym opadaniem*.

6 OPRACOWANIE I BADANIE WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNYCH MODELU FIZYCZNEGO SYSTEMU ODTWARZANIA NAPIĘĆ I PRĄDÓW

6.1 Opis systemu

Na rys.6.1 przedstawiony został system pomiarowy, zbudowany dla potrzeb fizycznej weryfikacji wyników opisanych badań symulacyjnych, w którego skład wchodzi następujące urządzenia:



Rys.6.1. System pomiarowy z kalibratorem C-101, miernikiem CALPORT-100 i komputerem z programem *Kalibra v.1.1*

- kalibrator uniwersalny typu C-101 [27] – napięć i prądów stałych i przemiennych. Przeznaczony jest do wzorcowania, sprawdzania i legalizacji elektrycznej aparatury pomiarowej. Charakteryzuje się jednocześnie dużą dokładnością i dużą mocą wyjściową przy małych gabarytach i masie. Umożliwia wytwarzanie napięć stałych (DC) i przemiennych (AC) do 1100 V w pięciu podzakresach 0,1-1-10-100-1000 V oraz prądów przemiennych do 20,5 A w pięciu podzakresach 0,001-0,01-0,1-1-10A. Częstotliwość sygnałów przemiennych wynosi: 45...2000 Hz; Wyposażony jest w interfejs szeregowy RS-232C. W badaniach zastosowano egzemplarz kalibratora, którego błąd celowo zwiększono, modyfikując parametry adjustacji;
- miernik typu CALPORT-100 [30] – trójfazowy analizator parametrów sieci energetycznej. Łączy on wiele funkcji (pomiar wartości skutecznej napięcia i prądu, pomiar kątów

fazowych i międzyprzewodowych, obliczanie mocy i energii, weryfikacja połączeń sieci, pomiar i analiza harmonicznych, zautomatyzowane testowanie liczników energii elektrycznej) z wielowariantowym wyprowadzaniem danych (wyświetlanie cyfrowe i graficzne, zapis danych w wewnętrznej pamięci, lokalne drukowanie, transmisja przez interfejs). Zakres pomiaru napięć obejmuje wartości 10,00...480,0 V natomiast prądów - 0,0050...6,000 A (pomiar bezpośredni) lub w zakresie 0,50...100,0 A z cęgami 100 A oraz w zakresie 5,0...1000 A z cęgami 1000 A. Miernik ten wyposażony jest w interfejs szeregowy w standardzie RS-232 z możliwością wyboru prędkości transmisji z szeregu 9600 19200 38400 i 57600 kbit/s;

- komputer z programem „Kalibra” w wersji 1.1 [86] – umożliwiający wykorzystanie przedstawionych powyżej przyrządów pomiarowych do przeprowadzenia procesu dopasowania wskazania kalibratora do nastawy w systemie zamkniętym z miernikiem kontrolnym, oraz prezentację wyników pomiarów.

6.2 Projekt aplikacji komputerowej sterującej systemem

6.2.1 Wybór środowiska programowego

Rynek oferuje szeroki wybór pakietów programowych lub programowo sprzętowych zaprojektowanych do pisania aplikacji o przeznaczeniu kontrolno pomiarowym. Wyróżnić można kilka wiodących produktów jak np. *LabVIEW (National Instruments)* [94], *LabWindow/CVI (National Instruments)* [95], *VEE (HP/Agilent)* [96], *Test Point (Keithley Instruments)* [97], i *DasyLab (DasyTec)* [98]. Są to narzędzia wysoce wyspecjalizowane, jednak zazwyczaj drogie, a często wymagające dodatkowych narzędzi sprzętowych (karty komunikacyjne lub urządzenia do akwizycji danych). Ze względu na możliwość wykorzystania platformy sprzętowej komputera PC wybrano środowisko Borland C++ Builder [99, 100]. Zastosowana została darmowa wersja (*Personal*) tego środowiska, której ograniczenia (m.in. zawężona obsługa baz danych i internetu) nie miały wpływu na projekt aplikacji *Kalibra 1.1*. Środowisko *C++ Builder* należy do systemów szybkiego projektowania aplikacji (*ang. RAD – Rapid Application Development*). Proces tworzenia interfejsu użytkownika jest wsparty przez gotowe komponenty, którymi projektant może zarządzać graficznie. Dzięki temu, że implementacja części wizualnej programu jest ułatwiona, programista może poświęcić więcej czasu się na implementację kluczowych zadań programu.

6.2.2 Opis funkcji i struktury programu

Opracowany dla potrzeb weryfikacji fizycznej wyników przedstawionych badań symulacyjnych program *Kalibra* w wersji 1.1, przeznaczony jest do obsługi systemu pomiarowego składającego się z kalibratora C-101 [27] oraz miernika CALPORT-100 [30]. Dla wymienionych urządzeń pomiarowych zaimplementowano w programie algorytm wyznaczania poprawki i modyfikowania wartości wejściowej kalibratora przedstawiony na rys.3.7.

Program spełnia następujące funkcje niezbędne do sterowania i wizualizacji procesu odtwarzania wartości napięcia i prądu:

- obsługa interfejsów komunikacyjnych komputera,
- sterowanie urządzeniami pomiarowymi podłączonymi do komputera,
- pobieranie, przetwarzanie i przesyłanie danych pomiarowych,
- możliwość wykonania serii działań (automatyzacja procesu sprawdzania mierników),
- prezentacja i archiwizacja wyników.

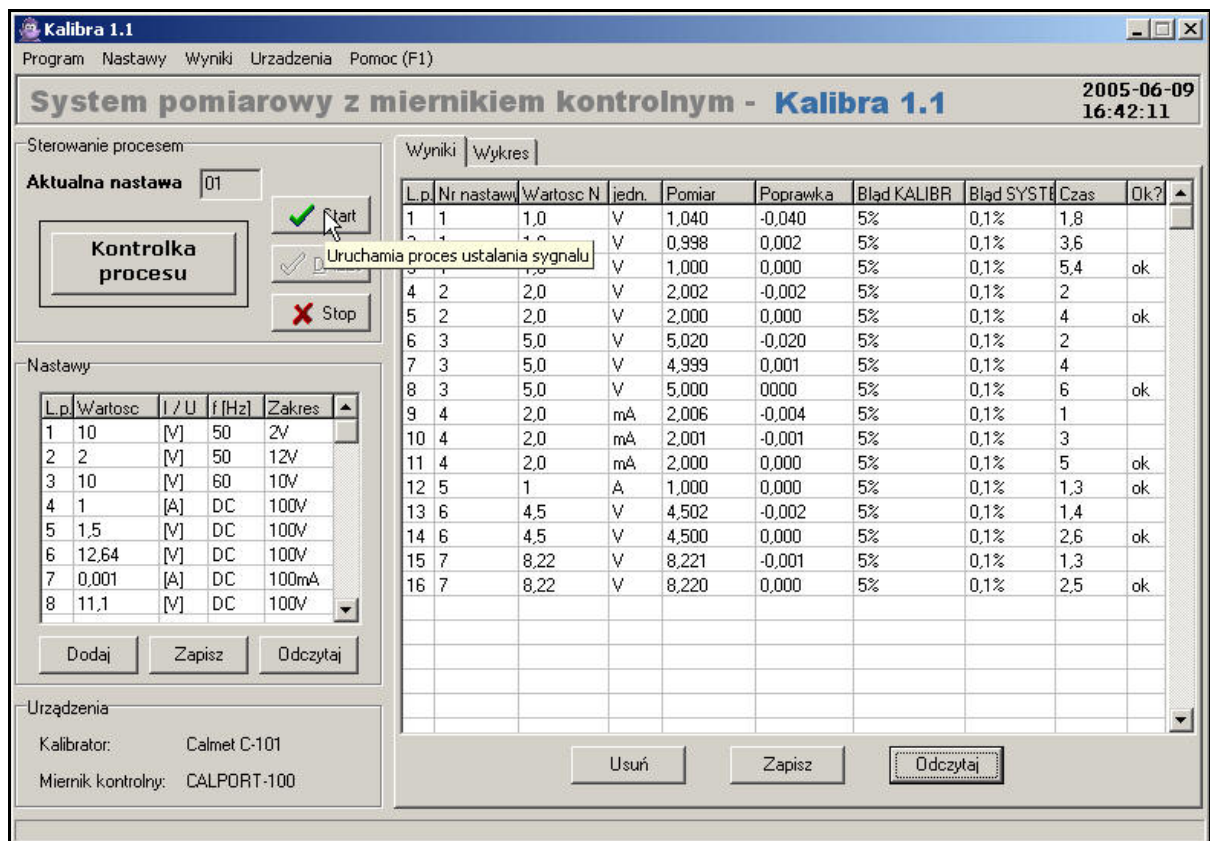
W strukturze zaprojektowanej aplikacji wyróżniono dwie podstawowe grupy elementów:

- elementy graficznego interfejsu użytkownika pozwalające na interakcje z użytkownikiem w celu wykonania procesu pomiarowego, oraz umożliwiające prezentacje i archiwizacje wyników pomiarów,
- elementy wewnętrzne zawierające algorytm działania procesów programowych oraz zespół funkcji wspomagających, odpowiedzialnych za komunikację urządzeniami zewnętrznymi oraz obsługę interfejsu użytkownika.

Głównym elementem graficznego interfejsu użytkownika jest okno główne programu przedstawione na rys.6.2.

W skład *okna głównego* wchodzi następujące elementy:

- menu programu,
- pole sterowania procesem,
- pole zarządzania ustawieniami,
- pole informacji o urządzeniach,
- panel zakładek prezentujących wyniki.



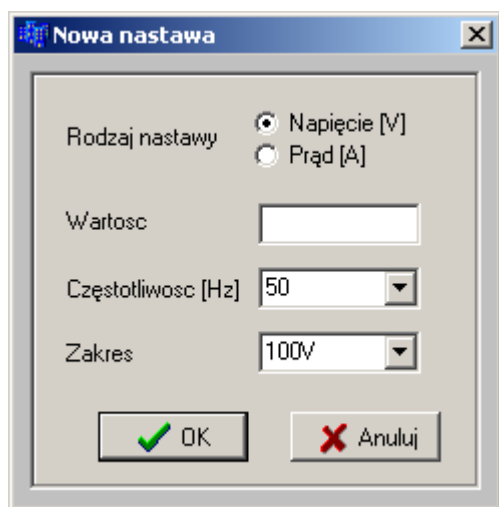
Rys.6.2. Okno główne programu *Kalibra 1.1*

Menu programu składa się z następujących pozycji:

- *Program* – jest to menu dające możliwość drukowania wyników w dwóch formach: jako wykres lub raport wyników. Wybór pozycji *Koniec* powoduje, że aplikacja kończy swoje działanie;
- *Nastawy* – umożliwia zarządzanie danymi z tabeli nastaw umieszczonej w oknie głównym. Użytkownik może dodawać dane z pliku, zapisywać do pliku już istniejące pozycje lub usunąć wszystkie dane z tabeli nastaw;
- *Wyniki* – po rozwinięciu tej pozycji menu programu użytkownik ma możliwość wybrania jednej z trzech akcji (*Otwórz z pliku*, *Zapisz jako*, *Usuń aktualne*), które dotyczą danych z tabeli wyników umieszczonej w zakładce *Tabela wyników*;
- *Urządzenia* – jest to menu pozwalające dokonać wyboru przyrządów pomiarowych podłączonych do komputera za pomocą interfejsu.
- *Pomoc* – po rozwinięciu tego menu użytkownik ma do wyboru następujące pozycje:
 - *Obsługa programu* – pozwalająca użytkownikowi na poznanie zasady użytkowania programu oraz sposobu postępowania w przypadku nieprawidłowego działania aplikacji,

- *Instrukcje obsługi* – zawierająca instrukcje obsługi dla przyrządów pomiarowych dołączanych do komputera,
- *O programie* – która wyświetla okno zawierające podstawowe informacje o wersji programu i jego przeznaczeniu,

Pole zarządzania nastawami jest obszarem okna głównego, w którym umieszczona została tabela z wprowadzonymi przez użytkownika nastawami. Chcąc dodać kolejną pozycję w tabeli użytkownik musi nacisnąć przycisk Dodaj, odpowiedzialny za wyświetlenie okna obsługującego funkcję dodawania nowej nastawy, przedstawionego na rys.6.3.



Rys.6.3. Okno dodawania kolejnej nastawy do tabeli nastaw

W powyższym oknie użytkownik ma możliwość sprecyzowania parametrów nastawy adekwatnie do możliwości kalibratora;

Pole sterowania procesem jest obszarem, gdzie umieszczone zostały przyciski pozwalające użytkownikowi na rozpoczynanie i zatrzymywanie procesu ustalania sygnału wyjściowego systemu pomiarowego oraz pola informacyjne o stanie procesu oraz aktualnej nastawie.

Pole *urządzenia* w lewej części okna, jest polem informacyjnym o wybranych w programie przyrządach pomiarowych. Program zaprojektowano tak by do obsługi systemu można było wybrać jeden z wprowadzonych do bazy kalibratorów oraz jeden z mierników kontrolnych, oraz by w przyszłości można było łatwo rozbudowywać bazę obsługiwanych urządzeń. W prototypowej wersji 1.1 programu Kalibra dostępne są: kalibrator C-101 oraz miernik CALPORT-100. W kolejnych wersjach oprogramowania planowane jest rozszerzenie możliwości współpracy z innymi urządzeniami jak np. miernik kontrolny wysokich klas dokładności typu HP-3458A[54].

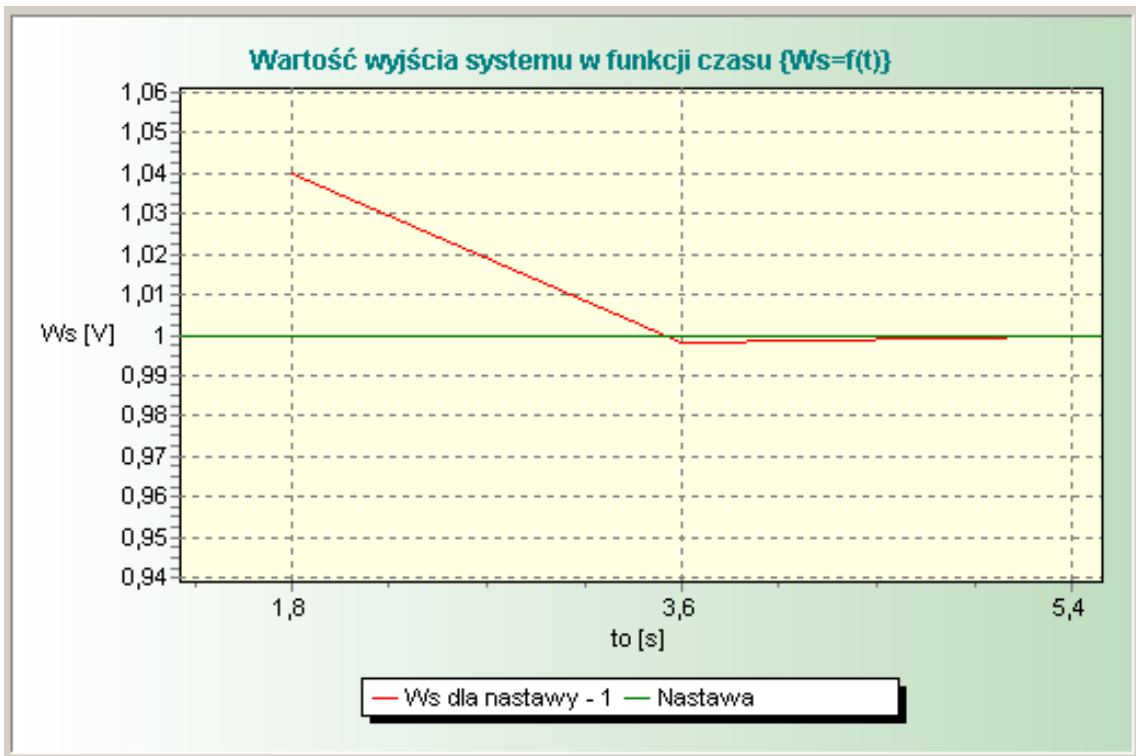
Panel zakładek służy do wyboru trybu wizualizacji wyników pomiarów i zawiera następujące dwie zakładki:

- zakładka *Tabela wyników* – gdzie kolejne pozycje w tabeli wpisywane są w czasie działania procesu ustalania. Dane z tabeli można zapisać do pliku, lub wydrukować w postaci raportu wyników. Zarządzanie danymi tabeli odbywa się także z pozycji menu Wyniki, które pozwala na wprowadzenie danych do tabeli z pliku. Kolumny tabeli przedstawione są na rys. 6.4. W momencie odczytu sygnału wyjściowego o wymaganej dokładności następuje decyzja o zakończeniu procesu ustalania. Wówczas do tabeli w ostatniej kolumnie zostaje wpisany znacznik *ok*;

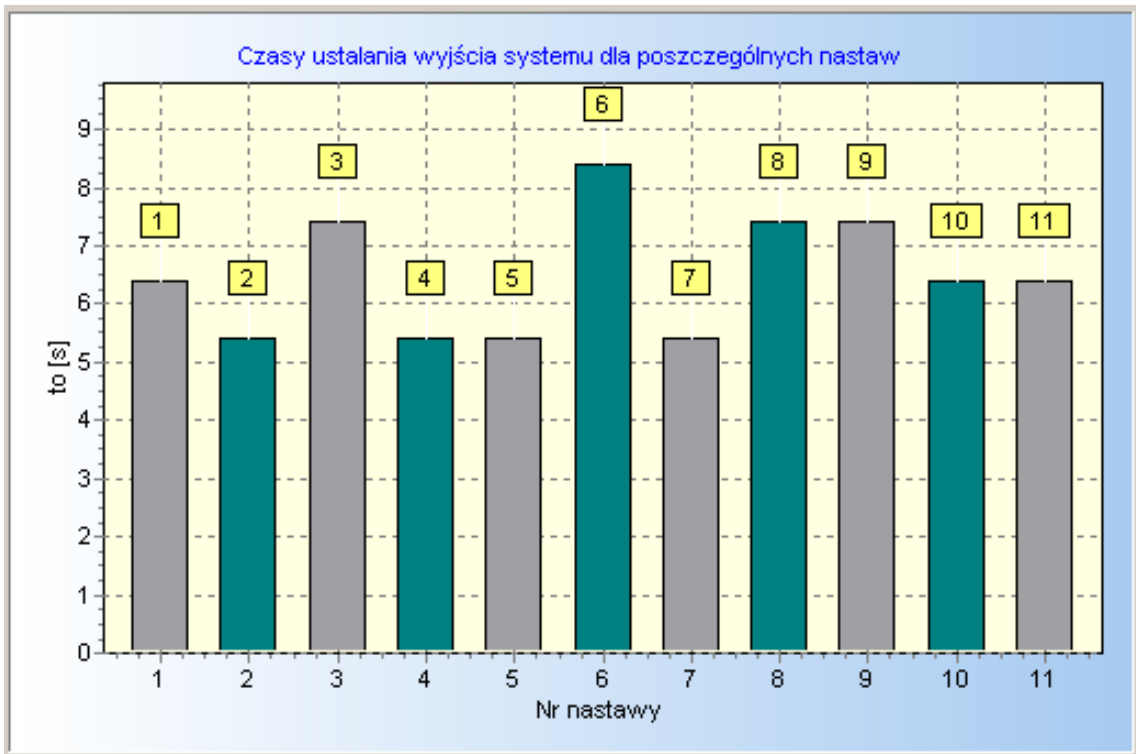
L.p.	Nr nastawy	Wartosc N	jedn.	Pomiar	Poprawka	Błąd KAL	Błąd SYS	Czas[s]	OK?
1	1	70	[V]	68,761	1,239	4%	0,1%	2,864	--
2	1	70	[V]	69,981	0,019	4%	0,1%	5,728	--
3	1	70	[V]	70,001	-0,001	4%	0,1%	8,592	ok
4	2	80	[V]	78,581	1,419	4,5%	0,1%	2,664	--
5	2	80	[V]	79,961	0,039	4,5%	0,1%	5,328	--
6	2	80	[V]	80,001	-0,001	4,5%	0,1%	7,992	ok
7	3	120	[V]	117,21	2,79	5,6%	1%	2,674	--
8	3	120	[V]	120,61	-0,609	5,6%	1%	5,338	--
9	3	120	[V]	120,01	-0,01	5,6%	1%	8,2	ok

Rys.6.4. Tabela wyników programu *Kalibra 1.1*

- zakładka *Wykresy* – w której użytkownik może obserwować interpretację graficzną wyników procesu ustalania sygnału wyjściowego systemu. W zakładce umieszczone są dwa wykresy: $W_S=f(t)$ – wartość wyjścia systemu odtwarzania w funkcji czasu (rys.6.5), oraz $t_0=f(N)$ – słupkowa prezentacja czasów ustalania odpowiedzi systemu dla poszczególnych nastaw (rys.6.6). Wykresy uaktualniane są na bieżąco w trakcie działania procesu ustalania sygnału wyjściowego, tak, aby użytkownik mógł obserwować bieżący stan procesu.



Rys.6.5. Wykres wartości wyjścia systemu odtwarzania w funkcji czasu $W_s=f(t_0)$



Rys.6.6. Wykres słupkowy czasów ustalania wyjścia systemu dla kolejnych nastaw

Opracowana aplikacja komputerowa wspomaga zarządzanie działaniem systemu z miernikiem kontrolnym według algorytmów przedstawionych w rozdziale 3 (rys.3.7, rys.3.8). Procedury programu podzielić można na grupy odpowiedzialne za następujące funkcje:

- obsługa kalibratora,
- obsługa miernika kontrolnego,
- obsługa komunikacji,
- obliczanie poprawki,
- zarządzanie bieżącymi danymi.

Obsługa kalibratora obejmuje: zarządzanie zakresami i nastawami oraz obsługę protokołu komunikacyjnego kalibratora.

Obsługa miernika odpowiedzialna jest za odczyt wyników pomiarów. Odczyt poprzedzony jest wysłaniem do miernika żądania wykonania pomiaru i przesłania danych. W przypadku miernika CALPORT-100 ramka odpowiedzi obejmuje 486 bajtów danych [30]. Interpretacja otrzymanych danych z miernika polega na odczycie znaków ASCII z odpowiednich pozycji odebranej ramki a następnie zamianie znaków na liczby zmiennoprzecinkowe i wpisaniu ich do zmiennych programu.

Obsługa komunikacji to zespół procedur do wysyłania i odbierania danych. Procedury nadawania i odbioru danych zaimplementowane zostały przy użyciu osobnych wątków roboczych, aby nie blokować interfejsu użytkownika w czasie obsługi transmisji danych. Wątek nadawczy kalibratora odbiera od aplikacji komunikaty niosące kody nastaw i obsługuje ich przesłanie. Wątek nadawczy miernika w podobny sposób obsługuje rozkazy wykonania pomiarów i odczytu wyników. Zadaniem wątku odbiorczego jest pobieranie znaków z portu wejściowego, analiza poprawności tych znaków, składanie ich w pakiety, i w przypadku stwierdzenia gotowości pakietu powiadomienie programu głównego o gotowości odebranych danych.

Obliczanie poprawki wyzwalane jest poprzez odebranie komunikatu o nowej wartości pomiaru W_{MK} . Polega na obliczeniu modułu różnicy wskazania miernika kontrolnego W_{MK} oraz początkowej wartości nastawy kalibratora N_K . Jeżeli obliczona wartość różnicy zawiera się w granicach określonych marginesem błędu systemu $|N_K - W_{MK}| < \varepsilon$ to procedura ustawia znacznik zakończenia procesu ustalania sygnału na wyjściu systemu pomiarowego. W przeciwnym wypadku wartość tej różnicy mnożona jest przez współczynnik K będący odwrotnością, wprowadzonej jako parametr programu, stałej czasowej regulatora całkującego T_C . Następnie ta zmodyfikowana wartość różnicy sumowana jest z dotychczasową wartością poprawki P .

Suma zmodyfikowanej poprawki P oraz nastawy kalibratora N_K jest podstawą nowego kodu nastawy, który zostaje niezwłocznie przesłany do procedury nadawczej kalibratora.

Zarządzanie bieżącymi danymi obsługuje tabelę wyników bieżącego procesu ustalania sygnału wyjściowego. W czasie trwania procesu ustalania kreślone są wykresy (rys.6.5 i rys.6.6), dzięki czemu użytkownik może obserwować aktualny stan procesu ustalania sygnału na wyjściu systemu pomiarowego.

6.3 Badanie właściwości dynamicznych

Przy zastosowaniu programu *Kalibra* zostały przeprowadzone testy opisanego fizycznego modelu systemu odtwarzania napięć i prądów. W tabeli 6.1 zamieszczono wartości parametrów dynamicznych urządzeń wchodzących w skład fizycznego modelu systemu odtwarzania napięć i prądów.

Tabela 6.1 Parametry dynamiczne modelu fizycznego.

nazwa parametru	wartość [ms]
opóźnienie interfejsu kalibratora	10-20
stała czasowa kalibratora T_{K1}	200-250
stała czasowa kalibratora T_{K2}	20-30
opóźnienie miernika kontrolnego τ_{MK}	450-500
opóźnienie interfejsu miernika τ_{IM}	900-950

Model symulacyjny, gdzie sygnał sterujący pochodzący z miernika kontrolnego jest traktowany jako ciągły, w dużym przybliżeniu odzwierciedla pracę systemu, gdy czas pomiaru, traktowany jako suma opóźnienia miernika kontrolnego i opóźnienia interfejsu miernika, jest dużo mniejszy od czasu ustalania wartości wyjściowej kalibratora. Algorytm przedstawiony w rozdziale 3 (rys 3.7) może być w takich przypadkach wykorzystany do modyfikacji nastaw kalibratora poprzez ingerencję w trakcie procesu przejściowego kalibratora. W przypadkach, gdy czas pomiaru jest porównywalny lub większy od czasu ustalania wyjścia kalibratora nie jest możliwe modyfikowanie procesu przejściowego wyjścia kalibratora, a więc nie zasadne jest wykonywanie pomiarów w trakcie jego trwania. W takich przypadkach ze względów praktycznych algorytm pracy powinien zawierać opóźnienie pomiędzy wysłaniem nastawy do kalibratora a rozpoczęciem pomiaru. Opóźnienie to powinno pozwalać na ustalenie się wartości na wyjściu kalibratora a więc nie powinno być mniejsze od jego czasu ustalania wartości wyjściowej. W odniesieniu do badań symulacyjnych, dla uchybu ustalonego $\varepsilon = 0,1\%$ nastawy, opóźnienie to określa zależność (4.1)

W przypadku badanego modelu fizycznego czas pomiaru był w przybliżeniu równy czasowi ustalania wyjścia kalibratora dla uchybu ustalonego regulacji $\varepsilon = 0,1\%$ nastawy. Do algorytmu pracy programu *Kalibra* wprowadzono opóźnienie wykonania pomiaru o wartości równej czasowi ustalania wartości wyjściowej systemu z kalibratorem kontrolnym zgodnie ze wzorem (4.1).

Dynamika procesu przejściowego modelu symulacyjnego systemu zależna jest od wartości stałej czasowej T_C . W przypadku opisywanego modelu fizycznego, w związku z brakiem możliwości ingerencji w proces przejściowy wyjścia kalibratora, wprowadzenie stałej czasowej T_C o wartości różnej od jedności powoduje wydłużenie całkowitego czasu ustalania wartości wyjściowej systemu.

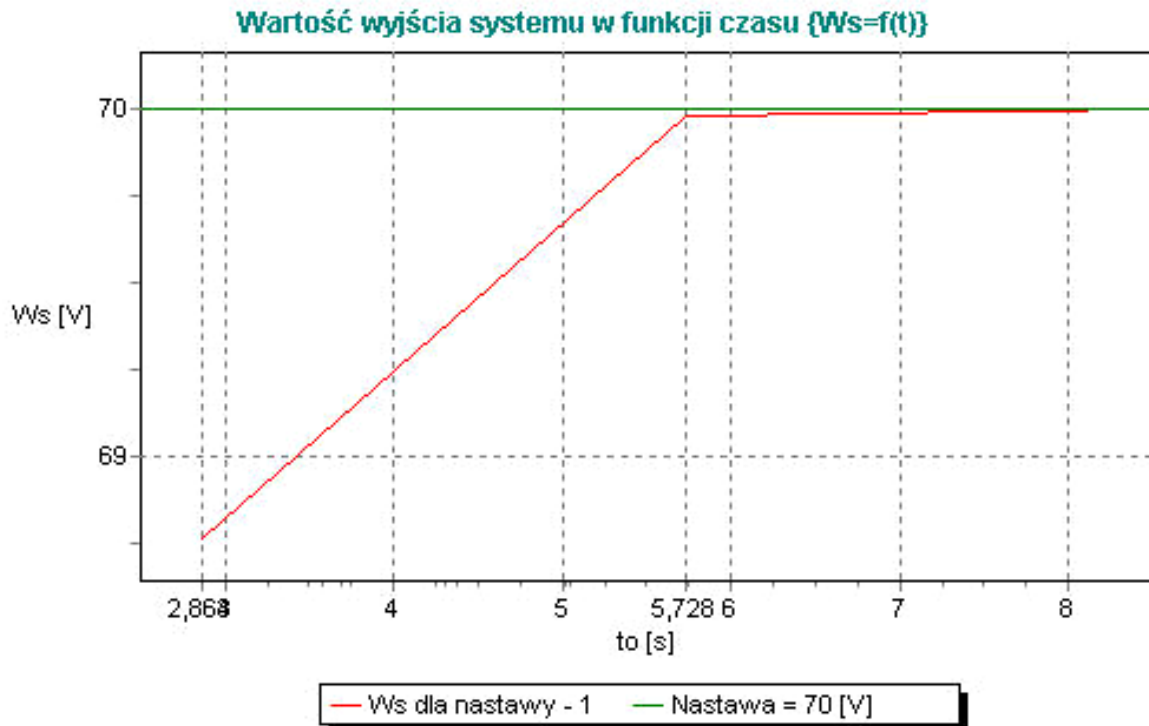
Badania fizycznego modelu przeprowadzono dla wartości stałej czasowej $T_C = 1$, oraz dla stałej czasowej $T_C = T_{C(OPT)} = 4$ zgodnie ze wzorem (4.12).

Rys.6.7 przedstawia tabelę wyników utworzoną w opracowanym programie. Tabela ta zawiera numery i wartości nastaw, wartości poszczególnych pomiarów, obliczone wartości przyrostu poprawki oraz czas uzyskania pomiaru od chwili rozpoczęcia procesu ustalania.

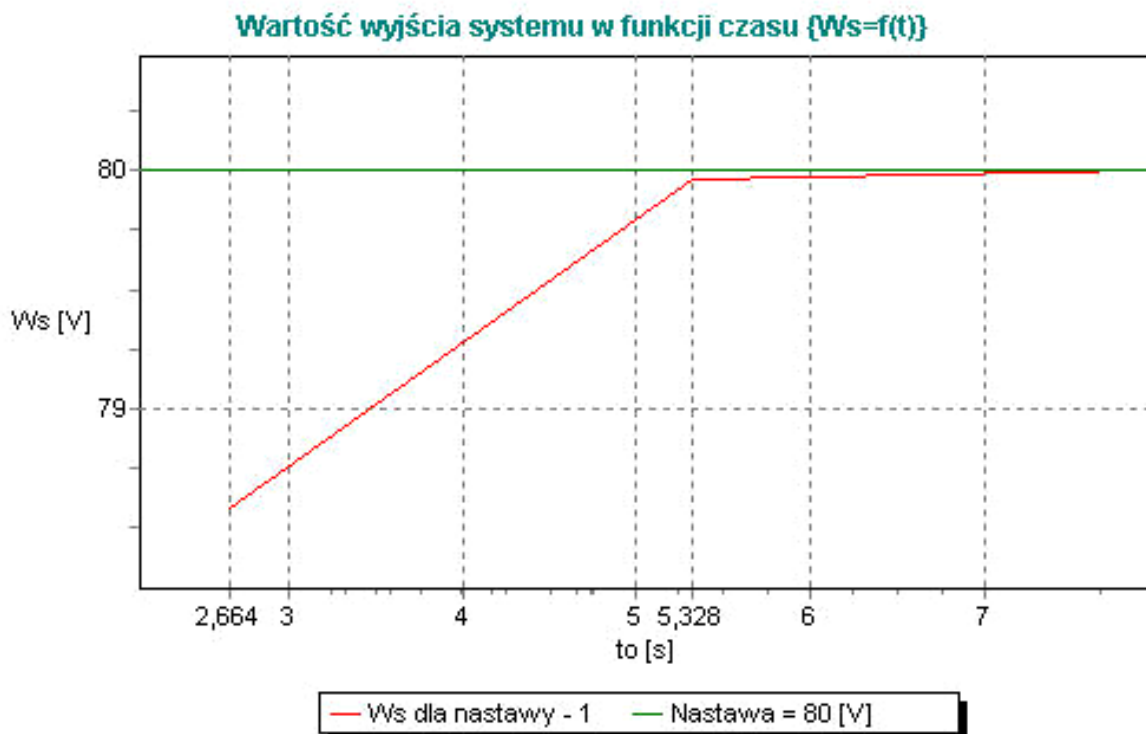
L.p.	Nr nastawy	Wartosc N	jedn.	Pomiar	Poprawka	Błąd KAL	Błąd SYS	Czas[s]	Ok?
1	1	70	[V]	68,761	1,239	4%	0,1%	2,864	--
2	1	70	[V]	69,981	0,019	4%	0,1%	5,728	--
3	1	70	[V]	70,001	-0,001	4%	0,1%	8,592	ok
4	2	80	[V]	78,581	1,419	4,5%	0,1%	2,664	--
5	2	80	[V]	79,961	0,039	4,5%	0,1%	5,328	--
6	2	80	[V]	80,001	-0,001	4,5%	0,1%	7,992	ok
7	3	120	[V]	117,21	2,79	5,6%	1%	2,674	--
8	3	120	[V]	120,61	-0,609	5,6%	1%	5,338	--
9	3	120	[V]	120,01	-0,01	5,6%	1%	8,2	ok

Rys.6.7. Wyniki testowania systemu w programie *Kalibra 1.1*

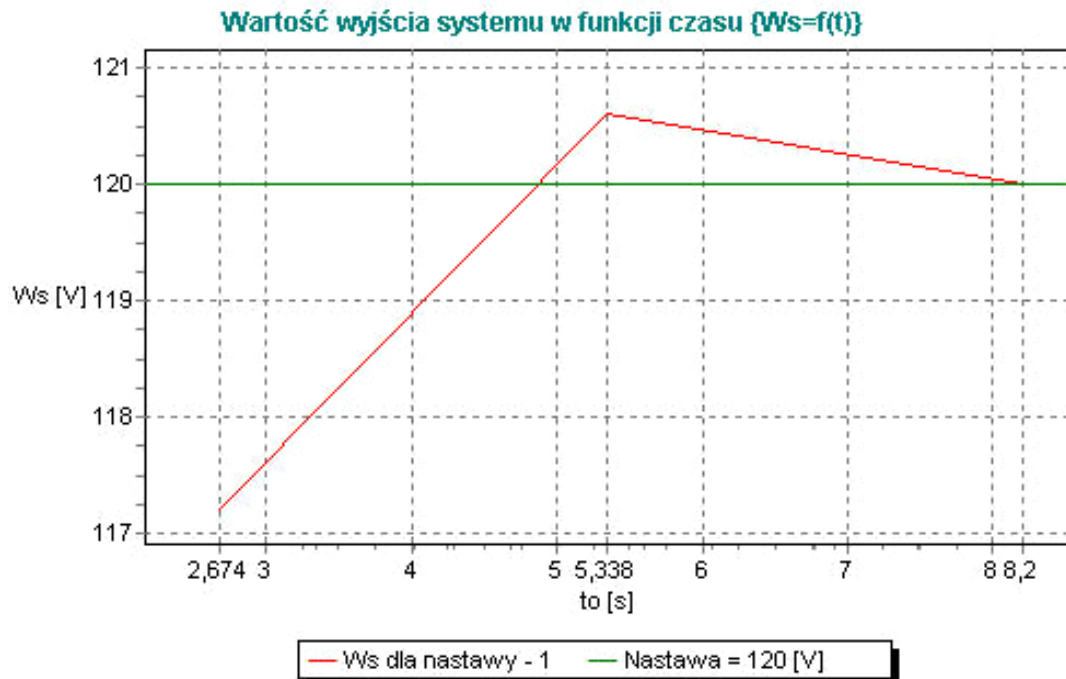
Wykresy wyników testowania modelu fizycznego systemu pomiarowego, wykonane przez program *Kalibra 1.1* w wyniku procesów ustalania, zostały przedstawione na rys.6.8, 6.9, 6.10.



Rys.6.8. Wykres wartości wyjścia systemu odtwarzania w funkcji czasu dla nastawy 70 V



Rys.6.9. Wykres wartości wyjścia systemu odtwarzania w funkcji czasu dla nastawy 80 V



Rys.6.10. Wykres wartości wyjścia systemu odtwarzania w funkcji czasu dla nastawy 120 V

Średni czas ustalenia sygnału wyjściowego modelu fizycznego systemu dla stałej $T_C = 1$ wyniósł 8,2 s. W wyniku badań modelu fizycznego dla takich samych nastaw przy zastosowaniu stałej czasowej $T_C = T_{C(OPT)} = 4$ średni czas odpowiedzi wyniósł 19,3 s. Dla porównania, minimalny czas odpowiedzi modelu symulacyjnego systemu obliczony ze wzoru (4.13) dla wartości parametrów dynamicznych urządzeń zastosowanych w opisanym modelu fizycznym wyniósł 11,53s.

6.4 Wnioski

Zastosowanie kalibratora C-101 ze zmodyfikowanymi współczynnikami adjustacji oraz miernika kontrolnego typu CALPORT-100 dało możliwość weryfikacji wyników badań symulacyjnych dla wartości parametrów zgodnych z parametrami fizycznego systemu.

Porównując wyniki badań modelu fizycznego i modelu symulacyjnego zauważono, iż biorąc pod uwagę stosunek czasu opóźnienia miernika τ_M do stałej czasowej kalibratora T_{KI} wyróżnić można dwa przedziały, dla których, aby uzyskać minimalne czasy odpowiedzi systemu, należy zastosować inną stałą czasową T_C regulatora. Umowną granicę między tymi przedziałami można w przybliżeniu wyrazić równaniem $\tau_M = T_{KI}$. Dla czasu opóźnienia miernika $\tau_M \ll T_{KI}$, czyli takiego, który pozwala na stosunkowo dużo pomiarów w trakcie procesu przejściowego, na wyjściu kalibratora należy zastosować stałą czasową $T_C = T_{C(OPT)}$ zgodnie ze wzorem (4.12). Dla mierników stosunkowo wolnych, gdzie $\tau_M > T_{KI}$, należy zastosować zmodyfikowany algorytm uwzględniający potrzebę opóźnienia pomiaru po wprowadzeniu nastawy kalibratora oraz zastosować stałą T_C o wartości równej 1.

7 PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Omówiono systemy z kalibratorem kontrolnym i systemy z miernikiem kontrolnym do sprawdzania multimetrów oraz możliwości ich automatyzacji z zastosowaniem programów komputerowych, w tym programów *Calpro 101* [26] i *Calsoft 100* [30] opracowanych przez autora. Podstawę obu systemów stanowią systemy odtwarzania napięć i prądów odpowiednio z kalibratorem kontrolnym i z miernikiem kontrolnym. Systemy odtwarzania napięć i prądów z miernikiem kontrolnym są ekonomiczne kosztowo, dlatego zaproponowano opracowanie takiego systemu o właściwościach metrologicznych równorzędnych systemom odtwarzania napięć i prądów z kalibratorem kontrolnym. W celu uzyskania wysokiej dokładności wybrano system zamknięty z addytywną korekcją błędów i astatyczną charakterystyką regulacji, w celu uzyskania dobrych właściwości dynamicznych podjęto się optymalizacji parametrów systemu.

Przeanalizowano właściwości statyczne systemu otwartego z kalibratorem kontrolnym i zaproponowanej strukturę i algorytm pracy systemu zamkniętego z miernikiem kontrolnym. Opracowano równania błędów systemów i wykazano, że o błędzie systemu z kalibratorem kontrolnym decydują błędy kalibratora (3.3), natomiast o błędzie systemu z miernikiem kontrolnym, zbudowanego jako system zamknięty z addytywną korekcją błędów i astatyczną charakterystyką regulacji, decydują błędy miernika (3.13). Opracowano modele systemów dla potrzeb analizy właściwości dynamicznych – w modelach systemów uwzględniono właściwości interfejsów.

Opracowano zautomatyzowane stanowisko do badań symulacyjnych (rys.4.1, 4.2), z zastosowaniem programów *MATLAB* i *Simulink*, właściwości dynamicznych systemów. Wykonano badania właściwości dynamicznych systemu otwartego z kalibratorem kontrolnym i systemu zamkniętego z miernikiem kontrolnym w odpowiedzi na zmianę nastawy w postaci skoku jednostkowego. W badaniach wyznaczano błędy dynamiczne systemów w funkcji czasu dla wytypowanych zestawów parametrów systemu, a następnie wyznaczano czas odpowiedzi i przeregulowanie. W badaniach pokazano, że:

- dla dowolnego zestawu parametrów czasowych kalibratora, miernika kontrolnego oraz ich interfejsów można dobrać stałą czasową regulatora całkującego tak, aby osiągnąć minimalny czas odpowiedzi systemu odpowiedni dla tych parametrów,
- dla dowolnego zestawu parametrów systemu zachodzi liniowa zależność optymalnej wartości stałej czasowej T_C regulatora całkującego od czasu pomiaru τ_M miernika kontrolnego i jego interfejsu, stałej czasowej T_{KI} kalibratora i opóźnienia interfejsu kalibratora τ_{IK} . Wyznaczono szereg równań cząstkowych (tabela 4.5) dla optymalnej

wartości stałej czasowej T_C oraz zaproponowano równanie ogólne (4.12) uzależniające dobór optymalnej wartości stałej czasowej T_C od wszystkich uwzględnionych w badaniach parametrów zamodelowanego systemu odtwarzania napięć i prądów,

- dobór stałej czasowej T_C nie jest zależny od wartości błędu zastosowanego w systemie kalibratora,
- minimalny czas odpowiedzi jest zależny od wszystkich parametrów dynamicznych zamodelowanego systemu oraz od wartości błędu zastosowanego w systemie kalibratora. Wyznaczono równania (tabela 4.6) minimalnej wartości czasu odpowiedzi przy spełnieniu warunku optymalnego doboru stałej czasowej regulatora całkującego, i na ich podstawie zaproponowano równania ogólne (4.13, 4.14) uzależniające wartość czasu odpowiedzi od wszystkich uwzględnionych w badaniach parametrów zamodelowanego systemu odtwarzania napięć i prądów,
- minimalny czas odpowiedzi systemu jest czuły na niedokładność doboru optymalnej stałej czasowej T_C z uwagi na stromość wykresów czasu odpowiedzi w pobliżu punktów należących do *prostej optymalnego doboru T_C* ,
- w opracowanym systemie z miernikiem kontrolnym możliwe jest osiągnięcie czasu odpowiedzi o wartości nie przekraczającej dwukrotnego czasu odpowiedzi systemu z kalibratorem kontrolnym (np. dla $T_{KI}=1$ s i $\tau_{IK}=0,01$ s w systemie otwartym $t_0=7,13$ s, w systemie zamkniętym $t_{o(MIN)}=12,3$ s - przy zastosowaniu stosunkowo szybkiego miernika kontrolnego),
- przeregulowanie uzależnione jest głównie od szybkości miernika kontrolnego i stałych czasowych kalibratora - dla optymalnie dobranych wartości stałej czasowej regulatora całkującego przyjmuje wartości nie większe od 43% i maleje wraz ze wzrostem współczynnika T_{KI}/τ_M . Mniejsze wartości przeregulowania można uzyskać stosując szybszy miernik kontrolny. Innym sposobem na osiągnięcie mniejszych wartości przeregulowania jest dobór większej od optymalnej wartości stałej czasowej regulatora całkującego, co jednak związane jest z wydłużeniem czasu odpowiedzi systemu.

Zbadano możliwości poprawy właściwości dynamicznych systemu zamkniętego przez dobór kształtu wymuszenia. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że zastosowanie sygnału wymuszającego o kształcie innym niż skok jednostkowy może wpłynąć na skrócenie czasu odpowiedzi modelowanego systemu z miernikiem kontrolnym. Dwa, z szeregu przebadanych kształtów wymuszeń, przyniosły pozytywne rezultaty w postaci skrócenia czasu odpowiedzi systemu przy dopuszczalnym wzroście wartości przeregulowania. W przypadku

zastosowania *wymuszenia z przeregulowaniem jedno schodkowym* osiągnięto skrócenie odpowiedzi systemu w granicach 91% minimalnego czasu odpowiedzi systemu uzyskanego dla wymuszenia skokiem jednostkowym. Zastosowanie *wymuszenia z przeregulowaniem i wykładniczym opadaniem* skutkowało skróceniem czasu odpowiedzi modelowanego systemu do poziomu 92%. Analizując możliwości poprawy właściwości dynamicznych fizycznego systemu z miernikiem kontrolnym stwierdzono, iż korzystniejsze jest wykorzystanie *wymuszenia z przeregulowaniem jedno schodkowym*, nie tylko z uwagi na blisko 9% skrócenie czasu odpowiedzi systemu, ale również ze względu na potrzebne do tego celu dużo mniejsze wartości nastaw generowane w trakcie sterowania procesem przejściowym niż w przypadku zastosowania *wymuszenia z przeregulowaniem i wykładniczym opadaniem*.

Opracowano model fizyczny systemu zamkniętego odtwarzania napięć i prądów z miernikiem kontrolnym, w którym zastosowano kalibrator typu C101, miernik Calport 100 i opracowany program komputerowy *Kalibra*. Badania właściwości dynamicznych modelu fizycznego wykazały zgodność, co do rzędu z wynikami badań symulacyjnych.

W pracy pokazano, że zamknięty system odtwarzania napięć i prądów z miernikiem kontrolnym, z zastosowaniem addytywnej korekcji błędów i astatycznej charakterystyki regulacji, ma dokładność statyczną równą dokładności miernika kontrolnego i może mieć tylko dwukrotnie dłuższy czas odpowiedzi. W ten sposób, postawiona teza została udowodniona.

LITERATURA

1. Lubimow Ł.I., Forsirowa I.D., Szapiro J.Z.: *Powierka sriedstw elektriczeskich izmierienij*. Sprawocznaja kniga. Energoatmizdat. Leningrad, 1987.
2. Olencki A.: *Zastosowanie kalibratorów do adiustacji, wzorcowania i sprawdzania urządzeń*. II Konferencja Naukowa KNWS'05 „Informatyka – sztuka czy rzemiosło”, Złotniki Lubańskie, 2005.
3. *Prawo o miarach*. Ustawa z dnia 27 maja 2004. Dz. U. z 2004 r. Nr 141, poz.1493. (www.ks.sejm.gov.pl)
4. T. Guzy, E. Smolarz, T. Wypych: *Wykorzystanie kompetencji laboratorium akredytowanego dla potrzeb automatyki zabezpieczeniowej*. Energopomiar Elektryka, Gliwice, 2005, (www.elektryka.com.pl).
5. *Zarządzenie Nr 5 Prezesa GUM z dnia 6 lutego 1995 r. w sprawie wprowadzenia instrukcji sprawdzania użytkowych i kontrolnych liczników energii elektrycznej prądu przemiennego*. Dziennik Urzędowy Miar i Probiernictwa Nr 2, Warszawa, 1995.
6. *Test and measurement in Europe: EPN Survey Results*. EPN Nr9, Sept.2001.
7. Szymtkiewicz J.: *Analiza możliwości poprawy parametrów metrologicznych uniwersalnego kalibratora napięć i prądów stałych i przemiennych*. Rozprawa doktorska, Zielona Góra, 2000.
8. Kaczmarek J., Kulesza W., Pawłowski J., Pietrzak A.: *Uniwersalny kalibrator napięcia, prądu i rezystancji – SQ7000*. XXVII Międzyuczelniana Konferencja Metrologów MKM'95, Zielona Góra, 1995.
9. Olencki A.: *Praktyczeskaja realizacja iererhiczeskoi struktury mier naprazenija i toka w Polsce*. Zbirnik naukowich prac Wipusk N5. Żurnał WOTTP. Kijów, 1999. s.84-87.
10. *Zarządzenie Nr13 Prezesa PKNMiJ z dnia 9 lutego 1978r. w sprawie ustalania przepisów o sterowanych źródłach odniesienia (kalibratorach) napięcia stałego*. Dziennik Normalizacji i Miar Nr4, 1978, Warszawa.
11. *Zarządzenie Nr55 Prezesa PKNMiJ z dnia 3 grudnia 1984r. w sprawie ustalania przepisów o kontrolnych sterowanych źródłach odniesienia wartości skutecznej napięcia sinusoidalnego w paśmie częstotliwości od 10Hz do 100kHz. Przepisy o legalizacji i sprawdzaniu narzędzi pomiarowych*. Załącznik do Dziennika Normalizacji i Miar nr16, 1984, Warszawa.
12. Chwaleba A., Poniński M., Siedlecki A.: *Metrologia elektryczna*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1994.
13. *Multifunkcni kalibrator M-130*. Meatest, 1998, (www.meatest.cz).
14. *5500A Multi-Product Kalibrator*. Technical Data. Fluke, 1994.
15. Bolikowski J., Kaczmarek J., Kulesza W., Pawłowski J., Pietrzak A.: *Uniwersalny przenośny kalibrator SQ8000*. IV Szkoła-Konferencja "Metrologia Wspomagana Komputerowo", MWK'99, Rynia k.Warszawy 1999, t.3, str.117-122.
16. Szymtkiewicz J.: *Mikroprocesorowy układ sterowania kalibratora SQ10*. V Krajowa Konferencja „Zastosowanie Mikroprocesorów w Automatyce i Pomiarach”. Warszawa, 1986.

17. Olencki A., Szmytkiewicz J.: *Komputerowy system pomiarowy do testowania mierników napięcia i prądu*. II Konferencja „Systemy pomiarowe w badaniach naukowych i w przemyśle”. Materiały konferencyjne. Zielona Góra, 1998, s.107-114.
18. *Design and Development of the 5790A Automated AC measurement Standard*. Application Note, Philips, Netherlands.
19. *Total Solutions in Precision Measurement*. Fluke, 1267473 C-ENG Rev B, USA, 2001.
20. *5700A/5720A Series II Multi-Function Calibrator*. Operators manual, PN601622, Fluke, 1996.
21. *Postępowanie przy czynnościach metrologicznych. Układ sprawdzeń narzędzi do pomiarów napięcia elektrycznego*. 5,03/1 arkusz 19. Załącznik nr1 do Dziennika Normalizacji i Miar nr6 z dnia 13 czerwca 1983r., poz.10.
22. *Postępowanie przy czynnościach metrologicznych. Układ sprawdzeń wzorców siły elektromotorycznej i napięcia stałego*. 5,03/1 arkusz 13. Załącznik nr1 do Dziennika Normalizacji i Miar nr6 z dnia 13 czerwca 1983r., poz.10.
23. *NBS Calibration Services. Users Guide 1986-88/Revised*. National Bureau of Standards Special Publication 250 -1986 Edition, U.S. Government Printing Office, Washington, 1987.
24. Stanioch W., Tarłowski A.: *Odtwarzanie i przekazywanie jednostek wielkości elektrycznych prądu stałego i przemiennego małej częstotliwości*. V Sympozjum Klubu Poselskie Forum ISO 9000 "Metrologia w systemach jakości", Mikołajki 1997, tom2 str.E/1...13.
25. Pogliano U., Bosco G.C.: *Automatic calibration of precision and programmable AC measuring instruments at IEN*. IEE Proc. -Sci. Meas. Technol., Vol.143, No4, July 1996, pp.259...262.
26. Dąbrowski R., Dobrzyński R.: *Software for C-101 Calibrator control and for direct and alternating voltage and current meter testing Calpro-101*. User's manual, Calmet, 2002.
27. *Kalibrator napięć i prądów stałych i przemiennych typu C101F*. Instrukcja obsługi. Calmet, 2004.
28. Szmytkiewicz J.: *Układ pomiarowy dla cyfrowej adiustacji kalibratora uniwersalnego*. XXX MKM'98. Materiały konferencyjne. Międzyzdroje, 1998.
29. Dąbrowski R.: *Projekt i oprogramowanie stacji wzorcowniczej do sprawdzania liczników energii elektrycznej*. MSN, Zielona Góra, 1998.
30. Dąbrowski R.: *Portable calibration meter model Calport 100. Calsoft 100 Software User's Manual*. HEG, 1999, pp.28-36.
31. *Portable calibration meter model Calport 100 accuracy class 0,1*. User's manual. HEG, 1999.
32. *Analizator parametrów sieci energetycznej i tester liczników energii typu Calport 100*. Karta katalogowa, Calmet, 2003.
33. *Expression of the performance of electrical and electronic measuring equipment*. IEC 60359.

34. *Elektroniczne przyrządy pomiarowe. Określanie parametrów. Badania.* PN-85/T-06500/04.
35. Olencki A.: *Filozofia testowania mierników napięć i prądów – sztuka budowy rodziny kalibratorów uniwersalnych.* PAK 9/1998, s.358-361.
36. Oldham N., Parker M., Young A., Smith A.: *A High-Accuracy 10Hz-1MHz Automatic AC Voltage Calibration System.* IEEE Transactions on Instrumentation and measurement, vol.IM-36, No4, 1987, s.883-887.
37. *8042A Digital Multimetr. Instruction Manual.* Fluke, Rev.2,4/94, Dec. 1991.
38. *Multimetr HP3458A. Instrukcja obsługi, programowania i konfigurowania.* Hewlett Packard, USA, 1994.
39. *6 ½ - Digit Precisions – Multimetr HM8112-3.* Produkte 2004, Hameg Instruments, 2004.
40. Olędzki J.: *Multimetry – stan dzisiejszy i rozwój.* V Sympozjum Klubu Poselskie Forum ISO 9000 "Metrologia w systemach jakości", Mikołajki 1997, tom2 str.E/29...38.
41. Ornatskij P.P.: *Awtomaticzeskije izmiereniya i pribory analogowyje i cifrowyje.* Kijów, Wiszcza Szkoła, 1986.
42. Dąbrowski R., Olencki A.: *Analiza modelu systemu pomiarowego odtwarzania napięć i prądów do sprawdzania mierników.* X Sympozium „Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych”. Krynica Górská, 2000.
43. Szmytkiewicz J., Urbański K.: *Parametry metrologiczne kalibratorów uniwersalnych.* XXIX MKM'97. Materiały konferencyjne tom2, Nałęczów, 1997, s.537-542.
44. Olencki A., Urbański K.: *Kalibratory napięcia i prądu. Ogólne wymagania i badania.* Norma Zakładowa ZN-86/MERA-005/323. Lumel, Zielona Góra, 1986.
45. Borodatyj W.I., Semieniuk A.Ł.: *Metodyka normirowanija i opriedielenija metrologiczeskich charakteristik priobrazowatieliej koda w postojannoje napriazhenije ili tok.* Metrologiczeskoje obesieczhenije dinamiczeskich izmierienij w informacionno-izmeritielnych sistiemach. Lwów WNIIMIUS, 1981, s.20-25.
46. *5700A Calibrator. Service Manual.* Fluke PN791996, 1996.
47. *Model 9100 Universal Calibration System.* Wavetek Corporation, 1996.
48. *Total Solutions in Precision Measurement.* Fluke, 1267473 C-ENG Rev B, USA, 2001.
49. Diemczenko J.W.: *Sistiemno-orientirowannyje mnogoznacznyje miery pieriemennogo napriazhenija s szirokim czastotnym i dinamiczeskim diapozonom.* Autoreferat rozprawy doktorskiej. Kijów, 1988.
50. *Met/Cal 3.0 Calibration Software.* Technical Data, 949875024411, Philips, Netherlands
51. *Design and Development of the 5790A Automated AC Measurement Standard.* Application Note, 949875023611, Philips, Netherlands.
52. Toomsalu F.: *Kontrol i testoprigodnost izmeritielnych priborow.* Sbornik statiej "Powyszenie konkurentosposobnosti radioelektronnoj apparatury. Opyt, rezultaty, problemy" pod redakciej Wołgina Ł.I. Izdatielstwo "Walgus", Tallin, 1988, s.84-89.

53. *EasyCal Calibration Software 5051 Plus Calibration System*. The Complete Calibration Solution, Time Electronics, 2005, (WWW.timeelectronics.co.uk).
54. *Multimetr HP3458A. Instrukcja obsługi, programowania i konfigurowania*. Hewlett Packard, USA, 1994.
55. Urbański K.: *Kalibrator wielkich rezystancji sterowany za pomocą komputera*. Podstawowe Problemy Metrologii, Komisja Metrologii PAN, PPM'98, str.167-174.
56. Gubar W.I., Nikiforow Ł.Ł., Tuz J.M., Wołodarskij E.T.: *Sistemy awtomatizirovannogo kontrola radioelektronnoj aparatury*. Tiechnika, Kijów, 1983.
57. Y. Hirota, T. Aoki, M. Noguchi: *Fully-Automatic DMM Calibration System*. 2000 NCSL Workshop & Symposium. (WWW.agilent.com/metrology).
58. Olencki A., Szmytkiewicz J.: *Optymalizacja dynamiki procesu przejściowego źródła napięć i prądów stałych i przemiennych*. PAK nr7, 1996.
59. Olencki A., Szmytkiewicz J.: *Analiza możliwości poprawy parametrów metrologicznych uniwersalnego kalibratora napięć i prądów stałych i przemiennych*. IV Szkoła – Konferencja Metrologia Wspomagana Komputerowo, MWK'99, Rynia, 1999, s.123-130.
60. Olencki A., Szmytkiewicz J., Taranow S.: *Low settling time alternating voltage-current calibrator*. XIV IMEKO World Congress, Tampere, 1997.
61. Olencki A.: *Mnogoznacznyje miery elektroenergeticzeskich wieliczin*. Rozprawa habilitacyjna, Kijów, 1991.
62. *Valhalla 2703 Programmable AC Voltage Standard and 2705 Phase Standard*. http://millennianet.com/valhalla/2703_05.htm.
63. Bolikowski J.: *Niektóre właściwości mikroprocesorowych przyrządów pomiarowych*. Przegląd Elektrotechniczny 10/1987.
64. Szmytkiewicz J.: *Mikroprocesorowa klawiatura uniwersalnego kalibratora napięć i prądów*. IX Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Zastosowanie mikroprocesorów w Automatyce i Pomiarach”. Materiały konferencyjne. warszawa, 1994, s.193-198.
65. Olencki A., Szmytkiewicz J., Urbański K.: *Kalibratory napięć i prądów – część cyfrowa*. Rozprawy Elektrotechniczne, 1988, 34, z.1, s.261-267.
66. Gajda J., Szyper M.: *Modelowanie i badania symulacyjne systemów pomiarowych*. AGH, Kraków, 1998.
67. Gonera M.: *Testery wewnętrzne ułatwiające kontrolę przetworników analogowo-cyfrowych*. VIII Krajowa Konferencja Metrologii, Warszawa, 1995.
68. N. Oldham, M. Parker: *NIST Multifunction Calibration System*. NIST Special Publication 250-46. Gaithersburg, 1998. (www.ts/nist.gov).
69. *Wyrażanie niepewności pomiaru przy wzorcowaniu*. Dokument EA-4/02. Główny Urząd Miar, 2001. (www.gum.gov.pl).
70. Urbański K.: *Struktury i algorytmy pracy kalibratorów mocy prądu przemiennego. Opracowanie i analiza właściwości*. Rozprawa doktorska, Zielona Góra, 2001.
71. 8042A Digital Multimeter. *Instruction Manual*, Fluke, Rev.2,4/94, Dec. 1991.

72. Dyer S.A: *Wiley Survey of Instrumentation and Measurement*, John Willey&Sons, 2001.
73. Mielczarek W.: *Urządzenia pomiarowe i systemy kompatybilne ze standardem SCPI*, Helion, Gliwice, 1999.
74. Pieczonka M.: *Cyfrowe Interfejsy Szeregowe*, (www.softel.pl/rs/).
75. Mielczarek W.: *Szeregowe interfejsy cyfrowe*, Helion, 1993.
76. Dąbrowski R., Dobrzyński R., Urbański K.: *NSQ 200 Users Manual*, EMH, 2005.
77. Bartosiński B.: *Systemy pomiarowe*, Skrypty Laboratorium Metrologii i Techniki Eksperymentu, Politechnika Gdańska.
78. *Model 2701 Ethernet-Based DMM/Data Acquisition System User's Manual REV. C*, KEITHLEY, (www.keithley.com/data?asset=10470).
79. NI Developer Zone, *GPIO Hardware and Software Specifications*, (zone.ni.com/devzone/conceptd.nsf/webmain/4DBDF56518F0210C862567C50072BCDC)
80. *The Ethernet Standard*, (www.ethermanage.com/ethernet/standard.html).
81. IEEE 802.3 CSMA/CD (ETHERNET), (www.ieee802.org/3/).
82. Nowakowski W.: *Systemy interfejsu w miernictwie*, WKŁ, Warszawa 1987.
83. Mielczarek W.: *Komunikacja w systemie USB*, Helion, Gliwice 2005.
84. *Universal Serial Bus*, (www.usb.org).
85. *Kalibratory INMEL 31, INMEL 33, INMEL 33A – parametry techniczne*, (www.inmel.com.pl/kalibratory_mocy_param.htm).
86. Dąbrowski R. Kamiński G.: *System pomiarowy z miernikiem kontrolnym-Kalibra 1.1*, Instrukcja obsługi programu, Zielona Góra, 2005.
87. Perdikaris G.A.: *Computer Controlled Systems: Theory and Applications*, Springer, New York, 1991.
88. Brzózka J., Dorobczyński L.: *Programowanie w Matlab*, Wydawnictwo MIKOM, Warszawa, 1998.
89. Osowski S.: *Modelowanie układów dynamicznych z zastosowaniem języka SIMULINK (wydanie 2)*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1999.
90. Dabney J. Harman T.: *Mastering Simulink*, Prentice Hall, 2004.
91. Kuo B.C., Golnaraghi F.: *Automatic Control Systems*, Eight edition, John Wiley & Sons, 2003.
92. Mróz P.: *Algorytmy pracy systemów testujących mikroprocesorowe urządzenia kontrolno-pomiarowe*. Rozprawa Doktorska, Zielona Góra, 2002.
93. *Using Simulink: The Simulink Accelerator, Real-Time Wrkshop*, (www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink/).
94. *LabVIEW – The Software That Powers Virtual Instrumentation*, (www.ni.com/labview/).
95. *What is LabWindows/CVI*, (volt.ni.com/niwc/cvi/what_is.jsp).

- 96 *HP VEE Visual programming language*,
(www.home.agilent.com/upload/cmc_upload/All/EPSSG086072.pdf)
- 97 Keithley Instruments Inc.– Software, (www.keithley.com/products/software/#1).
- 98 DASyLab Data Acquisition System Laboratory, (www.dasylab.com).
- 99 *Program Borland Builder C++ 6.0*, Builder C++ Help,
(www.borland.com/us/products/cbuilder/).
- 100 Hollingworth J., Butterfield D., Swart B., Allsop J.: *C++ Builder 5. Vademecum profesjonalisty*. Helion, Gliwice, 2001.
- 101 Dąbrowski R.: *Analiza właściwości dynamicznych modelu komputerowego systemu odtwarzania napięć i prądów*, Materiały konferencyjne, Ogólnopolskie Warsztaty Doktoranckie, Istabna, 2003.
- 102 Dąbrowski R.: *Komputerowy system odtwarzania napięć i prądów*, Konferencja Naukowa i Warsztaty Szkoleniowe IiiE, KNWS, Czocho, 2004.
- 103 Daniluk A.: *RS 232C – praktyczne programowanie*, Helion, 2001.
- 104 Dąbrowski R., Dobrzyński R., Urbański K.: *NSQ Soft Program User's Manual*, EMH, 2003.
- 105 Matlab, *Writing S-Functions*, The Matlab Inc. 2000.

DODATEK A

Skrypt dla programu *Matlab*, automatyzujący procesy symulacyjne w badaniach właściwości dynamicznych modelu symulacyjnego systemu z kalibratorem kontrolnym.

```
clear
%PARAMETRY BADAŃ
%odchylenie graniczne
P_EPSILON_VALUE = 0.001;
%amplituda skoku jednostkowego
P_STEP_VALUE = 1;

%załadowanie modelu
openSystem
%początkowy znacznik czasu symulacji
czas_poczatek = clock;

% iteracyjne wprowadzanie parametrów i symulacja modelu
idx=1;
x = [0.01:0.01:0.1 0.2:0.1:1] %Tik
y = [0.01:0.01:0.05 0.1:0.05:0.5 0.6:0.1:1] %Tk1
[X,Y] = meshgrid(x,y);
for itik = 1:length(x(:))
    Tik = x(itik);
    txt = num2str(Tik);
    param_Tik = ['[' txt ']''];
    %opóźnienie interfejsu kalibratora
    set_param('openSystem/Tik','delay',param_Tik);
for jtk1 = 1:length(y(:))
    Tk = y(jtk1);
    %ustawienie parametrow modelu kalibratora
    txt = num2str(Tk);
    param_Tk = ['[' txt ' 1]'']
    %stała czasowa Tk1
    set_param('openSystem/Tk1','Denominator',param_Tk);
    Tk=Tk/10;
    txt = num2str(Tk);
    param_Tk = ['[' txt ' 1]'']
    %stała czasowa Tk2
    set_param('openSystem/Tk2','Denominator',param_Tk);
    %czas symulacji= 30 krotny czas Tk1 + czas interfejsu
    czas = y(jtk1) * 30 + x(itik);
    %symulacja modelu
    sim ('openSystem',czas)
    %analiza danych
    %wyznaczenie czasu odpowiedzi
    len = length(simout.time(:,1));
    t=30;
    i=1;
    while(abs(P_STEP_VALUE-simout.signals.values(len)) < P_EPSILON_VALUE)
        t=simout.time(len);
        len=len-1;
    end
    %wyznaczenie przeregulowania
    len = length(simout.time(:,1));
    p=0;
    for i=1:len
        if (p < simout.signals.values(i))
            p = simout.signals.values(i);
        end
        i=i+1;
    end
end
```

```

    if(p>100)
        p=100;
    end

    T(itik,jtk1)=t;
    P(itik,jtk1)=p;
end %end for TK1
end %end for tik

%końcowy znacznik czasu symulacji
czas_koniec = clock;
czas_symulacji = czas_koniec - czas_poczatek;

subplot(1,2,1)
mesh(Y,X,T') %wykres czasu odpowiedzi

subplot(1,2,2)
mesh(Y,X,P') %wykres przeregulowania

```

DODATEK B

Przykładowe skrypty dla programu *Matlab*, automatyzujące procesy symulacyjne w badaniach właściwości dynamicznych modelu symulacyjnego systemu z miernikiem kontrolnym.

Program główny:

```
%open model
open ('model\\oneStepEr.mdl')

%one step parameter
P_STEP_VALUE = 1;
P_PERCENT_LIMIT = 100

%set simulation parameter ranges
% continues
CTIK = [0.002:0.002:0.02 0.03:0.01:0.1 0.2:0.1:1]
% parameter
PTIK = [0.001 0.01 0.1 1]

%continues
%test TK1 = [0.1:0.1:1]
CTK1 = [0.01:0.002:0.1 0.12:0.02:1]
%parameter
PTK1 = [0.01 0.05 0.1 0.5 1]

%continues
CTMK = [0.005:0.005:0.1 0.15:0.05:1 1.1:0.1:10]
%parameter
PTMK = [0.001 0.01 0.1 1 10]

% parameter only
pTIM = 0.001

%continues
CEM = [0.001:0.001:0.01 0.02:0.01:0.1 0.2:0.1:1]
%parameter
pEM = [0.01 0.1 1 5] % wartosc podana w procentach

%continues
%testTC = [0.1:0.1:3]
CTC = [0.05:0.05:1 1.2:0.2:50]
%parameter // unknown
pTC = [0.02 0.1 1 5 10]

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%/ PARAMETER Err          (pEM)
%/   where:
%/     TK1 = 0.1 (normal calibrator)
%/     TIK = 0.001s(fast kalbrator's interface)
%/     TIM = 0.001s (minimal)
%/     ErrA= 1/10 ErrM
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%set simulation numbering variable
nSim = 10

%set destination folder name
folderName = ['TMK_TC_paramErr\\']

%do simulation for parameters
for paramErr = 1:length(pEM)
% params
```

```

NpTIK = 1
NpTK1 = 3
NpTMK = cTMK
NpTIM = 1
NpTC = cTC
NpEM = paramErr

SIMULATION_TIME = 200 %25 .* paramTK1 % 1
% do simulation
[X,Y,T,P]=symOneStep_TMK_TC(pTIK(NpTIK), pTK1(NpTK1), cTMK,
pTIM(NpTIM), cTC, pEM(NpEM),SIMULATION_TIME)

%normalize P1 to vaules up to 100% above expected value
P1 = P - P_STEP_VALUE
P1 = P1.*100
idx = find(P1>P_PERCENT_LIMIT)
P1(idx) = P_PERCENT_LIMIT

%save simulation data to file
nSim = nSim+1;
txtNsim = num2str(nSim);
%normalize filename format
while(length(txtNsim)<3)
    txtNsim = ['0' txtNsim]
end
testFileName = [folderName 'sim' txtNsim '.mat'];
save (testFileName)

%prepare pictures
% response time
figure(1) %open figure window

h=surf(Y,X,T','FaceColor','interp','EdgeColor','none','FaceLighting','phong')
set(1,'Color','white') %set background color
%axis([0 5 0 1 0 30])

txt = num2str(pTIK(NpTIK))
tit = ['\tau_I_K = ' txt 's\newline']

txt = num2str(pTK1(NpTK1))
tit = [tit 'T_K_1 = ' txt 's\newline']
txt = num2str(pTK1(NpTK1)./10,6)
tit = [tit 'T_K_2 = ' txt 's\newline']

txt = num2str(pTIM(NpTIM))
tit = [tit '\tau_I_M = ' txt 's\newline']

txt = num2str(pEM(NpEM))
tit = [tit '\delta_k = ' txt '%\newline']
ea = pEM(NpEM) ./ 1000
txt = num2str(ea,6)
tit = [tit '\Delta_k = ' txt '\newline']
%parameters legend as title
title(tit)
%axis labels
xlabel('T_C [s]')
ylabel('\tau_M_K [s]')
zlabel('t_o [s]', 'Rotation',0)
%save figure to file
figFileName = [folderName 'to' txtNsim '.fig'];
saveas(gcf, figFileName, 'fig')

```



```

%overshot p
figure(2)

h=surf(Y,X,P1','FaceColor','interp','EdgeColor','none','FaceLighting'
,'phong')
set(2,'color','white')
%parameters legend
title(tit)
%axis labels
xlabel('T_C [s]')
ylabel('\tau_M_K [s]')
zlabel('p [%]','Rotation',0)
%save figure to file
figFileName = [folderName 'p' txtNsim '.fig'];
saveas(gcf, figFileName, 'fig')

end %for paramErr

```

Funkcja: *symOneStep_TMK_TC*

```

%simulation for TMK and TC for constant other parameters
function [X,Y,T,P] =
    symOneStep_TMK_TC(tik,tk1,tmk,tim,tc,em,SIMULATION_TIME)
%PARAMETRY

%amplituda skoku jednostkowego
P_STEP_VALUE = 1;

%odchylenie graniczne
P_EPSILON_VALUE = 0.001; % 0.1% wartości nastawionej

%załadowanie modelu
open('model\oneStepEr.mdl')

%załadowanie parametrow stałych
%czas interfejsu kalibratora
txt = num2str(tik);
set_param('onesteper/Tik','delay',txt);

%stała czasowa Tk1 kalibratora
txt = num2str(tk1);
param_TK = ['txt ' 1]';
set_param('onesteper/Tk1','Denominator',param_TK);

%stała czasowa Tk2 kalibratora
txt = num2str(tk1./10,6);
param_TK = ['txt ' 1]';
set_param('onesteper/Tk2','Denominator',param_TK);

%czas interfejsu miernika
txt = num2str(tim);
set_param('onesteper/Tim','delay',txt);

%składowa multiplikatywna błędu
ErrMultGain = 1 + (em./100)
txt = num2str(ErrMultGain,8);
set_param('onesteper/Em','Gain',txt);

%składowa addytywna błędu
ErrAdd = (em ./ 1000) .* P_STEP_VALUE
txt = num2str(ErrAdd,8);

```

```

set_param('onesteper/Ea','value',txt);
[X,Y] = meshgrid(tmk,tc);
%iteracyjne ustawianie parametrow modelu
for ix = 1:length(tmk(:))
    TimeMK = tmk(ix);
    %czas przetwarzania miernika
    txt = num2str(TimeMK);
    set_param('onesteper/Tmk','delay',txt);
for jy = 1:length(tc(:))
    TimeC = tc(jy);
    %stała czasowa Tc
    txt = num2str(TimeC);
    param_TC = [' ' txt ' 0'];
    set_param('onesteper/Tc','Denominator',param_TC);

%symulacja modelu
sim ('onesteper',SIMULATION_TIME)

%analiza danych
%wyznaczenie czasu odpowiedzi
len = length(simout.time(:,1));
t=SIMULATION_TIME;
i=1;
while(abs(P_STEP_VALUE-simout.signals.values(len)) < P_EPSILON_VALUE)
    t=simout.time(len);
    len=len-1;
end

%wyznaczenie przeregulowania
len = length(simout.time(:,1));
p=0;
for i=1:len
    if (p < simout.signals.values(i))
        p = simout.signals.values(i);
    end
    i=i+1;
end

if(p>100)
    p=100;
end

T(ix,jy)=t;
P(ix,jy)=p;

end %end for Tc
end %end for tałMK

```