

**POLITECHNIKA POZNAŃSKA**  
**WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ I TRANSPORTU**

**ROZPRAWA DOKTORSKA**

**SYSTEM STEROWANIA**  
**UKŁADU RADIALNEGO PROWADZENIA**  
**ZESTAWÓW KOŁOWYCH**

**mgr inż. Maksymilian Cierniewski**

Promotor:

Prof. dr hab. inż. Janusz Mielniczuk

Promotor pomocniczy:

Dr inż. Szymon Milecki

**POZNAŃ 2021**

# SPIS TREŚCI

Streszczenie .....	4
Abstract .....	5
1. Geneza pracy.....	6
2. Przegląd rozwiązań literaturowych.....	9
2.1. Smarowanie obrzeży kół.....	9
2.2. Systemy pasywne.....	11
2.2.1. Wózek SAR .....	11
2.2.2. Wózek typu 4ANg - modyfikacja.....	12
2.2.3. Wózek FEBA.....	14
2.3. Systemy aktywne .....	15
2.3.1. Bombardier FLEXXtronic .....	15
2.3.2. Siemens / Liebherr ADD .....	16
3. Cel i zakres pracy.....	19
4. Konceptje obwodów wejściowych dla systemu sterowania.....	20
4.1. Układ bazujący na pomiarze przemieszczenia zestawu kołowego .....	21
4.2. Układ bazujący na analizie dynamicznego zachowania wózka.....	22
4.3. Układ bazujący na pomiarze naprężeń w przewodnikach zestawu kołowego .....	24
5. Konceptje obwodów wykonawczych dla systemu sterowania.....	28
5.1. Obwód wykonawczy zawierający siłowniki zabudowane między nadwoziem a ramą wózka .....	29
5.2. Obwód wykonawczy zawierający siłownik w sprzęgu międzywózkowym .....	30
5.3. Obwód wykonawczy sterujący obrotem środkowego zestawu kołowego.....	31
5.4. Obwód wykonawczy sterujący przesuwem poprzecznym środkowego zestawu kołowego.....	32
6. Stanowisko badawcze .....	33
6.1. Założenia.....	33
6.2. Wykonanie obwodu mechanicznego .....	33
6.3. Wykonanie układu hydraulicznego.....	36
6.4. Zastosowane elementy pomiarowe .....	38
6.5. Wykonanie systemu sterowania stanowiska .....	39
6.5.1. Panel sterujący .....	39
6.5.2. Sterownik mikroprocesorowy.....	41
6.6. Badania na stanowisku 51SB.....	44
6.6.1. Kontrola sprawności działania.....	44

6.6.2.	Badania sterowania obwodem wyjściowym.....	46
6.6.3.	Schemat szczegółowy algorytmu sterującego stanowiska 51SB.....	47
6.6.4.	Wyniki badań algorytmu sterowania pracą zaworu proporcjonalnego na stanowisku 51SB.....	54
6.6.5.	Wyniki badań algorytmu sterowania pracą rozdzielacza proporcjonalnego na stanowisku 51SB.....	59
6.6.6.	Wyniki badań algorytmu sterowania wspólną pracą zaworu proporcjonalnego i rozdzielacza proporcjonalnego na stanowisku 51SB.....	63
6.6.7.	Wnioski z badań na stanowisku 51SB.....	69
7.	Prowadnik zestawu kołowego jako źródło sygnału dla systemu sterowania.....	71
7.1.	Prowadnik typu Alstom .....	72
7.1.1.	Zabudowa w pojeździe .....	72
7.1.2.	Badania symulacyjne .....	72
7.1.3.	Badania laboratoryjne .....	73
7.1.4.	Badania prowadnika typu Alstom na stanowisku 51SB .....	75
7.1.5.	Wnioski z badań laboratoryjnych prowadnika typu Alstom.....	81
7.2.	Prowadnik zestawu kołowego lokomotywy 111E .....	82
7.2.1.	Zabudowa w pojeździe .....	82
7.2.2.	Badania symulacyjne .....	83
7.2.3.	Badania laboratoryjne .....	84
7.2.4.	Badania poligonowe .....	86
7.2.5.	Wnioski z badań prowadnika zestawu kołowego lokomotywy 111E.....	96
8.	Koncepcja systemu sterowania .....	98
8.1.	Moduł czujnika pomiarowego siły łożyskowej .....	99
8.1.1.	Budowa sprzętowa.....	99
8.1.2.	Algorytm działania .....	103
8.2.	Moduł wykonawczy sterownika obwodu zasilania hydraulicznego.....	104
8.2.1.	Budowa sprzętowa.....	104
8.2.2.	Algorytm działania .....	105
8.3.	Moduł wykonawczy sterownika siłowników hydraulicznych.....	106
8.3.1.	Budowa sprzętowa.....	106
8.3.2.	Algorytm działania .....	108
8.4.	Sterownik centralny .....	109
8.4.1.	Budowa sprzętowa.....	109
8.4.2.	Sygnały wejściowe .....	111
8.4.3.	Sygnały wyjściowe .....	111
8.4.4.	Algorytm działania .....	112
9.	Podsumowanie .....	116
9.1.	Wnioski .....	116
9.2.	Kierunki dalszych prac.....	117
10.	Bibliografia .....	118

## Streszczenie

Przedmiotem niniejszej pracy było opracowanie koncepcji systemu sterowania układem radialnego prowadzenia zestawów kołowych, zapewniającym konieczność wykonania jedynie minimalnych zmian w pojeździe przy zabudowie.

W ramach pracy został dokonany przegląd istniejących rozwiązań, ze szczególnym uwzględnieniem mechatronicznych systemów aktywnych. Na tej podstawie zostały wytypowane wybrane koncepcje obwodów pomiarowych dla systemu sterowania. Opracowane zostały również koncepcje obwodów wykonawczych i kontrolerów systemu sterowania.

Na bazie powyższych analiz opracowane zostało specjalistyczne stanowisko badawcze, umożliwiające symulację pojazdu pracującego z układem radialnego prowadzenia zestawów kołowych. Na stanowisku badawczym zostały zweryfikowane praktycznie różne rodzaje czujników, mających służyć jako źródło sygnału dla systemu sterowania. Przeprowadzone zostały również badania obwodu wyjściowego, które zakończyły się opracowaniem szczegółowego algorytmu sterowania tym obwodem.

W ramach pracy została także opracowana koncepcja wykorzystania przewodnika zestawu kołowego jako podstawowego źródła sygnału dla systemu sterowania. Zostały przeprowadzone szczegółowe badania różnych typów przewodników, zarówno ich badania teoretyczne (symulacyjne), jak i badania laboratoryjne i poligonowe (podczas jazd próbnych lokomotywy).

Na podstawie przeprowadzonych badań została zaproponowana koncepcja modułowego systemu radialnego prowadzenia zestawów kołowych, spełniająca założenia pracy.

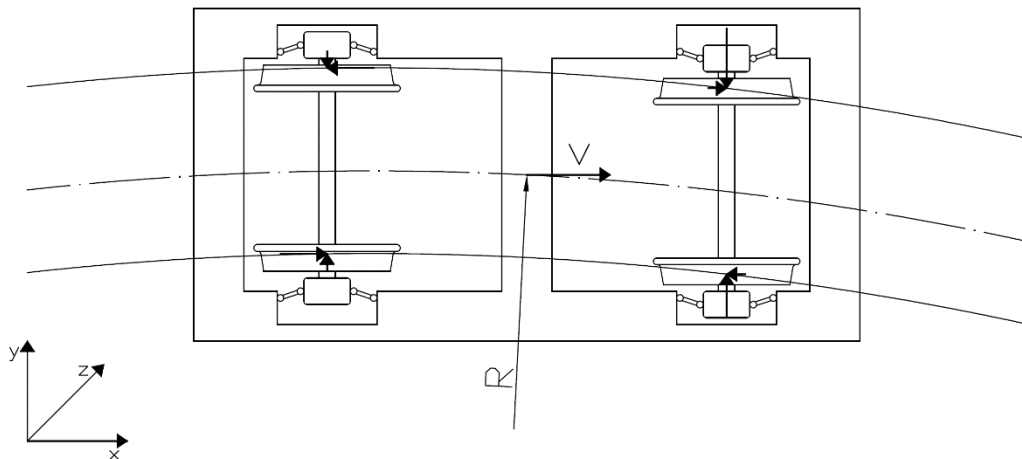
## **Abstract**

The subject of this study was the development of the concept of the control system for the radial guidance of the wheelsets, which ensures making only minimal changes to the vehicle in case of installation of this system. As a part of this study, an overview of existing solutions was made, with particular emphasis on mechatronic active systems. On this basis, concepts of measurement circuits for the control system have been selected. The concepts of executive circuits and controllers of the control system have also been developed. On the basis of mentioned analyses, a specialized test stand has been created, enabling the simulation of a vehicle operating with the radial guidance system of wheelsets. On the test stand, different types of sensors, serving as a signal source for the control system, were practically verified. Tests of the output circuit have been also carried out and resulted in the development of a detailed algorithm to control this circuit. As a part of the study, the concept of using a guiding shoe as the primary source of signal for the control system has been also developed. Detailed studies of various types of guiding shoes have been carried out, theoretical (simulation), as well as in the laboratory and field tests (during test drives of the locomotive). On the basis of conducted research, the concept of a modular radial wheelset guiding system was proposed, meeting the objectives of the work.

## 1. Geneza pracy

Nieodłącznym efektem współpracy elementów układu „koło-szyna” we wszystkich pojazdach szynowych jest występowanie tarcia pomiędzy obrzeżem koła a boczną powierzchnią główki szyny, występujące przede wszystkim na krzywiznach toru (łuki szlakowe czy rozjazdy).

Podstawową przyczyną takiego zjawiska jest konstrukcja zawieszenia pojazdów szynowych – powodująca samoistne „prostowanie się” zestawów kołowych na łukach torowych, zwłaszcza w pojazdach wyposażonych w zestawy kołowe umieszczone w wózkach. Skutkuje to nabieganiem pierwszego zestawu kołowego na zewnętrzną szynę łuku torowego, co powoduje powstanie dużych sił tarcia, a przy większych prędkościach uderowe działanie sił poprzecznych na torowisko i zawieszenie pojazdu [3].

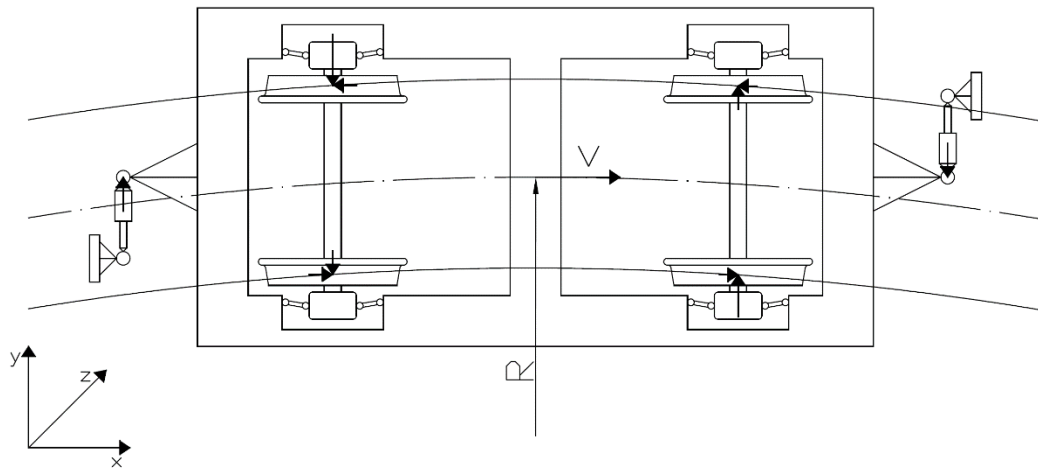


Rys. 1.1 Naturalna pozycja wózka pojazdu na łuku torowym [3]

Takie „naturalne” położenie wózka w łuku jest bardzo niekorzystne, gdyż skutkuje wieloma zjawiskami, do których należą:

- zwiększone zużycie bocznej powierzchni główki szyny, co powoduje zmniejszenie jej trwałości i konieczność częstszej wymiany lub szlifowania,
- zwiększone zużycie powierzchni obrzeży zestawów kołowych pojazdu, co zmniejsza żywotność zestawu, podnosząc znacznie koszty eksploatacyjne poprzez konieczność częstszej wymiany czy korekty profilu obrzeży lub zestawów kołowych monoblokowych,
- zwiększone zużycie elementów zawieszenia pojazdu, co również skraca przebiegi pomiędzy przeglądami czy naprawami okresowymi pojazdu,

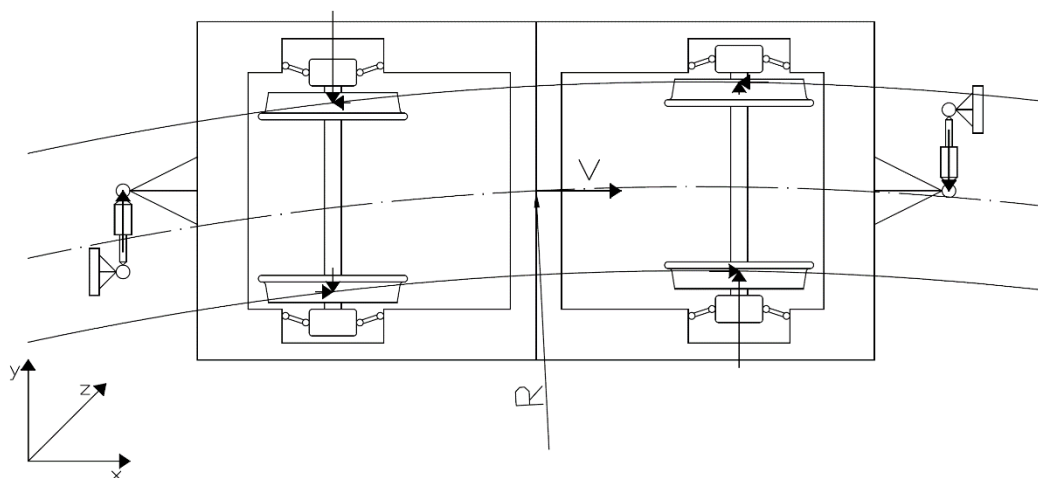
- zwiększone opory ruchu podczas jazdy na łukach torowych, co powoduje zwiększenie zużycia energii przez pojazd, generując wyższe koszty dla jego użytkownika,
- możliwość wykolejenia pojazdu na łukach torowych o małym promieniu,
- zwiększone opłaty za dostęp do szlaku kolejowego, kompensujące wyższe koszty utrzymania dla operatora infrastruktury torowej,
- generowanie hałasu podczas przejazdu przez łuki torowe.



Rys. 1.2 Radialna pozycja wózka pojazdu na łuku torowym [3]

Na powyższym rysunku przedstawione zostało radialne położenie wózka, wymuszone poprzez dwa siłowniki, umieszczone pomiędzy ramą wózka, a konstrukcją („pudłem”) pojazdu.

Należy również zwrócić uwagę na sytuację, kiedy wymuszenie obrotu wózka (podczas nieprawidłowej pracy systemu radialnego prowadzenia zestawów kołowych) skutkuje nadmiernym obrotem wózka na łuku torowym. Jest to bardzo niekorzystne działanie, mogące skutkować wykolejeniem pojazdu.



Rys. 1.3 Pozycja wózka na łuku torowym przy nadmiernym wymuszeniu obrotu [3]

Już wiele lat temu zaczęły powstawać różne systemy, umożliwiające radialne prowadzenie zestawów kołowych, które w efekcie powodowały zmniejszanie sił poprzecznych i sił tarcia.

Najprostszym układem, pełniącym jedynie rolę „wspomagania” i obniżania sił tarcia w łukach, jest system smarowania obrzeży kół. Zdobył on dużą popularność ze względu na prostotę i konieczność małej ingerencji w konstrukcję pojazdu.

Powstało wiele konstrukcji pasywnych radialnego prowadzenia zestawów kołowych, nie wymagających dostarczenia dodatkowej energii z zewnątrz, bazujących na rozwiązaniach mechanicznych lub hydraulicznych. Stosowane są one przede wszystkim w wagonach.

Rozwój układów elektronicznych oraz techniki mikroprocesorowej spowodował opracowanie systemów aktywnych radialnego prowadzenia zestawów kołowych, gdzie źródłem sygnałów dla sterownika są różne czujniki (siły, przemieszczenia, przyspieszeń, prędkości), zabudowanych na wózkach czy ramie pojazdu. W efekcie położeniem zestawów kołowych czy całego wózka pojazdu steruje układ wykonawczy, bazujący na siłownikach (hydraulicznych lub elektrycznych), kontrolowany przez system mikroprocesorowy.

Jednakże w chwili obecnej funkcjonuje relatywnie niewiele rozwiązań układów radialnego prowadzenia zestawów kołowych, z czego praktycznie wszystkie stosowane są wyłącznie w nowo budowanych pojazdach trakcyjnych i wagonach. Brak jest do chwili obecnej kompleksowego rozwiązania, możliwego do zastosowania na istniejących pojazdach, bez konieczności ich znacznej przebudowy.

Na sieci PKP wielu przewoźników eksploatuje dużą ilość ciężkich lokomotyw spalinowych (SP/ST45 oraz SU/ST46) oraz elektrycznych (ET22), charakteryzujących się bardzo niekorzystnym oddziaływaniem na torowisko. Stosowane obecnie w nich rozwiązania – układy smarowania obrzeży kół, tylko w niewielkim stopniu poprawiają ich własności trakcyjne w tym zakresie.

Zauważając ten istotny brak - Instytut Pojazdów Szynowych „Tabor” w Poznaniu zrealizował projekt badawczy pt. „Mechatroniczne układy wychylne sprzężonych przegubowo konstrukcji ramowo powłokowych niwelujące siły odśrodkowe”.

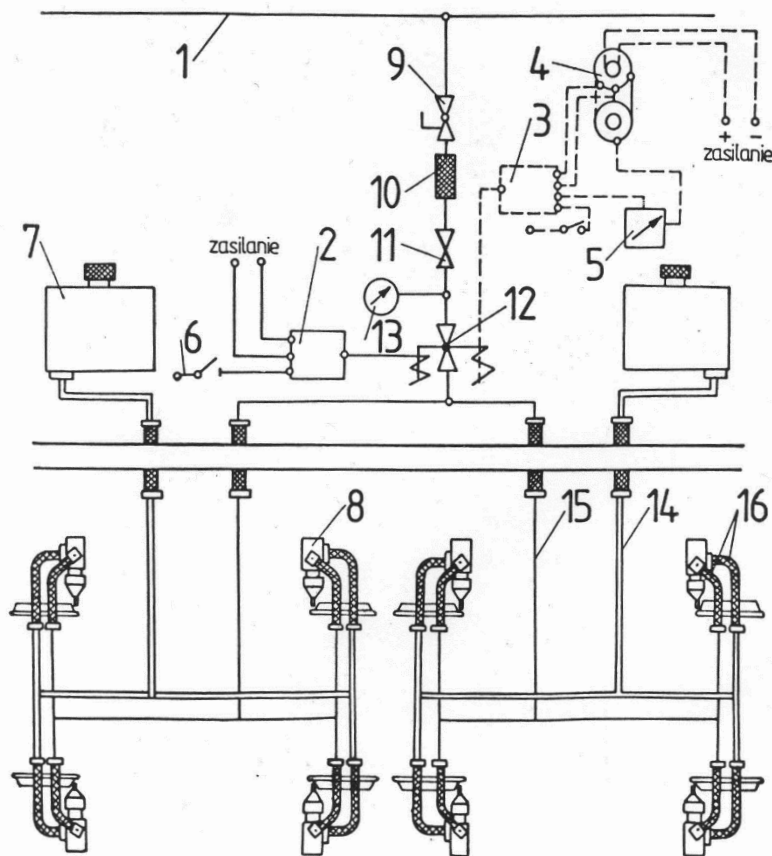
Jednym z podstawowych celów tego projektu było opracowanie układu radialnego prowadzenia zestawów kołowych pojazdu, łącznie z koncepcją systemu jego sterowania, z możliwością zabudowy na nowych lub istniejących typach pojazdów szynowych.



## 2. Przegląd rozwiązań literaturowych

### 2.1. Smarowanie obrzeży kół

Smarowanie obrzeży kół nie jest w pełni funkcjonalnym układem radialnego prowadzenia zestawów kołowych, jednakże znacznie ułatwia ustawienie się wózka pojazdu w położeniu zbliżonym do radialnego. Nie bez znaczenia jest też stosunkowo niski koszt wdrożenia takiego rozwiązania w pojazdach szynowych [1].



Rys. 2.1 Schemat układu smarowania obrzeży kół [1]

Powyższy rysunek przedstawia schemat układu smarowania obrzeży kół, opracowany w Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Pojazdów Szynowych w Poznaniu (obecnie Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Pojazdów Szynowych „Tabor”), stosowany na wielu typach pojazdów szynowych, takich jak elektryczne lokomotywy liniowe ET21 (3E), ET22 (201E), EU07 (4E oraz 303E), EP09 (104E), spalinowe lokomotywy manewrowe S200 i SM42 (6D).

Układ smarowania obrzeży kół składa się z trzech podstawowych zespołów:

- sterujący, w skład którego wchodzi elektroniczne urządzenie sterujące (2,3) współpracujące z niezbędnymi obwodami prędkościomierza pojazdu (4,5) lub nastawnika jazdy (6), oraz zawór elektropneumatyczny (12),

- dystrybucji oleju i powietrza, w skład których wchodzi: przewód zasilający (1), zawór odcinający (9), filtr (10), reduktor (11), manometr (13) oraz zbiorniki oleju (7),

- rozpylający, w skład którego wchodzi dysze rozpylające (8) wraz z przewodami elastycznymi oleju i powietrza (16) oraz przewody oleju (14) i powietrza (15).

Układ sterujący zapewnia właściwe dozowanie środka smarnego (oleju). W zależności od rodzaju pojazdu (lokomotywa manewrowa, liniowa, autobus szynowy) środek smarny jest dozowany w odstępach czasowych podczas jazdy powyżej określonej prędkości (podstawowy system pracy w lokomotywach manewrowych) lub w zależności od przebytej drogi podczas jazdy powyżej określonej prędkości (podstawowy system pracy w lokomotywach liniowych oraz autobusach szynowych). Urządzenie sterujące zapewnia również możliwość regulacji odcinka drogi lub czasu, aby możliwe było dobranie właściwej wartości, zależnie od profilu trasy, na której porusza się pojazd.

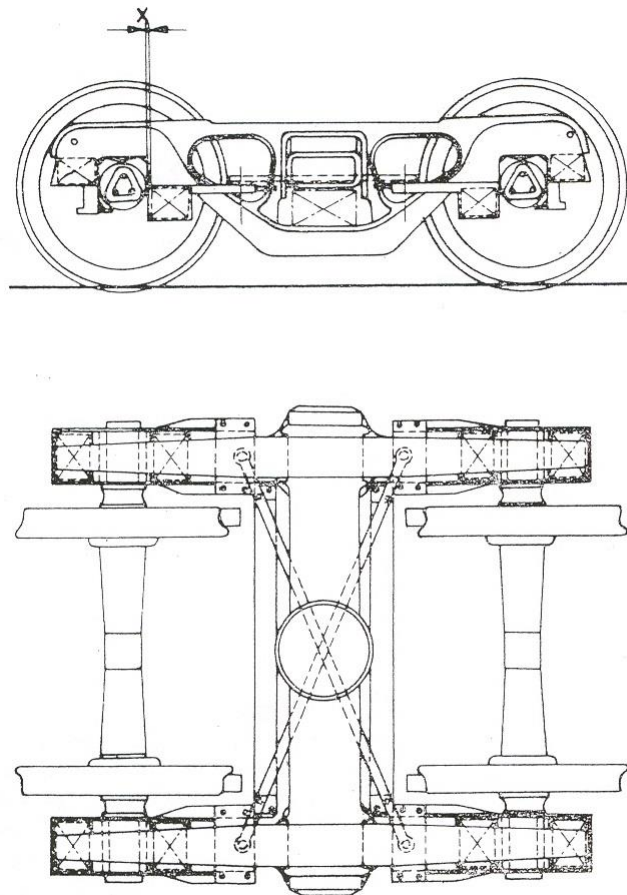
Smarowanie obrzeży kół wywiera istotny wpływ na zmniejszenie tempa zużycia się obrzeży kół i główek szyny, a tym samym zwiększenie ich trwałości oraz wydłużenie przebiegów eksploatacyjnych. Osiąga się to w wyniku obniżenia współczynnika tarcia występującego pomiędzy obrzeżem a szyną, zwłaszcza podczas przejazdu przez łuki torowe. Stosowanie smarowania zapewnia ponadto podniesienie stopnia zabezpieczenia przed wykolejeniem, zmniejszenie oporów ruchu i oszczędności w zakresie zmniejszenia zużycia energii, poprawę spokojności jazdy oraz obniżenie bądź wyeliminowanie hałasu [1].

## 2.2. Systemy pasywne

Systemy pasywne w swojej idei wykorzystują naturalną współpracę mechaniczną między zestawami kołowymi a torowiskiem. Wykorzystywana jest w tym przypadku naturalna tendencja zestawów kołowych do przyjmowania radialnego położenia względem torowiska podczas przejazdu przez łuk torowy. Realizacja takiego układu odbywa się poprzez odpowiedni dobór sztywności usprężynowania pierwszego oraz drugiego stopnia lub poprzez zastosowanie luzów w układzie prowadzenia zastawów kołowych, wraz z zainstalowaniem elementów, które zapewniają mechaniczne sprzężenie maźnic.

### 2.2.1. Wózek SAR

Wózek SAR został opracowany w roku 1968. Opracowanie powstało na bazie eksploatowanego ówczesnie wózka wagonu towarowego, wdrożone zostało na Kolei Południowej Afryki (SAR).



Rys. 2.2 Widok wózka SAR [8]

System wózka SAR przewiduje zastosowanie obejm dla obu maźnic każdego zestawu kołowego i połączenie ich poprzeczną belką biegnącą wzdłuż zestawu kołowego. Boczne ramy wózka oparte są na gniazdach sprężyn nośnych, umiejscowionych w obejmach. Obejmy maźnic mają pewien luz wzdłużny  $x$ . Ponadto obejmy jednego zestawu kołowego połączone są przegubowo skrzyżowanymi drążkami z obejmami drugiego zestawu. Dzięki temu istnieje ograniczona możliwość obrotu zestawu kołowego w płaszczyźnie poziomej. Ze względu na zainstalowane ukośne drążki, zestawy kołowe mogą obracać się jedynie w przeciwnych do siebie kierunkach [8].

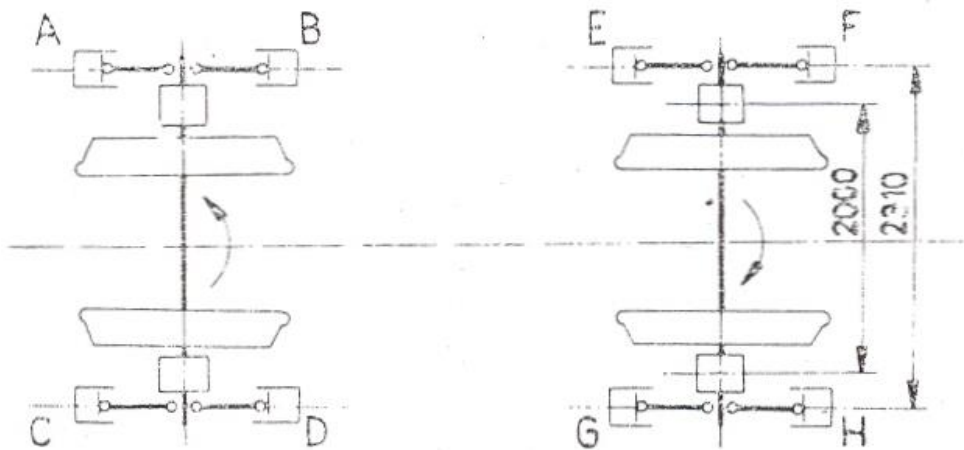
Podczas jazdy na prostym odcinku toru układ ten ma umożliwić stłumienie wężykowania, dzięki wzajemnemu powiązaniu ruchu obu zestawów kołowych.

Przy jeździe w łuku - prowadzący zestaw kołowy po wykasowaniu luzu na torze nabiega obręczą koła zewnętrznego na szynę. W efekcie na zewnętrznym kole zestawu średnica okręgu tocznego staje się większa. Ponieważ oba koła zestawu są połączone osią, powstaje moment skręcający zestaw kołowy w kierunku profilu łuku. Analogicznie - na drugi zestaw kołowy działa taki sam moment w kierunku odwrotnym, spowodowany nabieganiem obręczy na szynę wewnętrzną. W konsekwencji oba zestawy kołowe dążą samoczynnie do ustawienia radialnego, popychając dodatkowo drążki łączące obejmy maźnic, co dodatkowo umożliwia zajęcie położenia radialnego w stosunku do łuku torowego. Po wyjechaniu z łuku oba zestawy wracają do położenia spoczynkowego (środkowego), dzięki sprężynom zawieszenia maźnic.

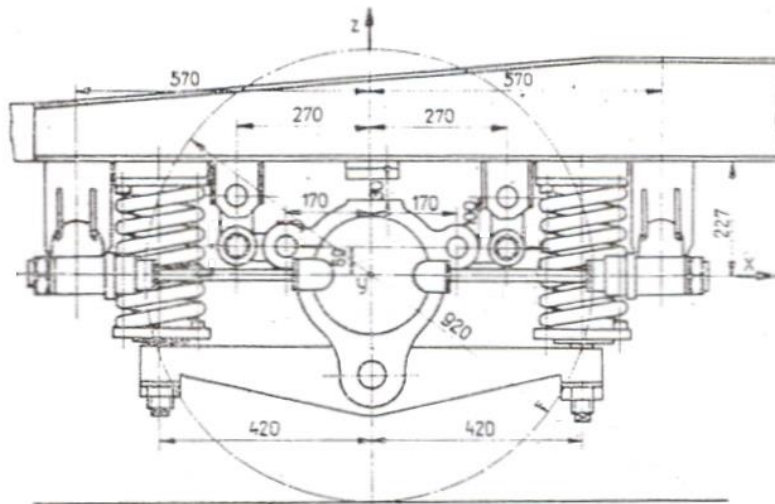
### **2.2.2. Wózek typu 4ANg - modyfikacja**

W roku 1979 została opracowana modyfikacja wózka do wagonów osobowych typu 4ANg, umożliwiająca sterowanie radialne w łuku torowym.

Modyfikacja wózka polegała na przegubowym połączeniu każdej maźnicy zestawu kołowego wózka dwoma poziomymi drążkami usytuowanymi naprzeciwko siebie z tłokami siłowników hydraulicznych jednostronnego działania, których cylindry osadzone są we wspornikach osi wózka. Siłowniki hydrauliczne są połączone ze sobą w zamknięte obwody hydrauliczne. Układ jest pasywny, jednakże z możliwością uzupełnienia ubytków czynnika roboczego poprzez zbiorniczek z zaworem zwrotnym [8].



Rys. 2.3 Rozmieszczenie siłowników na wózku [8]



Rys. 2.4 Widok zestawu kołowego [8]

Zastosowanie ośmiu siłowników umożliwia realizację prowadzenia radialnego zestawów kołowych z zastosowaniem różnych obwodów hydraulicznych:

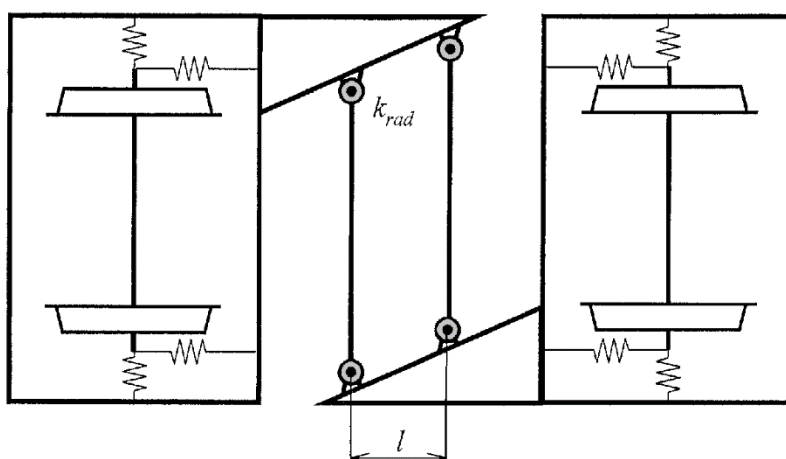
- cztery obwody: A-E, B-F, C-G, D-H – w takim przypadku zapewnione jest przeciwne ustawienie zestawów kołowych podczas wjazdu na łuk,
- cztery obwody: A-C, B-D, E-G, F-H – w takim przypadku zapewnione jest radialne ustawienie się pojedynczego zestawu kołowego podczas wjazdu na łuk,
- dwa obwody: A-C-E-G oraz B-D-F-H – stanowi połączenie obu powyższych układów.

Powrót zestawów kołowych do położenia środkowego wymuszany jest poprzez sprężyny zawieszenia.

Modyfikacja ta jest możliwa przy relatywnie niewielkich zmianach w konstrukcji wózka, bez konieczności naruszania jego konstrukcji. Zastosowanie układu hydraulicznego zamiast mechanicznego przeniesienia sił eliminuje wiele niedogodności, wynikających z konieczności zabudowy układu cięgieł i dźwigni i jest o wiele prostsze w eksploatacji i utrzymaniu.

### 2.2.3. Wózek FEBA

Wózek FEBA, stanowiący dwa powiązane ze sobą wzajemnie wózki jednoosiowe, umożliwia zwiększenie spokojności biegu pojazdów, jednocześnie dając możliwość bardzo łagodnego przechodzenia pojazdu przez łuki torowe [7].



Rys. 2.5 Schemat wózka FEBA [7]

Poprzez połączenie osiągnięto wymuszone pasywne sterowanie zestawami kołowymi. Z powodu obrócenia wózka pod pudłem w czasie przejazdu przez łuk sztywność wzdłużna zawieszenia drugiego stopnia działa w kierunku przeciwnym do sztywności skrętnej zestawu.

Komplet wózków równoważy sam siebie w pozycji pośredniej pomiędzy układem występującym w sztywno prowadzanej osi pojazdu dwuosioowego, a układem z wózkiem Jakobsa. Jeśli sztywność skrętna zestawu wózków jest wystarczająco mała, zestaw kołowy posiada dodatkowy luz pozwalający mu na samosterowanie w celu osiągnięcia pozycji radialnej przez efekt działania wzdłużnych sił w układzie „koło-szyna”.

Testy biegowe układu wózków jednoosiowych FEBA pokazały, że ów układ dla pojazdów przegubowych osiąga bardzo dobre własności biegowe. Szczególnie na szlakach z dużą ilością łuków, jego charakterystyka wyraźnie przewyższa rozwiązania klasyczne [7].

### **2.3. Systemy aktywne**

Wraz z rozpowszechnieniem się układów elektronicznych, zwłaszcza szybkich i dokładnych czujników, jak również mikrokontrolerów o dużej mocy obliczeniowej, możliwe stało się zastosowanie systemów aktywnych radialnego prowadzenia zestawów kołowych.

W systemach tych ustawienie zestawu kołowego wewnątrz ramy wózka (lub całego wózka) jest realizowane poprzez system siłowników, sterowanych przez mikrokontroler na podstawie sygnałów z czujników np. siły, prędkości, odległości lub kąta. Rozwiązania aktywne stosowane są w nowo produkowanych pojazdach i nadal rozwijane [9].

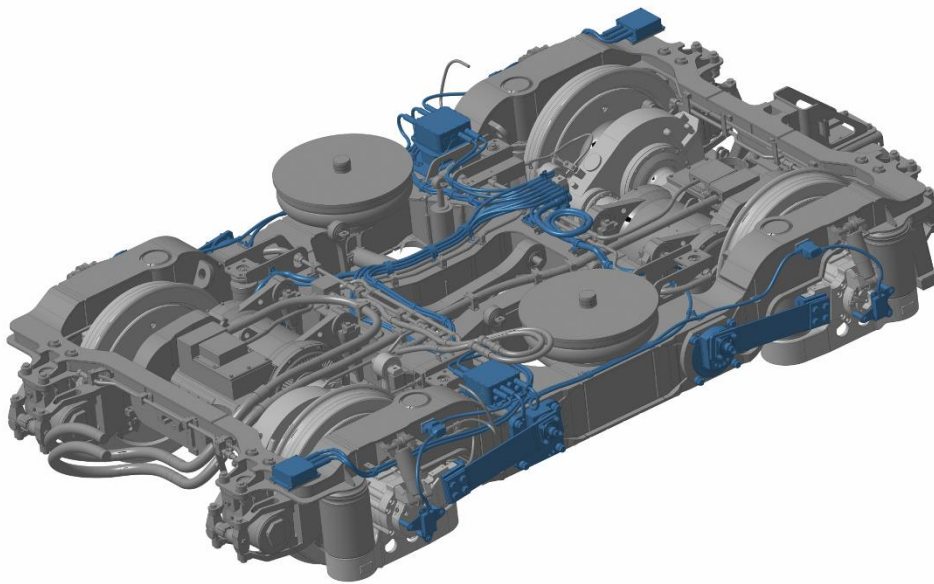
#### **2.3.1. Bombardier FLEXXtronic**

System aktywny FLEXXtronic z układem aktywnego radialnego sterowania i kontroli stabilności (ARS) zapewnia stabilny bieg na prostych odcinkach torów oraz właściwe prowadzenie w łuku.

Rdzeniem układu jest zaawansowany kontroler rozpoznający zachowanie dynamiczne całego wózka oraz poszczególnych zestawów kołowych w torze. Zapewnia on odpowiednie indywidualne sterowanie każdego z zestawów kołowych, umożliwiając nadanie właściwego kąta położenia w torze, zapewniając jednocześnie tłumienie wymuszeń pochodzących od nierówności torów. Pojedynczy siłownik przypadający na każdy zestaw kołowy steruje nim zgodnie z zadanymi przez kontroler sygnałami bez zauważalnej zwłoki czasowej.

Działanie układu ARS opiera się na wykrywaniu momentów działających na poszczególne zestawy kołowe za pomocą czujników. Kontrola stabilności działa poprzez kontrreakcje na boczny ruch zestawu kołowego spowodowany nieregularnością toru lub wężykowaniem. Pozwala to utrzymać spokojny bieg zestawów kołowych.

System sterowania pracuje w dwóch podstawowych trybach pracy. Gdy wymuszenia powodują znaczną niestabilność układu wózka, układ kontroli działa z większymi częstotliwościami aż do około 15 Hz. W tym trybie pracy system pracuje jako aktywny tłumik wężykowania. Drugi tryb pracy systemu, działający na niskich częstotliwościach, pozwala zestawowi kołowemu podążać za krzywizną łuku i ustawiać się radialnie [35].



Rys. 2.6 Model wózka z system FLEXX [35]

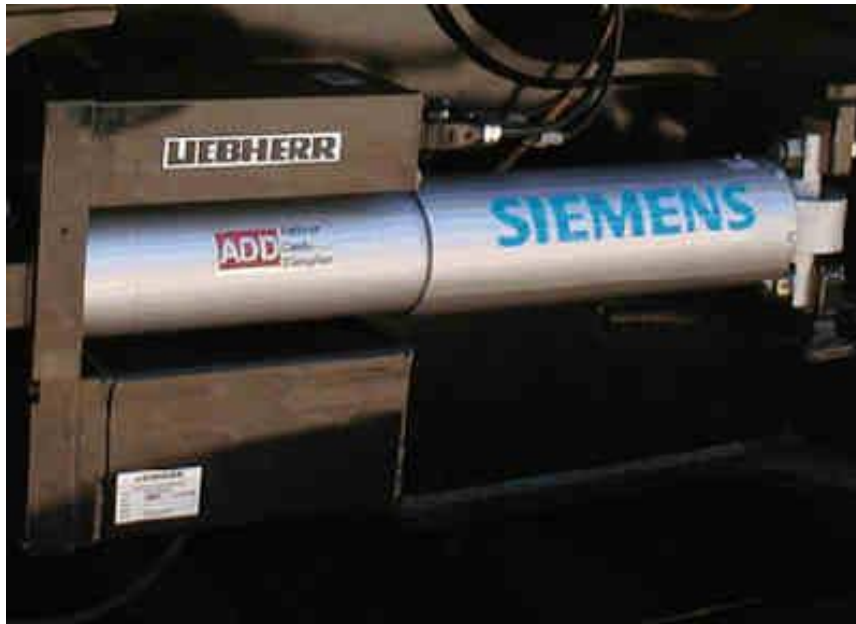
System zbudowany jest modułowo, składa się z czujników, siłowników oraz sterujących układów elektronicznych, pracujących w technologii Plug&Play, może on również posłużyć do wdrożenia aktywnego sterowania komfortem oraz przechyłem nadwozia pojazdu. Dodatkowymi cechami układu jest jego autoadaptacyjność i autodiagnostyka oraz łatwa i szybka wymiana modułów w razie konieczności.

### **2.3.2. Siemens / Liebherr ADD**

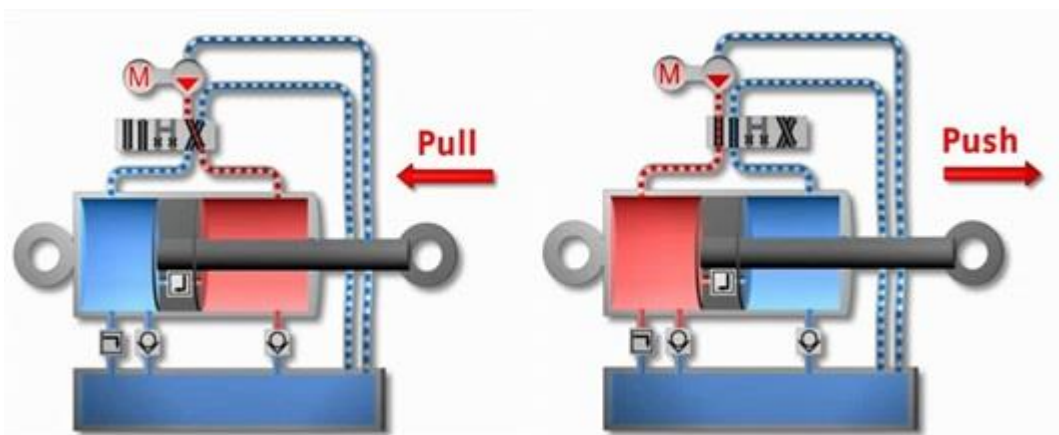
Zaprojektowany przez firmy Siemens oraz Liebherr system ADD charakteryzuje się znacznym stopniem integracji. System ten składa się z kontrolera oraz dwóch siłowników, które zawierają układ pomiarowy i wykonawczy. Siłowniki te mogą być zabudowane w miejscu pasywnych tłumików wężykowania, wymagane jest jedynie zapewnienie zasilania elektrycznego dla kontrolera oraz pompy hydraulicznej [36, 37].

Dopełnienie systemu stanowi obwód zasilania hydraulicznego (pompa hydrauliczna, zbiornik oleju oraz silnik elektryczny), który zostaje zabudowany w przedziale maszynowym pojazdu.

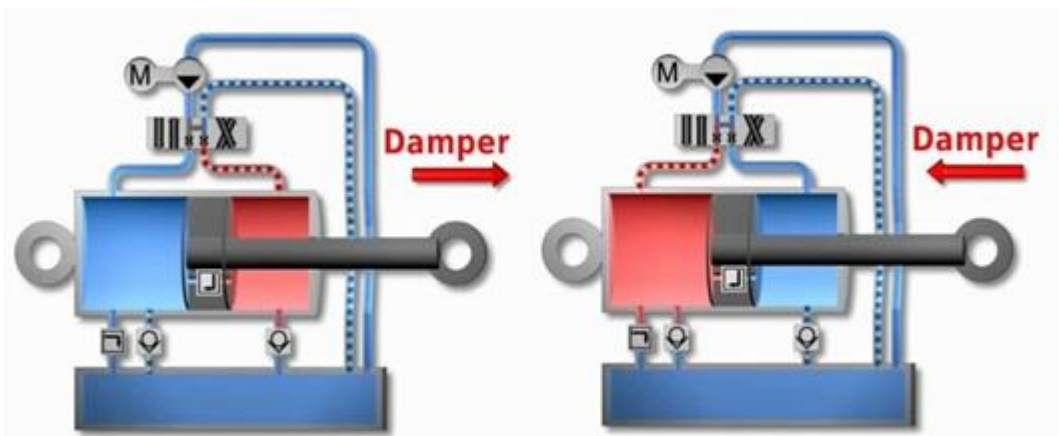




Rys. 2.7 Siłownik systemu ADD zabudowany na pojeździe [37]



Rys. 2.8 System ADD pracujący jako układ radialnego prowadzenia zestawów kołowych [36]



Rys. 2.9 System ADD pracujący jako aktywny tłumik wężykowania [36]

System ADD może pracować w dwóch podstawowych trybach pracy – jako aktywny tłumik wężykowania (rys 2.9), oraz układ prowadzenia radialnego zestawów kołowych (rys. 2.8).

W tym drugim przypadku – źródłem sygnału o jeździe po łuku torowym jest sam siłownik. Kontroler wykrywa zmianę skoku siłownika (pracującego jako tłumik). Po spełnieniu warunków dla wykrycia jazdy po łuku, kontroler uruchamia pompę hydrauliczną. Oba siłowniki, pracując jednocześnie, zaczynają się przesuwają, wymuszając zwiększenie kąta obrotu wózka, co skutkuje zmniejszeniem sił prowadzących podczas jazdy po łuku torowym.

### 3. Cel i zakres pracy

Celem niniejszej pracy jest opracowanie kompletnej koncepcji systemu radialnego sterowania zestawów kołowych pojazdów szynowych. Istotną kwestią jest zakładana duża elastyczność i możliwość skalowania takiego systemu, aby mógł być zastosowany w eksploatowanych już lokomotywach różnych typów, a także w nowo opracowywanych konstrukcjach.

Przedstawiony cel pracy pozwala na sformułowanie następującej tezy:

*Możliwe jest opracowanie koncepcji uniwersalnego systemu radialnego prowadzenia zestawów kołowych, przystosowanego do zabudowy w eksploatowanych oraz nowych pojazdach, przy minimalnej liczbie modyfikacji dokonywanych w pojeździe.*

Zakres wykonanych prac, umożliwiających realizację celu pracy, obejmuje:

- wykorzystanie informacji zawartych w literaturze o istniejących lub koncepcyjnych rozwiązaniach,
- opracowanie autorskiej koncepcji na podstawie różnych metod pozyskiwania sygnałów sterujących dla systemu,
- wybranie i opracowanie koncepcji spośród różnych rozwiązań obwodów wykonawczych dla systemu,
- wykonanie symulacji poszczególnych elementów składowych systemu,
- wykonanie badań laboratoryjnych wykonanych na modelach użytkowych elementów składowych systemu (prowadniki zestawów kołowych) oraz na zbudowanym stanowisku badawczym,
- wykonanie badań poligonowych weryfikujących symulacje i badania laboratoryjne.

#### **4. Koncepcje obwodów wejściowych dla systemu sterowania**

Najważniejszym problemem w przypadku budowy systemu radialnego sterowania wózkiem pojazdu jest ustalenie aktualnej pozycji wózka w torze. Rozpoznanie, czy pojazd znajduje się w łuku, czy też porusza się na prostym odcinku toru, jest stosunkowo łatwe. Informacje te można uzyskać na przykład badając przyspieszenia poprzeczne oraz położenie wózka względem pudła pojazdu.

Jednak informacje szczegółowe na temat ustawienia zestawów kołowych względem promienia łuku lub odległość obrzeży kół od powierzchni bocznej szyn są trudne do uzyskania, ponieważ nie ma możliwości mierzenia wielkości geometrycznych bezpośrednio między kołem a szyną.

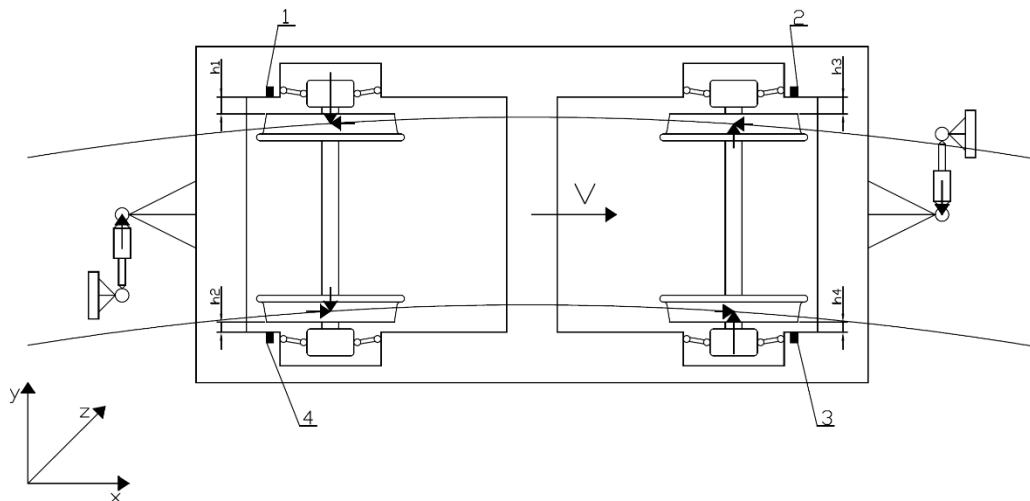
Najbardziej wiarygodny byłby bezpośredni pomiar tej wielkości za pomocą czujnika przemieszczenia, który zainstalowany byłby na kole. Jednak, jako iż koło wiruje, nie ma możliwości montażu na nim żadnych urządzeń. Jedyną możliwością zainstalowania czujników blisko koła istnieje na maźnicy zestawu kołowego. Jednak występuje tutaj problem pojawiających przyspieszeń o wysokich wartościach częstotliwości, na co nie jest odporna większość czujników. Co więcej - od powierzchni bocznej główki szyny dzieli czujnik wielkość promienia koła. Kolejnym problemem są wymagania skrajni oraz technologia budowy szlaków kolejowych. Zatem czujniki pomiarowe mogą być umieszczone jedynie na ramie wózka lub pudle pojazdu szynowego.

Należy przy tym podkreślić, że niewłaściwa ocena położenia wózka w torze i zły dobór parametrów sterowania skutkować może pogorszeniem oddziaływania pojazdu na tor lub wykolejeniem pojazdu.

W rozdziale zostały przedstawione trzy różne koncepcje systemów pomiarowych, które służyć mają określeniu dokładnej pozycji wózka w torze. Każdy z tych systemów opiera się na rejestracji sygnałów z czujników zainstalowanych na pojeździe oraz pełni również rolę sprzężenia zwrotnego, które pozwala ocenić czy położenie całego wózka i zestawów kołowych pojazdu została właściwie dostosowana do aktualnego profilu torowiska [10].

#### 4.1. Układ bazujący na pomiarze przemieszczenia zestawu kołowego

Podczas przejazdu przez łuk torowy zestawy kołowe przemieszczają się poprzecznie w ramie wózka (rys. 4.1), jednak, ze względu na opór jaki stawia rama wózka, oba zestawy kołowe wózka dwuosioowego (lub zestawy skrajne wózka trzyosiowego) przemieszczają się w przeciwnych kierunkach. Powoduje to zwiększenie kąta nabiegania zestawu prowadzącego i powstanie znacznych sił w układzie koło szyna. Jednak przemieszczenia te są mierzalne, a na ich podstawie można ustalić położenie wózka wobec pudła tak, aby wpłynąć na układ sił i spowodować radialne ustawienie ramy wózka w łuku torowym. Może być to wykonane poprzez zamontowanie czujników przemieszczeń w narożnikach ramy i pomiar odległości do powierzchni bocznej koła [10].



Rys. 4.1 Wózek z zabudowanym systemem pomiaru przemieszczeń, oprac. własne na podst. [10]  
(1 ÷ 4 – czujniki odległości pomiędzy zestawem kołowym, a ramą wózka,  
h1 ÷ h4 – wartości odległości)

Celem jest ustawienie wózka w łuku torowym zaprezentowane na rys. 4.1. W tej pozycji odległości obu kół od czujników posiadają jednakową wartość po lewej stronie ( $h_1=h_3$ ) oraz inną jednakową wartość po prawej stronie wózka ( $h_2=h_4$ ).

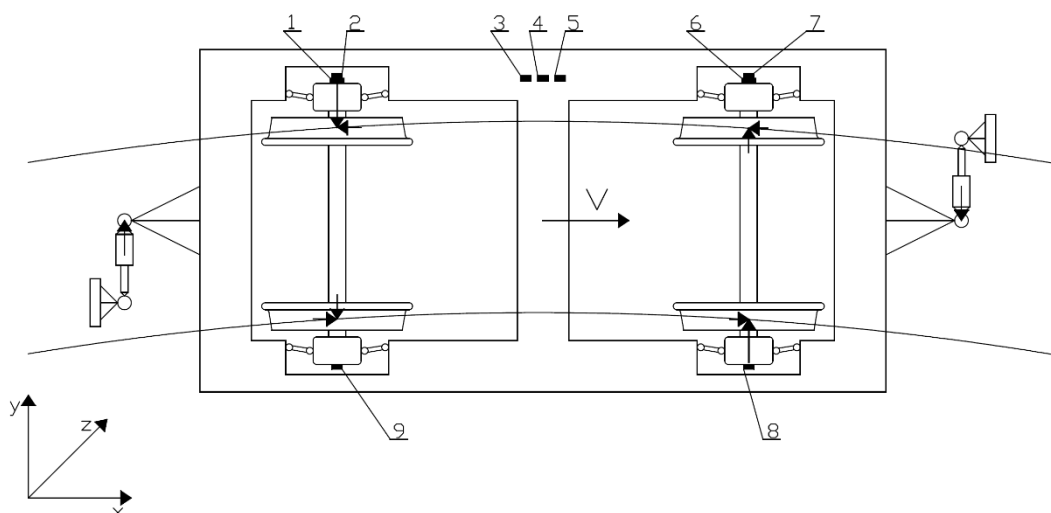
Pomiar odległości musi odbywać się z użyciem czujników bezdotykowych, zatem wybór ograniczony jest wstępnie do trzech typów czujników, tj. dalmierz laserowy, czujnik ultradźwiękowy lub czujnik indukcyjny.

Opisany powyżej system posiada kilka istotnych ograniczeń. Wszystkie z opisanych wyżej czujników są wrażliwe na środowisko pracy. Wymagane miejsce montażu czujników powoduje, że narażone będą one na dość znaczne oddziaływania dynamiczne oraz zanieczyszczenia wzbijane w powietrze podczas jazdy obiektu. Ponadto czujniki te muszą być

odporne na opady deszczu lub śniegu. W związku z tym najbardziej odpowiednie do takich warunków pracy są czujniki indukcyjne, ponieważ ich zwarta budowa zapewnia dużą wytrzymałość na oddziaływania dynamiczne, natomiast użycie pola magnetycznego do pomiaru zapewnia brak wrażliwości na niemetalowe obiekty, które mogą znaleźć się w polu pracy oraz brak wrażliwości na stan powierzchni bocznej koła. Jednakże należy pamiętać o możliwości zabrudzenia powierzchni czołowej czujników drobkami metalu, na przykład pochodzących ze ścierających się klocków hamulcowych, co skutkować może istotnymi zaburzeniami w ich poprawnym działaniu.

#### **4.2. Układ bazujący na analizie dynamicznego zachowania wózka**

System, zaprezentowany ideowo na rys. 4.2, rejestruje sygnały z akcelerometrów zamontowanych na maźnicach zestawów kołowych, ramie wózka oraz w pudle pojazdu szynowego. Następnie wartości te są przetwarzane w sterowniku, oraz porównywane ze sobą, by ustalić właściwą geometrię pojazdu podczas przejazdu przez łuk torowy. Następnie, po obliczeniach w sterowniku, jest ona realizowana przez układ wykonawczy. Przy zastosowaniu odpowiednio szybkich układów elektronicznych możliwe jest ustalanie trajektorii pojazdu w czasie rzeczywistym i zapewnienie optymalnego ustawienia. Należy przy tym pamiętać o uwzględnieniu przechyłki torowej, która będzie miała wpływ na mierzone wartości przyspieszenia bocznego, w związku z tym system pomiarowy musi zawierać elektroniczny inklinometr zamontowany na ramie wózka, oraz na maźnicach zestawów kołowych. Dodatkowo niezbędną informacją do wyznaczenia wartości promienia łuku torowego jest prędkość pojazdu, w związku z tym wymagane jest zastosowanie enkoderów umieszczonych na maźnicach zestawów kołowych, które będą podawać prędkości poszczególnych zestawów kołowych. Aby dopasować reakcje systemu do prędkości pojazdy na ramie wózka powinien być dodatkowo zamontowany żyroskop elektroniczny podający informacje o prędkości kątowej [10].



Rys. 4.2 Wózek z zabudowanym systemem pomiaru przyspieszeń, oprac. własne na podst. [10]  
 (1, 3, 6 – akcelerometry zabudowane na maźnicach zestawów kołowych i ramie wózka,  
 2, 7 – czujniki prędkości (enkodery) zabudowane na maźnicach zestawów kołowych,  
 4, 8, 9 – inklinometry zabudowane na maźnicach zestawów kołowych i ramie wózka,  
 5 – żyroskop trójosiowy zabudowany na ramie wózka)

Przyspieszenie boczne (normalne do łuku torowiska) może być wyliczone z poniższego wzoru:

$$a_y = \frac{V^2}{r}$$

Zatem poprzez odpowiednie przekształcenie na podstawie znajomości wartości przyspieszenia i prędkości można wyznaczyć optymalny promień łuku uwzględniając dodatkowo kąt pochylenia torowiska:

$$r = \frac{V^2}{a_y \cos \alpha}$$

W takim układzie pracy należy zwrócić uwagę na bardzo duże wartości chwilowych przyspieszeń (udary) na maźnicach zestawów kołowych, dobierając czujniki o właściwym zakresie pomiarowym i dużej odporności na udary mechaniczne, które nie mogą zakłócać właściwych pomiarów.

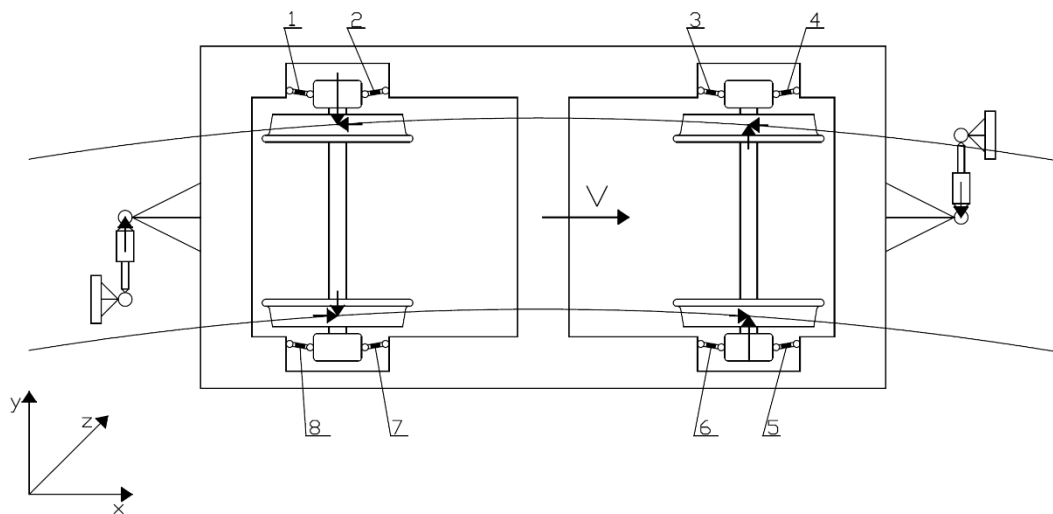
### 4.3. Układ bazujący na pomiarze naprężeń w przewodnikach zestawu kołowego

Jeżeli usprężynowanie pierwszego stopnia posiada dużą sztywność poprzeczną, a moment sił generowany przez zawieszenie drugiego stopnia wykazuje również znaczną wartość, to w takiej sytuacji elementy prowadzenia zestawu kołowego podlegają znacznym obciążeniom [10].

W związku z tym istnieje możliwość mierzenia naprężeń na tych elementach, przy spodziewanych ich dość znacznych wartościach, za pomocą odpowiednio naklejonych czujników tensometrycznych. Tak przygotowany element pełni funkcję dynamometru dostarczającego informacje o siłach wzdłużnych oraz poprzecznych.

Celem jest wywołanie takich samych zwrotów sił na obu zestawach kołowych oraz ogólne zminimalizowanie wartości sił poprzecznych, które zwiększają opory jazdy podczas przejazdu pojazdu przez łuk torowy, oraz powodują zwiększone zużycie kół i szyn.

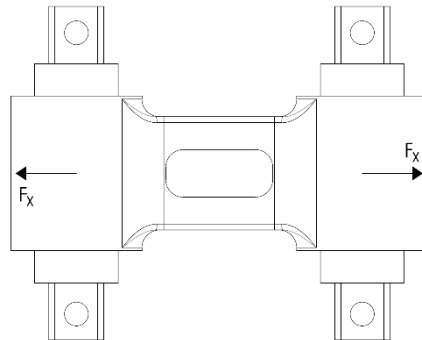
Schemat wózka wyposażonego w otensometrowane elementy prowadzenia zestawów kołowych pokazano na rys. 4.3.



Rys. 4.3 Wózek z zabudowanym systemem pomiaru naprężeń, oprac. własne na podst. [10]  
(1 ÷ 8 –przewodniki zestawów kołowych, wyposażone w tensometry)

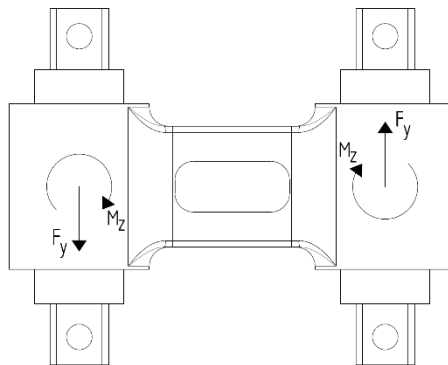


Prowadnik zestawu kołowego przenosi siły wzdłużne  $F_x$ , pochodzące od rozruchu lub hamowania pojazdu.



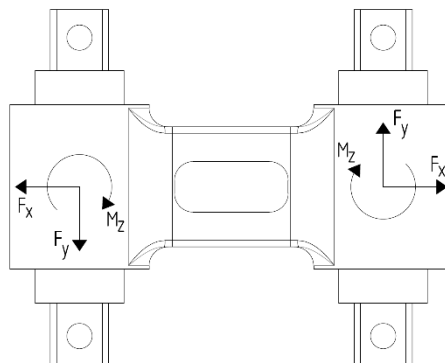
Rys. 4.4 Widok prowadnika z zaznaczonymi kierunkami działania sił wzdłużnych, oprac. własne

Podczas jazdy na łuku torowym, pojawiają się działające na niego siły poprzeczne, spowodowane przesunięciem maźnicy w odniesieniu do ramy wózka.



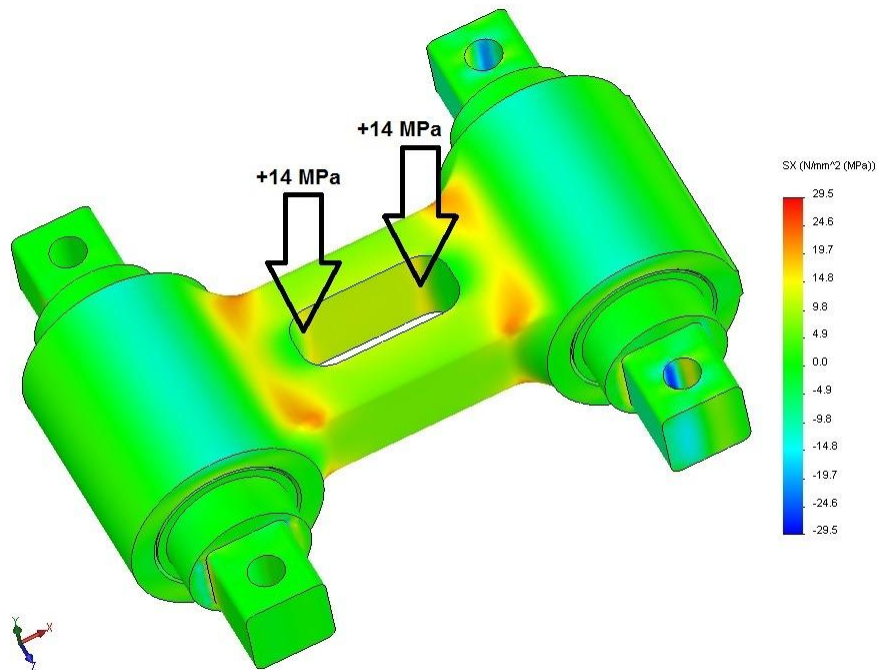
Rys. 4.5 Widok prowadnika z zaznaczonymi kierunkami działania sił poprzecznych, oprac. własne

Siła poprzeczna  $F_y$  przenoszona przez prowadnik powoduje jego zginanie, pojawia się też moment zginający  $M_z$ . W warunkach rzeczywistych w prowadniku pojawią się naprężenia pochodzące od sił podłużnych i poprzecznych, co zostało przedstawione na rys. 4.6.



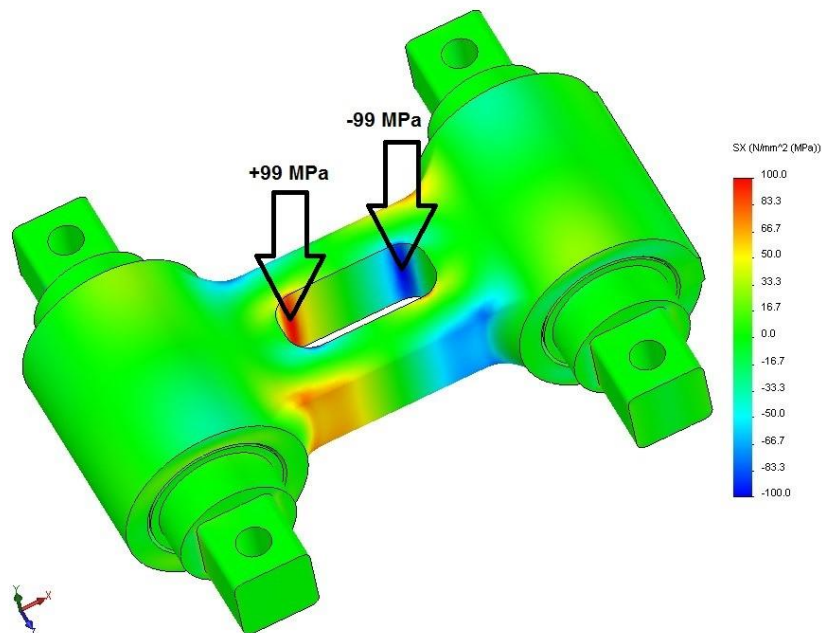
Rys. 4.6 Widok prowadnika z zaznaczonymi kierunkami działania sił podłużnych i poprzecznych, oprac. własne

Przykładowa symulacja, zakładająca działanie siły podłużnej o wartości 25kN (rozciąganie przewodnika), pozwala na uzyskanie następujących wartości naprężeń:



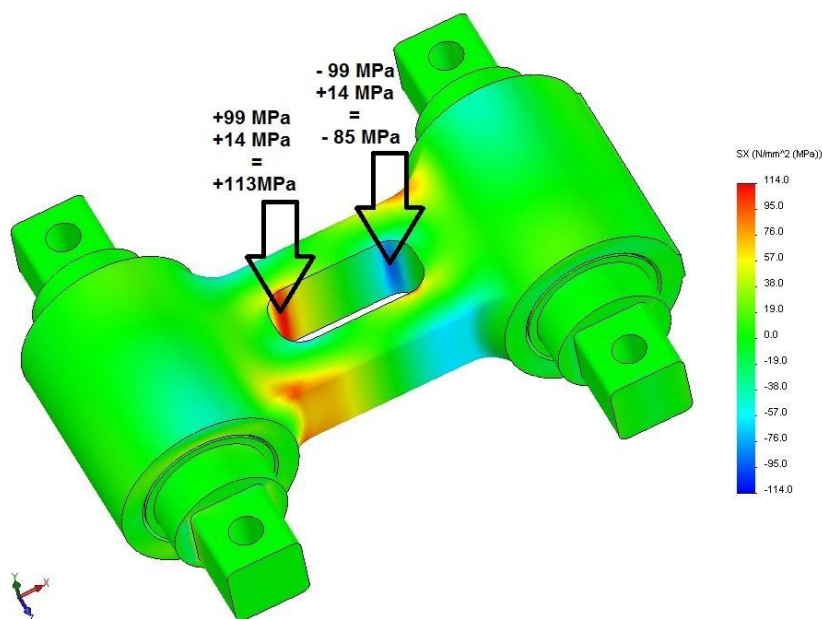
Rys. 4.7 Wartości naprężeń w przewodniku rozciągany z siłą 25kN, oprac. własne

Analogiczna symulacja, zakładająca działanie siły poprzecznej o wartości 25kN (zginanie przewodnika), pozwala na uzyskanie następujących wartości naprężeń:



Rys. 4.8 Wartości naprężeń w przewodniku zginany z siłą 25kN, oprac. własne

Zakładając działanie z siłą 25kN na prowadnik w obu kierunkach – otrzymujemy następujący rezultat:



Rys. 4.9 Wartości naprężeń w prowadniku rozciągany i zginany z siłą 25kN, oprac. własne

Jak można zauważyć, naprężenia pochodzące od sił podłużnych i poprzecznych nakładają się na siebie, sumując się w węzłach. Ze względu na konieczność pomiaru na prowadniku wyłącznie sił poprzecznych, należy wyeliminować składową, pochodzącą od sił podłużnych. Można to uzyskać na drodze prostych działań matematycznych lub poprzez odpowiednie połączenie tensometrów w układ mostka tensometrycznego.

## 5. Koncepcje obwodów wykonawczych dla systemu sterowania

Jako system wykonawczy wybrany został układ hydrauliczny ze względu na oferowaną przez niego precyzję sterowania i dostępność różnorodnych elementów, z których można zbudować układ spełniający szczegółowe wymagania. Ponadto siłowniki hydrauliczne wyposażone w regulatory przepływu mogą dodatkowo pełnić funkcje pasywnych lub aktywnych tłumików hydraulicznych, zapewniając pracę systemu również na prostych odcinkach torów, eliminując konieczność stosowania dodatkowych elementów biernych (niezależne pasywne tłumiki wężykowania) [12].

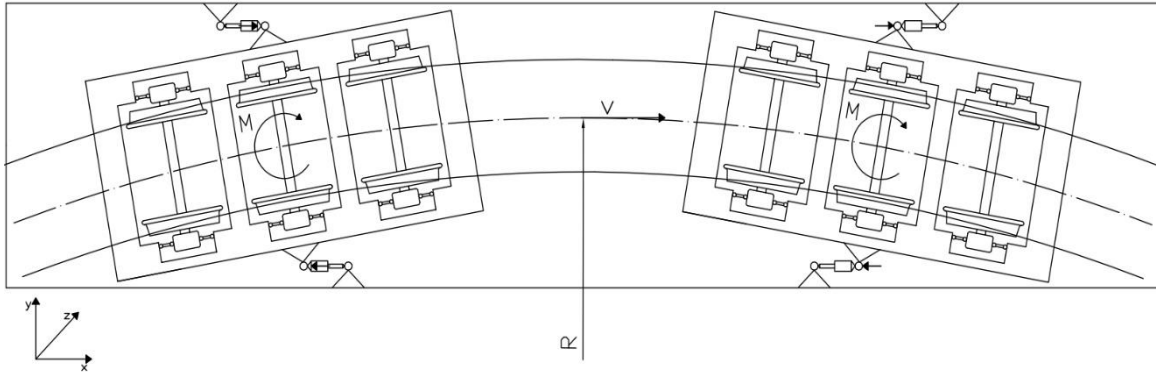
W niniejszej pracy postanowiono zaproponować kilka takich rozwiązań mogących zrealizować najpilniejsze potrzeby taboru kolejowego używanego w Polsce. Podstawowy cel, jaki tym rozwiązaniom ma przyświecać, to obniżenie oddziaływania poprzecznego na tor - dlatego za bazę ćwiczebną wybrano trzy serie lokomotyw produkcji krajowej z lat 70 i 80-tych ubiegłego stulecia, które są jeszcze bardzo licznie eksploatowane na torach PKP PLK i nie posiadają zbyt dobrych parametrów współpracy z torem.

Są to lokomotywy serii:

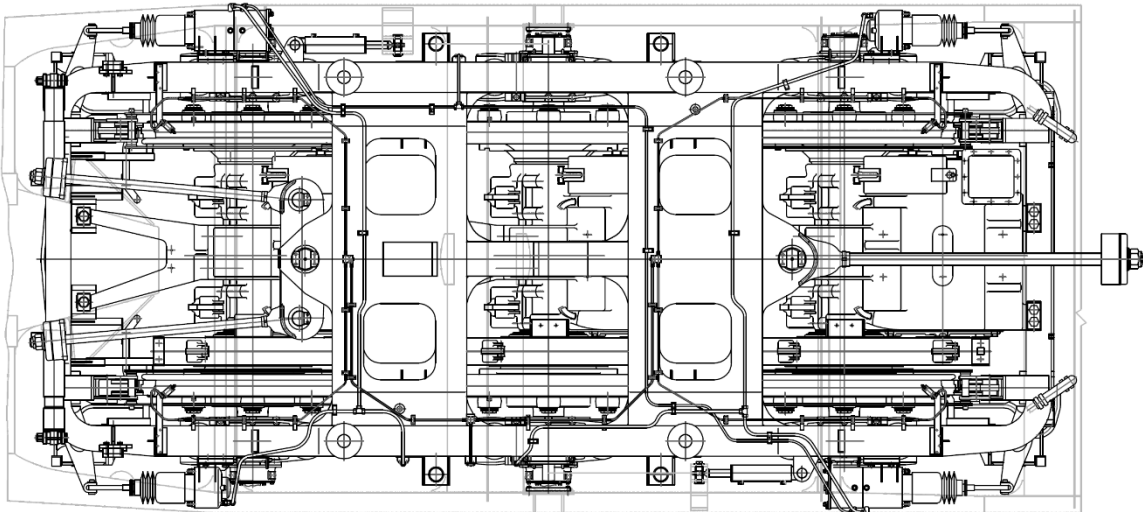
- ET22 (typ fabryczny 201E i pochodne),
- SP45/SU45/ST45 (typ fabryczny 301D i pochodne),
- SU46/ST46 (typ fabryczny 303D i pochodne).

## 5.1. Obwód wykonawczy zawierający siłowniki zabudowane między nadwoziem a ramą wózka

Obwód wykonawczy posiada siłowniki hydrauliczne, umieszczone pomiędzy wózkami a ramą nadwozia, w miejscu typowych pasywnych tłumików wężykowania.



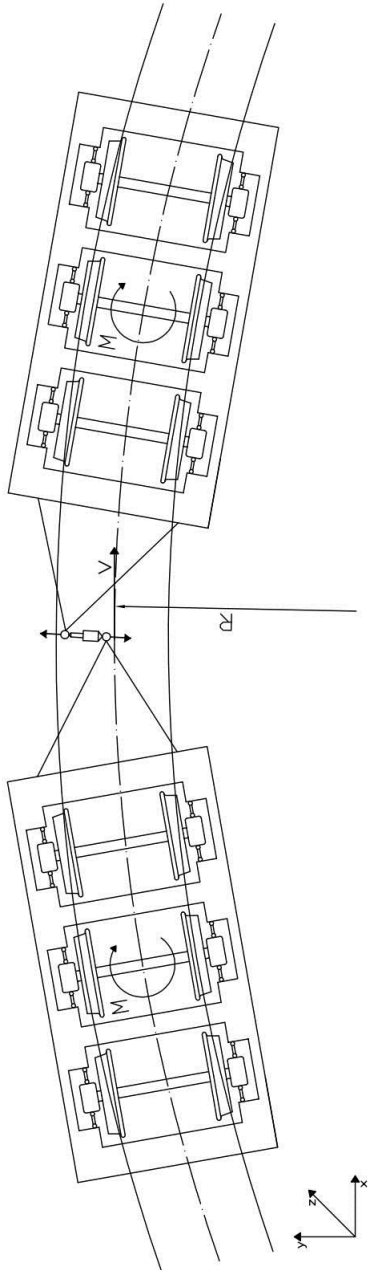
Rys. 5.2 Widok wózków pojazdu z siłownikami zabudowanymi pomiędzy ramą wózka a pudłem [14, 15]



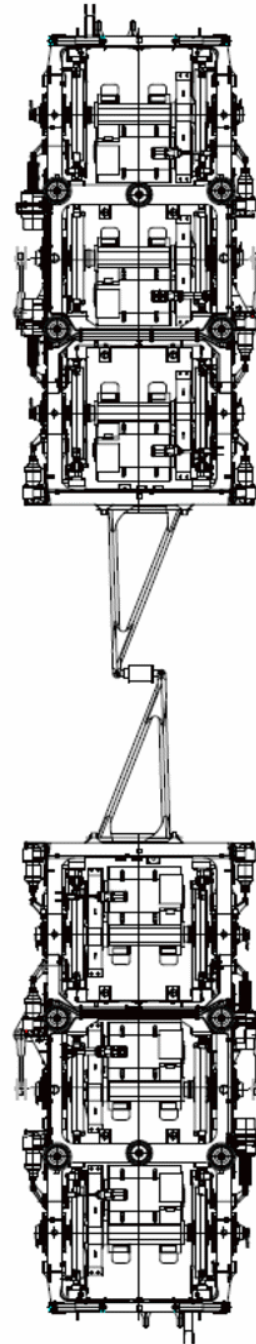
Rys. 5.1 Konstrukcja wózka lokomotywy ET22 z zabudowanymi siłownikami hydraulicznymi pomiędzy ramą wózka a pudłem, służącymi do obracania wózka do pozycji radialnej [14,15]

## 5.2. Obwód wykonawczy zawierający siłownik w sprzęgu międzywózkowym

Obwód wykonawczy posiada pojedynczy siłownik hydrauliczny, zabudowany w sprzęgu międzywózkowym, zamiast amortyzatora sprężynowego.



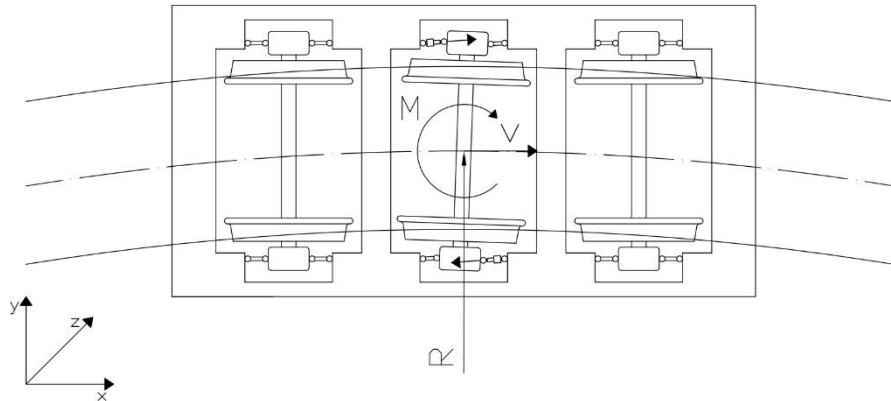
Rys. 5.4 Widok wózków pojazdu z zabudowanym siłownikiem w sprzęgu międzywózkowym [16,17]



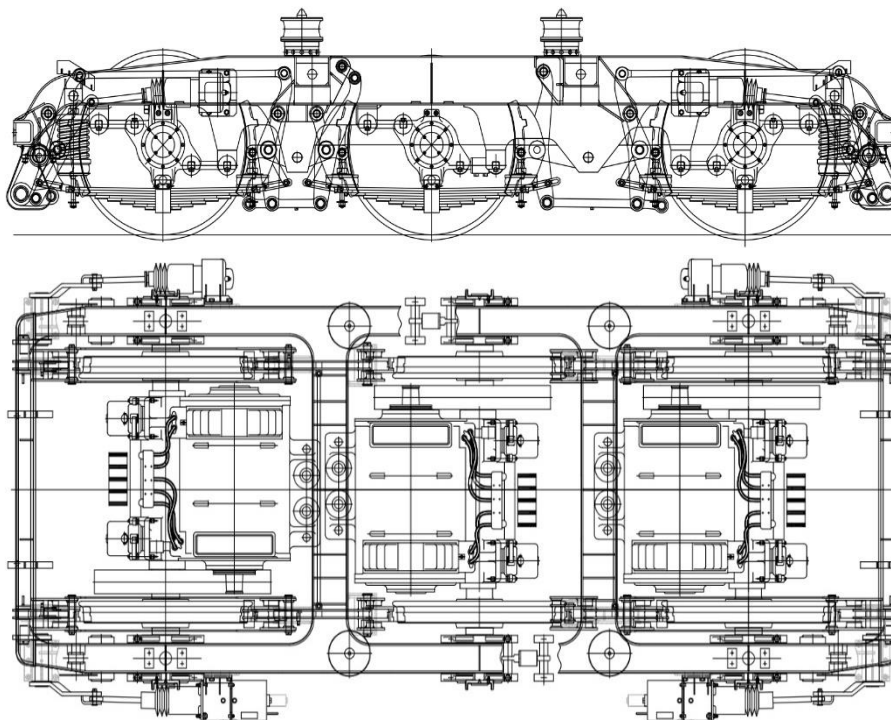
Rys. 5.3 Wózki lokomotywy SU45/46 z zainstalowanym dyszlowym sprzęgiem międzywózkowym [16, 17]

### 5.3. Obwód wykonawczy sterujący obrotem środkowego zestawu kołowego

Obwód wykonawczy zawiera siłowniki hydrauliczne zabudowane (zamiast poszczególnych przewodników) między maźnicami, a ramą wózka.



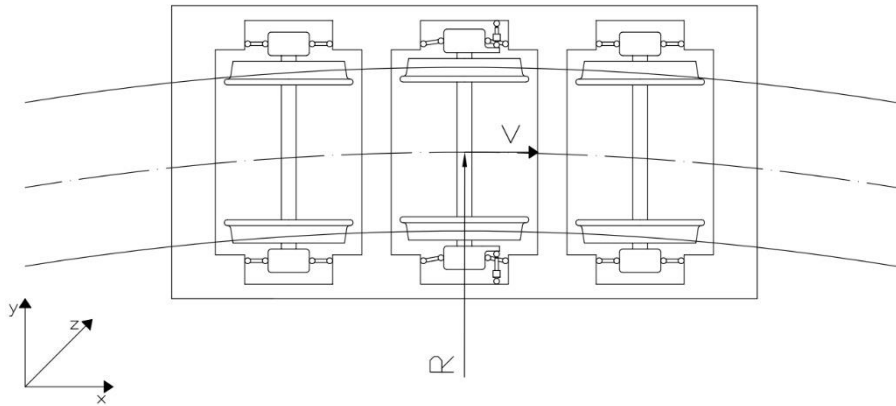
Rys. 5.5 Widok wózka pojazdu z siłownikami zabudowanymi pomiędzy ramą wózka a maźnicą środkowej osi [18, 19]



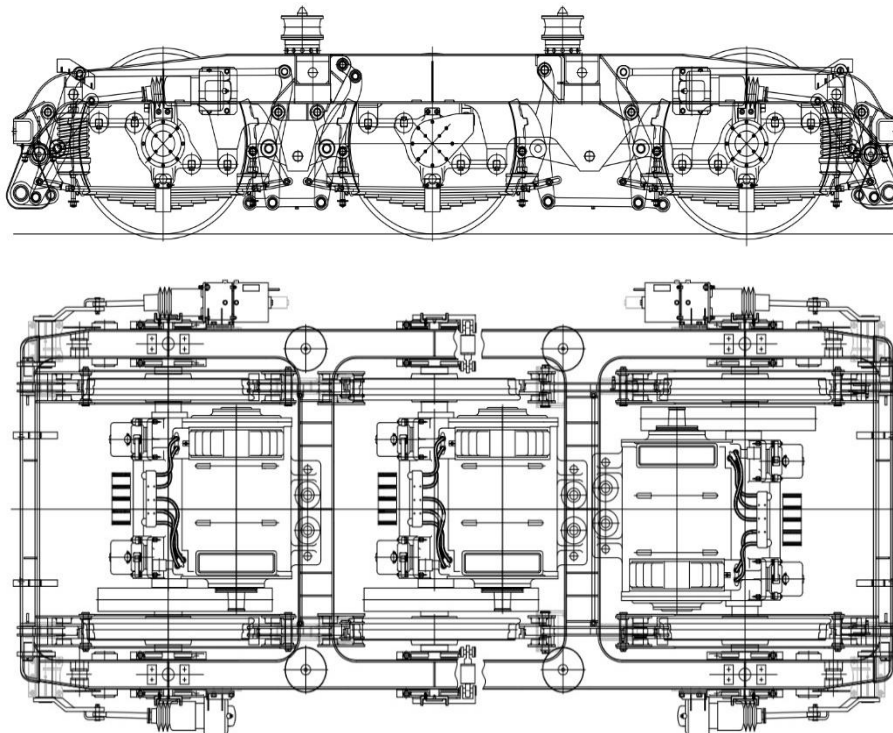
Rys. 5.6 Wózek lokomotywy SU45 z zabudowanymi siłownikami hydraulicznymi obracania środkowego zestawu kołowego w celu regulowania (odciążania) sił poprzecznych w łożyskach osi skrajnych [18, 19]

#### 5.4. Obwód wykonawczy sterujący przesuwem poprzecznym środkowego zestawu kołowego

Obwód wykonawczy zawiera siłowniki hydrauliczne zabudowane między maźnicami, a ramą wózka.



Rys. 5.7 Widok wózka pojazdu z siłownikami zabudowanymi pomiędzy ramą wózka a maźnicą środkowej osi [18, 19]



Rys. 5.8 Wózek lokomotywy SU45 z zabudowanymi siłownikami hydraulicznymi przesuwania środkowego zestawu kołowego w celu regulowania (odciążania) sił poprzecznych w łożyskach osi skrajnych.[18, 19]



## **6. Stanowisko badawcze**

Stanowisko badawcze 51SB zostało wykonane w celu weryfikacji możliwości wykorzystania poszczególnych typów czujników (źródeł sygnału wejściowego), oraz rozpoznanie praktycznych możliwości sterowania obwodem wykonawczym [13].

### **6.1. Założenia**

Podstawowym założeniem konstrukcji stanowiska 51SB jest chęć jak najdokładniejszego odwzorowania układu, który miałby być zabudowany na pojeździe szynowym.

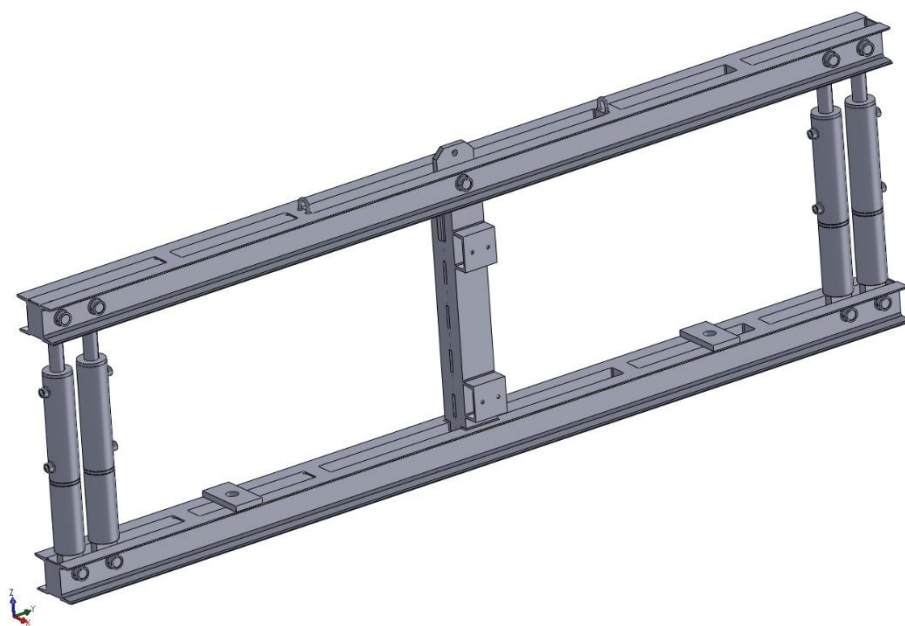
Ze względu na konieczność realizowania dużych wartości sił i momentów, przy zachowaniu niewielkiej masy, przyjęto założenie, że obwód wykonawczy powinien zostać oparty o system hydrauliczny. System ten powinien umożliwiać symulację wymuszeń pochodzących od układu biegowego lokomotywy, jak również dać możliwość przebadania reakcji na wymuszenie (symulując system radialnego prowadzenia zestawów kołowych).

Stanowisko musi zostać wyposażone w jak największą ilość czujników, w celu weryfikacji przydatności sygnałów z nich pochodzących jako źródeł sygnałów wejściowych dla kontrolera systemu radialnego prowadzenia zestawów kołowych.

Stanowisko będzie posiadać kontroler, oparty o sterownik mikroprocesorowy, umożliwiając wykonywanie prób i badań pod kontrolą komputera sterującego, jak również w kolejnym etapie – pracę w pełni autonomiczną [11]. Kontroler powinien być wyposażony w obwody wejściowe, umożliwiające bezpośrednie wykorzystanie sygnałów, pochodzących z czujników. Obwody wyjściowe kontrolera powinny umożliwiać bezpośrednie sterowanie obwodami hydraulicznymi stanowiska.

### **6.2. Wykonanie obwodu mechanicznego**

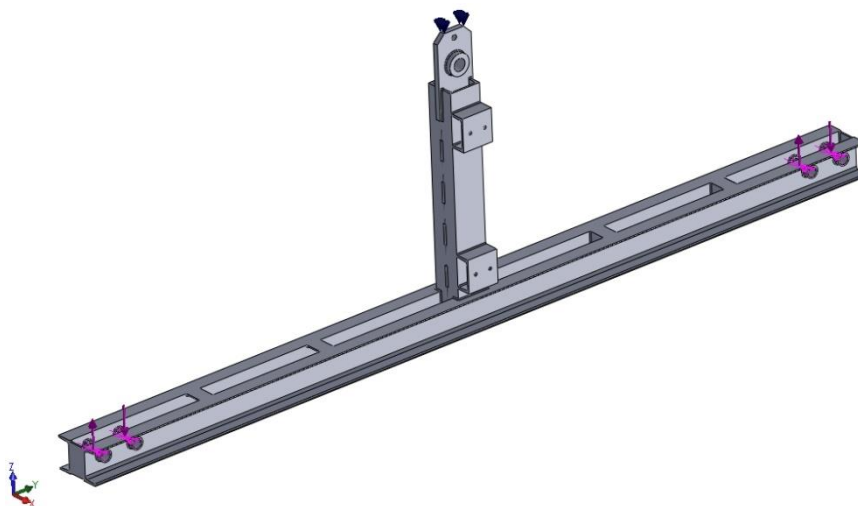
Stanowisko SB51 zostało wykonane jako rama z dwoma zestawami siłowników, do której przymocowana została tablica z obwodem hydraulicznym. Jeden zestaw siłowników i jeden obwód hydrauliczny tworzą obwód symulujący obrót wózka lokomotywy na łuku (obwód wymuszający), drugi zestaw pełni rolę obwodu prowadzenia radialnego zestawów kołowych. Konstrukcja taka wynika z warunków laboratoryjnych, które muszą umożliwić zadanie wymuszenia i reagowanie na nie. Zabudowa systemu na pojeździe zawierać będzie jeden obwód.



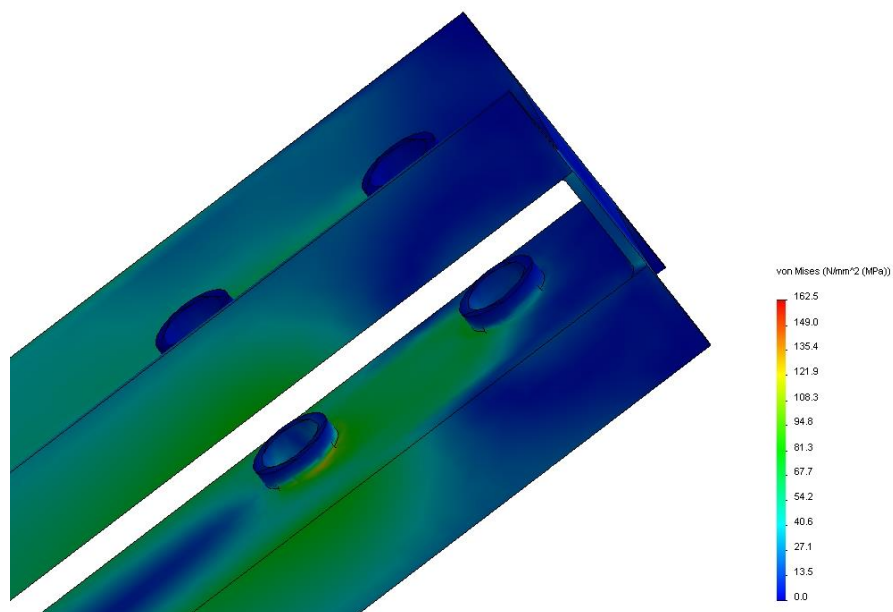
Rys. 6.1 Widok modelu ramy stanowiska badawczego, wraz z siłownikami [13]

Konstrukcja stanowiska przenosi jedynie obciążenia pochodzące od siłowników, pracujących przeciwbieżnie – parami. Jeden obwód stanowią siłowniki zamocowane „od zewnątrz”, drugi – „wewnętrzne”.

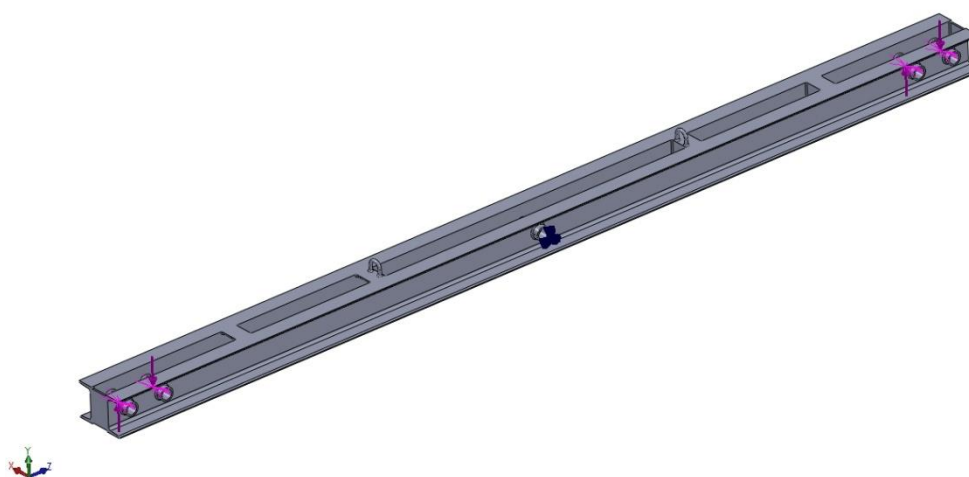
Zakładana wytrzymałość i sztywność konstrukcji stanowiska 51SB (podstawy i wahacza) została zweryfikowana przy pomocy symulacji poszczególnych elementów metodą elementów skończonych (MES).



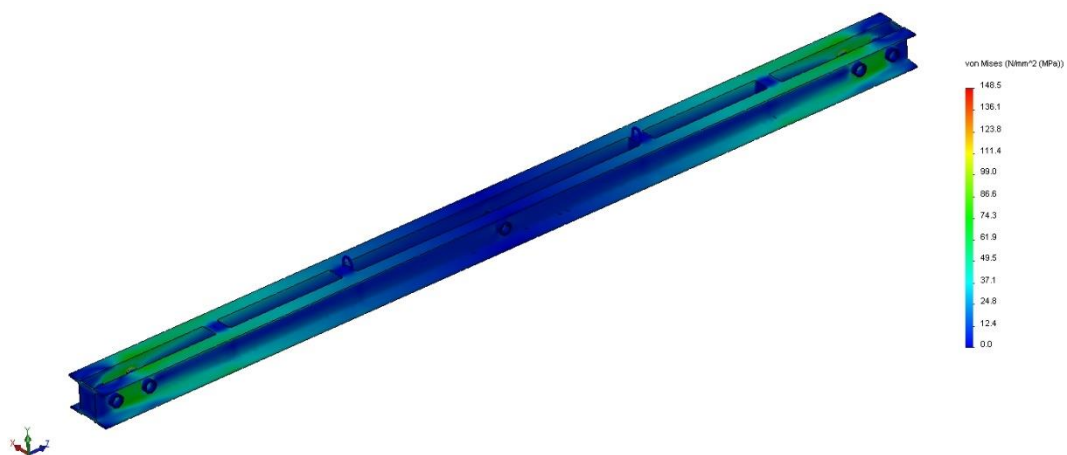
Rys. 6.2 Obciążenia od siłowników, oddziałujące na podstawę [13]



Rys. 6.3 Naprężenia w gniazdach sworzni siłowników – pod obciążeniem [13]



Rys. 6.4 Obciążenia od siłowników, oddziałujące na wahacz [13]



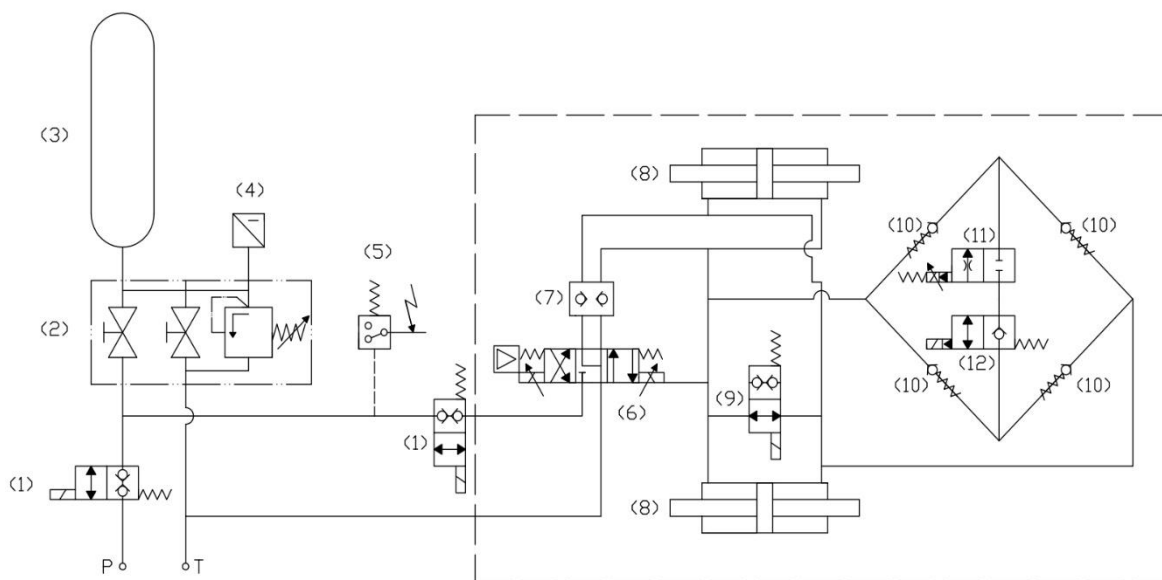
Rys. 6.5 Rozkład naprężeń w wahaczu – pod obciążeniem [13]

### 6.3. Wykonanie układu hydraulicznego

Układ hydrauliczny powinien umożliwiać pracę każdego z obwodów w trzech trybach pracy:

- a) brak działania, brak oporu,
- b) praca jako regulowany tłumik (aktywny tłumik wężykowania),
- c) praca jako układ wymuszający obrót (układ radialnego prowadzenia zestawów kołowych).

Ze względu na to, że w warunkach rzeczywistych układ taki będzie pracował jedynie okresowo, przewidziane zostało użycie akumulatora hydraulicznego, aby pompa zasilająca nie musiała pracować w sposób ciągły.



Rys. 6.6 Schemat obwodu hydraulicznego stanowiska 51SB [13]

Fragmenc schematu, mieszczący się w ramce, jest zdublowany z powodu konieczności zastosowania w warunkach laboratoryjnych dwóch obwodów (co zostało wyjaśnione w punkcie 6.2).

Blok zasilania obwodu hydraulicznego obejmuje następujące komponenty:

- przyłącza do pompy hydraulicznej (P oraz T),
- dwa zawory (1), jeden z nich umożliwia przepływ oleju hydraulicznego od zasilania (pompy) do akumulatora hydraulicznego, drugi natomiast umożliwia przepływ oleju od akumulatora hydraulicznego do obwodów wykonawczych,

- blok zabezpieczenia akumulatora hydraulicznego (2), współpracujący z akumulatorem hydraulicznym (3), czujnikiem ciśnienia (4) oraz wyłącznikiem ciśnieniowym (5).

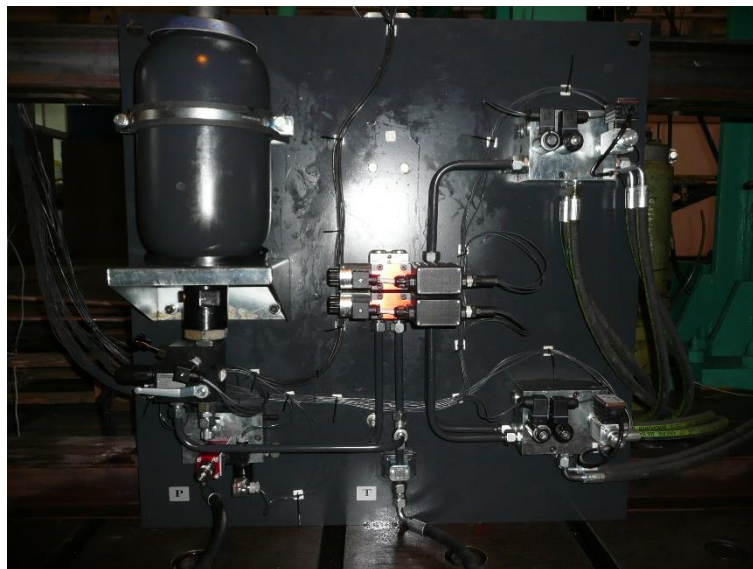
Blok obwodu wykonawczego (zdublowany) zawiera następujące komponenty:

- dwa siłowniki hydrauliczne (8),
- zawór (9), umożliwiający realizację stanu pracy a),
- regulator proporcjonalny (6) oraz zawór zamkowy (7), umożliwiający realizację stanu pracy c),
- zawór (1), zawór proporcjonalny (11) oraz cztery zawory zwrotne (10) w układzie mostkowym, umożliwiające realizację stanu pracy b).

Zawór (9) stanowi również rodzaj zabezpieczenia, gdyż umożliwia natychmiastowe wyłączenie siły realizowanej w stanie beznapięciowym.

Zawór zamkowy (7) stanowi dodatek do rozdzielacza proporcjonalnego, zapewniając poprawność sterowania, gdyż rozdzielacze proporcjonalne suwakowe posiadają pewne nieszczelności, wynikające z ich zasady działania, co w konsekwencji powoduje zmiany położenia siłownika przy jego obciążeniu.

Analogiczną funkcję pełni zawór (12) w obwodzie zaworu proporcjonalnego. Zawory zwrotne (10) w układzie mostkowym zapewniają natomiast jeden kierunek przepływu oleju hydraulicznego przez zawór proporcjonalny, co jest wymuszone jego konstrukcją.



Rys. 6.7 Widok tablicy z obwodem hydraulicznym stanowiska 51SB [13]

#### 6.4. Zastosowane elementy pomiarowe

Stanowisko badawcze 51SB zostało wyposażone w dwa, całkowicie niezależne, zestawy czujników umieszczone na wahaczu, na obu jego końcach.

Każdy zestaw czujników składa się z następujących elementów:

- czujnik przemieszczenia typu linkowego

Czujnik ten ma zakres pomiarowy 250mm, służy do określenia położenia tłoczyska siłownika, poprzez pomiar odległości wahacza od ramy stanowiska. Czujnik jest typu potencjometrycznego, posiada wyjście napięciowe o charakterystyce liniowej. Zasilanie czujnika wynosi 5V, stąd zakres napięcia wyjściowego zawierać się będzie w granicach  $0V \div 5V$ .

- trójosiowy czujnik przyspieszenia (akcelerometr) typu ADXL326

Jest to czujnik, umożliwiający pomiar przyspieszeń o wartości nie przekraczającej  $\pm 16g$ , w każdej z osi. Wymagane napięcie zasilania tego czujnika to 3,3V. Czujnik posiada wyjścia analogowe, pracujące w pełnym zakresie napięć zasilania, czyli  $0V \div 3,3V$ .

- żyroskop typu ADXRS610

Jest to żyroskop jednoosiowy, o zakresie pomiarowym  $\pm 300^\circ/s$ . Czujnik zasilany jest z napięcia 5V, posiada jedno wyjście analogowe o napięciu wyjściowym  $0V \div 5V$ , oraz dodatkowe wyjście, umożliwiające odczyt temperatury czujnika, co umożliwia kompensację termiczną odczytanej wartości w kontrolerze mikroprocesorowym.

Obwód akumulatora ciśnienia posiada również dwa czujniki, służące do kontroli parametrów zasilania obwodów hydraulicznych:

- czujnik ciśnienia 250 bar

Czujnik ten jest zasilany napięciem 24V, zakres napięcia wyjściowego wynosi  $0V \div 10V$ .

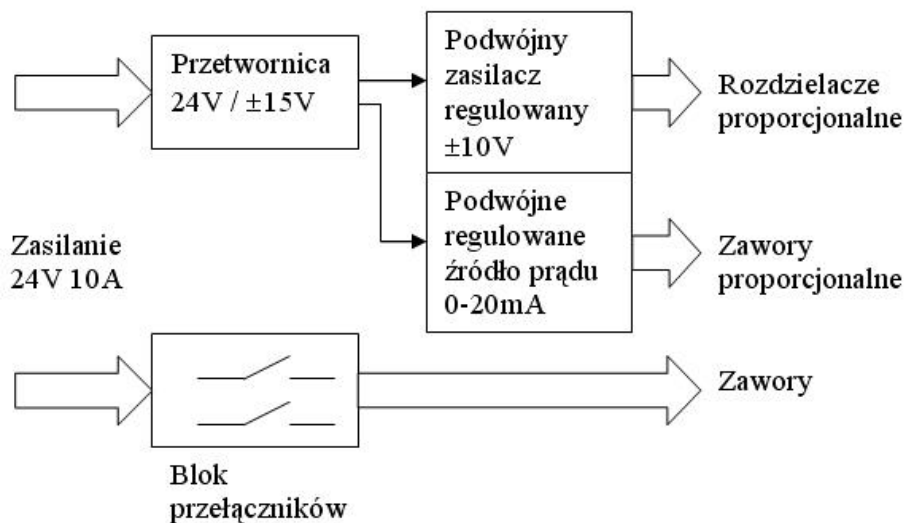
- stykowy czujnik ciśnienia

Jest to typowy wyłącznik ciśnieniowy, pełniący funkcję pomocniczą, który pracuje przy zasilaniu 24V. Sygnał wyjściowy 24V jest podawany na wejście kontrolera.

## 6.5. Wykonanie systemu sterowania stanowiska

### 6.5.1. Panel sterujący

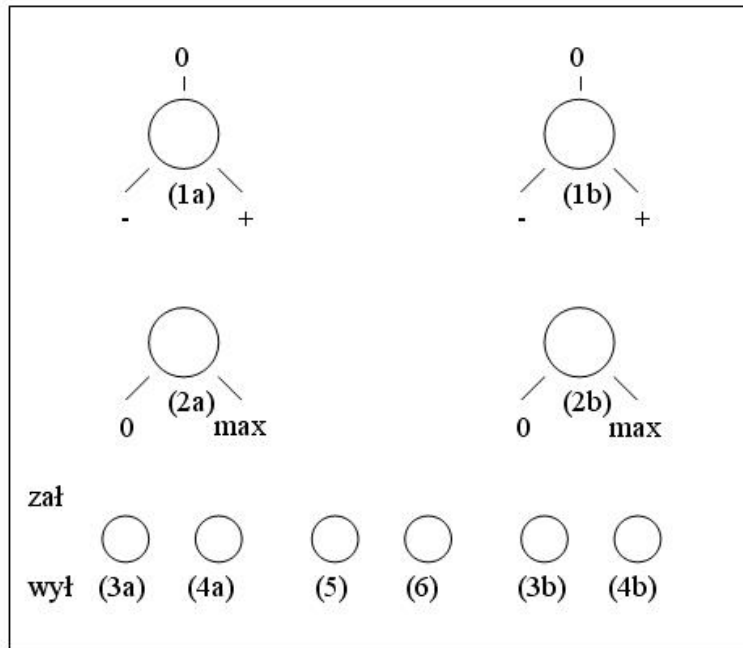
Wykonanie panelu sterującego, umożliwiającego wykonywanie manualnych operacji z wykorzystaniem stanowiska 51SB, umożliwiło wstępną weryfikację założeń i sprawdzenie poprawności działania poszczególnych podzespołów hydraulicznych.



Rys. 6.8 Schemat blokowy panelu sterującego [13]

Panel sterujący wymaga zasilania 24V z zewnętrznego zasilacza, zapewniając jednocześnie zasilanie i sterowanie wszystkich zaworów i rozdzielaczy hydraulicznych w obwodzie. Umieszczone w nim zostały regulowane źródła napięcia o zakresie  $-10V \div +10V$ , regulowane źródła prądu o zakresie  $0mA \div 20mA$  oraz blok przełączników (klucze cyfrowe), zasilający bezpośrednio zawory hydrauliczne napięciem z zasilacza. Zastosowanie tak wielu źródeł sygnałów w panelu spowodowane było różnymi standardami sterowania zastosowanych komponentów. Wszystkie obwody panelu sterującego zabezpieczone zostały przed przeciążeniem, zwarciem lub błędnym podłączeniem komponentów.

Źródła napięcia i prądu regulowane są za pomocą potencjometrów, zabudowanych na płycie czołowej panelu sterującego. Blok cyfrowych kluczy przełączających (układy scalone typu ITS716), sterowany jest z wykorzystaniem przełączników, również zabudowanych na płycie czołowej.



Rys. 6.9 Widok płyty czołowej panelu sterującego [13]

Panel sterujący został podzielony na dwie części, oznaczone (a) oraz (b), odpowiedzialne za sterowanie poszczególnymi obwodami hydraulicznymi. Dodatkowo na płycie czołowej znajdują się przełączniki, odpowiedzialne za sterowanie obwodem akumulatora hydraulicznego. Funkcjonalność poszczególnych komponentów jest następująca:

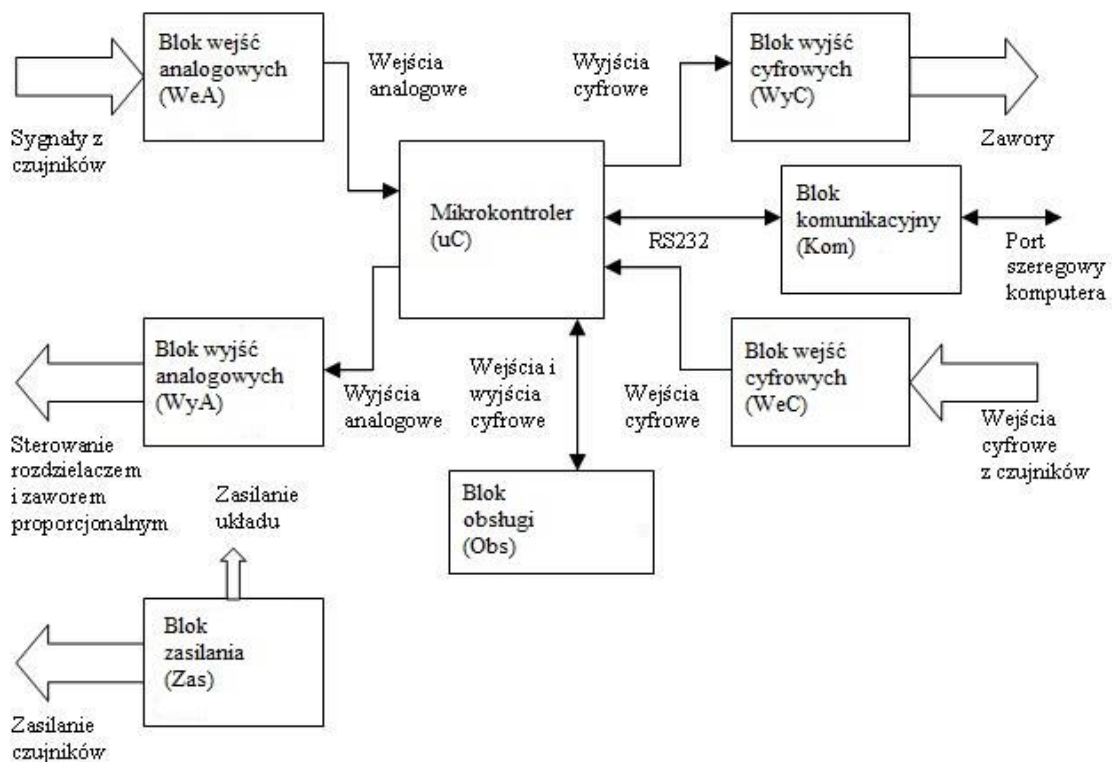
- potencjometry, oznaczone (1), regulują źródła napięcia, służące do sterowania rozdzielaczami proporcjonalnymi poszczególnych obwodów,
- potencjometry (2), regulują źródła prądowe, służące do sterowania zaworami proporcjonalnymi,
- przełączniki (3) sterują zaworami odcinającymi zawory proporcjonalne,
- przełączniki (4) sterują zaworami przelewowymi obwodów,
- przełącznik (5) pozwala na dołączenie zasilania hydraulicznego do akumulatora,
- przełącznik (6) umożliwia dołączenie obwodów wykonawczych do akumulatora.

Panel sterujący nie umożliwia odczytu wartości z czujników zabudowanych na stanowisku badawczym, dlatego też jego zastosowanie jest mocno ograniczone – do testów obwodu hydraulicznego lub zadawania stałego wymuszenia w obwodach.



## 6.5.2. Sterownik mikroprocesorowy

W celu pełnego wykorzystania możliwości sterowania stanowiskiem 51SB, został opracowany specjalizowany sterownik mikroprocesorowy. Sterownik ten składa się z dwóch identycznych obwodów, aby możliwe było całkowicie niezależne sterowanie obwodami hydraulicznymi. Dzięki takiemu rozwiązaniu będzie również możliwa łatwa implementacja układu w rozwiązaniu „praktycznym”, tj. podczas zabudowy na pojeździe trakcyjnym.



Rys. 6.10 Schemat blokowy jednego obwodu sterownika mikroprocesorowego [13]

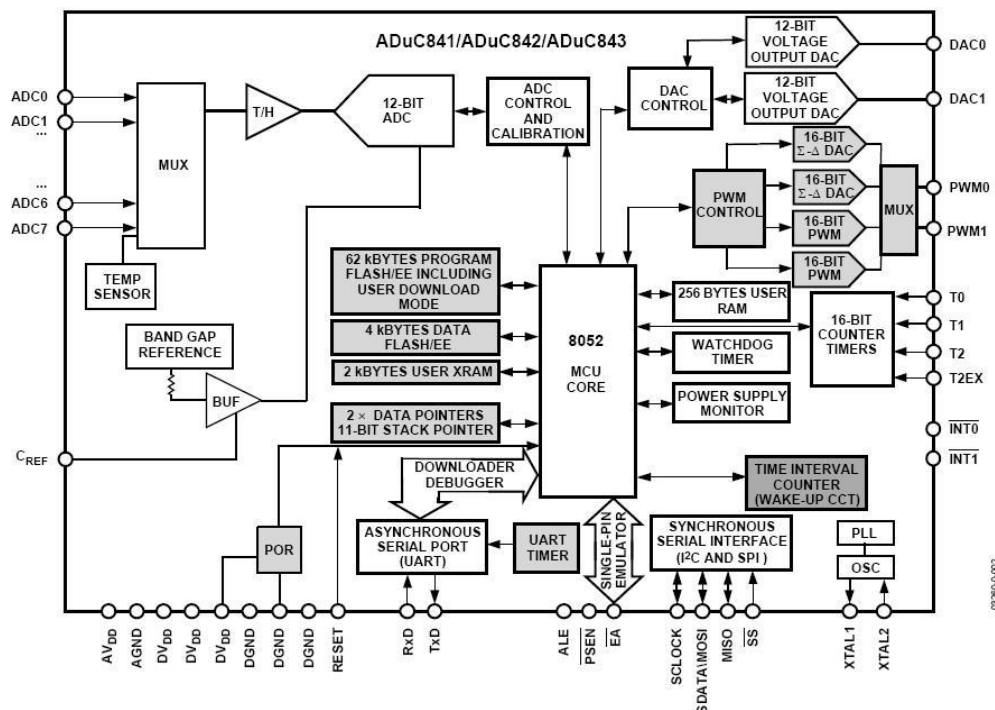
Sterownik mikroprocesorowy umożliwia sterowanie stanowiskiem 51SB z wykorzystaniem komputera nadrzędnego. W takim przypadku sterownik stanowi inteligentny moduł wejść/wyjść, pracujący pod kontrolą aplikacji na komputerze.

Drugi tryb pracy – w pełni autonomiczny, możliwy jest poprzez załadowanie programu do sterownika poprzez komputer nadrzędny. W takim przypadku sterownik pracuje w pełni samodzielnie, rola komputera nadrzędnego jest zredukowana do rejestracji wyników pracy systemu.

Każdy z dwóch (identycznych) obwodów sterownika można podzielić na następujące bloki funkcjonalne:

- Mikrokontroler (uC)

W tym bloku został wykorzystany mikrokontroler typu ADuC842 firmy Analog Devices. Układ ten wyposażony jest w precyzyjny 8-kanałowy 12-bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy (ADC), o częstotliwości próbkowania 420ksps, co czyni go szczególnie użytecznym do zastosowania w stanowisku badawczym, oraz w dwukanałowy, 12-bitowy przetwornik cyfrowo-analogowy (DAC) [32]. Rdzeń mikrokontrolera jest kompatybilny z rodziną 8051, co umożliwia łatwe oprogramowanie z użyciem powszechnie dostępnych narzędzi programistycznych.



Rys. 6.11 Architektura wewnętrzna mikrokontrolera typu ADuC842 [32]

- Blok wejść analogowych (WeA)

Blok ten zawiera dzielniki napięcia i wzmacniacze operacyjne, które zapewniają dopasowanie wartości napięć i prądów z czujników zewnętrznych (żyroskop, akcelerometr, linkowy czujnik przemieszczenia, czujnik ciśnienia) do wartości akceptowanych przez przetwornik analogowo-cyfrowy (ADC) mikrokontrolera, z wykorzystaniem jak najszerszego zakresu pomiaru.

- Blok wyjść analogowych (WyA)

Blok ten zawiera konwerter napięcie-prąd (U/I) oraz wzmacniacze operacyjne. Umożliwia to współpracę przetwornika cyfrowo/analogowego (DAC) z rozdzielaczem i zaworem proporcjonalnym, zabudowanym na stanowisku badawczym, poprzez generowanie właściwych sygnałów sterujących (prąd, napięcie), przy odpowiednim ich zakresie.

- Blok wejść cyfrowych (WeC)

Blok ten zawiera układy separacji galwanicznej i konwersji poziomów napięć, dopasowując sygnały z cyfrowych obwodów wejściowych (czujnik ciśnienia, wyłączniki awaryjne), aby można było je wprowadzić na wejścia cyfrowe mikrokontrolera.

- Blok wyjść cyfrowych (WyC)

Blok ten zawiera układy separacji galwanicznej oraz klucze elektroniczne, umożliwiające sterowanie zaworami, z kontrolą przeciążenia i zwarcia w obwodzie. Blok ten wykorzystywany jest również do zasilania innych obwodów zewnętrznych napięciem +24V, np. czujników ciśnienia, czy zaworów proporcjonalnych.

- Blok obsługi (Obs)

Blok ten zawiera cztery diody świecące (LED) oraz cztery przełączniki, podłączone bezpośrednio do wyprowadzeń mikrokontrolera, umożliwiające sygnalizację stanu sterownika przez mikrokontroler, oraz możliwość sterowania.

- Blok komunikacyjny (Kom)

Blok ten zawiera separowany galwanicznie konwerter poziomów napięć, umożliwiając współpracę mikrokontrolera z portem szeregowym RS232, zabudowanym w komputerze. Opcjonalnie możliwe jest połączenie sterownika z komputerem z wykorzystaniem złącza USB, po wymianie płytki bloku komunikacyjnego, lub z użyciem dodatkowej przejściówki.

- Blok zasilania (Zas)

Blok ten przetwarza napięcie zasilania 24V na szereg innych napięć, wykorzystywanych wewnętrznie przez sterownik, np. +5V zasilające rdzeń mikrokontrolera i część czujników, +3,3V zasilające część czujników oraz ±15V, wykorzystywane do zasilania bloków analogowych (WeA) oraz (WyA).

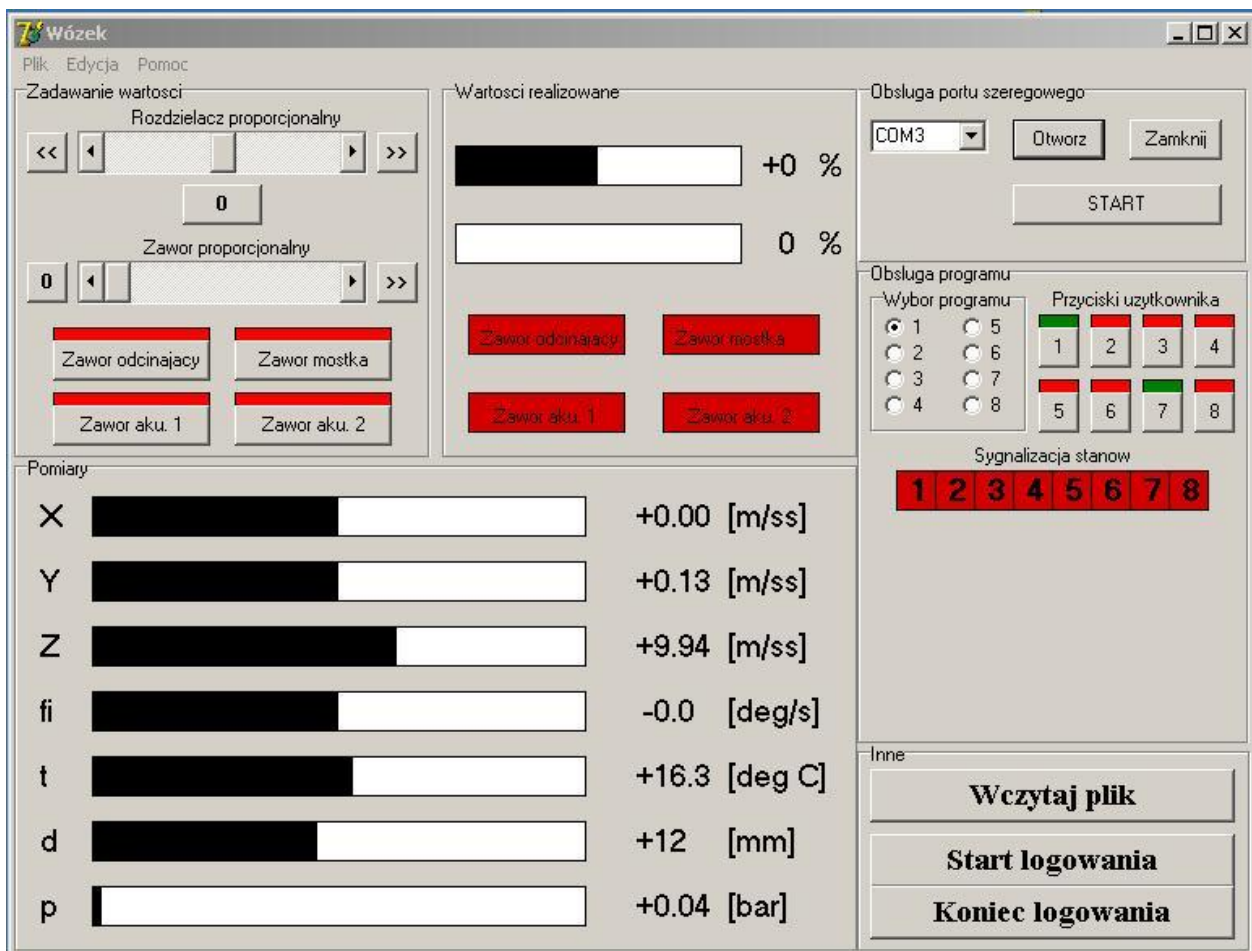
## 6.6. Badania na stanowisku 51SB

### 6.6.1. Kontrola sprawności działania

Wstępne badania stanowiska 51SB odbyły się z wykorzystaniem przywołanego wcześniej panelu sterującego. Po pomyślnym przeprowadzeniu tych prób, zostało wykonane oprogramowanie uruchomieniowe dla sterownika mikroprocesorowego.

Jednocześnie została stworzona aplikacja, służąca do kontroli pracy sterownika mikroprocesorowego. Aplikacja ta została napisana z wykorzystaniem środowiska programistycznego Borland Delphi 7. Sterownik mikroprocesorowy łączy się z aplikacją, uruchomioną na komputerze nadrzędnym, przy pomocy portu szeregowego RS232.

Dla pełnej obsługi stanowiska 51SB wymagane jest uruchomienie dwóch niezależnych aplikacji na różnych portach szeregowych, gdyż sterownik mikroprocesorowy zawiera dwa niezależne układy sterujące.



Rys. 6.12 Widok okna głównego aplikacji kontrolnej [21]

Aplikacja ta jest uniwersalna – umożliwia sprawdzenie funkcjonalności wszystkich podzespołów stanowiska, a także daje możliwość rejestracji parametrów pracy sterownika mikroprocesorowego.

Pole „Zadawanie wartości” umożliwia manualne sterowanie wszystkimi elementami obwodu hydraulicznego znajdującymi się na stanowisku. Taki tryb pracy daje możliwość kontroli działania poszczególnych podzespołów stanowiska 51SB. Należy zwrócić uwagę, iż tylko jeden sterownik ma możliwość sterowania zaworami akumulatora ciśnienia, stąd też próba sterowania tymi zaworami drugim obwodem nie przyniesie efektu.

Pole „Pomiary” daje nam podgląd w czasie rzeczywistym parametrów rejestrowanych przez czujniki umieszczone na stanowisku. Są to: akcelerometr trójosiowy (X,Y,Z), żyroskop jednoosiowy (pomiar kąta ( $\phi$ ) oraz temperatury dla kompensacji wartości ( $t$ )), linkowy czujnik przemieszczenia ( $d$ ), oraz (tylko dla pierwszego obwodu) pomiar ciśnienia w obwodzie ( $p$ ).

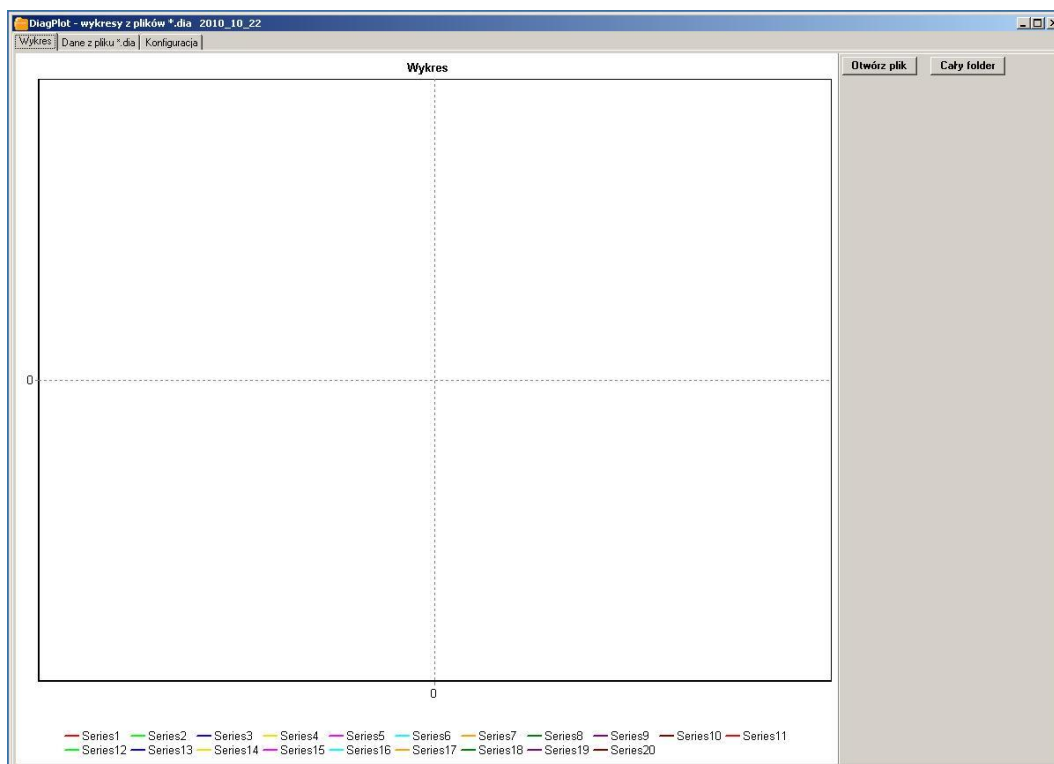
„Obsługa portu szeregowego” umożliwia wybór portu komunikacyjnego i połączenie aplikacji ze sterownikiem mikroprocesorowym.

Pole „Obsługa programu” umożliwia wywołanie programów umieszczonych w pamięci sterownika mikroprocesorowego. Sterownik mikroprocesorowy działa wtedy autonomicznie, aplikacja natomiast służy wyłącznie do obrazowania stanu stanowiska. Zadawanie manualne wartości jest wtedy niemożliwe.

Informacja zwrotna o działaniu poszczególnych aparatów jest obrazowana w polu „Wartości realizowane”. Przedstawia ono w czasie rzeczywistym stan poszczególnych aparatów, zarówno w trybie sterowania manualnego, jak i pracy pod kontrolą programu umieszczonego w pamięci sterownika mikroprocesorowego.

Przycisk „wczytaj plik” umożliwia wczytanie pliku z zadaniem przebiegiem wymuszenia przemieszczeń w obwodzie. Jest to stosowane w przypadku, gdy obwód spełnia funkcję wymuszającą (symuluje ruch wózka w łuku). Drugi obwód w tym przypadku pracuje autonomicznie, realizując zadaną funkcję minimalizacji sił.

Przyciski „Start logowania” oraz „Koniec logowania” umożliwiają zapis zarejestrowanych przebiegów w czasie rzeczywistym do pliku CSV, umożliwiając dalszą obróbkę danych np. w programie Microsoft Excel. Równolegle generowane są również pliki diagnostyczne DIA, możliwe do odtworzenia w aplikacji diagnostycznej, wykorzystywanej przez IPS.



Rys. 6.13 Widok okna głównego aplikacji diagnostycznej [22]

Aplikacja diagnostyczna „DiagPlot” umożliwia odtworzenie plików DIA, wybór serii pomiarów przedstawionych do wizualizacji, a także prostą możliwość obróbki sygnałów (zmiana wzmacnienia czy offsetu). Możliwe jest zapisanie wykresu lub jego fragmentu do pliku graficznego.

### 6.6.2. Badania sterowania obwodem wyjściowym

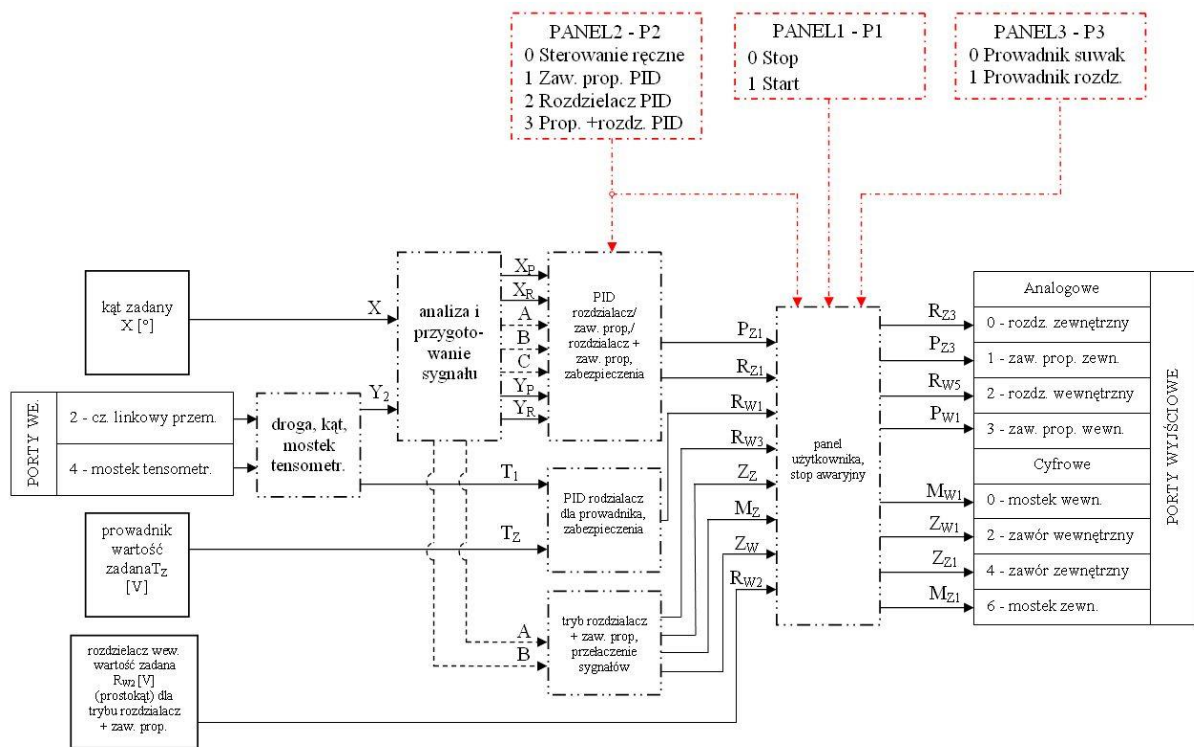
Stanowisko 51SB zostało wykorzystane do badań sterowania obwodem wyjściowym, pracującym w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego, gdzie sygnałem sprzężenia była informacja o położeniu siłownika, otrzymywana z linkowego czujnika przemieszczenia. Sygnał zadany generowany był przez komputer nadrzędny.

Do sterowania położeniem siłownika wykorzystano algorytm nadążny, bazujący na regulatorze PID, który zapewnił dość dobre odwzorowanie zadawanego przebiegu wejściowego, po dobraniu właściwych nastaw.

Eksperymenty obejmowały badania wykorzystujące sterowanie siłownikiem wyłącznie z użyciem rozdzielacza proporcjonalnego. Druga testowana możliwość uwzględniała współpracę rozdzielacza z zaworem proporcjonalnym. W takim przypadku zawór proporcjonalny wspomagał pracę rozdzielacza, reagując z większą szybkością.

### 6.6.3. Schemat szczegółowy algorytmu sterującego stanowiska 51SB

Ostatecznym celem przeprowadzonych badań na stanowisku było powstanie programu pozwalającego na autonomiczną kontrolę nad położeniem belki z wykorzystaniem siłowników hydraulicznych sterowanych przez rozdzielacz oraz zawór proporcjonalny. Umożliwia to symulację kontroli skrętu wózka podczas jazdy lokomotywy na łuku torowym. Schemat szczegółowy algorytmu sterującego przedstawiony został rys. 6.10.

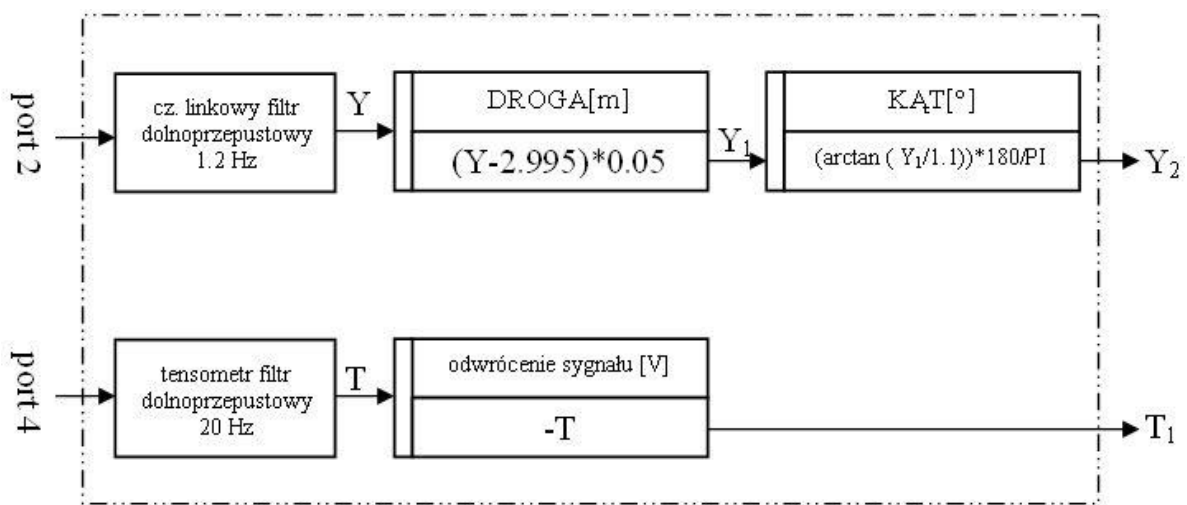


Rys. 6.14 Schemat szczegółowy algorytmu sterowania obwodem wyjściowym stanowiska 51SB [23]

Idea działania układu sterowania opierała się na przyjętych z góry sekwencjach działania i wykorzystania poszczególnych zaworów (wykres rozdzielacz - zawór). W koncepcji tej rozdzielacz służy do kontroli wysuwu siłowników, a co za tym idzie, do zadawania siły większej od przeciwstawnej i ustawienia ramy wózka prostopadle do promienia łuku. Zawór proporcjonalny natomiast pozwala na kontrolowane odpuszczanie, równoważąc działające na wózek siły. Dodatkowo może być on wykorzystywany jako aktywny tłumik. Działanie obu zaworów zostało skorelowane dzięki wykorzystaniu odpowiednich funkcji rozpoznawania przebiegu sygnałów zadanego i otrzymanego oraz sprzężonych z nimi funkcji warunkowych, generujące w odpowiedzi odpowiednie sygnały zadane.

Algorytmy działania poszczególnych modułów składowych, wraz z krótkim opisem ich działania, przedstawione są poniżej.

Moduł rejestracji sygnałów pomiarowych przygotowuje sygnał z linkowych czujników przemieszczenia (oraz układu mostka tensometrycznego, w przypadku prób z wykorzystaniem sygnałów z otensometrowanych przewodników zestawów kołowych) do dalszego wykorzystania w programie poprzez użycie filtrów dolnoprzepustowych usuwających zakłócenia o wysokich częstotliwościach. Sygnał z linkowego czujnika przemieszczenia przeliczany jest na drogę, a następnie na kąt obrotu belki.



Rys. 6.15 Schemat blokowy modułu rejestracji sygnałów pomiarowych [23]

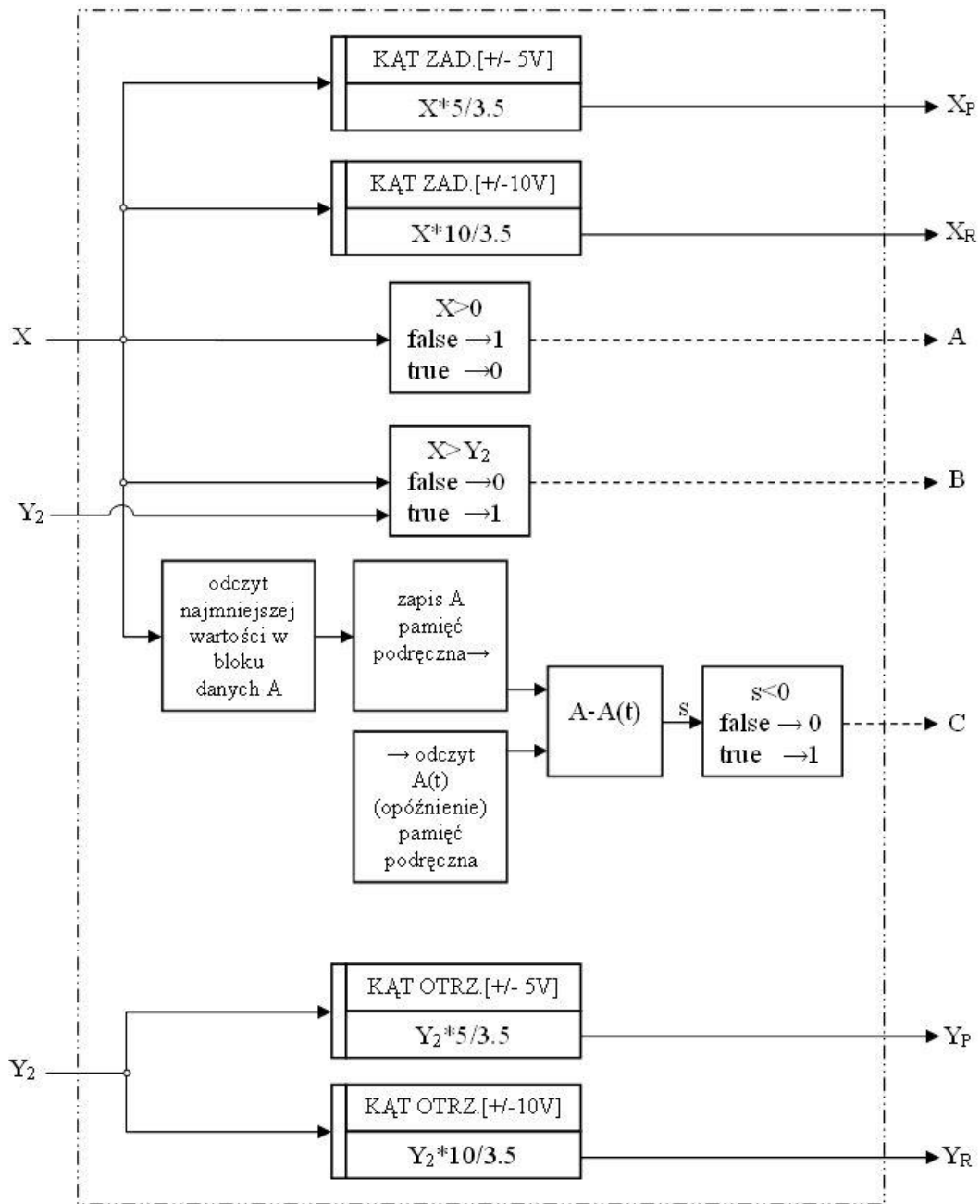
Kolejnym modułem służy do analizy i przygotowania sygnału wyjściowego. Moduł ten przelicza sygnał zadany i realizowany na wartości odpowiednie dla wysterowania rozdzielacza i zaworu proporcjonalnego.

Odbywa się tu także analiza i rozpoznanie własności sygnałów, pozwalające wykorzystać funkcje warunkowe do wyboru odpowiedzi.

W module rozpoznawane są:

- znak wartości zadanej ( $X > 0$ ),
- czy wartość zadana jest większa od otrzymanej ( $X > Y_2$ ),
- monotoniczność wartości zadanej.

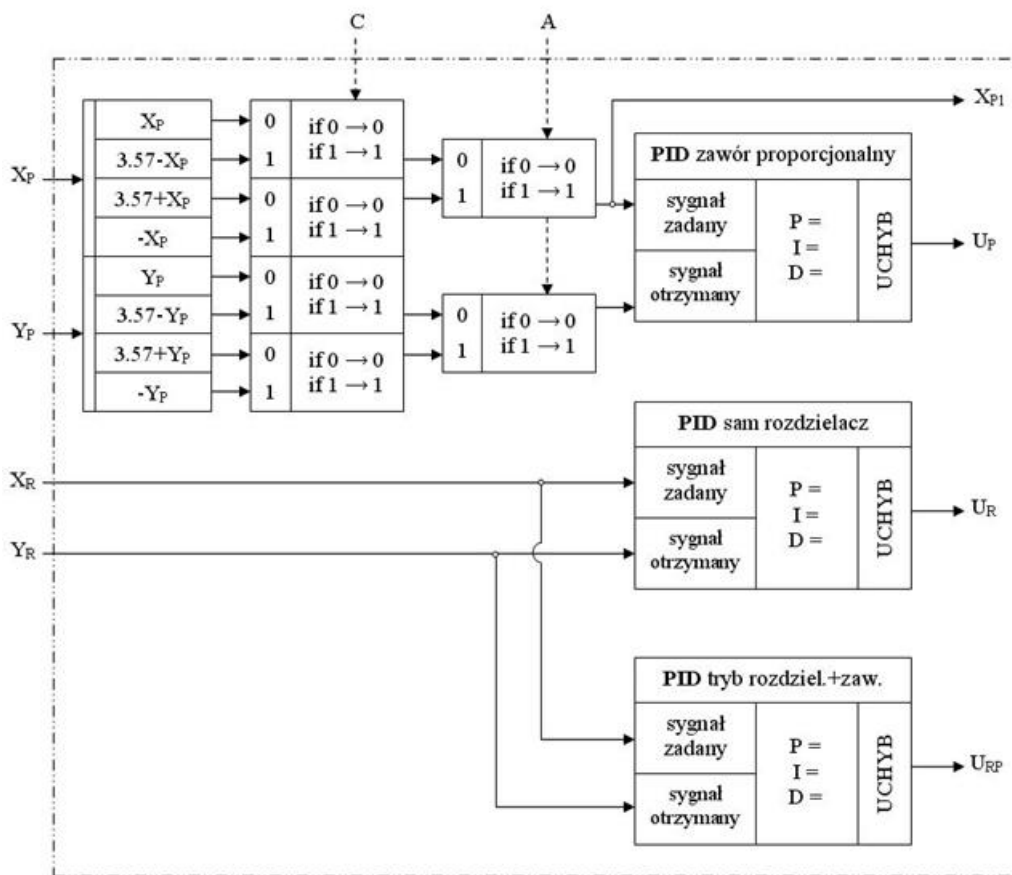




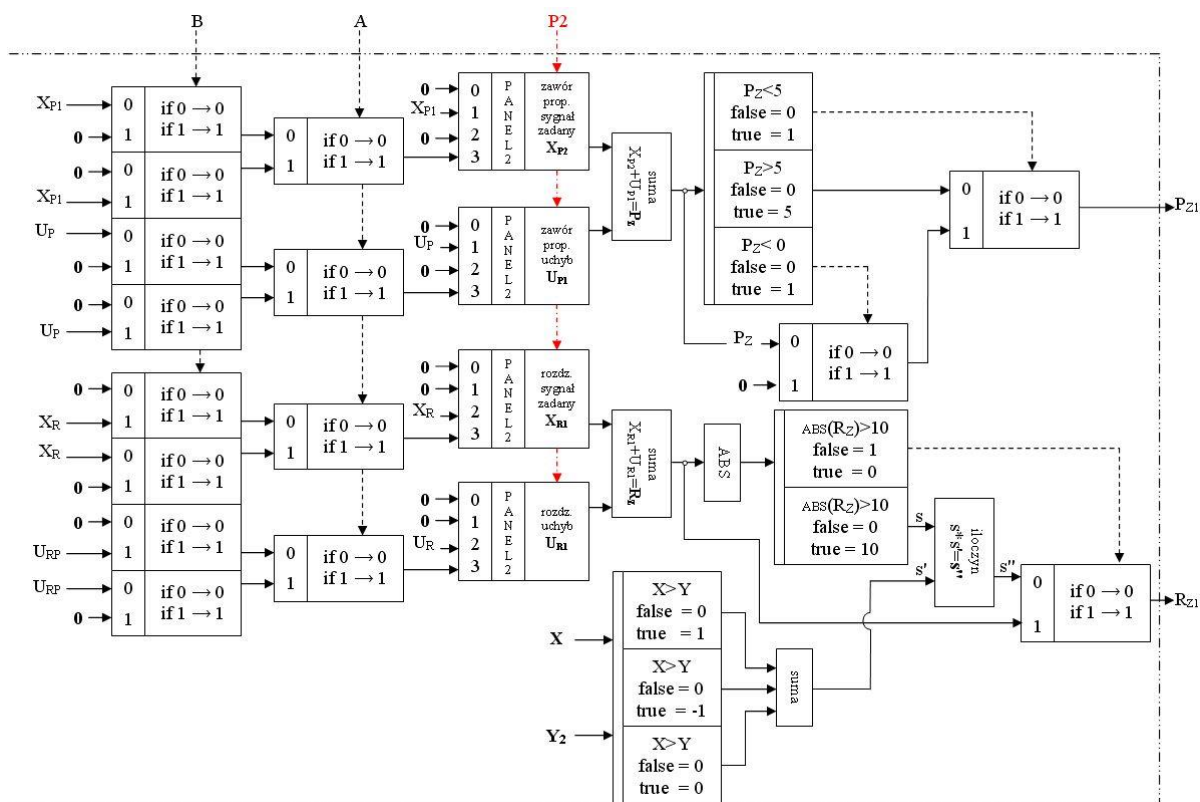
Rys. 6.16 Schemat blokowy modułu analizy i przygotowania sygnału [23]

Moduł sterujący rozdzielaczem i zaworem proporcjonalnym zapewnia między innymi przekształcenie sygnałów, zadanego i otrzymanego, dla zaworu proporcjonalnego, na sygnał wyłącznie dodatni. W module znajdują się trzy regulatory PID. Jeden dla sygnału sterującego zaworem proporcjonalnym dla siłowników zewnętrznych, oraz dwa dla rozdzielacza proporcjonalnego także sterującego siłownikami zewnętrznymi. Człon PID rozdzielacza regulujący sygnał zadany, wykorzystuje inne nastawy w trybie pracy samego rozdzielacza, a inne w trybie naprzemiennym: rozdzielacz - zawór proporcjonalny. Wykorzystanie dwóch

regulatorów PID umożliwia pozostawienie na stałe ich nastaw, bez konieczności ich zmiany podczas zmiany trybu działania układu. Po zsumowaniu sygnałów zadanych z uchybami regulacji, wynikiem są gotowe sygnały wyjściowe dla zaworów, które poddawane są następnie kontroli pod kątem przekroczenia wartości granicznych dla zaworu proporcjonalnego oraz rozdzielacza proporcjonalnego. W razie ich przekroczenia na wyjście wysyłana jest maksymalna/minimalna wartość domyślnego zakresu.

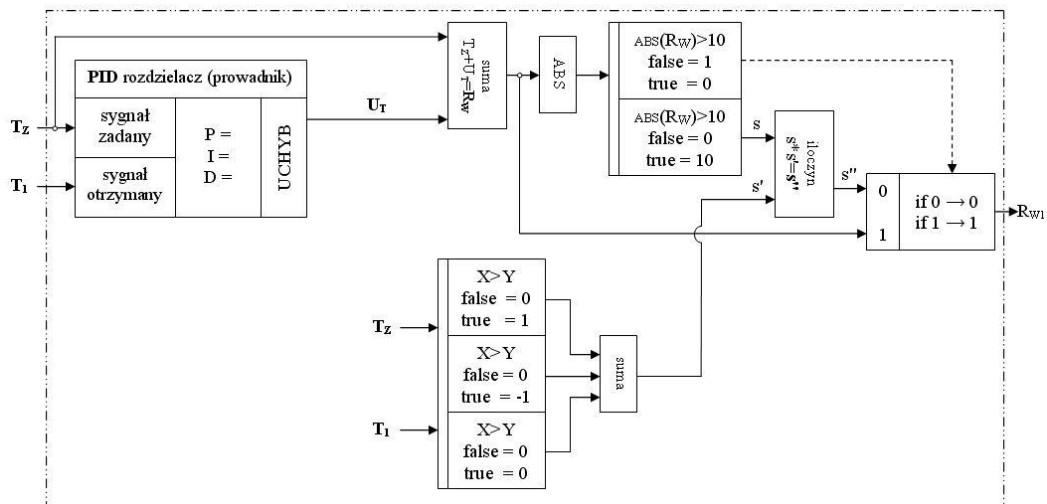


Rys. 6.17 Schemat blokowy modułu sterującego rozdzielaczem i zaworem proporcjonalnym – część regulatorów PID [23]



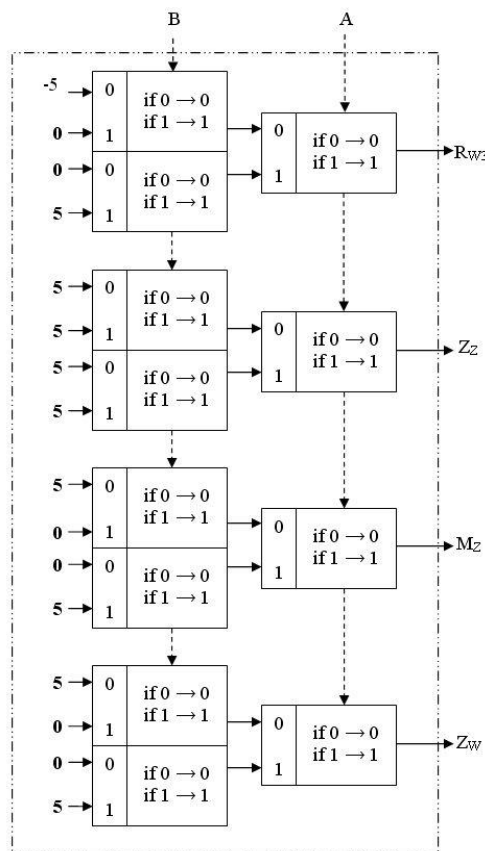
Rys. 6.18 Schemat blokowy modułu sterującego rozdzielaczem i zaworem proporcjonalnym – część bloków wyboru [23]

Moduł sterujący rozdzielaczem proporcjonalnym przewodnika, został wykonany do wykorzystania w próbach z wykorzystaniem otensometrowanych przewodników zestawów kołowych typu Alstom (omówionych w rozdziale 7). W module tym znajduje się regulator PID porównujący sygnał zadany i otrzymany dla rozdzielacza proporcjonalnego sprzężonego z siłownikiem obciążającym przewodniki na stanowisku. Po zsumowaniu sygnału zadanego z uchybem regulacji wynikiem jest gotowy sygnał wyjściowy dla zaworu, który poddawany jest następnie kontroli pod kątem przekroczenia wartości granicznych dla rozdzielacza proporcjonalnego. W razie ich przekroczenia na wyjście wysyłana jest maksymalna/minimalna wartość domyślnego zakresu.



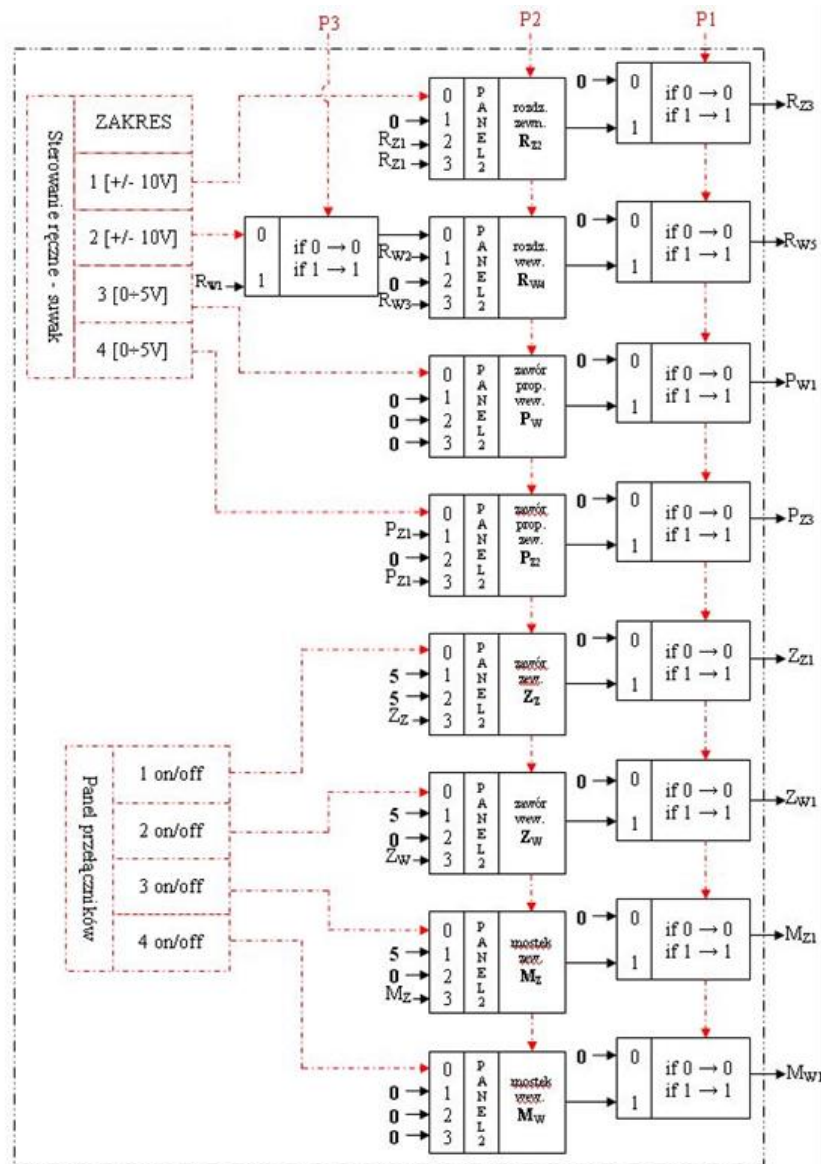
Rys. 6.19 Schemat blokowy modułu sterującego rozdzielaczem proporcjonalnym prowadnika [23]

Moduł wyboru trybu pracy algorytmu, w którym znajduje się zbiór funkcji warunkowych, sterujących odpowiednim otwarciem zaworów sterowanych cyfrowo, a także rozdzielaczem sterującym siłownikami wewnętrznymi w kontrolowanym układzie hydraulicznym dla trybu pracy współbieżnej rozdzielacza i zaworu proporcjonalnego.



Rys. 6.20 Schemat blokowy modułu wyboru trybu pracy [23]

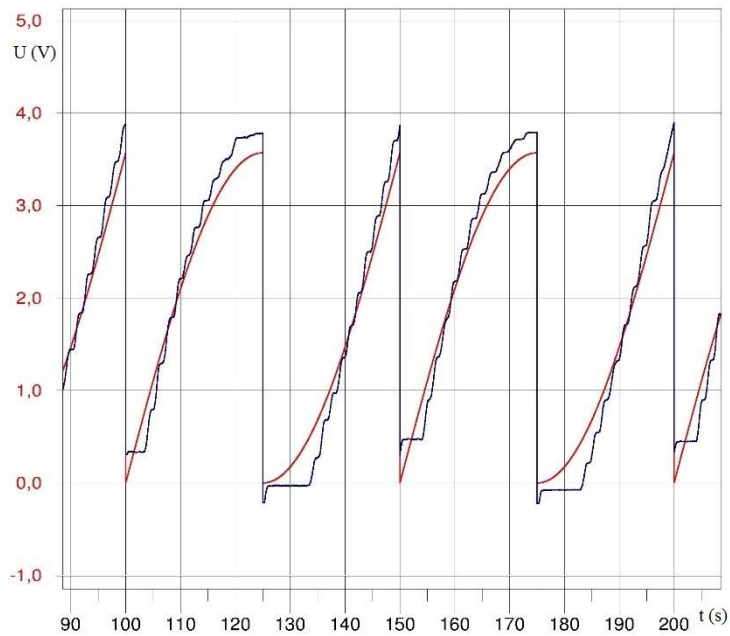
Moduł kontrolny zawiera zbiór przełączników kontrolowanych przez użytkownika, który umożliwia wybór jednego z czterech trybów działania: sterowanie ręczne, sterowanie samym zaworem proporcjonalnym, sterowanie samym rozdzielaczem proporcjonalnym, tryb naprzemiennego działania zaworu proporcjonalnego i rozdzielacza. Moduł umożliwia zmianę sposobu sterowania siłownikiem obciążającym przewodnik – praca w trybie ręcznym lub automatycznym. Możliwe jest natychmiastowe wyłączenie sterowania wszystkich zaworów, czyli wyłączenie awaryjne. Moduł ten daje również możliwość ręcznego sterowania zaworów i rozdzielaczy proporcjonalnych - pozwalając na bezpośrednie zadawanie wartości. Możliwe też jest bezpośrednie sterowanie zaworami – otwieranie i zamykanie zaworów sterowanych sygnałem cyfrowym.



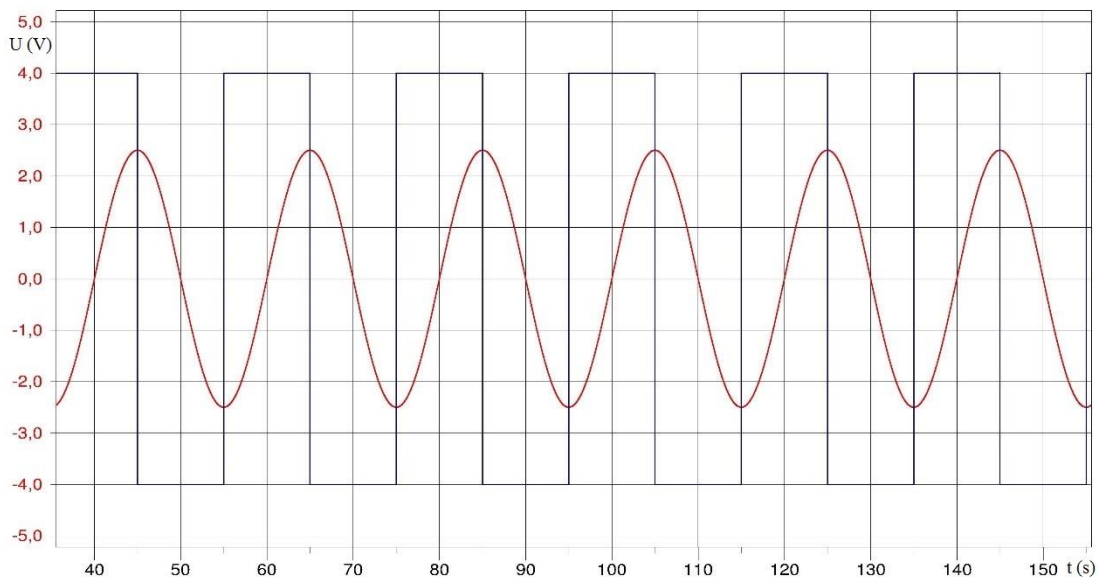
Rys. 6.21 Schemat blokowy modułu kontrolnego [23]

#### 6.6.4. Wyniki badań algorytmu sterowania pracą zaworu proporcjonalnego na stanowisku 51SB

Poniżej przedstawiono przebiegi, otrzymane podczas prób sterowania pracą zaworu proporcjonalnego.



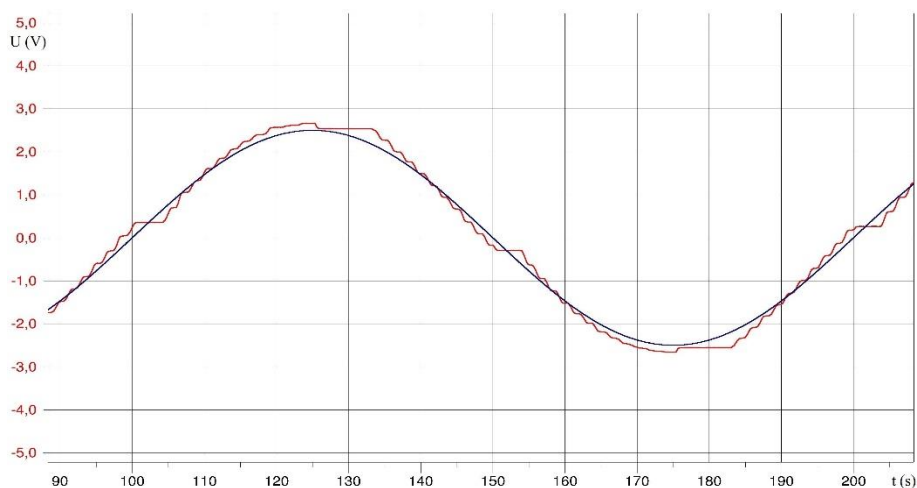
Rys. 6.22 Sygnał zadany (czerwony) i realizowany (niebieski) przez zawór proporcjonalny podczas pracy [23]



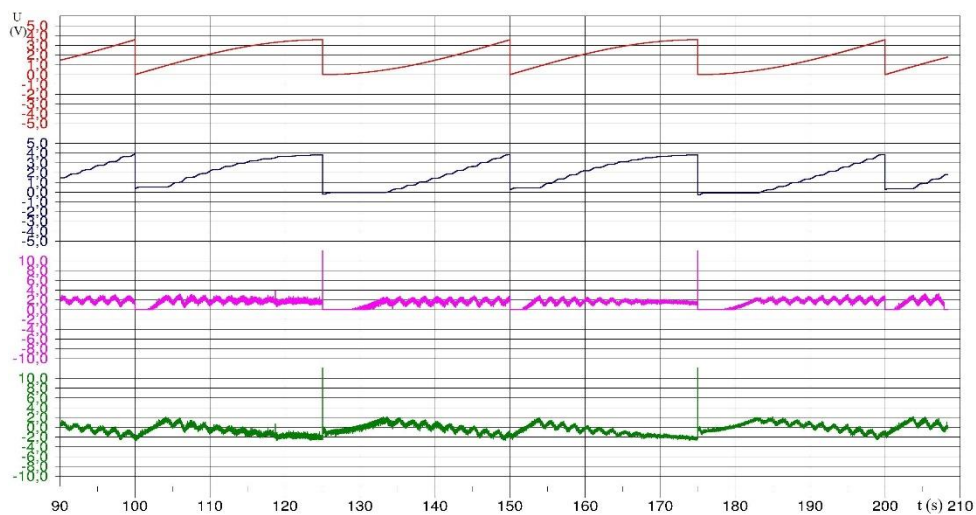
Rys. 6.23 Przykładowy przebieg czasowy sygnału prostokątnego zadanego na rozdzielacz symulujący działanie usprężynowania II stopnia (niebieski) oraz sygnału sinusoidalnego zadanego na sterownik, symulujący przebiegi otrzymywane z czujników tensometrycznych (czerwony) [23]

Tab. 6.1 Wartości nastaw regulatora oraz częstotliwości sygnału wejściowego [23]

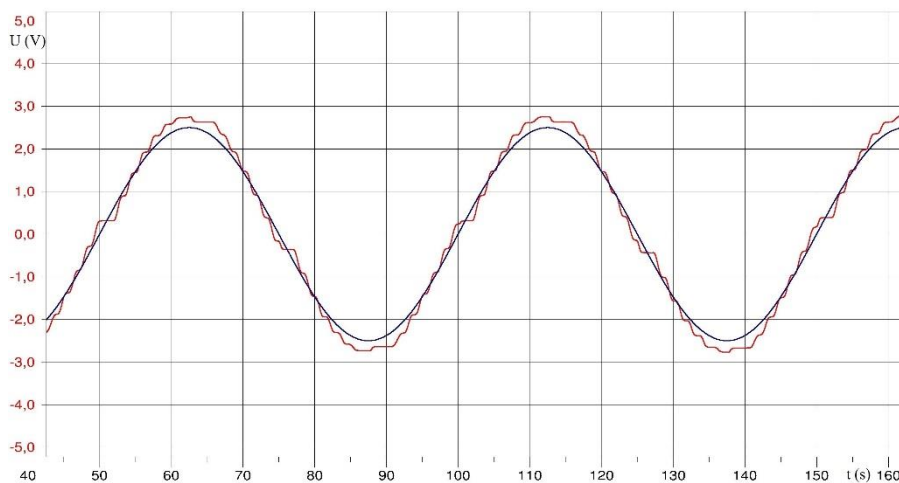
Przypadek	Częstotliwość [Hz]	Nastawa P	Nastawa I	Nastawa D
1	0,01	4	0,4	1,5
2	0,02	4	0,4	1,5
3	0,03	3,5	1	1,5
4	0,04	6,5	3	1,8
5	0,05	12,5	3	3,8



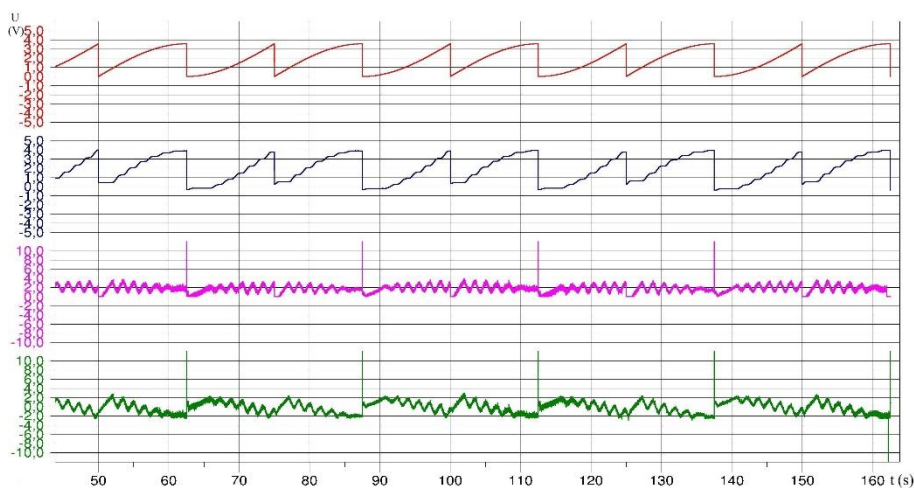
Rys. 6.24 Przebieg czasowy sygnału zadanego (niebieski) oraz sygnału otrzymywanego z czujników przemieszczenia (czerwony) dla przypadku 1 [23]



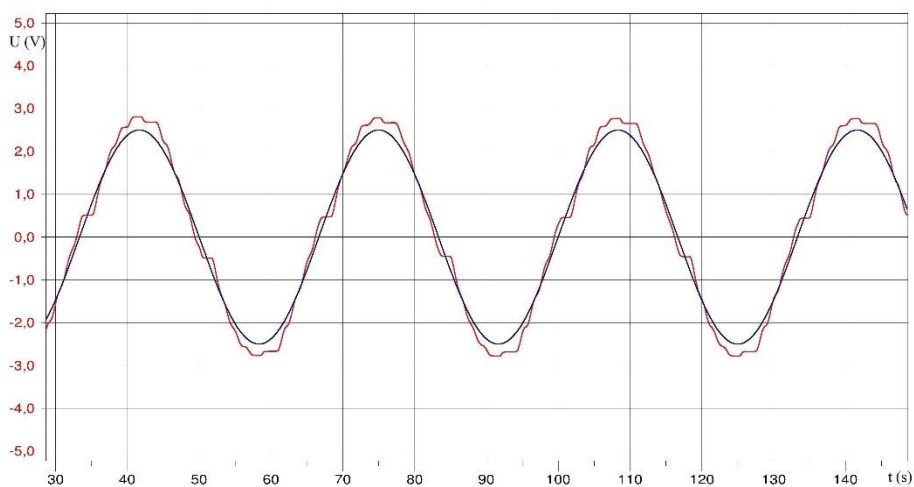
Rys. 6.25 Przebieg czasowy zmodyfikowanego sygnału zadanego (czerwony), zmodyfikowanego sygnału otrzymanego (niebieski), sygnału zadanego na zawór proporcjonalny (fioletowy) oraz sygnału wartości uchybu (zielony) dla przypadku 1 [23]



Rys. 6.26 Przebieg czasowy sygnału zadanego (niebieski) oraz sygnału otrzymywanego z czujników przemieszczenia (czerwony) dla przypadku 2 [23]

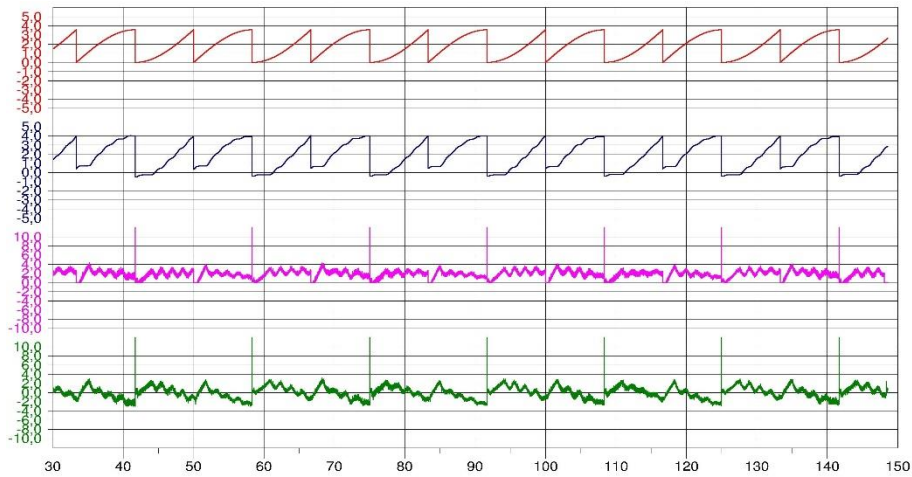


Rys. 6.27 Przebieg czasowy zmodyfikowanego sygnału zadanego (czerwony), zmodyfikowanego sygnału otrzymanego (niebieski), sygnału zadanego na zawór proporcjonalny (fioletowy) oraz sygnału wartości uchybu (zielony) dla przypadku 2 [23]

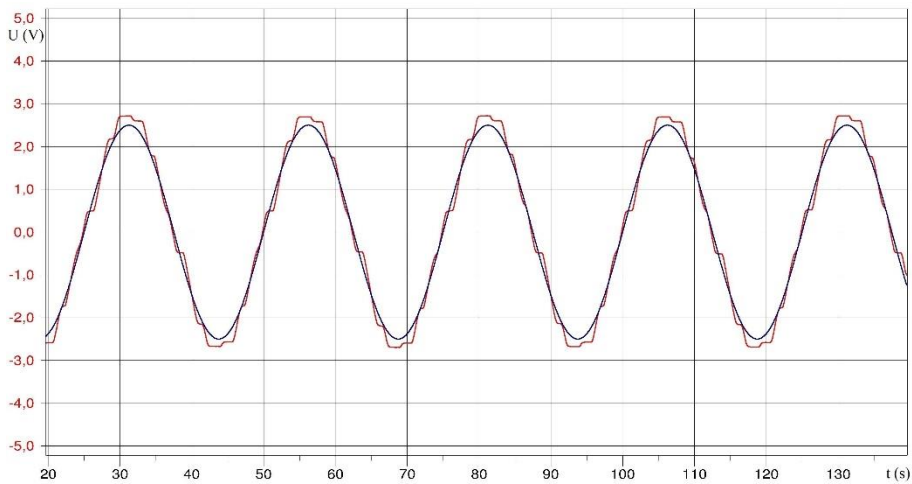


Rys. 6.28 Przebieg czasowy sygnału zadanego (niebieski) oraz sygnału otrzymywanego z czujników przemieszczenia (czerwony) dla przypadku 3 [23]

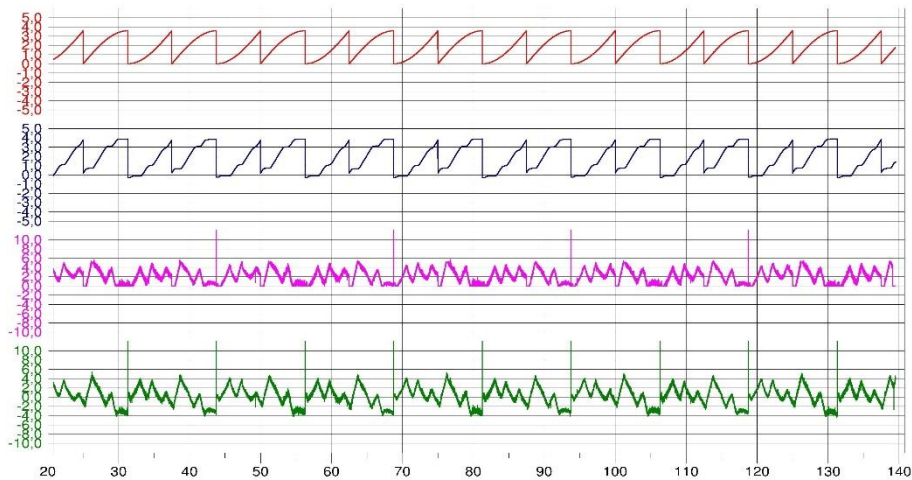




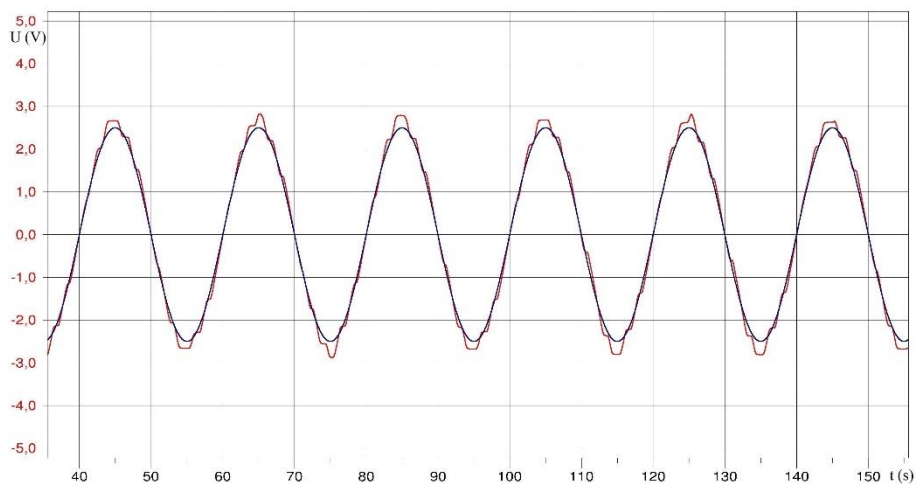
Rys. 6.29 Przebieg czasowy zmodyfikowanego sygnału zadanego (czerwony), zmodyfikowanego sygnału otrzymanego (niebieski), sygnału zadanego na zawór proporcjonalny (fioletowy) oraz sygnału wartości uchybu (zielony) dla przypadku 3 [23]



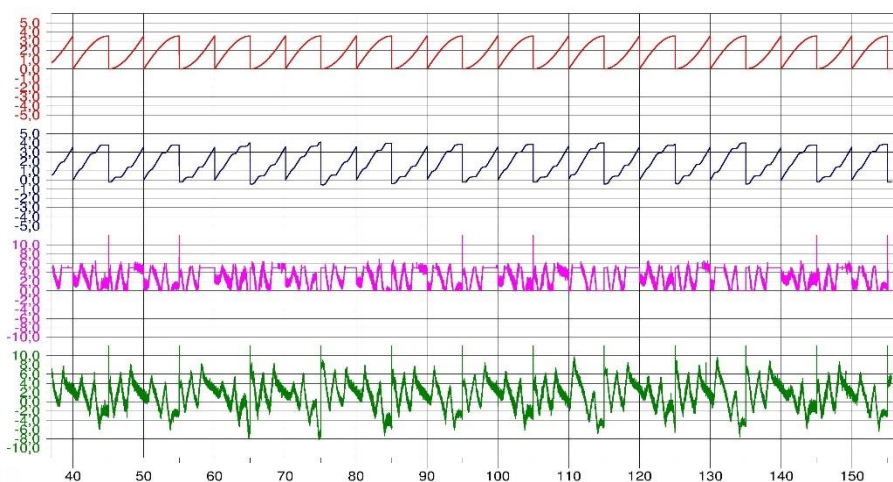
Rys. 6.30 Przebieg czasowy sygnału zadanego (niebieski) oraz sygnału otrzymywanego z czujników przemieszczenia (czerwony) dla przypadku 4 [23]



Rys. 6.31 Przebieg czasowy zmodyfikowanego sygnału zadanego (czerwony), zmodyfikowanego sygnału otrzymanego (niebieski), sygnału zadanego na zawór proporcjonalny (fioletowy) oraz sygnału wartości uchybu (zielony) dla przypadku 4 [23]



Rys. 6.32 Przebieg czasowy sygnału zadanego (niebieski) oraz sygnału otrzymywanego z czujników przemieszczenia (czerwony) dla przypadku 5 [23]



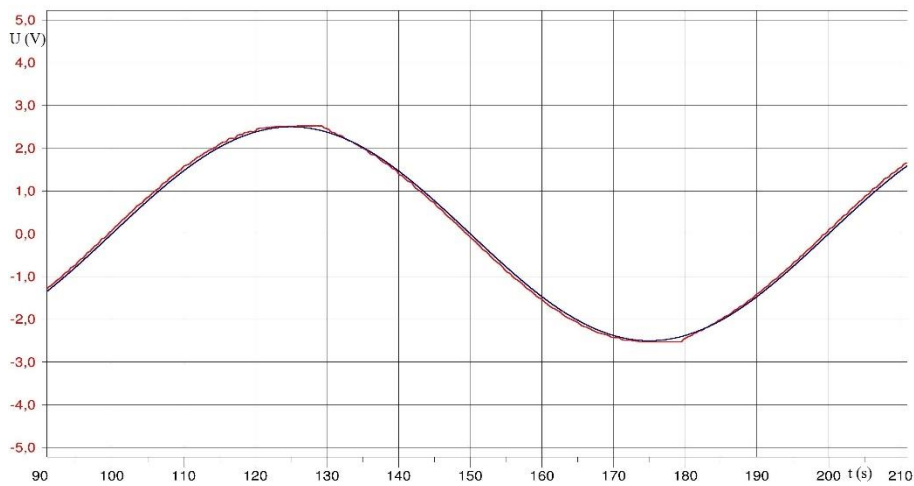
Rys. 6.33 Przebieg czasowy zmodyfikowanego sygnału zadanego (czerwony), zmodyfikowanego sygnału otrzymanego (niebieski), sygnału zadanego na zawór proporcjonalny (fioletowy) oraz sygnału wartości uchybu (zielony) dla przypadku 5 [23]

### 6.6.5. Wyniki badań algorytmu sterowania pracą rozdzielacza proporcjonalnego na stanowisku 51SB

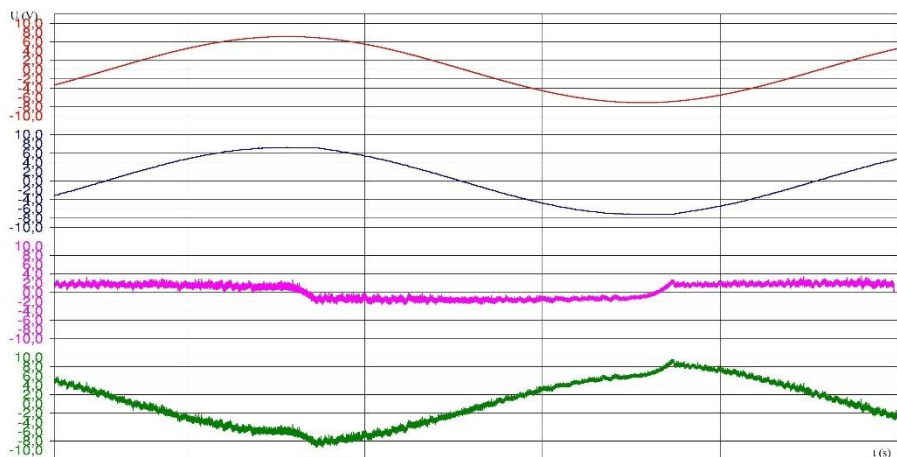
Poniżej przedstawiono przebiegi uzyskane podczas prób sterowania rozdzielaczem.

Tab. 6.2 Wartości nastaw regulatora oraz częstotliwości sygnału wejściowego [23]

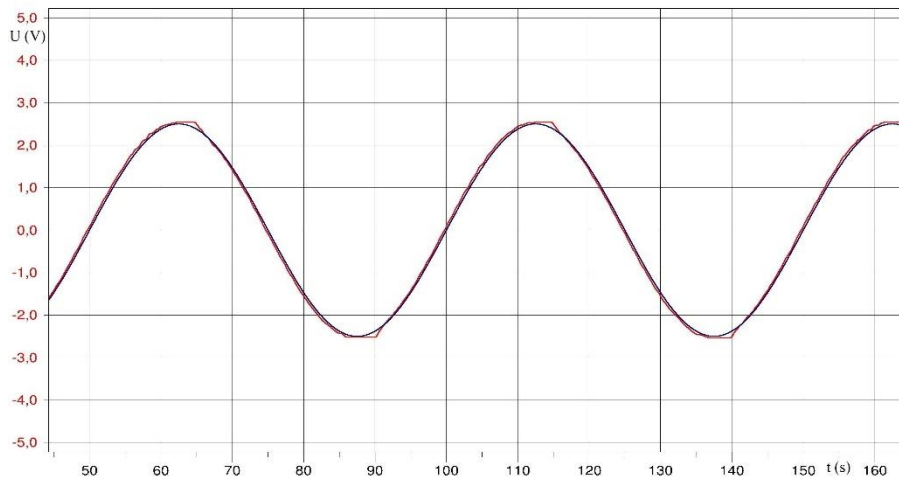
Przypadek	Częstotliwość [Hz]	Nastawa P	Nastawa I	Nastawa D
1	0,01	5,5	1,8	1
2	0,02	4,5	3,6	1
3	0,03	4	3,2	0,5
4	0,04	3,8	2,7	0,5
5	0,05	6	2,5	1,8



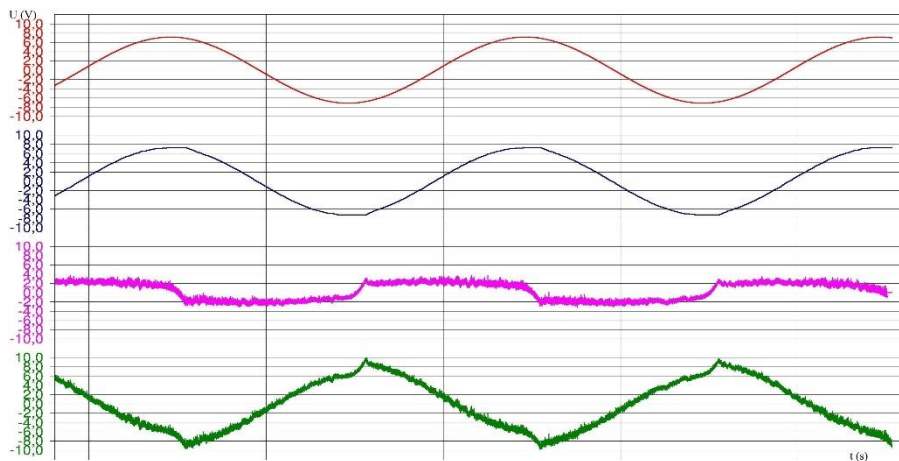
Rys. 6.34 Przebieg czasowy sygnału zadanego (niebieski) oraz sygnału otrzymywanego z czujników przemieszczenia (czerwony) dla przypadku 1 [23]



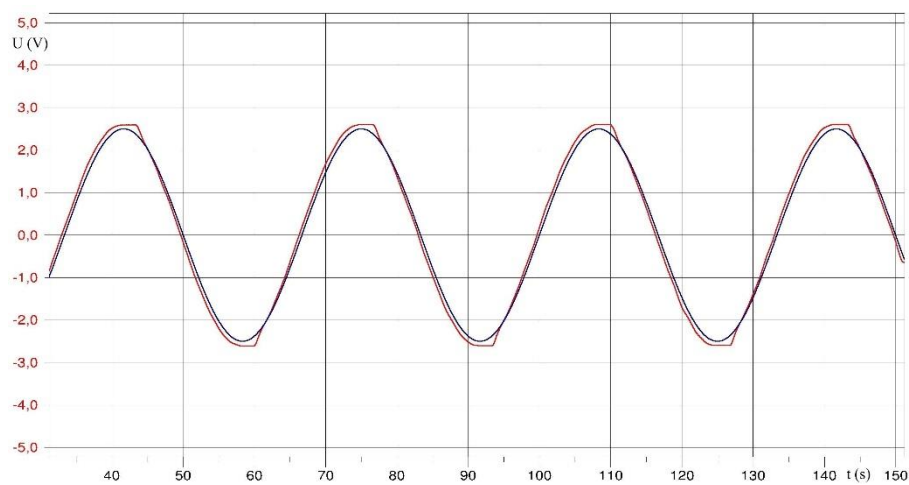
Rys. 6.35 Przebieg czasowy zmodyfikowanego sygnału zadanego (czerwony), zmodyfikowanego sygnału otrzymanego (niebieski), sygnału zadanego na rozdzielacz proporcjonalny (fioletowy) oraz sygnału wartości uchybu (zielony) dla przypadku 1 [23]



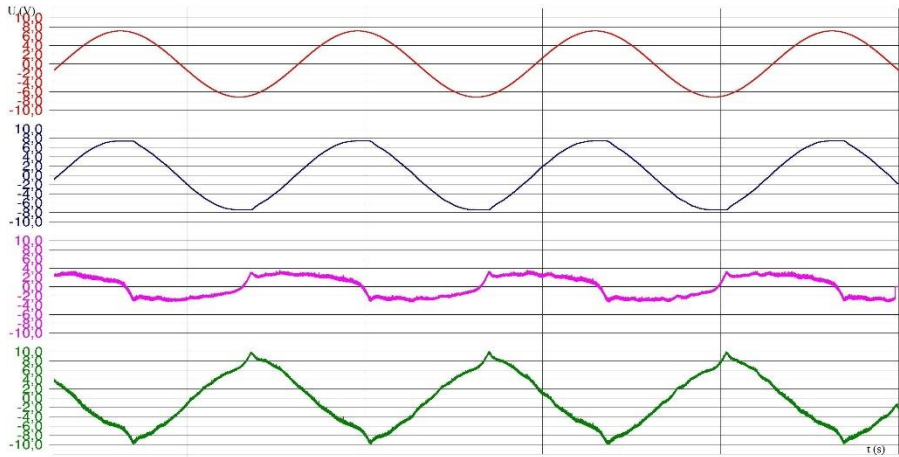
Rys. 6.36 Przebieg czasowy sygnału zadanego (niebieski) oraz sygnału otrzymywanego z czujników przemieszczenia (czerwony) dla przypadku 2 [23]



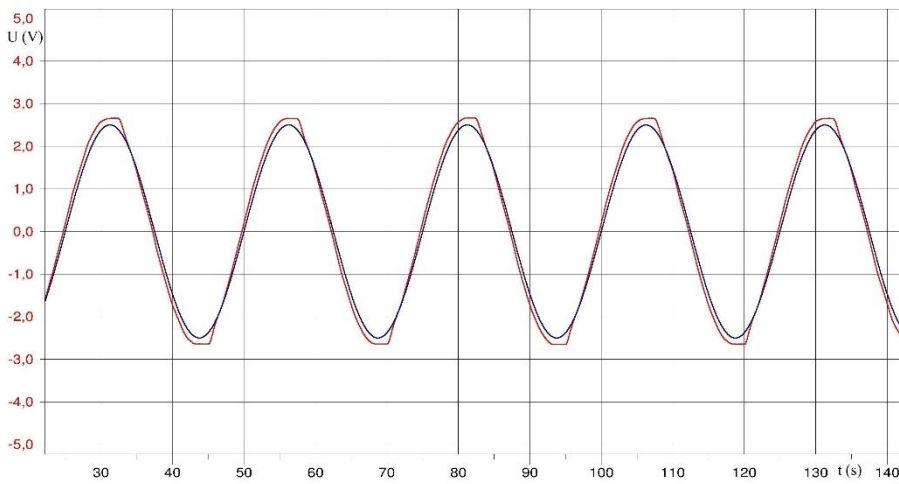
Rys. 6.37 Przebieg czasowy zmodyfikowanego sygnału zadanego (czerwony), zmodyfikowanego sygnału otrzymanego (niebieski), sygnału zadanego na rozdzielacz proporcjonalny (fioletowy) oraz sygnału wartości uchybu (zielony) dla przypadku 2 [23]



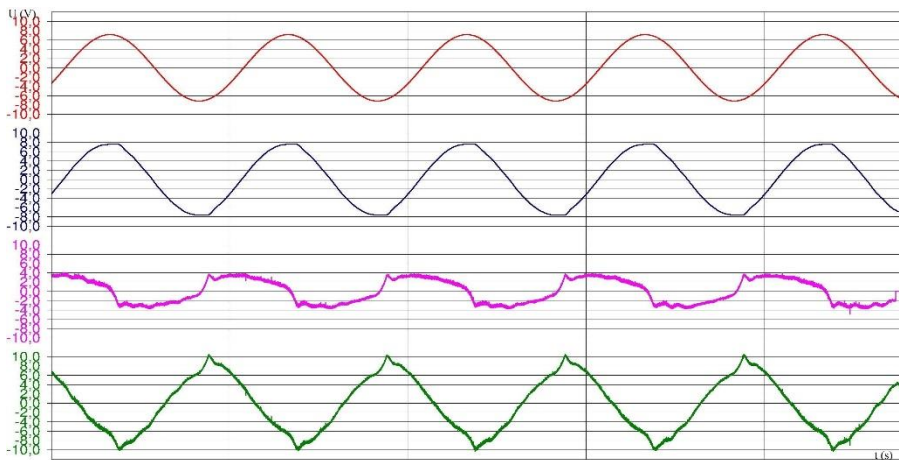
Rys. 6.38 Przebieg czasowy sygnału zadanego (niebieski) oraz sygnału otrzymywanego z czujników przemieszczenia (czerwony) dla przypadku 3 [23]



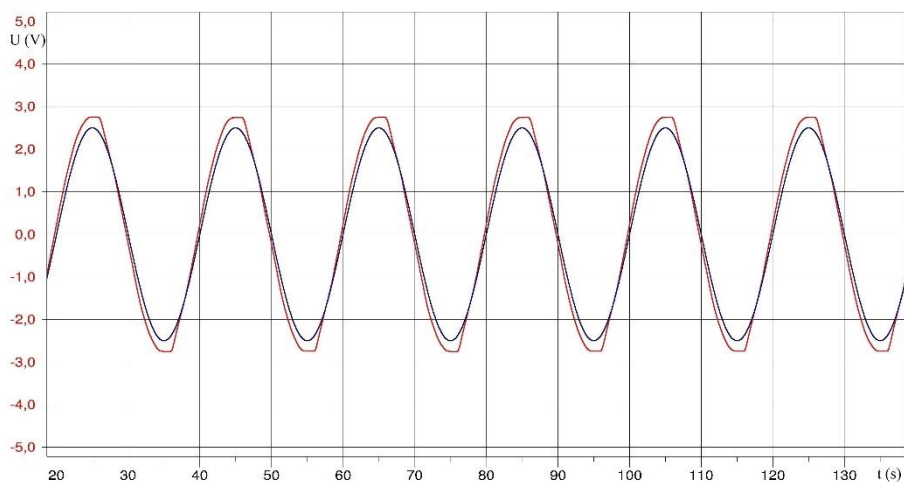
Rys. 6.39 Przebieg czasowy zmodyfikowanego sygnału zadanego (czerwony), zmodyfikowanego sygnału otrzymanego (niebieski), sygnału zadanego na rozdzielacz proporcjonalny (fioletowy) oraz sygnału wartości uchybu (zielony) dla przypadku 3 [23]



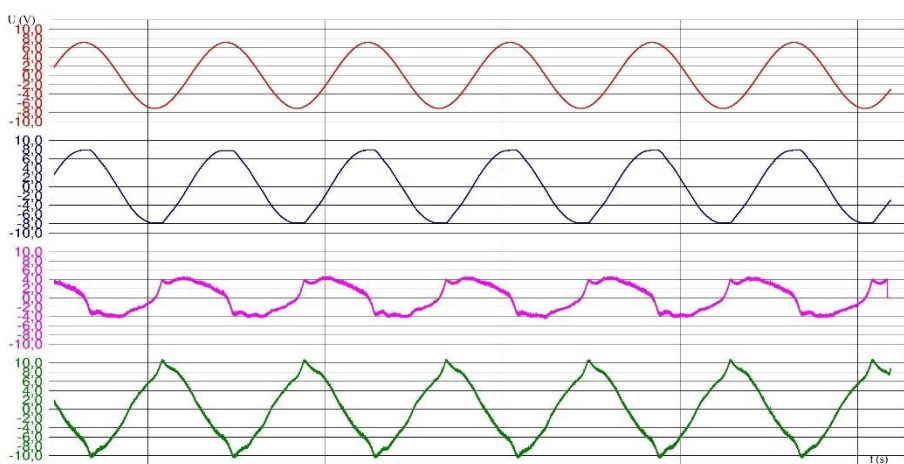
Rys. 6.40 Przebieg czasowy sygnału zadanego (niebieski) oraz sygnału otrzymywanego z czujników przemieszczenia (czerwony) dla przypadku 4 [23]



Rys. 6.41 Przebieg czasowy zmodyfikowanego sygnału zadanego (czerwony), zmodyfikowanego sygnału otrzymanego (niebieski), sygnału zadanego na rozdzielacz proporcjonalny (fioletowy) oraz sygnału wartości uchybu (zielony) dla przypadku 4 [23]



Rys. 6.42 Przebieg czasowy sygnału zadanego (niebieski) oraz sygnału otrzymywanego z czujników przemieszczenia (czerwony) dla przypadku 5 [23]



Rys. 6.43 Przebieg czasowy zmodyfikowanego sygnału zadanego (czerwony), zmodyfikowanego sygnału otrzymanego (niebieski), sygnału zadanego na rozdzielacz proporcjonalny (fioletowy) oraz sygnału wartości uchybu (zielony) dla przypadku 5 [23]

### 6.6.6. Wyniki badań algorytmu sterowania wspólną pracą zaworu proporcjonalnego i rozdzielacza proporcjonalnego na stanowisku 51SB

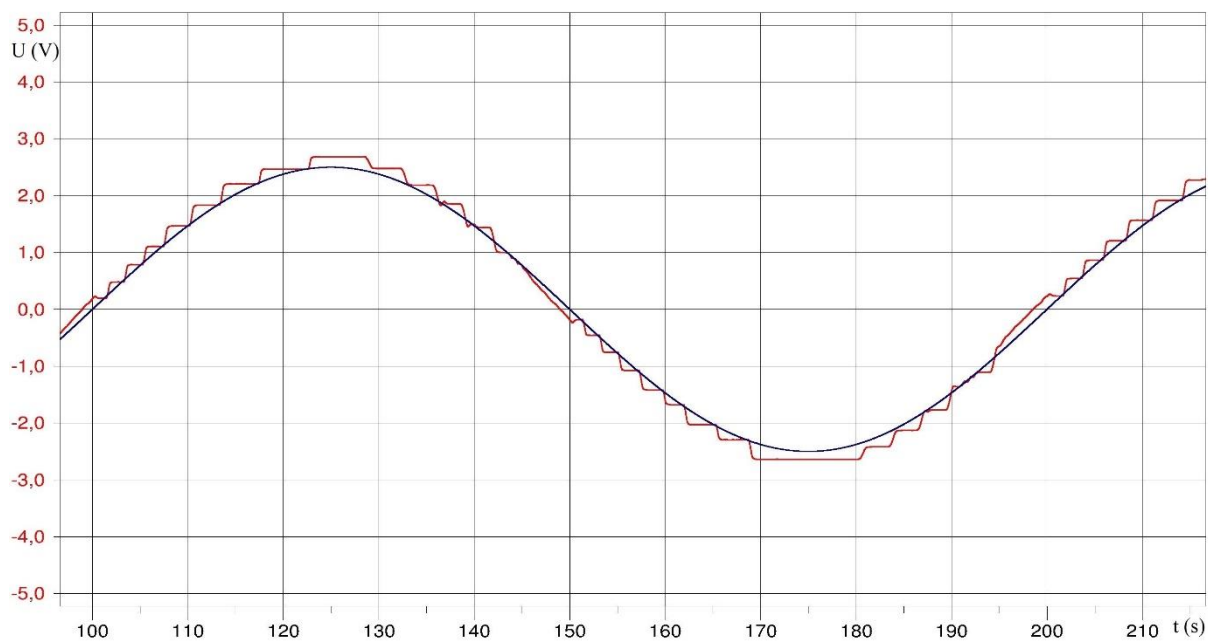
Poniżej przedstawiono przebiegi uzyskane podczas prób wspólnego sterowania zaworu proporcjonalnego i rozdzielacza proporcjonalnego.

Tab. 6.3 Wartości nastaw regulatora zaworu proporcjonalnego oraz częstotliwości sygnału wejściowego [23]

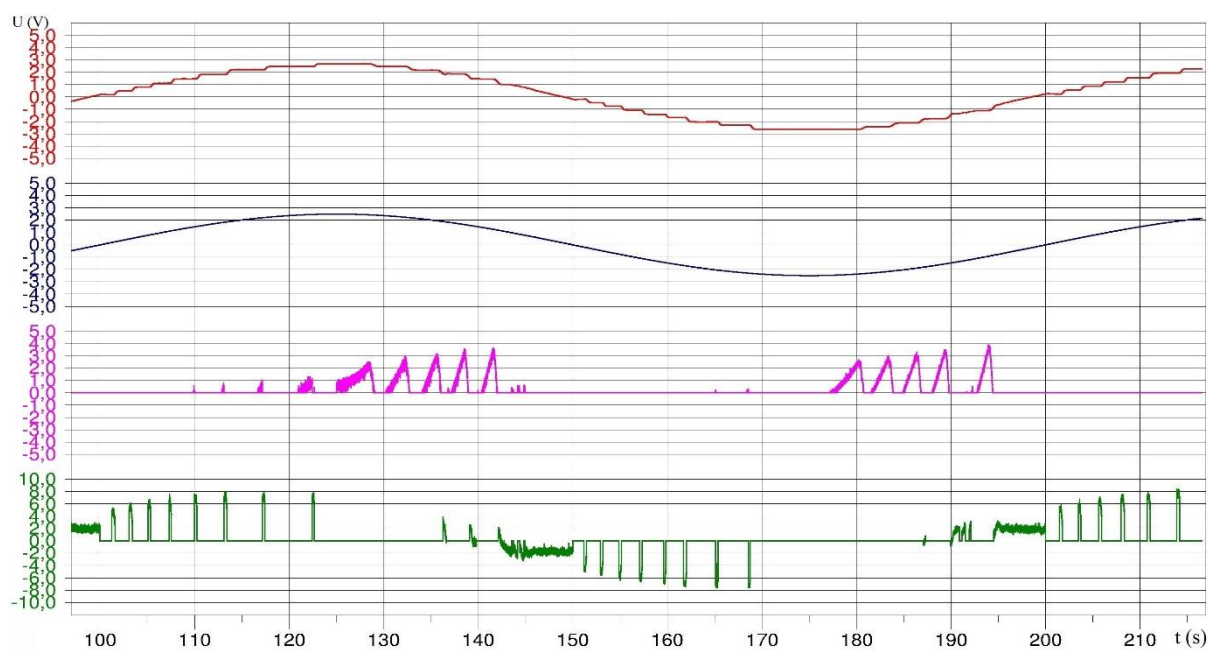
Przypadek	Częstotliwość [Hz]	Nastawa P	Nastawa I	Nastawa D
1	0,01	14	0,3	1,2
2	0,02	14	0,3	1,2
3	0,03	14	0,3	1,2
4	0,04	14	0,3	1,2
5	0,05	7	0,3	1,2

Tab. 6.4 Wartości nastaw regulatora rozdzielacza proporcjonalnego oraz częstotliwości sygnału wejściowego [23]

Przypadek	Częstotliwość [Hz]	Nastawa P	Nastawa I	Nastawa D
1	0,01	3,5	0,6	1
2	0,02	3,5	0,6	1
3	0,03	3,5	0,6	1
4	0,04	3,5	0,2	0,1
5	0,05	3,5	0,2	0,1

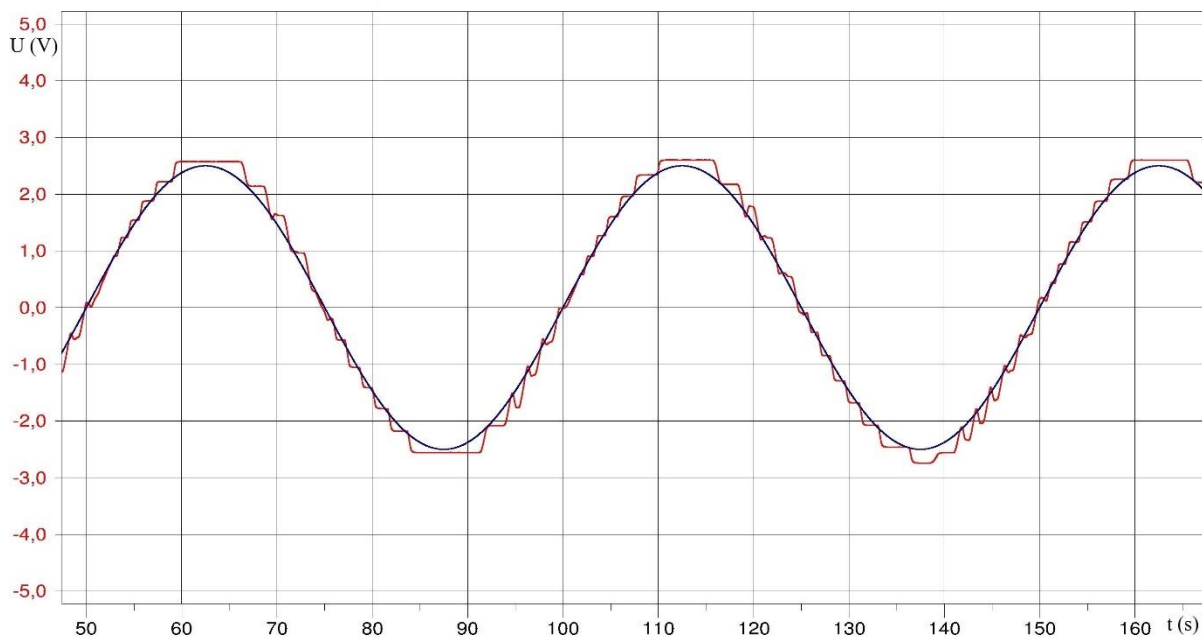


Rys. 6.44 Przebieg czasowy sygnału zadanego (niebieski) oraz sygnału otrzymywanego z czujników przemieszczenia (czerwony) dla przypadku 1 [23]

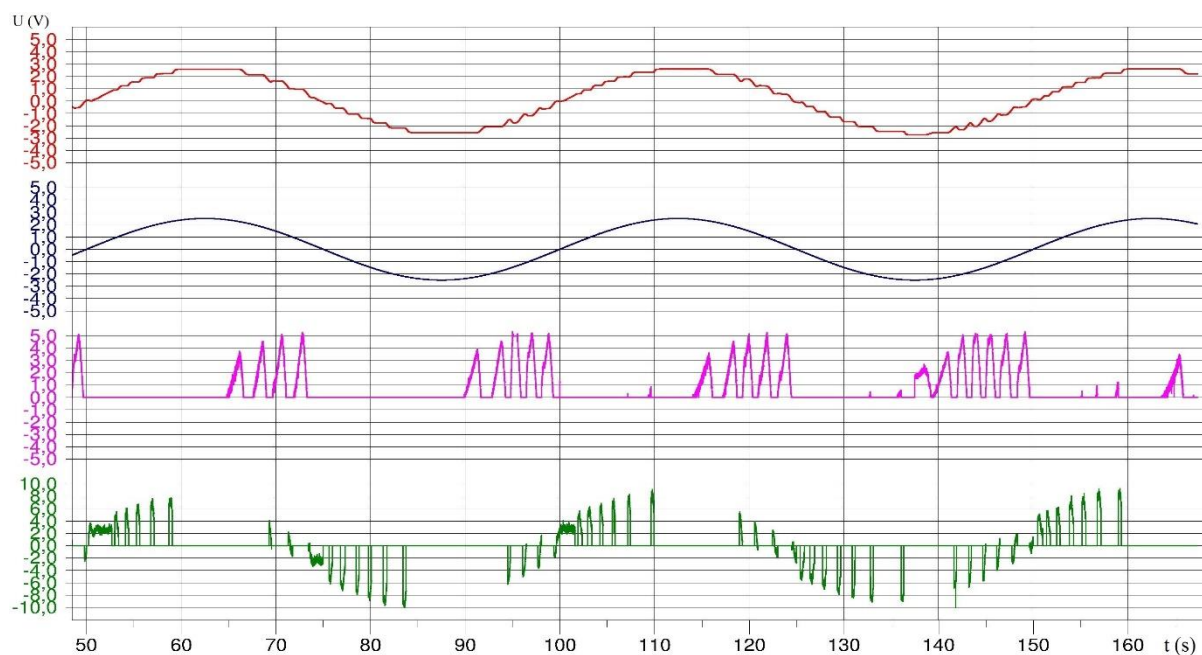


Rys. 6.45 Przebieg czasowy sygnału otrzymanego z czujników przemieszczenia (czerwony), sygnału zadanego do sterownika (niebieski), sygnału zadanego na zawór proporcjonalny (fioletowy) oraz sygnału zadanego na rozdzielacz proporcjonalny (zielony) dla przypadku 1 [23]

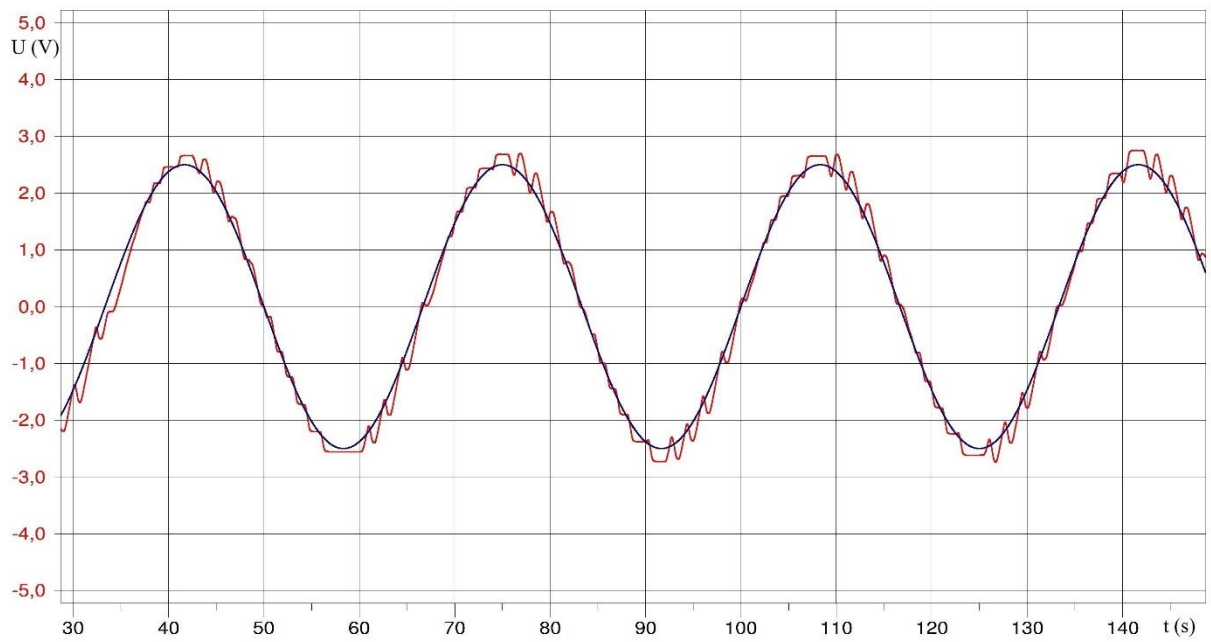




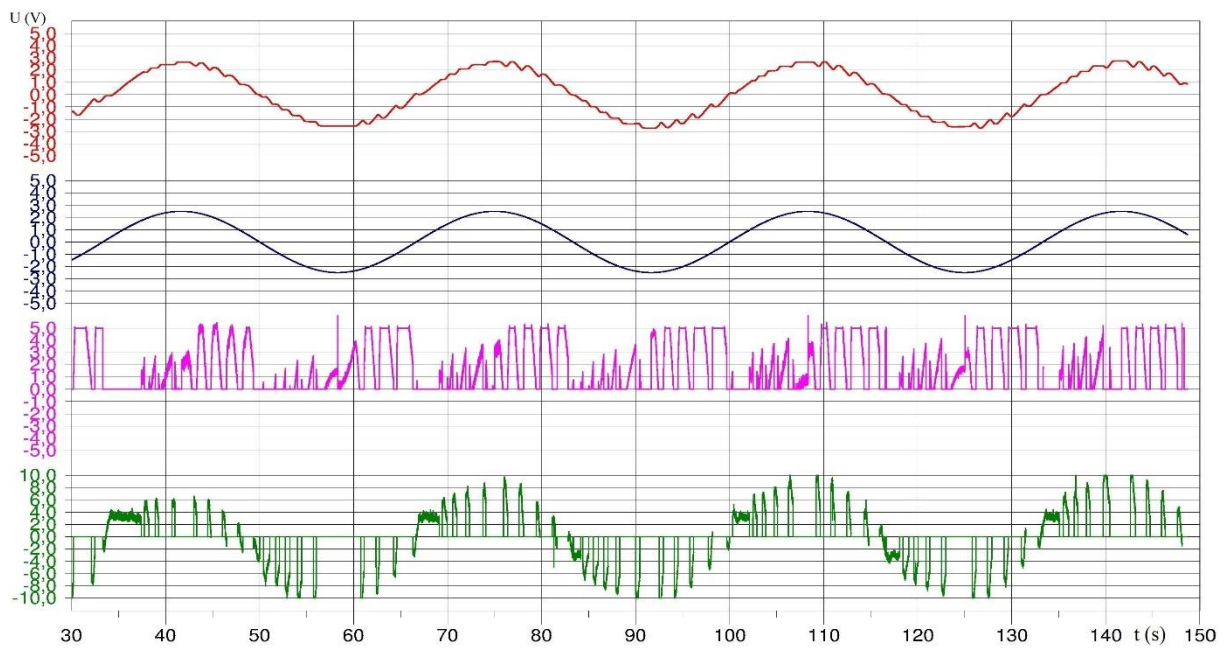
Rys. 6.46 Przebieg czasowy sygnału zadanego (niebieski) oraz sygnału otrzymywanego z czujników przemieszczenia (czerwony) dla przypadku 2 [23]



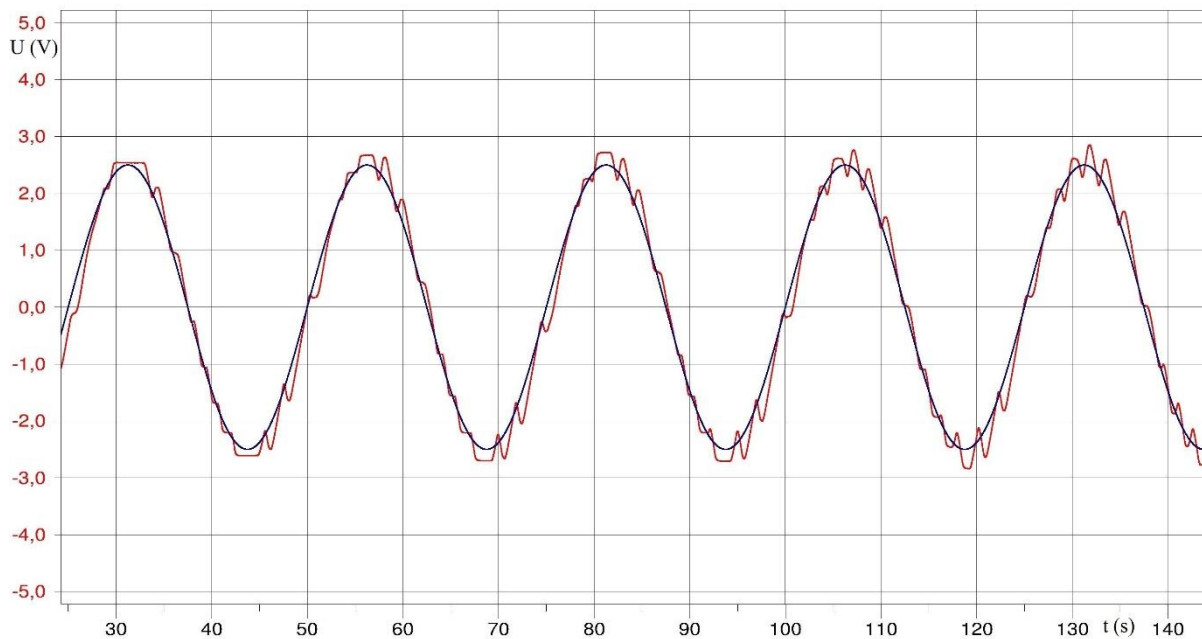
Rys. 6.47 Przebieg czasowy sygnału otrzymanego z czujników przemieszczenia (czerwony), sygnału zadanego do sterownika (niebieski), sygnału zadanego na zawór proporcjonalny (fioletowy) oraz sygnału zadanego na rozdzielacz proporcjonalny (zielony) dla przypadku 2 [23]



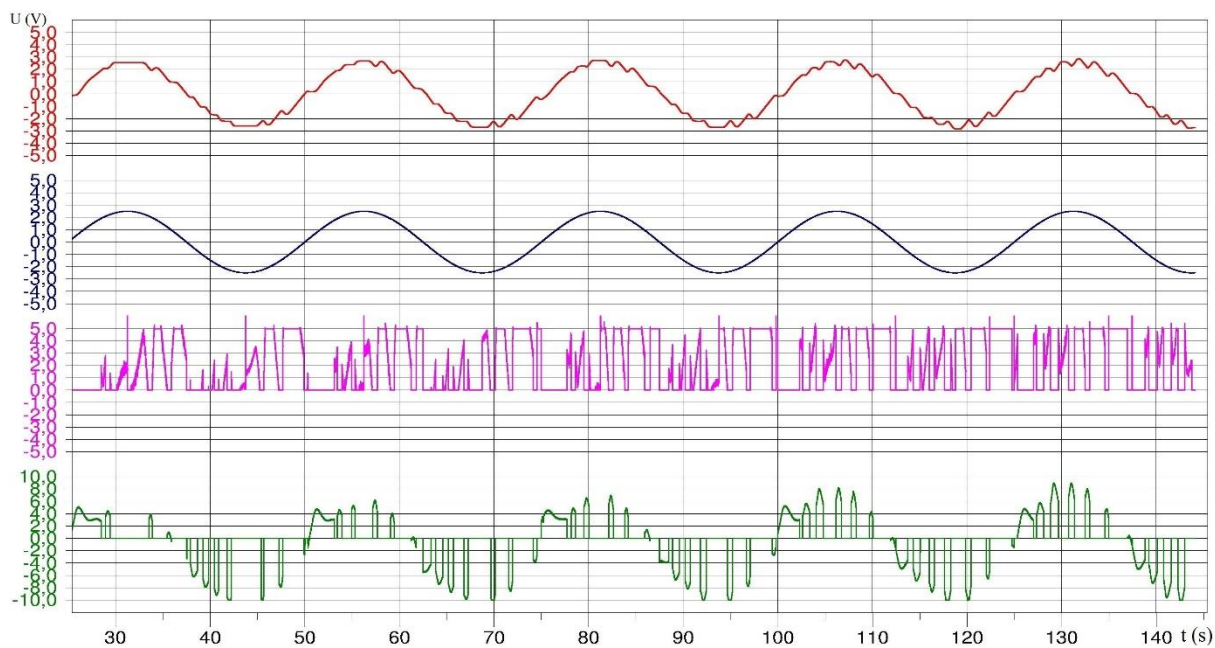
Rys. 6.48 Przebieg czasowy sygnału zadanego (niebieski) oraz sygnału otrzymywanego z czujników przemieszczenia (czerwony) dla przypadku 3 [23]



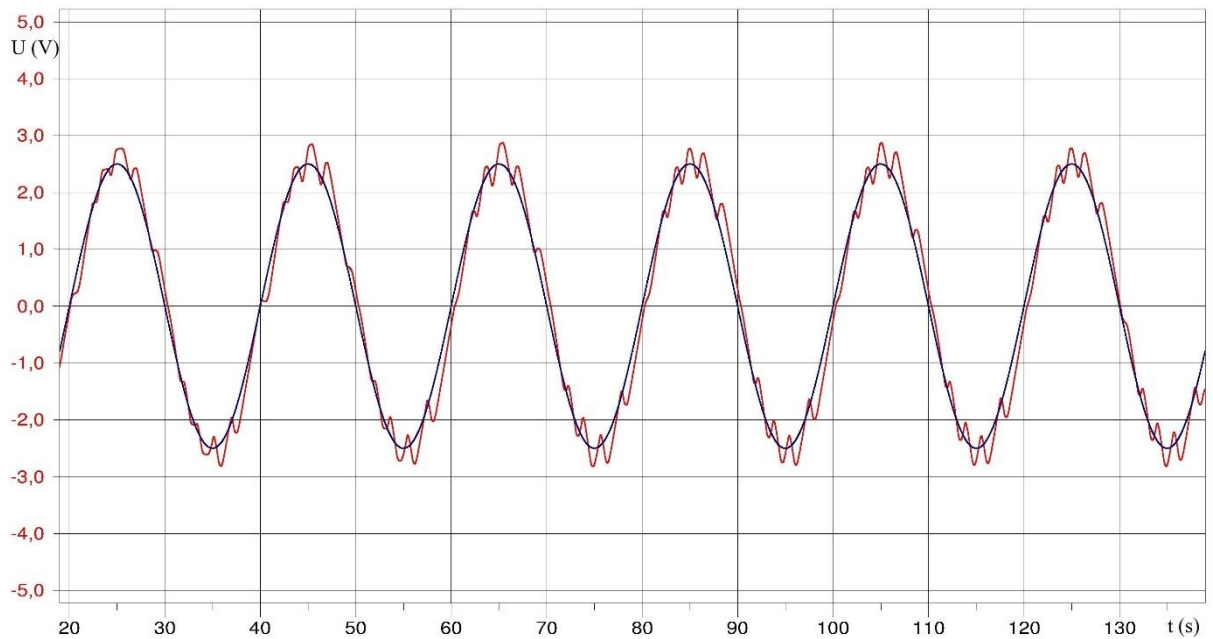
Rys. 6.49 Przebieg czasowy sygnału otrzymanego z czujników przemieszczenia (czerwony), sygnału zadanego do sterownika (niebieski), sygnału zadanego na zawór proporcjonalny (fioletowy) oraz sygnału zadanego na rozdzielacz proporcjonalny (zielony) dla przypadku 3 [23]



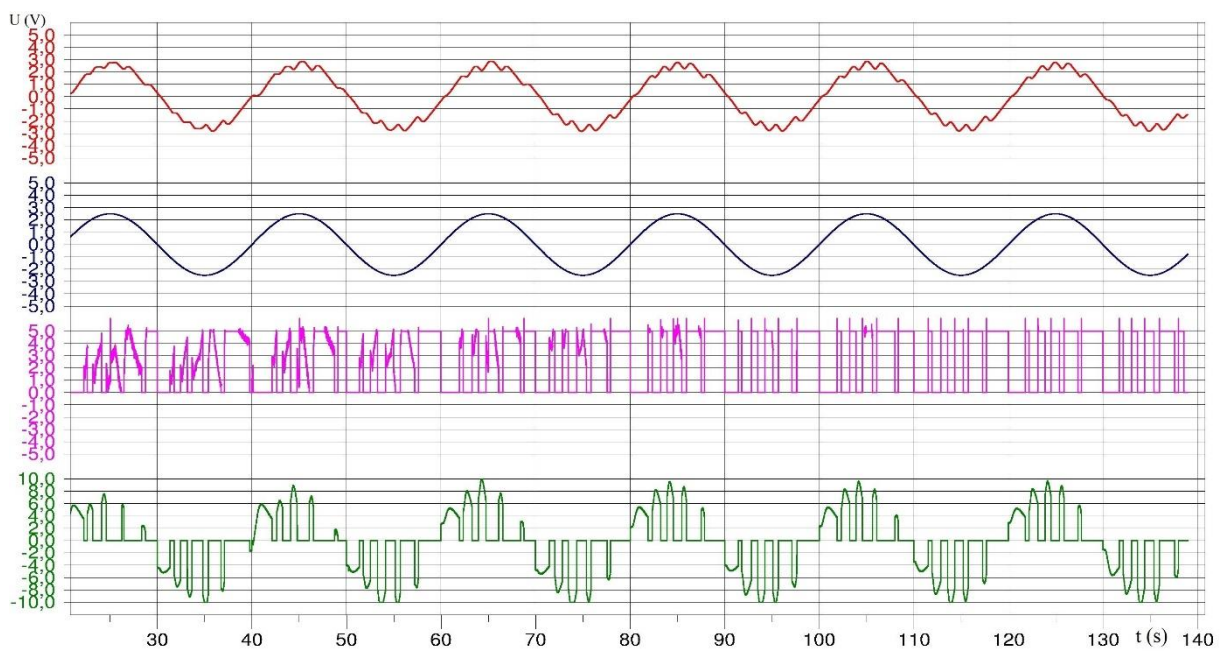
Rys. 6.50 Przebieg czasowy sygnału zadanego (niebieski) oraz sygnału otrzymywanego z czujników przemieszczenia (czerwony) dla przypadku 4 [23]



Rys. 6.51 Przebieg czasowy sygnału otrzymanego z czujników przemieszczenia (czerwony), sygnału zadanego do sterownika (niebieski), sygnału zadanego na zawór proporcjonalny (fioletowy) oraz sygnału zadanego na rozdzielacz proporcjonalny (zielony) dla przypadku 4 [23]



Rys. 6.52 Przebieg czasowy sygnału zadanego (niebieski) oraz sygnału otrzymywanego z czujników przemieszczenia (czerwony) dla przypadku 5 [23]



Rys. 6.53 Przebieg czasowy sygnału otrzymanego z czujników przemieszczenia (czerwony), sygnału zadanego do sterownika (niebieski), sygnału zadanego na zawór proporcjonalny (fioletowy) oraz sygnału zadanego na rozdzielacz proporcjonalny (zielony) dla przypadku 5 [23]

### **6.6.7. Wnioski z badań na stanowisku 51SB**

Na wykonanym stanowisku wykonano szereg testów i prób, w celu przybliżenia założeń teoretycznych do praktyki.

Powodzeniem zakończyły się próby realizacji obracania elementów ramy z układem zadanych obciążeń siłowych w ślad sygnałów zadanych. Z każdą kolejną próbą realizacja przebiegała coraz sprawniej - programy sterujące i wykonawcze zostały precyzyjnie zgrane ze sobą. Można z całą pewnością założyć, że wykonany na stanowisku model obwodu wykonawczego spełni w całości oczekiwania po zabudowie na pojeździe.

Dzięki przeprowadzonym badaniom pozytywnie zweryfikowano opracowany algorytm sterowania wyjściowym obwodem hydraulicznym. W efekcie układ dość dobrze odwzorowywał zadane przebiegi wejściowe.

Opracowany został uniwersalny algorytm, zapewniający różne tryby pracy. Umożliwiają one ręczne bądź automatyczne sterowanie, z wykorzystaniem pojedynczych komponentów obwodu (zawór i rozdzielacz proporcjonalny), a także pracę równoczesną obu tych komponentów. Praca obwodu z wykorzystaniem samodzielnego sterowania zaworem proporcjonalnym posłużyła do początkowego ustalenia zakresu nastaw regulatora PID oraz pozwoliła na kalibrację sygnału, który miał być podany na wejście tego regulatora.

W związku z tym, że zawór proporcjonalny może służyć jedynie jako regulator przepływu cieczy hydraulicznej, sprzężony był on z rozdzielaczem sterującym wewnętrzną parą siłowników, symulującym działanie usprężynowania II stopnia. W wyniku przeprowadzonych badań dokonano niezbędnych korekt wzmocnienia sygnału zadawanego i otrzymywanego od czujników przemieszczenia, aby wypracowany na ich podstawie sygnał wejściowy do regulatora PID, by był jak najlepiej dopasowany do zakresu pracy zaworu proporcjonalnego.

Przeprowadzenie opisanych powyżej badań pozwoliło osiągnąć ostateczny cel badań, jakim było opracowanie algorytmu sterującego wykorzystującego współbieżną pracę zaworu oraz rozdzielacza proporcjonalnego. Jednakże, przebieg sygnału otrzymanego nie odwzorowuje idealnie przebiegu zadanego. Spowodowane jest to koniecznością odłączania regulatora PID rozdzielacza lub zaworu proporcjonalnego oraz koniecznością zastąpienia sprężyn śrubowych występujących na rzeczywistym pojeździe, siłownikami hydraulicznymi zasilanymi osobnym rozdzielaczem.

Powyższe badania wykorzystywały maksimum możliwości, jakie dało wykonane stanowisko pomiarowe 51SB. Otrzymane wyniki zgadzają się z wcześniejszymi założeniami,

a zbudowany algorytm sterujący układem hydraulicznym pozwala odwzorowywać zadany przebieg poprzez algorytm sterujący układem hydraulicznym.

Należy podkreślić, że wyniki badań są jednak obarczone błędem wynikającym z niedoskonałości zbudowanego modelu stanowiskowego względem rzeczywistego pojazdu szynowego.

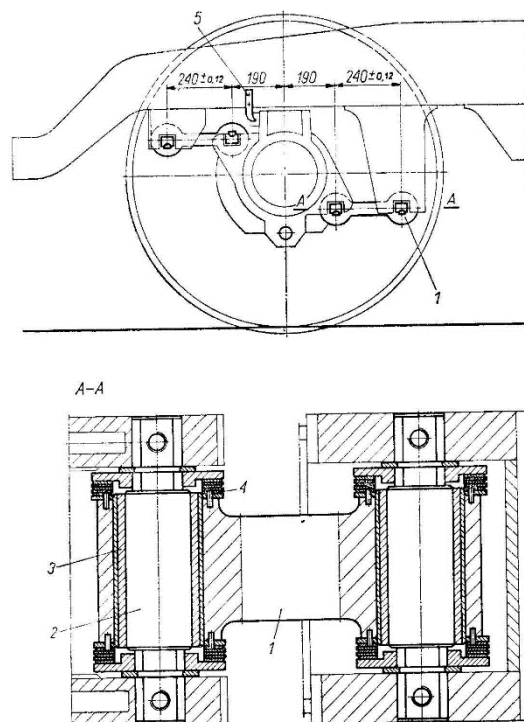
Sygnaly otrzymane z czujników przyspieszenia i żyroskopów, zabudowanych na stanowisku 51SB, okazały się mało użyteczne jako potencjalne źródło sygnałów dla systemu radialnego prowadzenia zestawów kołowych, ze względu na relatywnie małe wartości sygnałów. To z kolei przy spodziewanych dużych wartościach zakłóceń w warunkach rzeczywistych może uniemożliwić ich obróbkę i poprawną interpretację.

Dlatego też zdecydowano się na przetestowanie innej koncepcji jako podstawowego źródła sygnałów dla systemu sterowania – z użyciem sygnałów naprężeń z przewodników zestawów kołowych.

## 7. Prowadnik zestawu kołowego jako źródło sygnału dla systemu sterowania

Ze względu na potencjalnie małą przydatność sygnałów z czujników przyspieszeń dla systemu radialnego prowadzenia zestawów kołowych, podjęte zostały działania w celu weryfikacji przydatności sygnałów, możliwych do uzyskania z wykorzystaniem prowadnika zestawu kołowego, dla celów radialnego prowadzenia zestawów kołowych.

Prowadniki zestawów kołowych łączą kadłub maźnicy zestawu kołowego z ramą wózka. Podstawowym ich zadaniem jest przenoszenie sił wzdłużnych pochodzących od napędu i hamowania pojazdu oraz sił poprzecznych [6].



Rys. 7.1 Widok prowadnika maźnicy wraz z zabudową na wózku [6]

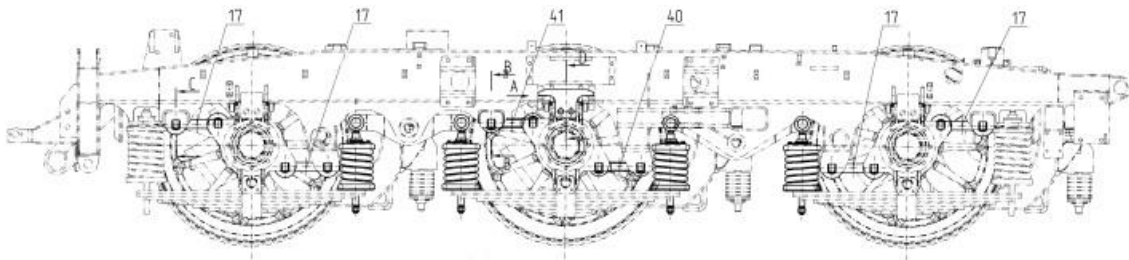
(1 – trzon prowadnika, 2 – sworzeń, 3,4 – tuleja metalowo gumowa, 5 – wskaźnik położenia maźnicy)

System prowadzenia maźnic z wykorzystaniem prowadników posiada wiele zalet, takich jak: swobodne ustawianie się zestawu kołowego względem wózka w granicach odkształceń elementów gumowych, przenoszenie sił prowadzących bez luzów i tarcia, tłumienie drgań zestawu kołowego przez elementy gumowe.

## 7.1. Prowadnik typu Alstom

### 7.1.1. Zabudowa w pojeździe

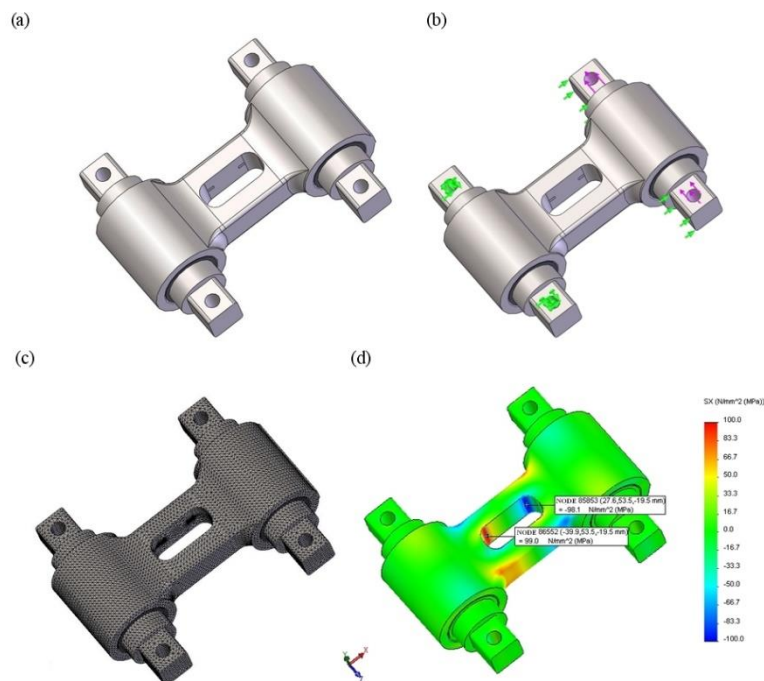
Prowadnik typu Alstom stosowany jest w wielu tradycyjnych konstrukcjach polskich lokomotyw.



Rys. 7.2 Widok wózka lokomotywy 303D z zaznaczonymi prowadnikami [40]

### 7.1.2. Badania symulacyjne

W celu sprawdzenia możliwości wykorzystania prowadnika zestawu kołowego typu Alstom jako źródła informacji o sile poprzecznej działającej na zestaw kołowy, został wykonany model numeryczny prowadnika.



Rys. 7.3 Model i symulacja numeryczna zmodyfikowanego prowadnika typu Alstom [4]  
(a) – model numeryczny, (b) – warunki brzegowe, (c) – siatka obliczeniowa,  
(d) – widok rozkładu naprężeń



Na stworzonym modelu przewodnika wykonano symulację numeryczną. Właściwości materiału modelu były takie same jak właściwości materiału rzeczywistego elementu. Zastosowano metodę analizy elementów skończonych (MES). Siatka została przedstawiona rys. 7.3c. Siatkę zagęszczono w miejscach skoncentrowanego naprężenia, gdzie tensometry należy zamontować na rzeczywistym elemencie. Warunki brzegowe można zobaczyć na rys. 7.3b. Pierwszy sworzень został zamocowany we wszystkich kierunkach, a ruch drugiego możliwy jest tylko w kierunku poprzecznym.

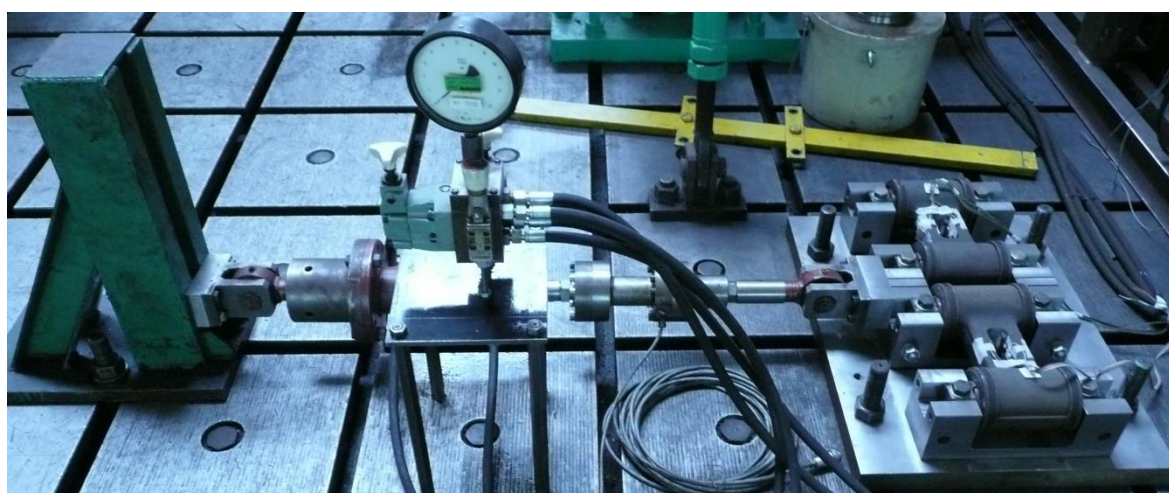
Siła została przyłożona do drugiego sworznia w kierunku poprzecznym, a wartość siły wynosiła 25 kN. Wartości naprężeń uzyskane za pomocą symulacji numerycznej z użyciem oryginalnego elementu były zbyt niskie, aby można je było wykorzystać do bezpośredniego pomiaru z użyciem tensometrów.

Tak więc element ten został nieco zmodyfikowany, utworzono owalny otwór, aby podnieść wartości naprężeń do poziomów mierzalnych wybraną metodą. Wyniki tego eksperymentu przedstawiono na rys. 7.3d.

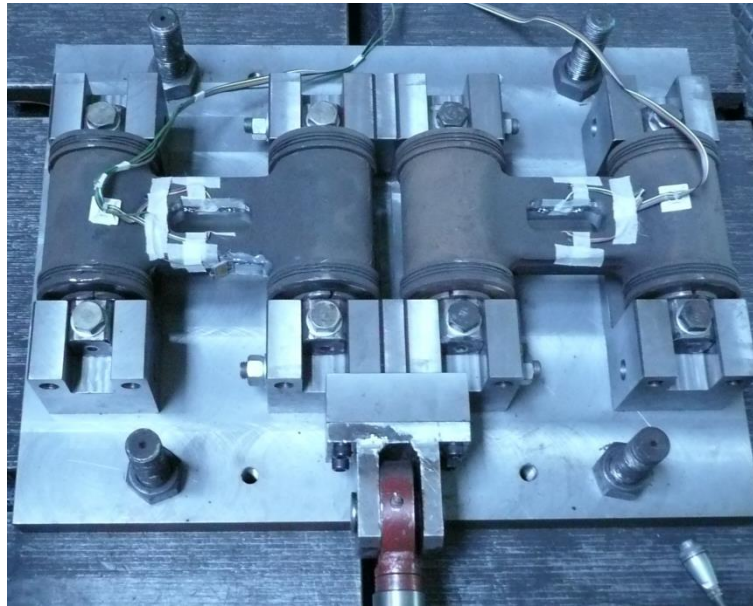
### 7.1.3. Badania laboratoryjne

W celu weryfikacji obliczeń numerycznych wykonano dwa zmodyfikowane przewodniki typu Alstom, które następnie zostały wyposażone w układy tensometrów, służące do pomiaru naprężeń. Tensometry zostały umieszczone w owalnym otworze, wykonanym w obu testowanych elementach.

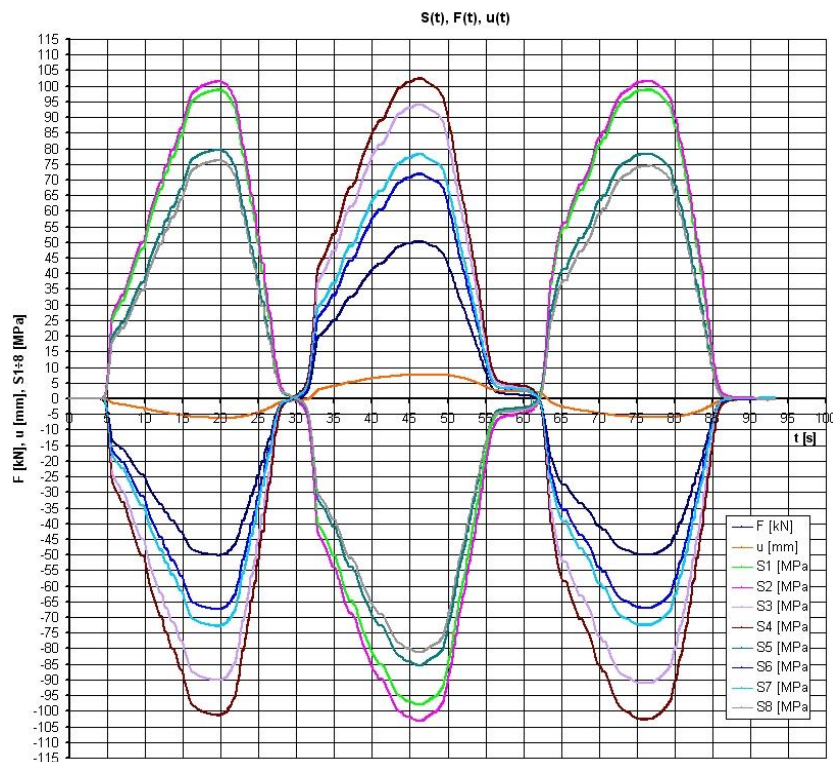
Wykonane również zostało stanowisko badawcze, umożliwiające symulację sił poprzecznych, działających na przewodniki.



Rys. 7.4 Widok stanowiska badawczego dla przewodników typu Alstom [4]



Rys. 7.5 Zmodyfikowane przewodniki typu Alstom wyposażone w tensometry, połączone przez element symulujący maźnicę zestawu kołowego [4]



Rys. 7.6 Przebieg deformacji, naprężeń i sił w przewodnikach podczas cechowania [4]

Na rys. 7.6 przedstawione zostały wyniki przeprowadzonych badań. Linie oznaczone symbolami S1, S2, S3, S4 należą do tensometrów na jednym przewodniku, natomiast S5, S6, S7, S8 odpowiadają drugiemu przewodnikowi.

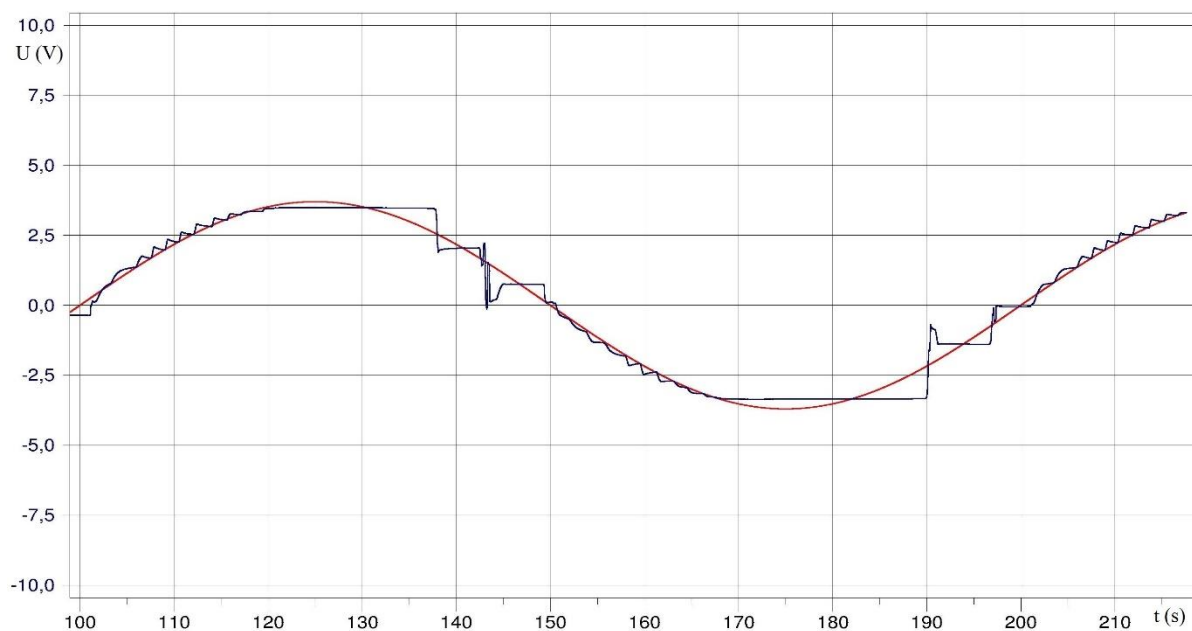
#### 7.1.4. Badania przewodnika typu Alstom na stanowisku 51SB

Stanowisko 51SB zostało wykorzystane do sterowania rozdzielaczem proporcjonalnym, wymuszającym siłę w badanych przewodnikach typu Alstom.

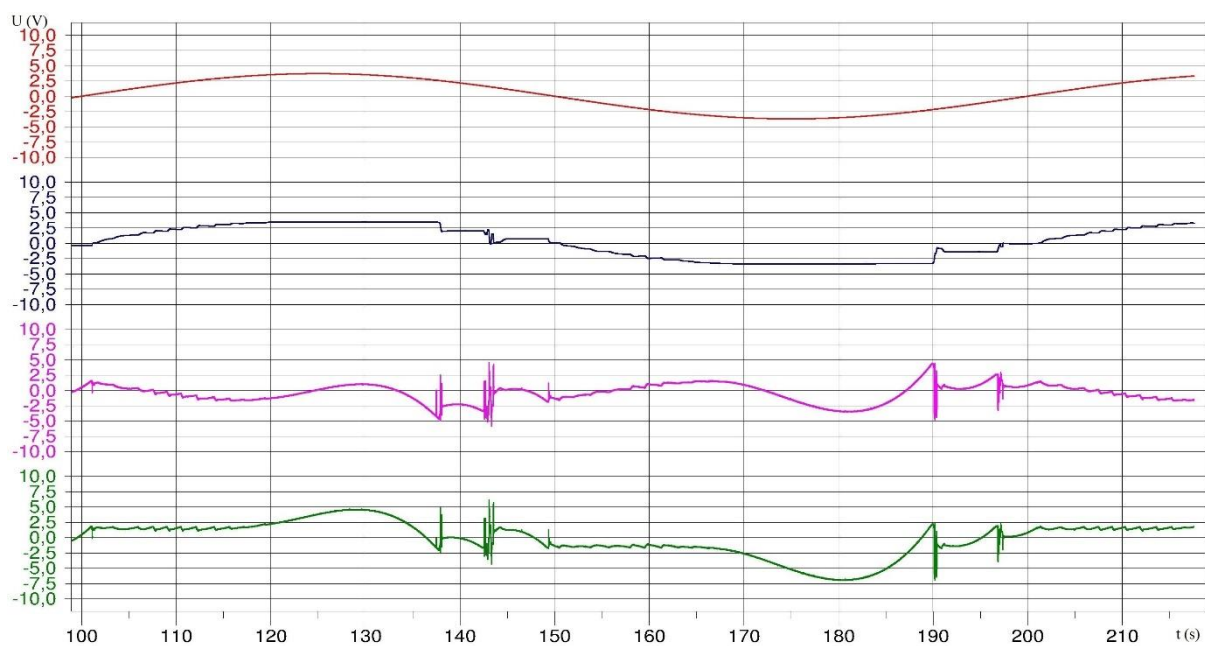
Wykorzystany do badań został, przedstawiony na rys. 6.15, zaimplementowany już w algorytmie, moduł sterujący rozdzielaczem proporcjonalnym przewodnika. Algorytm sterujący w tym przypadku wykorzystuje jako przebieg wartości zadanej sygnał otrzymany na podstawie pomiarów napiężeń na przewodnikach zestawów kołowych.

Tab. 7.1 Wartości nastaw regulatora rozdzielacza proporcjonalnego oraz częstotliwości sygnału wejściowego [23]

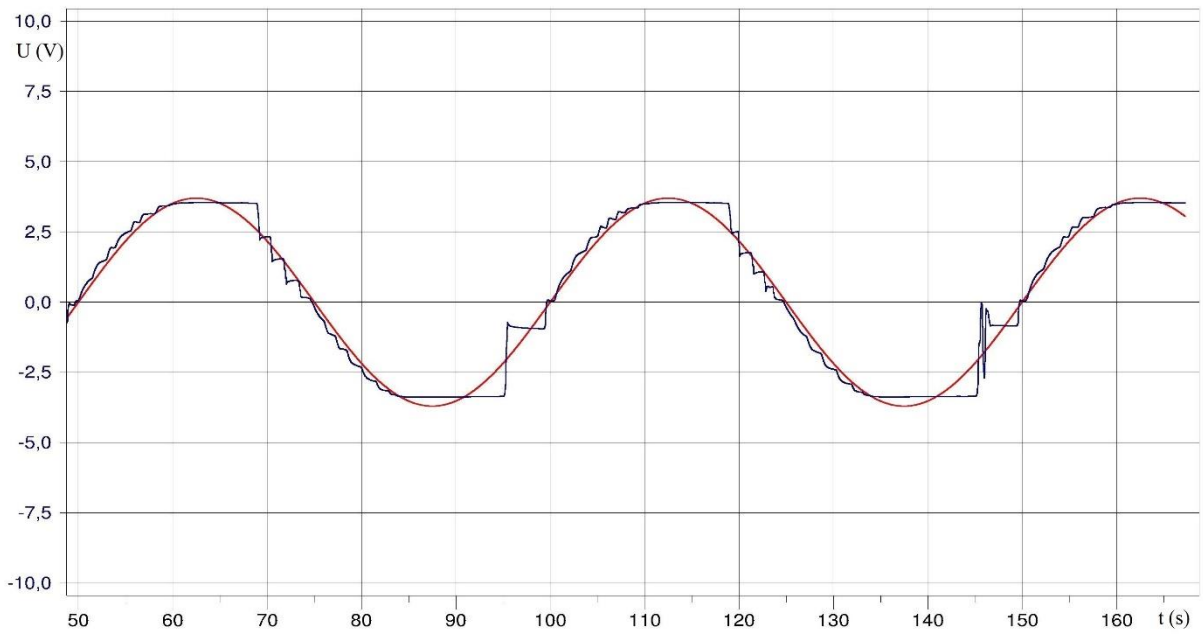
Przypadek	Częstotliwość [Hz]	Nastawa P	Nastawa I	Nastawa D
1	0,01	1,5	1,5	0,15
2	0,02	1,5	1,5	0,15
3	0,03	1,3	1,4	0,1
4	0,04	1,3	1,4	0,1
5	0,05	1,1	1,2	0,05



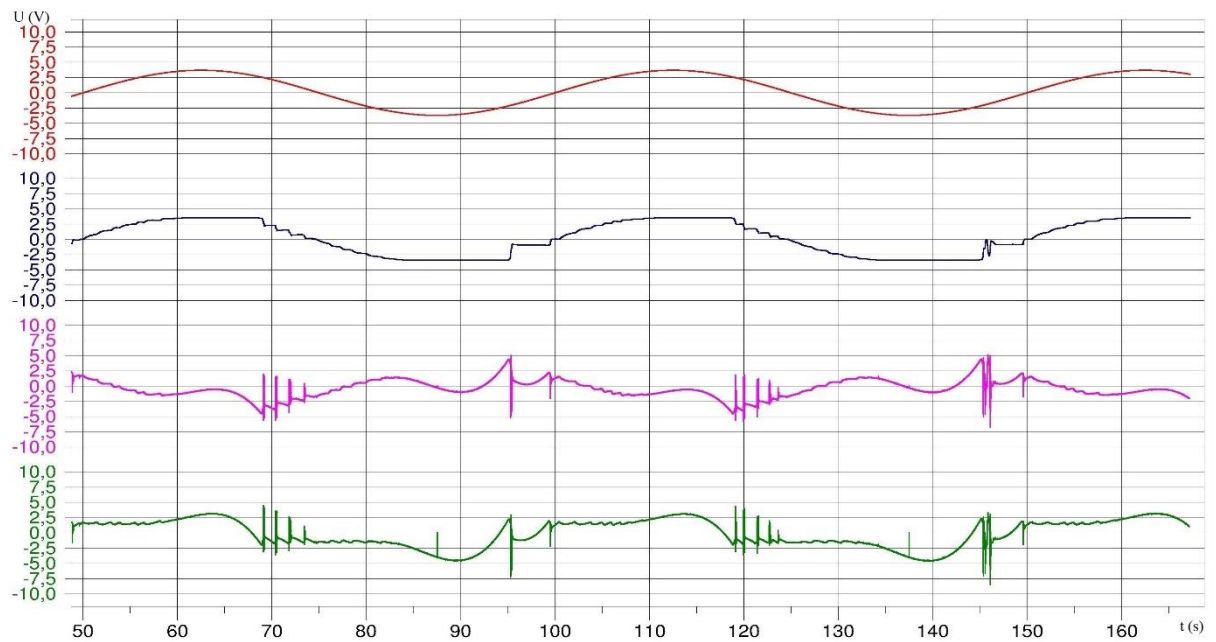
Rys. 7.7 Przebieg sygnału zadanego na sterownik (czerwony) oraz sygnał otrzymywany z czujników przemieszczeń (niebieski) dla przypadku 1 [23]



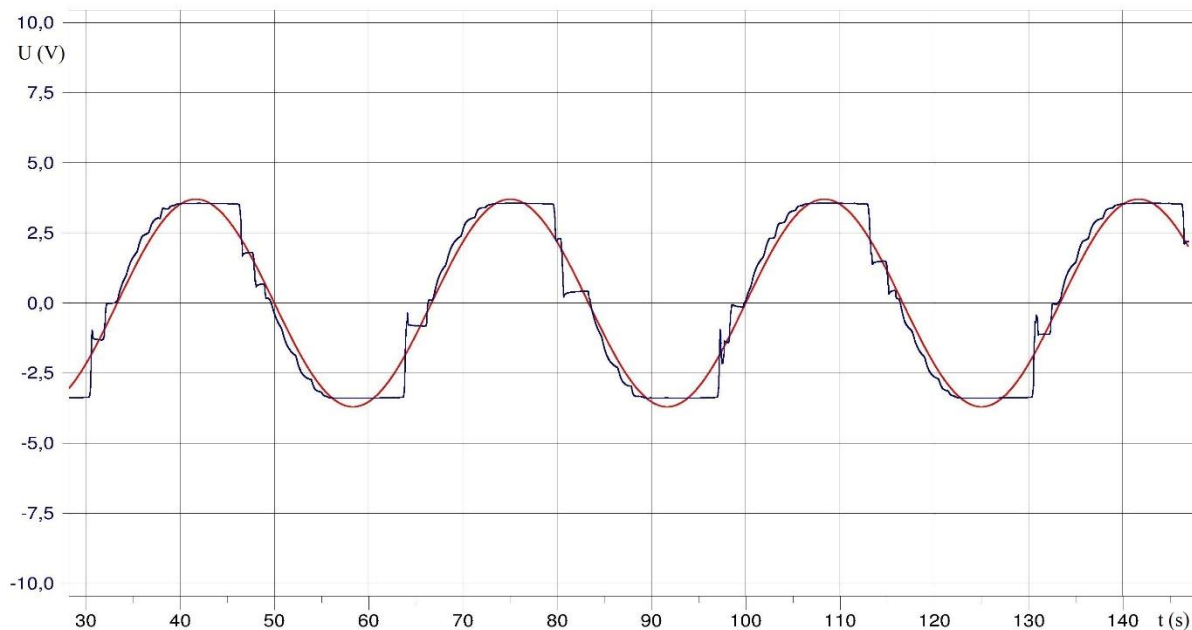
Rys. 7.8 Przebieg sygnału zadanego (czerwony), sygnału z czujnika przemieszczenia (niebieski), sygnału zadanego na rozdzielacz proporcjonalny (fioletowy) oraz sygnału wartości uchybu (zielony) dla przypadku 1 [23]



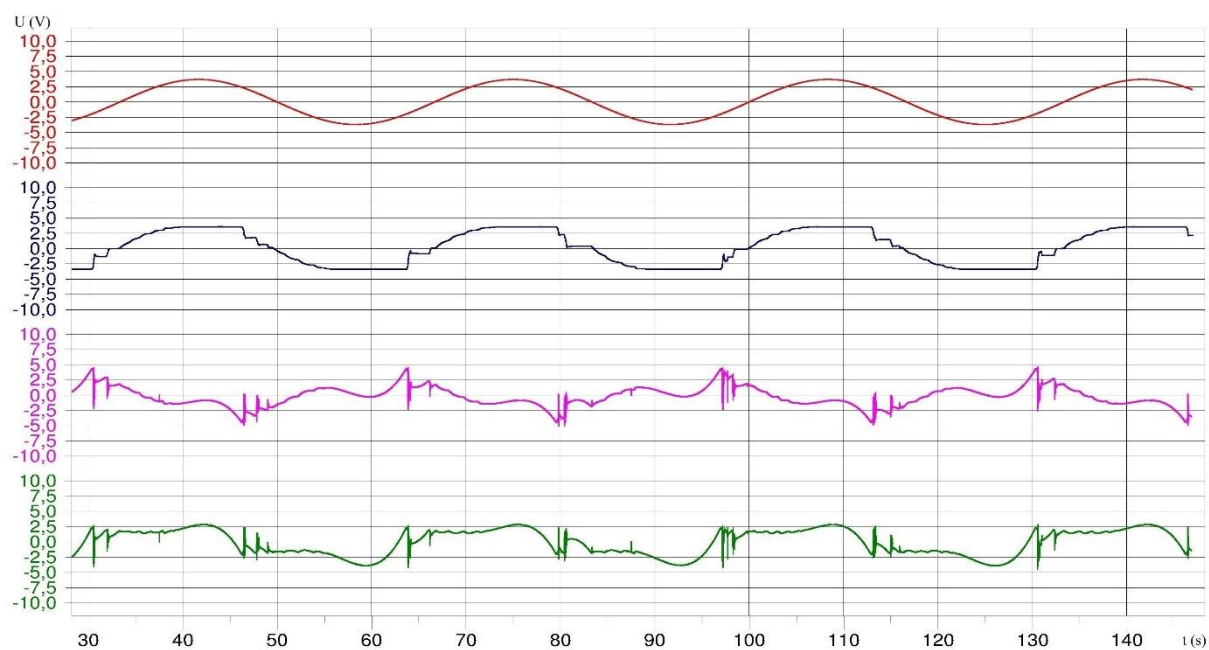
Rys. 7.9 Przebieg sygnału zadanego na sterownik (czerwony) oraz sygnał otrzymywany z czujników przemieszczeń (niebieski) dla przypadku 2 [23]



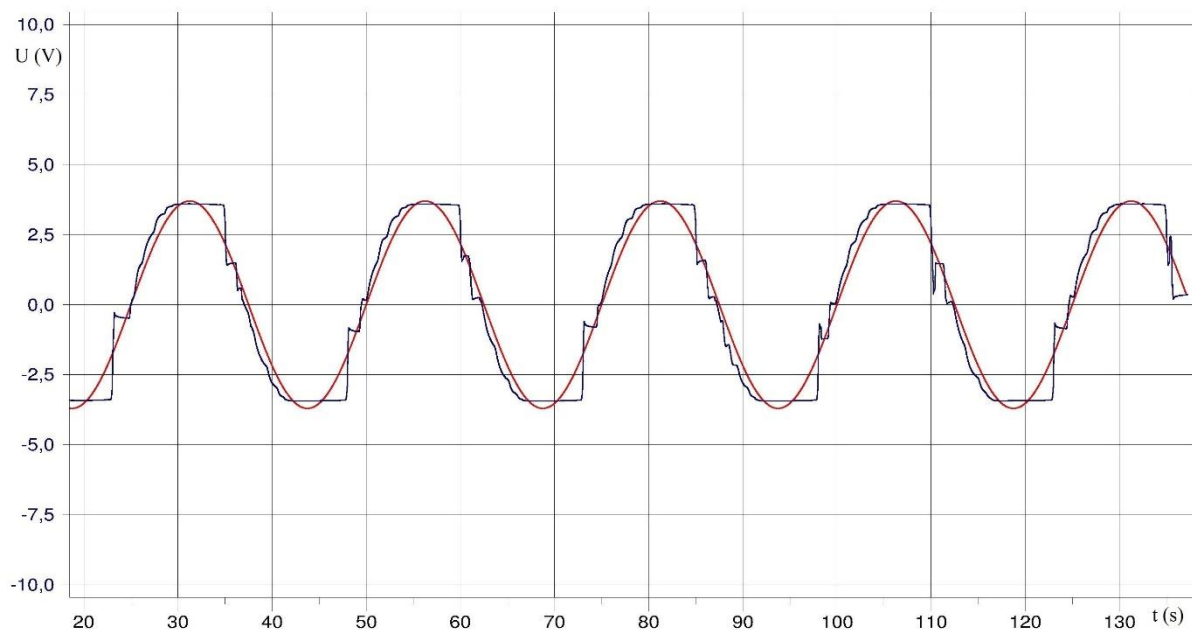
Rys. 7.10 Przebieg sygnału zadanego (czerwony), sygnału z czujnika przemieszczenia (niebieski), sygnału zadanego na rozdzielacz proporcjonalny (fioletowy) oraz sygnału wartości uchybu (zielony) dla przypadku 2 [23]



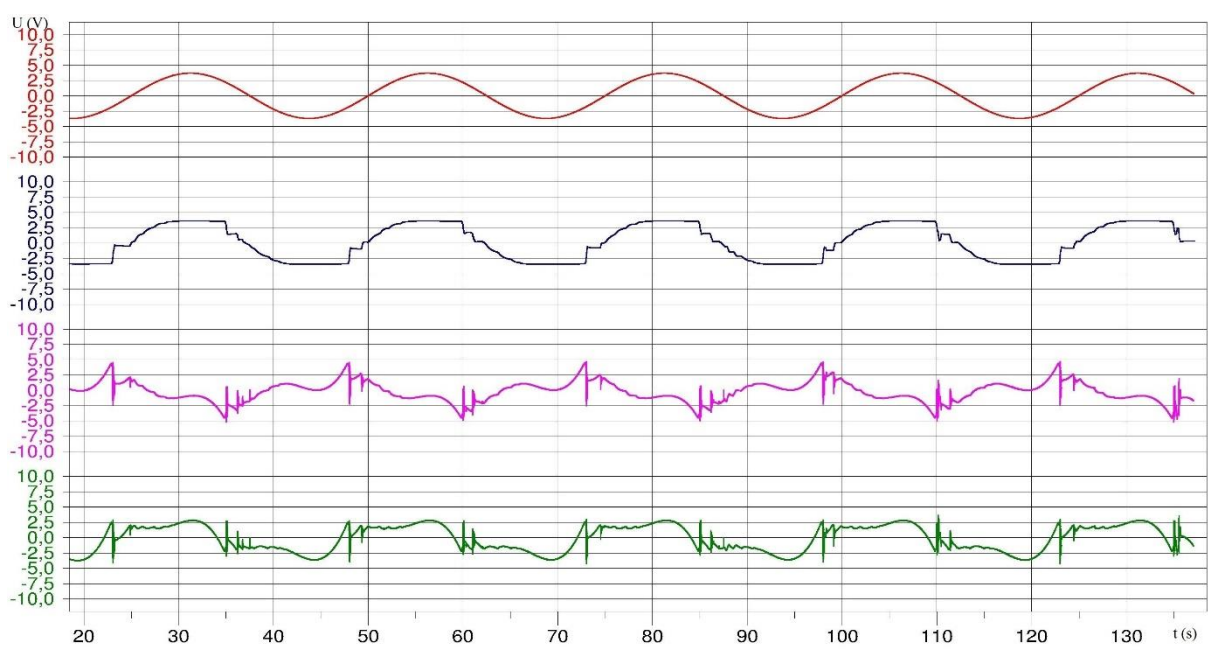
Rys. 7.11 Przebieg sygnału zadanego na sterownik (czerwony) oraz sygnał otrzymywany z czujników przemieszczeń (niebieski) dla przypadku 3 [23]



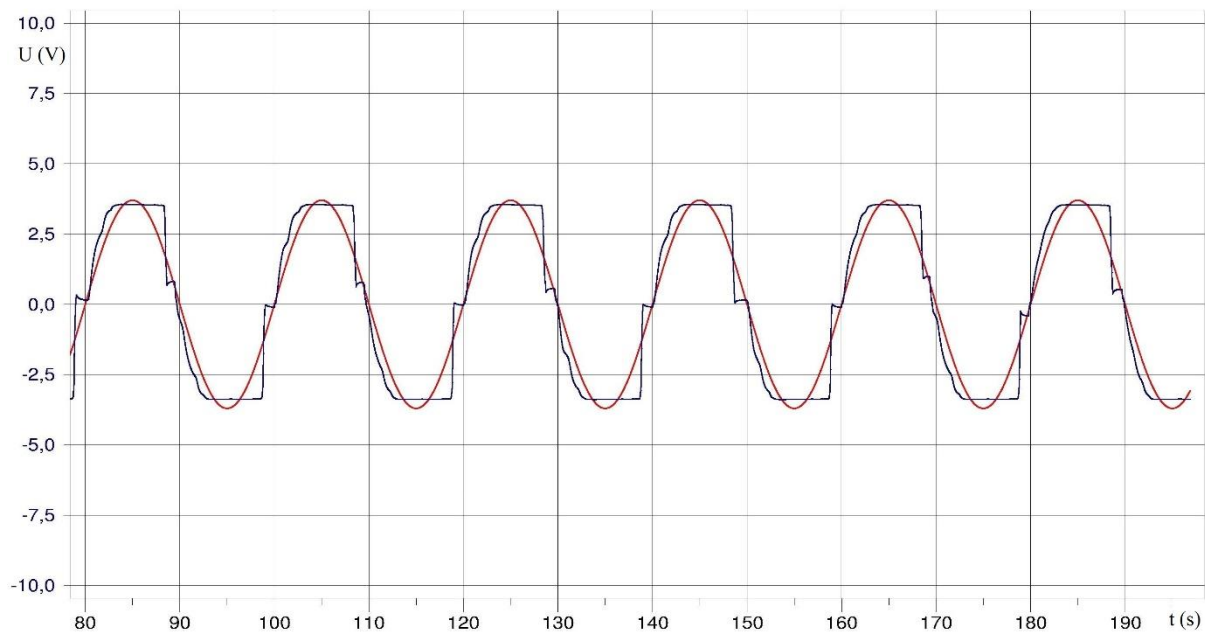
Rys. 7.12 Przebieg sygnału zadanego (czerwony), sygnału z czujnika przemieszczenia (niebieski), sygnału zadanego na rozdzielacz proporcjonalny (fioletowy) oraz sygnału wartości uchybu (zielony) dla przypadku 3 [23]



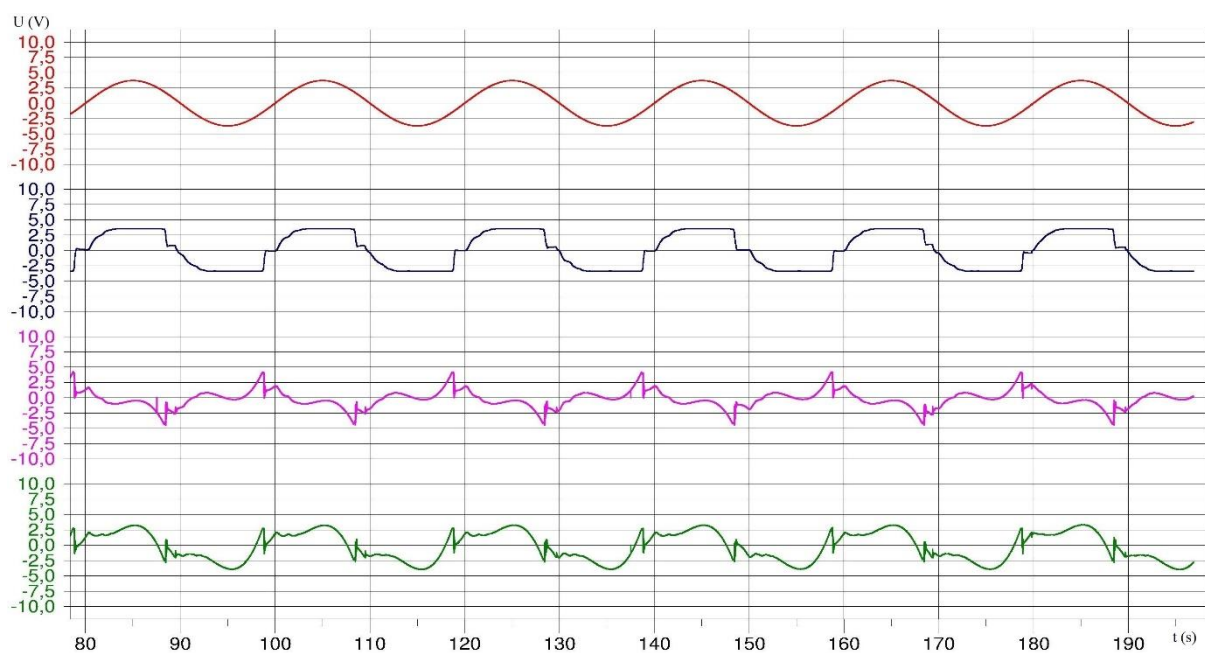
Rys. 7.13 Przebieg sygnału zadanego na sterownik (czerwony) oraz sygnał otrzymywany z czujników przemieszczeń (niebieski) dla przypadku 4 [23]



Rys. 7.14 Przebieg sygnału zadanego (czerwony), sygnału z czujnika przemieszczenia (niebieski), sygnału zadanego na rozdzielacz proporcjonalny (fioletowy) oraz sygnału wartości uchybu (zielony) dla przypadku 4 [23]



Rys. 7.15 Przebieg sygnału zadanego na sterownik (czerwony) oraz sygnał otrzymywany z czujników przemieszczeń (niebieski) dla przypadku 5 [23]



Rys. 7.16 Przebieg sygnału zadanego (czerwony), sygnału z czujnika przemieszczenia (niebieski), sygnału zadanego na rozdzielacz proporcjonalny (fioletowy) oraz sygnału wartości uchybu (zielony) dla przypadku 5 [23]



### **7.1.5. Wnioski z badań laboratoryjnych przewodnika typu Alstom**

Podczas cechowania, zauważalna wyraźnie była pewna różnica wartości naprężeń pomiędzy dwoma badanymi przewodnikami. Spowodowane jest to zużyciem eksploatacyjnym elementów, posiadających tuleje gumowe w różnym stanie zużycia.

Warty podkreślenia jest fakt, iż wartości naprężeń otrzymane z tensometrów na pierwszym przewodniku są bardzo zbliżone do wartości teoretycznych, uzyskanych za pomocą obliczeń MES.

W trakcie przeprowadzanych prób zauważono, iż sygnały z tensometrów są czułe na zakłócenia od innych maszyn, pracujących na hali badawczej. Mimo wykonania poprawek w okablowaniu (zastosowanie przewodów ekranowanych, prowadzenia sygnałów parami różnicowymi/skrętkami) zakłócenia były nadal widoczne. Można z tego sformułować wniosek o konieczności umieszczenia obwodu wzmacniającego/kondycjonującego w bezpośredniej bliskości układu mostkowego tensometrów, lub też w samym przewodniku.

Wykonanie owalnego otworu umożliwi zabudowę wstępnego układu wzmacniającego lub kompletnego systemu przetwornika w samym przewodniku (po zabezpieczeniu obwodu przed wpływem czynników zewnętrznych poprzez umieszczenie w elastycznej hermetycznej zalewie).

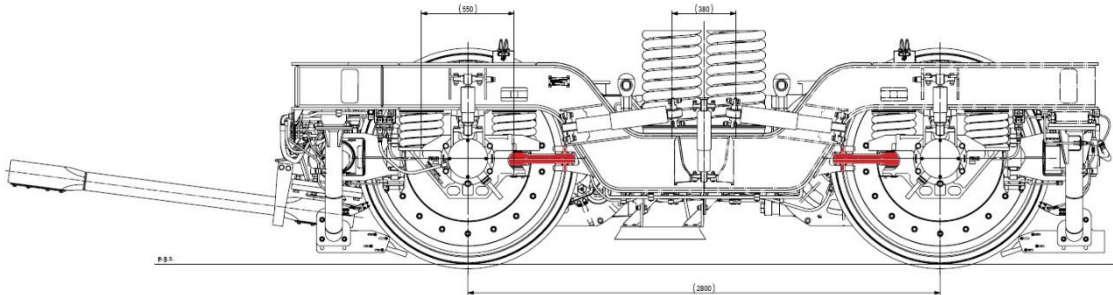
Zabudowa kompletnego układu, wraz z przetwarzaniem (potraktowanie przewodnika jako aktywny zespół peryferyjny, komunikujący się ze sterownikiem systemu radialnego prowadzenia zestawów kołowych za pośrednictwem odpornej na zakłócenia magistrali danych np. CAN), umożliwi zastąpienie „normalnego” przewodnika, bez konieczności dokonywania znacznych zmian w okablowaniu wózka i pojazdu.

Sygnał z przewodników Alstom wykorzystany został również jako źródło sprzężenia zwrotnego podczas badań na stanowisku 51SB. Algorytm sterujący działaniem obwodów wyjściowych nie pracował w tym przypadku optymalnie. Przebiegi sygnałów otrzymane w wyniku obciążania przewodników nie mogły być poprawnie sprzężone z resztą algorytmu z powodu powstałych w nich zakłóceń.

## 7.2. Prowadnik zestawu kołowego lokomotywy 111E

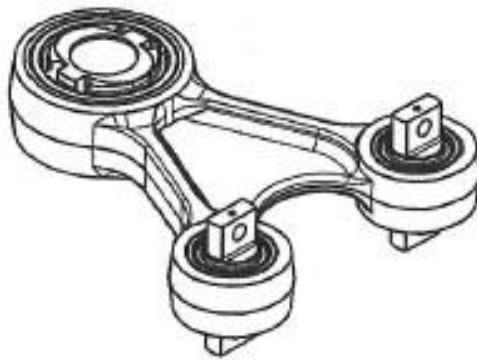
### 7.2.1. Zabudowa w pojeździe

Prowadnik zestawów kołowych tego typu jest stosowany w lokomotywach rodziny 111D, 111E oraz typach pochodnych.



Rys. 7.17 Widok wózka lokomotywy 111DE z zaznaczonymi prowadnikami, oprac. własne na podst. [38]

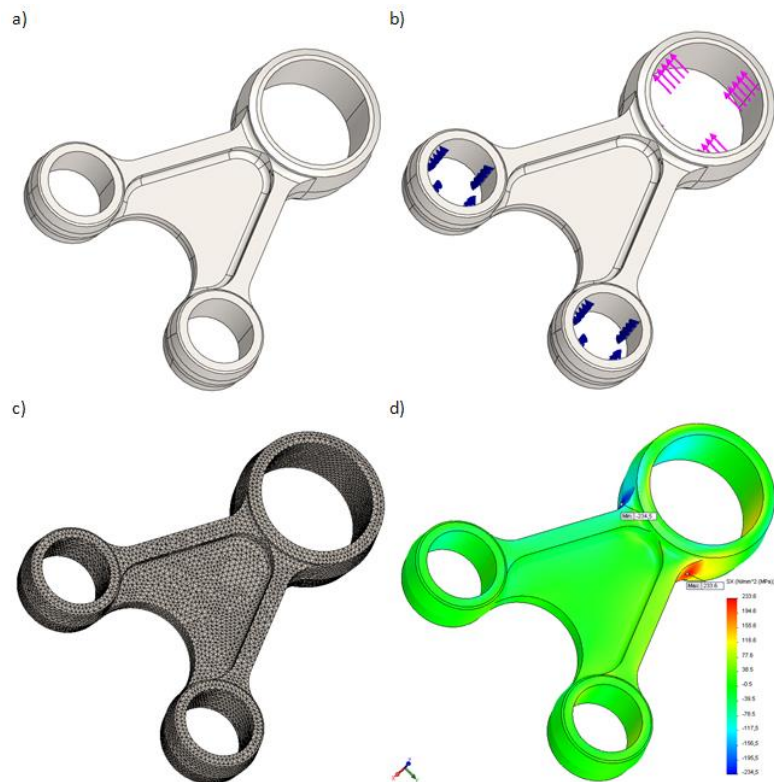
Konstrukcja samego prowadnika jest odmienna, ze względu na inny układ prowadzenia zestawów kołowych. Ze względu na to, iż lokomotywy są produkowane wspólnie, zdecydowano o wykonaniu badań, wykazujących również przydatność prowadnika tego typu jako źródła sygnału dla systemu radialnego prowadzenia zestawów kołowych.



Rys. 7.18 Widok prowadnika zestawu kołowego lokomotywy 111E [38]

### 7.2.2. Badania symulacyjne

W celu wykonania badań symulacyjnych posłużono się analogiczną metodą badawczą, jak w przypadku przewodnika typu Alstom. Jednakże w tym przypadku występuje jeden element prowadzący zestaw kołowy. Jest on tak zaprojektowany, iż uzyskanie wysokich wartości odkształceń rejestrowanych przez tensometry nie wymagało dokonania jego modyfikacji.



Rys. 7.19 Model i symulacja numeryczna przewodnika typu 111E [5]  
(a) – model numeryczny, (b) – warunki brzegowe,  
(c) – siatka obliczeniowa, (d) – widok rozkładu naprężeń

W celu wytypowania dokładnej lokalizacji miejsc naklejenia tensometrów wykonano symulacje numeryczną. Jako miejsca o najwyższych stanach naprężeń wytypowano rejon promieni przejściowych obsady tulei metalowo-gumowej od strony połączenia z maźnicą.

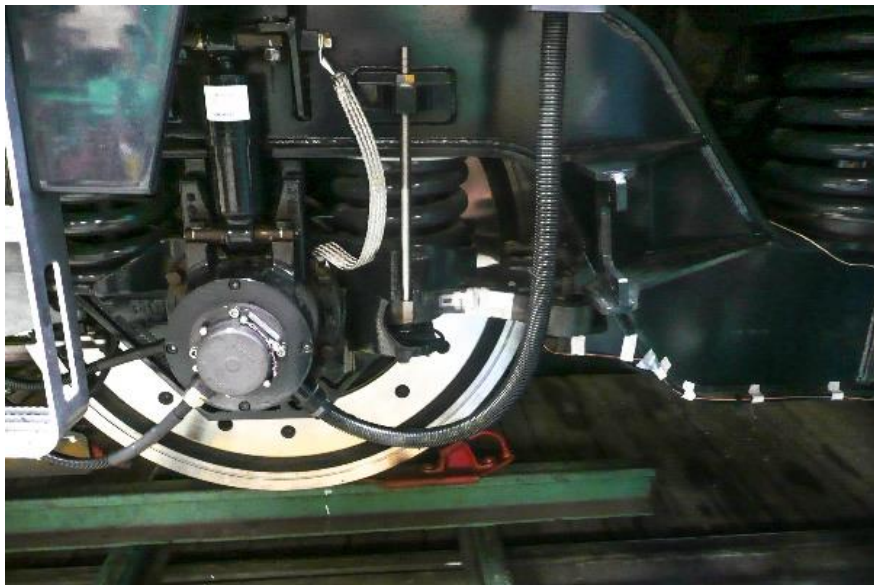
Ze względu na brak możliwości wykonania zmian w przewodniku (nie było możliwości dokonania modyfikacji w elemencie rzeczywistym), na jego powierzchni zewnętrznej wytypowano dwa miejsca o największych wartościach naprężeń, dla umieszczenia tensometrów.

### 7.2.3. Badania laboratoryjne

W miejscach wytypowanych podczas symulacji numerycznej (rys. 7.19d) na prowadniku zostały przyklejone dwa tensometry.



Rys. 7.20 Widok prowadnika z miejscem przewidzianym na umieszczenie tensometrów [5]

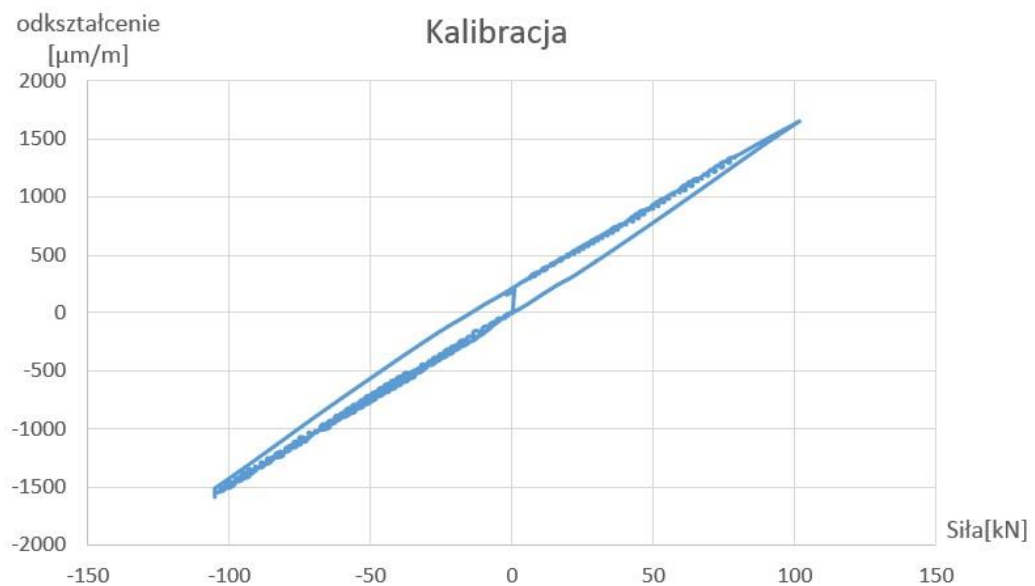


Rys. 7.21 Widok zestawu kołowego z prowadnikiem wyposażonym w tensometry [5]



Rys. 7.22 Widok lokomotywy 111E na stanowisku testowym [5]

Na stanowisku testowym dokonano wzorcowania sygnałów z przewodników zestawów kołowych. Wyniki wzorcowania okazały się w pełni zgodne z oczekiwaniami. Wartość sygnału jest proporcjonalna do wartości siły przyłożonej do konstrukcji wózka pojazdu, z zachowaniem liniowości w praktycznie całym zakresie, co zostało zobrazowane na rys. 7.23.



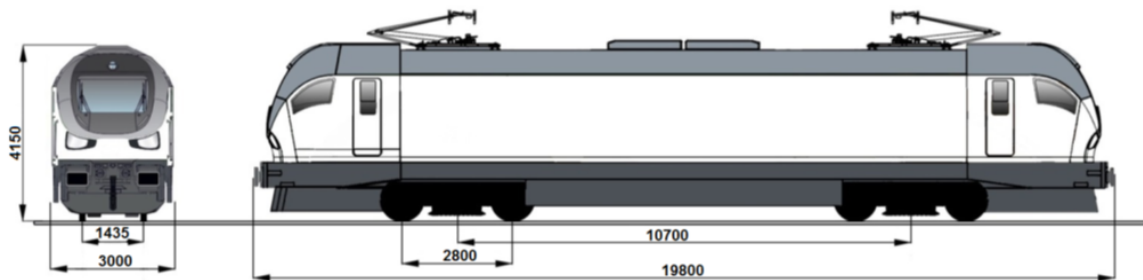
Rys. 7.23 Rezultat kalibracji przewodnika [5]

#### 7.2.4. Badania poligonowe

W celu weryfikacji badań symulacyjnych i wykonanych na stanowisku testowym, zostały przeprowadzone badania ruchowe z wykorzystaniem lokomotywy serii 111E, wyposażonej w dwa otensometrowane prowadniki zestawów kołowych.

Podstawowe dane lokomotywy, przedstawione zostały poniżej:

- |                                                             |                             |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| • rodzaj pracy                                              | ruch towarowy i pasażerski, |
| • moc ciągła przy napędzie elektrycznym                     | 5600 kW,                    |
| • moc silnika spalinowego                                   | 377 kW,                     |
| • układ osi                                                 | Bo'-Bo',                    |
| • masa służbowa                                             | 84 t ±3 %,                  |
| • szerokość toru                                            | 1435 mm,                    |
| • prędkość maksymalna dla ruchu towarowego                  | 140 km/h,                   |
| • prędkość maksymalna dla ruchu pasażerskiego               | 160 km/h,                   |
| • długość lokomotywy ze zderzakami                          | 19,8 m,                     |
| • baza lokomotywy 2a* (odległość pomiędzy środkami wózków ) | 10,7 m,                     |
| • rozstaw zestawów kołowych wózka 2a+                       | 2,8 m.                      |



Rys. 7.24 Widok lokomotywy serii 111E [24]

Usprężynowanie pierwszego stopnia stanowią sprężyny śrubowe oraz tłumiki drgań pionowych po jednym na każdą maźnicę. Sprężyny usytuowane są pomiędzy korpusem maźnicy i ramą wózka.

Pudło lokomotywy opiera się na każdym wózku za pomocą czterech sprężyn śrubowych typu „flexicoil” umożliwiających przenoszenie obciążeń zarówno pionowych jak i poprzecznych. W celu ograniczenia drgań i hałasu sprężyny oparte są na gumowym

przewodzeniu. Układ sprężyn współpracuje z zespołem tłumików drgań pionowych, poprzecznych oraz wężykowania co zapewnia wysoki poziom amortyzacji [24].

Dokonano kilku przejazdów doświadczalnych lokomotywą luzem, po trasie zawierającej łuki o małych promieniach (szlak Świnoujście – Wysoka Kamińska).

Przebiegi z półmostków tensometrycznych (zawierających dwa tensometry, naklejone po przeciwnych stronach prowadnika – jak na rys. 7.20), umieszczonych na prowadnikach zestawów kołowych, były zapisywane w rejestratorze.

Położenie lokomotywy, z zaznaczeniem miejsca zabudowy otensometrowanych prowadników (H I oraz H II) przedstawione jest na poniższym rysunku.

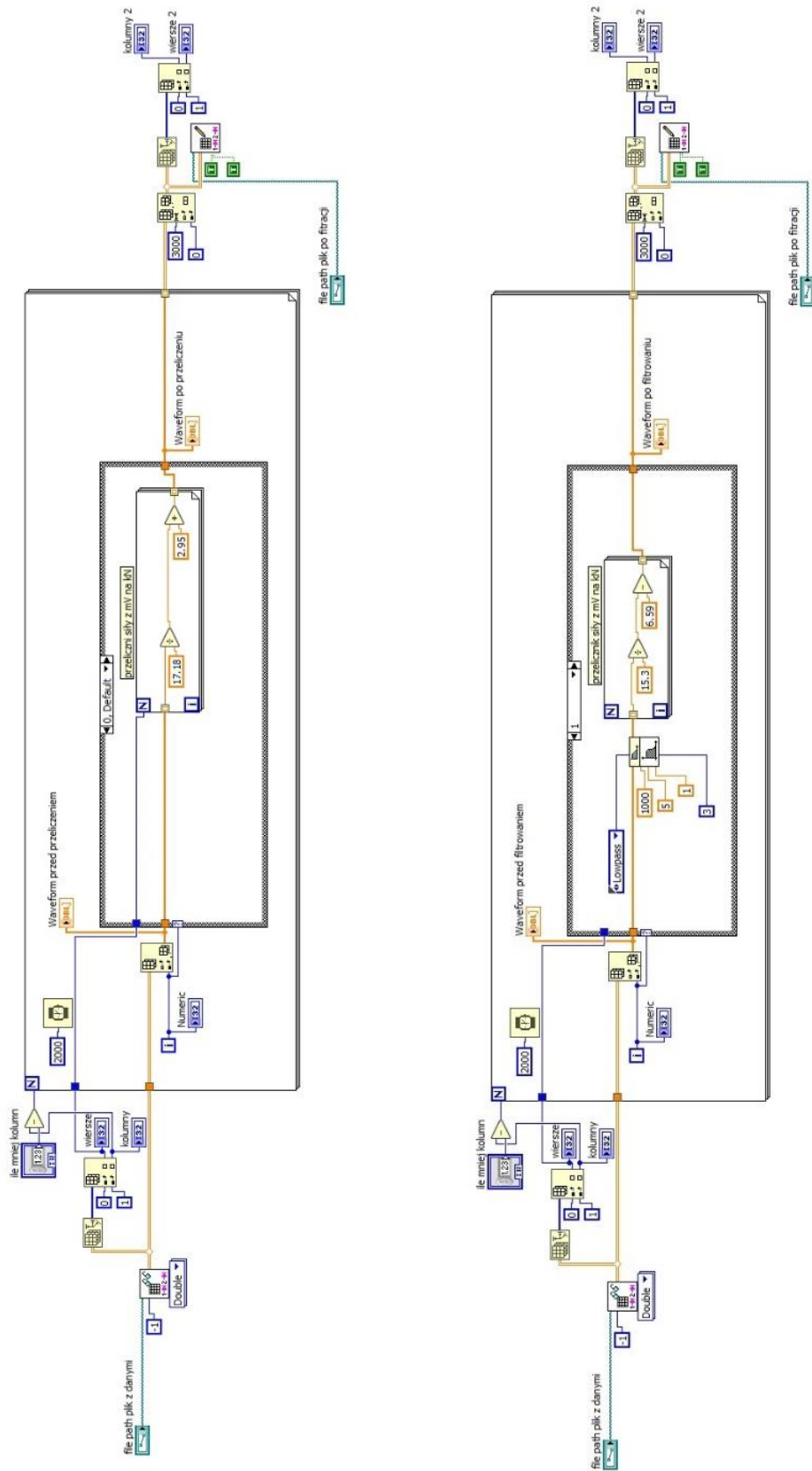


Rys. 7.25 Rozmieszczenie punktów pomiarowych na lokomotywie 111E, oprac. własne na podst. [24]

Do obróbki danych otrzymanych z rejestratora wykorzystane zostało oprogramowanie LabView v17.0 firmy National Instruments.

Oprogramowanie powyższe zostało wykorzystane do:

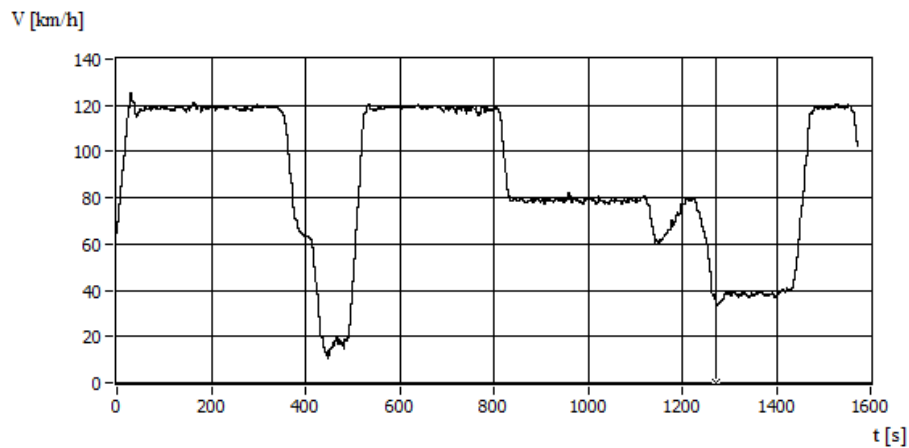
- wprowadzenia wartości offsetu i mnożnika (uzyskanej podczas kalibracji na stanowisku testowym), do przeliczenia wartości napięcia uzyskanej z dwóch tensometrów umieszczonych na prowadnikach zestawów kołowych na wartość siły poprzecznej H,
- filtracji otrzymanych przebiegów, z wykorzystaniem bloku programowego filtra dolnoprzepustowego,
- graficznej wizualizacji otrzymanych przebiegów.



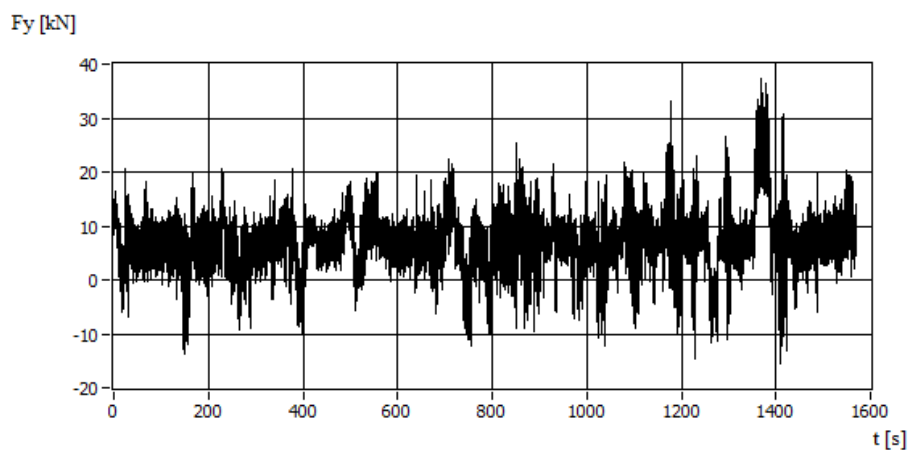
Rys. 7.26 Schemat blokowy programu do przeliczenia (lewy) oraz przeliczenia i filtracji (prawy) sygnałów otrzymanych z przewodników zestawów kołowych, oprac. własne



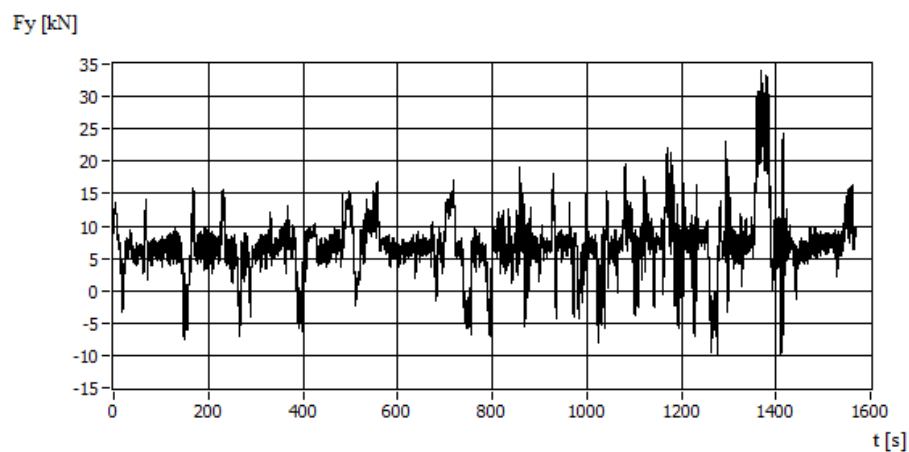
Przykładowe przebiegi sygnałów podczas przejazdu kabiną A do przodu. Czas jest podany w sekundach przejazdu, przebieg sygnału siły poprzecznej w [kN].



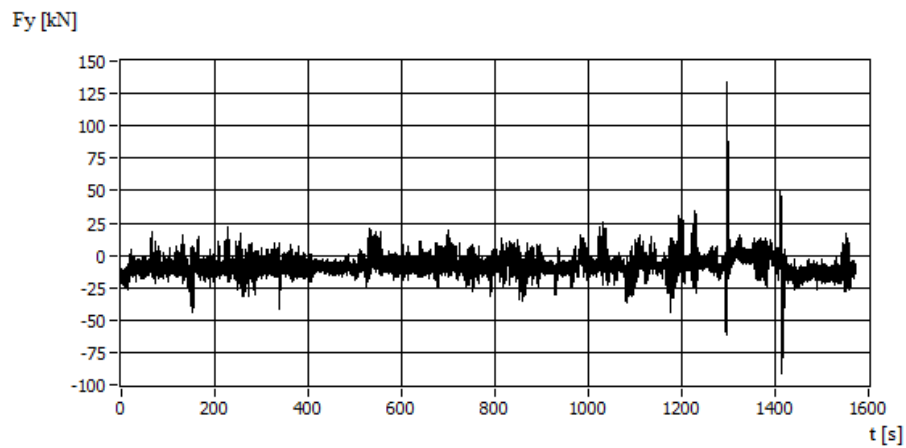
Rys. 7.27 Przebieg prędkości pojazdu, oprac. własne



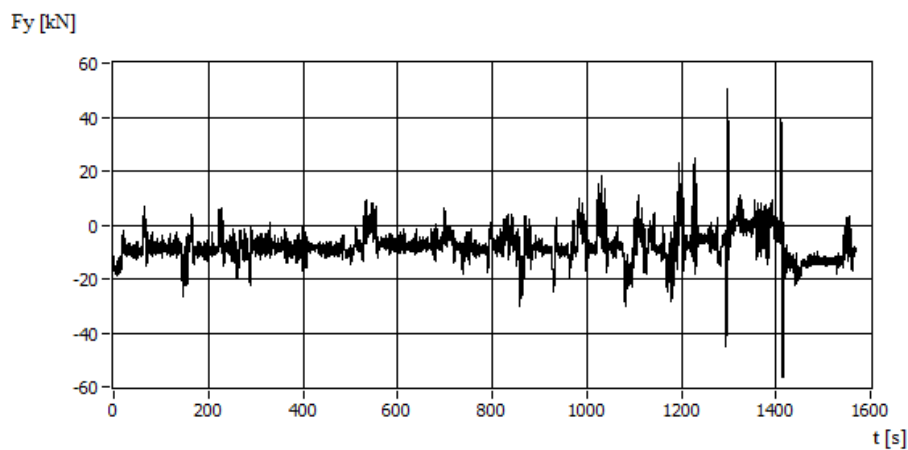
Rys. 7.28 Przebieg sygnału siły poprzecznej z osi prowadzącej (H I), bez obróbki, oprac. własne



Rys. 7.29 Przebieg sygnału siły poprzecznej z osi prowadzącej (H I), po filtracji z użyciem filtra dolnoprzepustowego 20Hz, oprac. własne

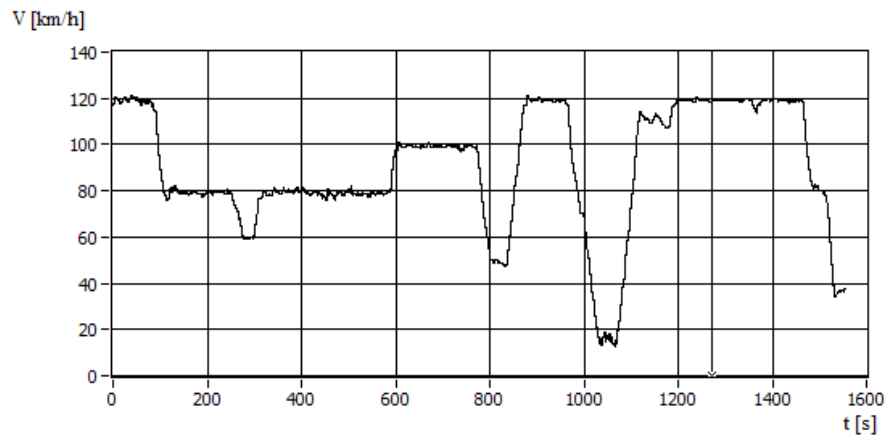


Rys. 7.30 Przebieg sygnału siły poprzecznej z drugiej osi wózka (H II), bez obróbki, oprac. własne

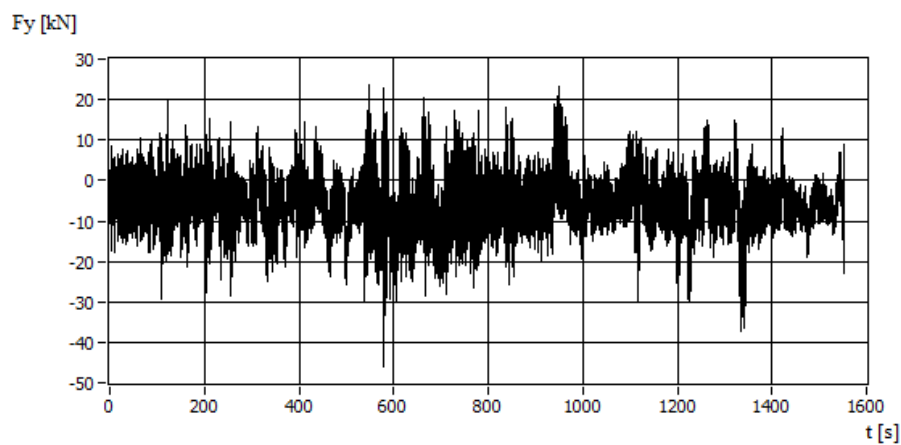


Rys. 7.31 Przebieg sygnału siły poprzecznej z drugiej osi wózka (H II), po filtracji z użyciem filtra dolnoprzepustowego 20Hz, oprac. własne

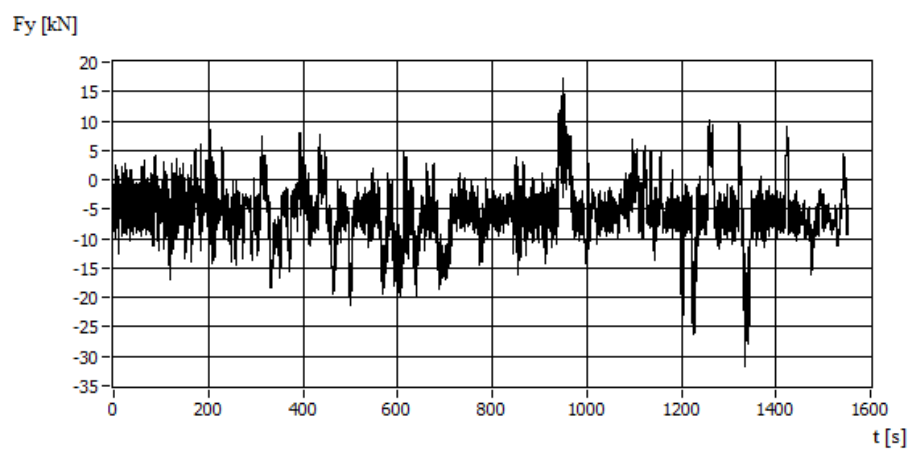
Przykładowe przebiegi sygnałów podczas przejazdu kabiną B do przodu. Czas jest podany w sekundach przejazdu, przebieg sygnału siły poprzecznej w [kN].



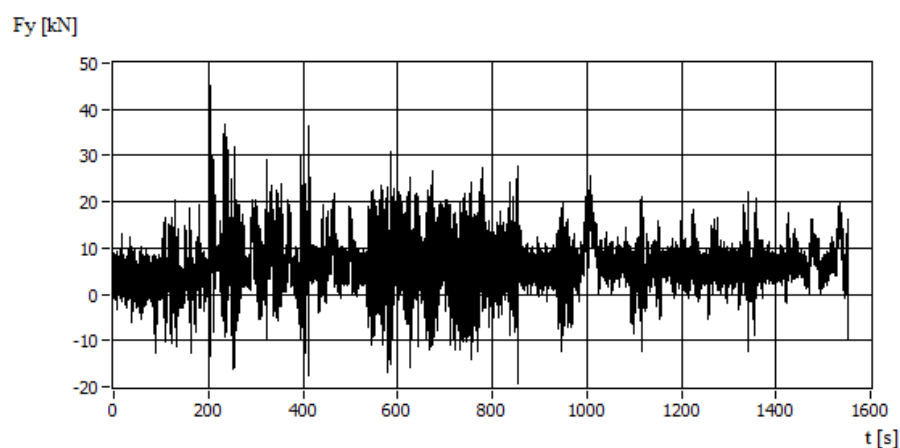
Rys. 7.32 Przebieg prędkości pojazdu, oprac. własne



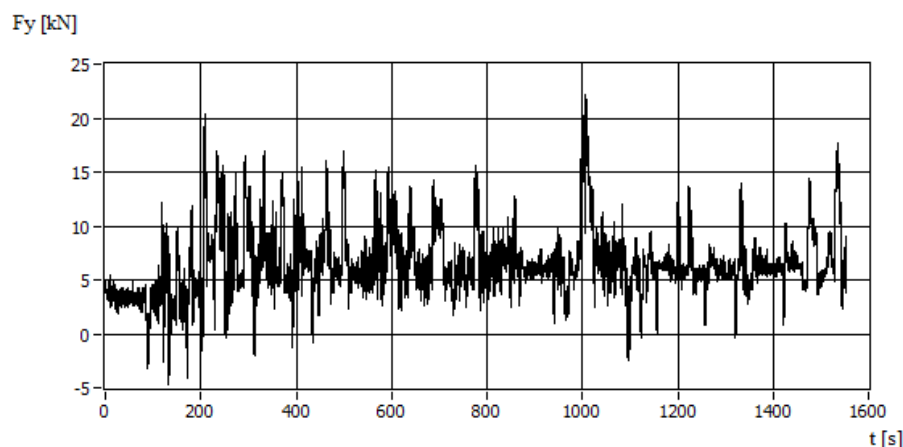
Rys. 7.33 Przebieg sygnału siły poprzecznej z osi prowadzącej drugiego wózka (H II), bez obróbki, oprac. własne



Rys. 7.34 Przebieg sygnału siły poprzecznej z osi prowadzącej drugiego wózka (H II), po filtracji z użyciem filtra dolnoprzepustowego 20Hz, oprac. własne



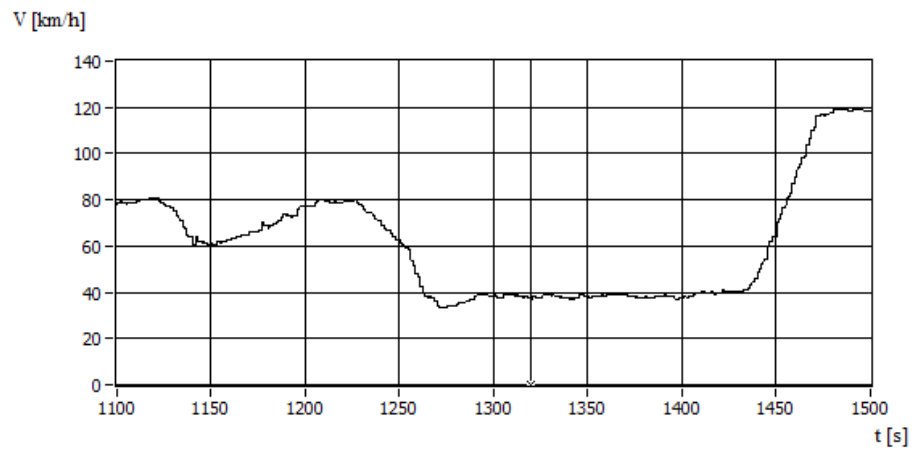
Rys. 7.35 Przebieg sygnału siły poprzecznej z tylnej osi drugiego wózka (H I), bez obróbki, oprac. własne



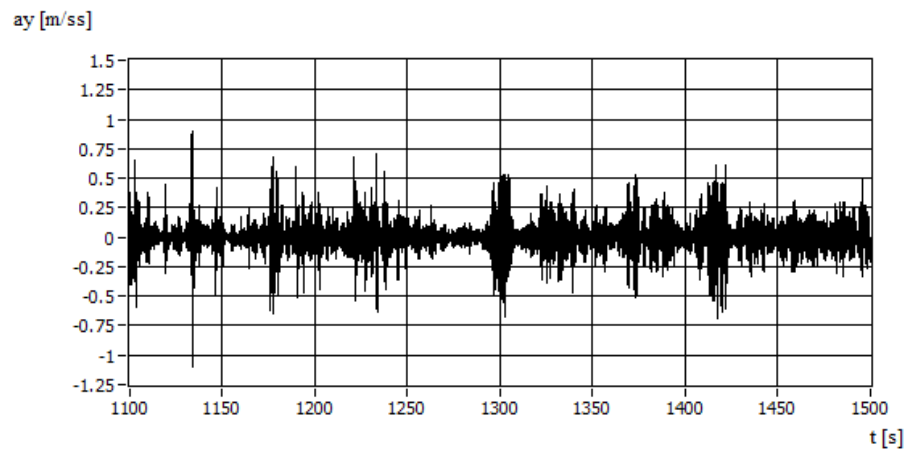
Rys. 7.36 Przebieg sygnału siły poprzecznej z tylnej osi drugiego wózka (H I), po filtracji z użyciem filtra dolnoprzepustowego 20Hz, oprac. własne

W celu dodatkowej weryfikacji jakości sygnałów otrzymywanych z prowadników zestawów kołowych, zainstalowane zostały czujniki przyspieszeń na maźnicach osi 1 oraz 2 (wyposażonej w otensometrowane prowadniki zestawów kołowych) i na pudle lokomotywy nad pierwszym wózkiem. Przy pomocy akcelerometrów zostały zarejestrowane wartości przyspieszeń poprzecznych podczas przejazdu kabiną A do przodu (oś 1 była osią prowadzącą pojazdu).

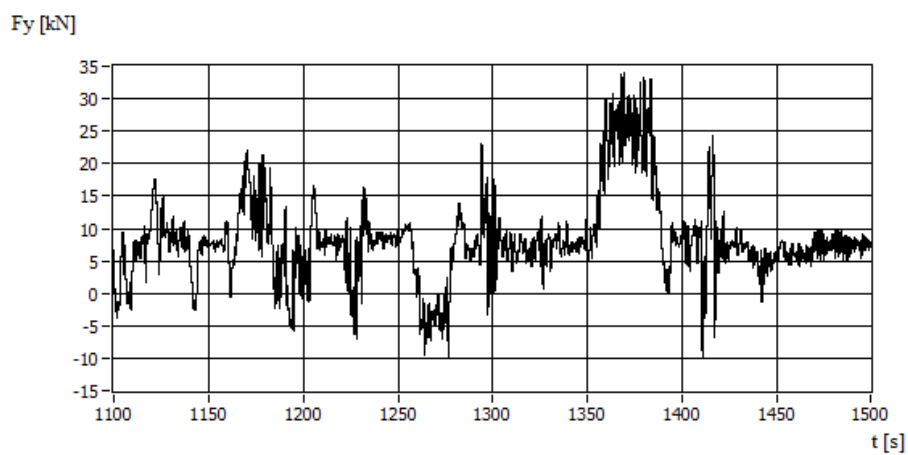
Prędkość na wykresie podana w [km/h], sygnał siły poprzecznej w [kN], przyspieszenie poprzeczne w [m/s<sup>2</sup>], czas w [s].



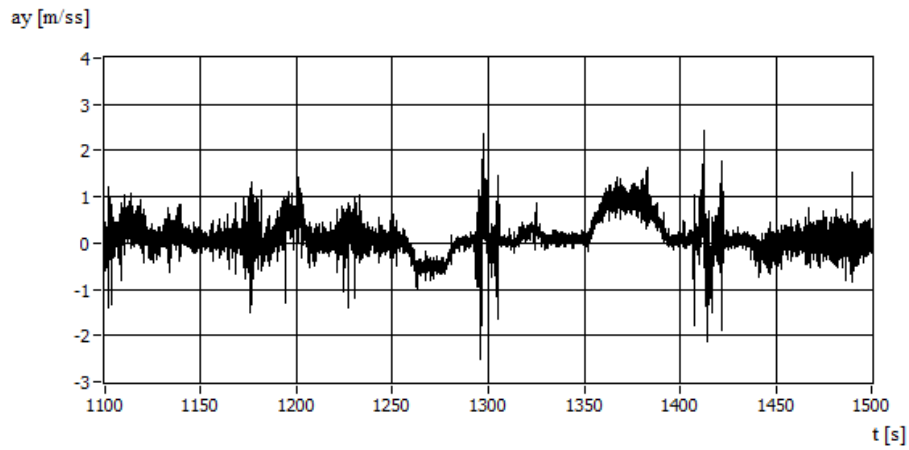
Rys. 7.37 Przebieg prędkości pojazdu na wybranym odcinku, oprac. własne



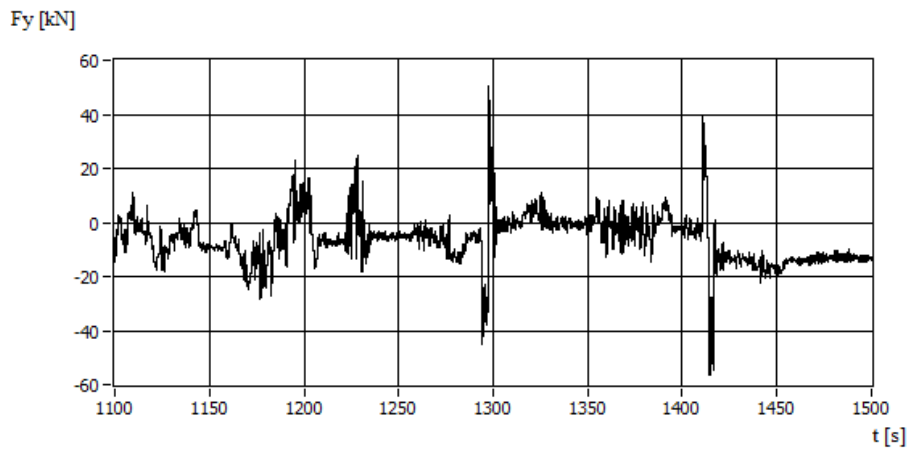
Rys. 7.38 Przebieg sygnału przyspieszenia poprzecznego pudła lokomotywy, oprac. własne



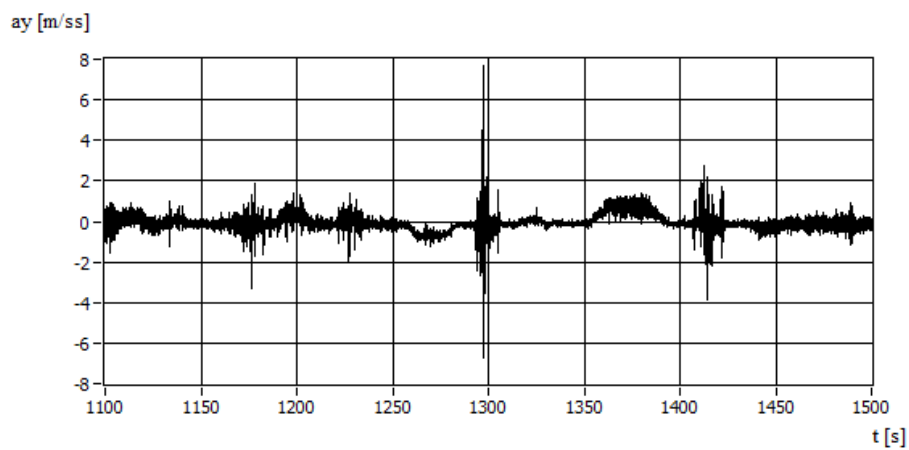
Rys. 7.39 Przebieg sygnału siły poprzecznej z osi prowadzącej wózka, oprac. własne



Rys. 7.40 Przebieg sygnału przyspieszenia poprzecznego osi prowadzącej wózka, oprac. własne

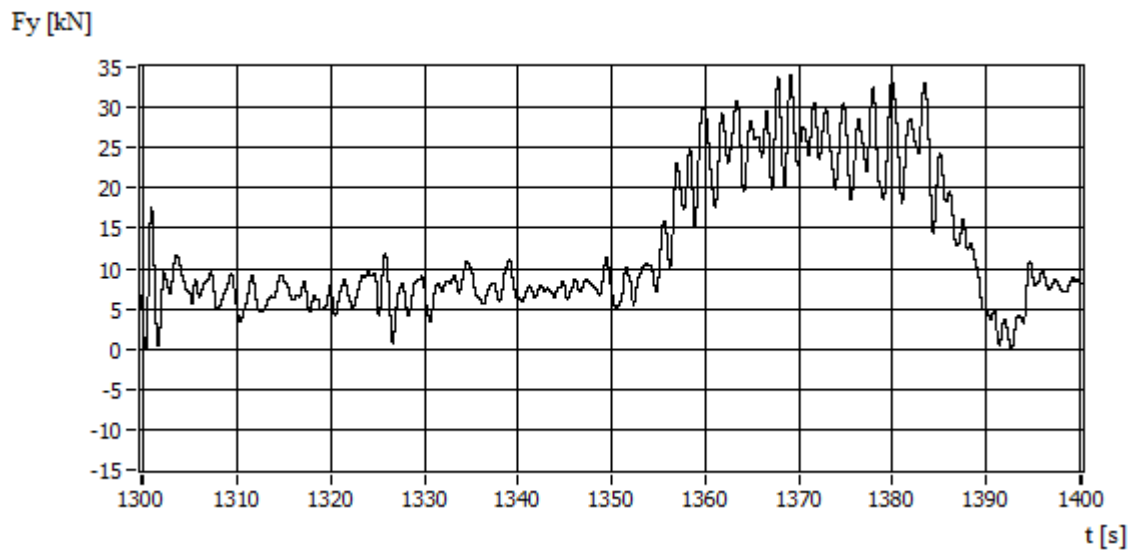


Rys. 7.41 Przebieg sygnału siły poprzecznej z drugiej osi wózka, oprac. własne

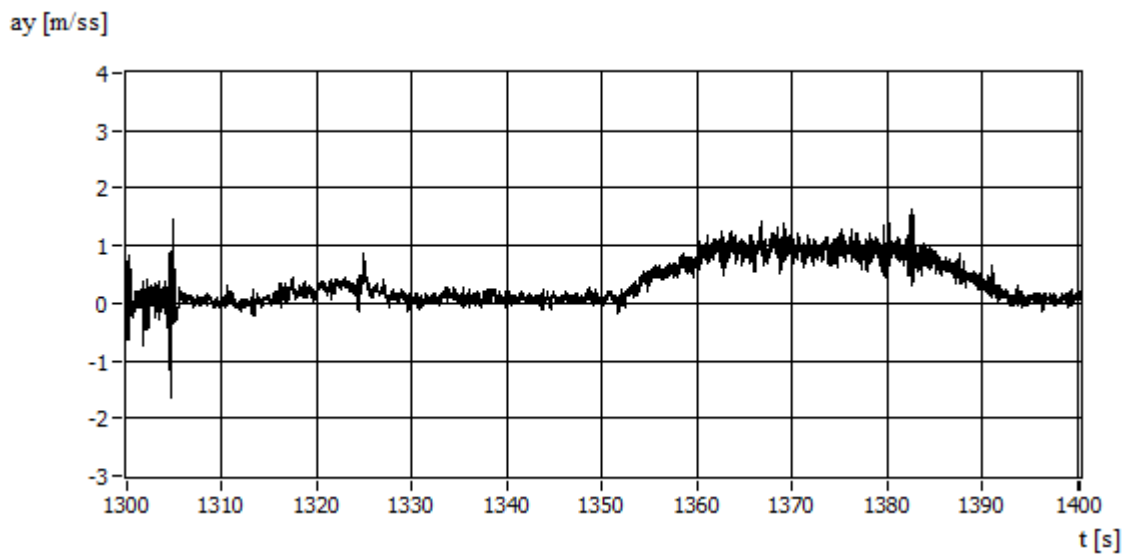


Rys. 7.42 Przebieg sygnału przyspieszenia poprzecznego drugiej osi wózka, oprac. własne

W celu dokładniejszego porównania sygnałów pochodzących z prowadnika zestawu kołowego oraz czujnika przyspieszenia, umieszczonego na maźnicy, powiększone zostały fragmenty zarejestrowanych przebiegów.



Rys. 7.43 Przebieg sygnału siły poprzecznej, oprac. własne



Rys. 7.44 Przebieg sygnału przyspieszenia poprzecznego, oprac. własne

### 7.2.5. Wnioski z badań przewodnika zestawu kołowego lokomotywy 111E

Podczas kalibracji przewodników zestawów kołowych, zauważalna była pewna rozbieżność wartości odczytanej siły, mająca charakter histerezy. Spowodowane było to metodą badania – wymuszanie siły poprzecznej działającej na zestaw kołowy kompletnego pojazdu powoduje pewną reakcję wszystkich stopni usprężynowania zawieszenia pojazdu.

Sygnały zebrane podczas jazd próbnych, zwłaszcza z osi prowadzącej lokomotywy, wydają się być bardzo dobrym źródłem sygnału dla systemu sterowania układu radialnego prowadzenia zestawów kołowych. Zauważalne są wzrosty sił poprzecznych podczas przejazdów po łukach o bardzo małych promieniach (zmniejszona jest wtedy prędkość pojazdu). Chwilowe, znacznie zwiększone wartości sił odpowiadają wjazdowi w łuk o małym promieniu lub np. na zwrotnicę ustawioną w kierunku bocznym.

W trakcie przeprowadzanych prób zauważono, iż sygnały z przewodników posiadają dość znaczne składowe o dużych częstotliwościach (ponad 10Hz). Nie ma uzasadnienia dla takich częstotliwości sygnałów użytecznych, dlatego też dokonano filtracji sygnałów wejściowych z wykorzystaniem cyfrowego filtra dolnoprzepustowego. Wybrana częstotliwość graniczna jest kompromisem pomiędzy przewidywaną szybkością działania systemu sterowania (filtracja dolnoprzepustowa pozornie opóźnia sygnał wejściowy ze względu na uśrednianie), a jakością sygnału wejściowego.

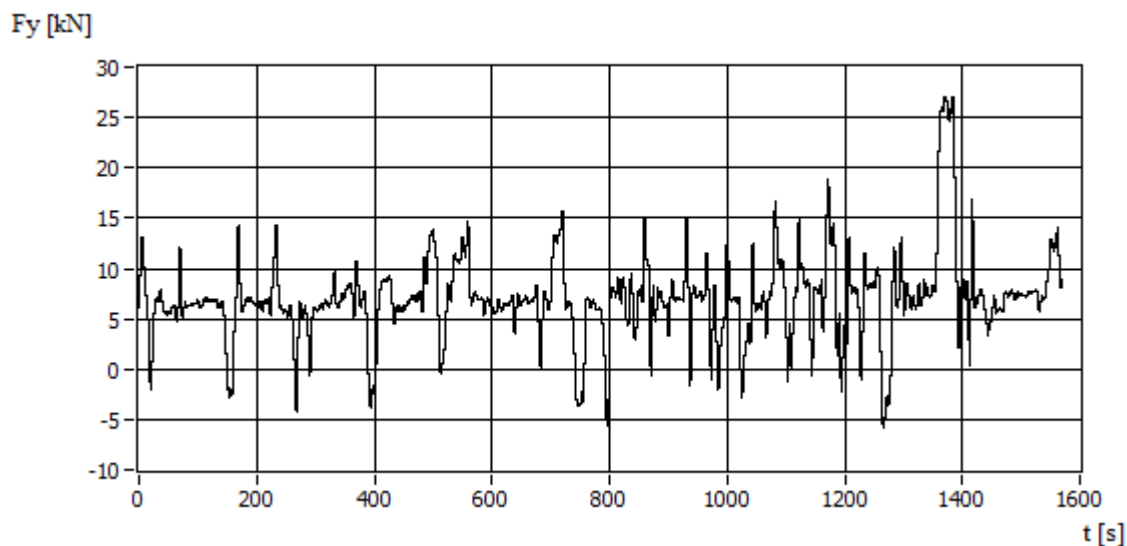
Zastosowana wartość częstotliwości granicznej filtra dolnoprzepustowego dla sygnału siły poprzecznej (łożyskowej) wynosząca 20Hz jest także podana w normie PN-EN14363 (Kolejnictwo – Badania i symulacje modelowe właściwości dynamicznych pojazdów szynowych przed dopuszczeniem do ruchu – Badania właściwości biegowych i próby stacjonarne), jako odpowiednia przetwarzania sygnału pomiarowego przy badaniach bezpieczeństwa jazdy [25].

Sygnały z przewodników posiadają pewną wartość offsetu, która nie została w pełni skompensowana mimo zastosowania korekcji programowej. Prawdopodobną przyczyną takiego zjawiska jest zastosowanie układu półmostkowego w pomiarze tensometrycznym oraz brak zewnętrznej kompensacji temperaturowej. Należy to uwzględnić w opracowywanej koncepcji układu pomiarowego.

W przypadku badań poligonowych tego typu przewodnika można sformułować wniosek, że zakłócenia pochodzące od innych obwodów pojazdu (szczególnie od energoelektronicznych obwodów mocy) mogą stanowić pewien problem, pogarszający jakość sygnałów wejściowych do systemu sterowania układu radialnego prowadzenia zestawów kołowych.



Zastosowanie dodatkowego filtra dolnoprzepustowego o częstotliwości granicznej 0,5Hz pozwala na uzyskanie praktycznie „czystego” przebiegu sygnału o sile poprzecznej, jednakże sygnał taki będzie posiadał duże opóźnienie, przez co jego przydatność do celów sterowania może być ograniczona. Z przebiegu takiego natomiast łatwo można wyznaczyć aktualną wartość offsetu sygnału pomiarowego.



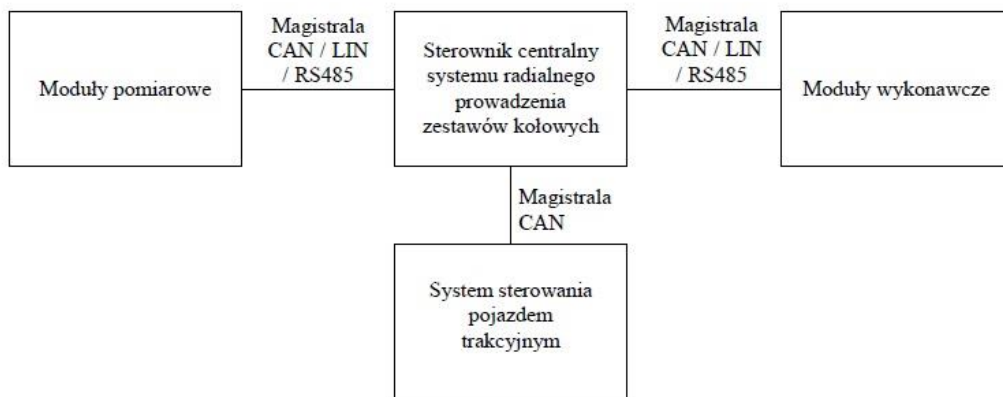
Rys. 7.45 Przebieg sygnału siły poprzecznej z osi prowadzącej (H I) – jazda kabiną A do przodu, po filtracji z użyciem filtra dolnoprzepustowego 0,5Hz, oprac. własne

Rozważyć można użycie takiego sygnału do weryfikacji sprawności układu i ewentualnej programowej kompensacji offsetu spowodowanego zmianami temperatury mostka tensometrycznego.

Zauważyć można duże podobieństwo sygnałów pochodzących z czujników przyspieszenia poprzecznego, umieszczonych na maźnicach poszczególnych osi, oraz sygnałów pochodzących z otensometrowanych przewodników zestawów kołowych. Oznacza to, że możliwe jest użycie sygnału pochodzącego z przewodników zestawów kołowych, jako informacji dla systemu sterowania radialnego prowadzenia zestawów kołowych. Sygnał przyspieszenia poprzecznego, pochodzący z akcelerometru umieszczonego na pudle pojazdu, nie niesie ze sobą informacji użytecznych jako dane wejściowe. Wykorzystany może być natomiast jako sygnał pomocniczy, w celu identyfikacji stanów awaryjnych, związanych z uszkodzeniami elementów układu biegowego, zawieszenia czy systemu sterowania radialnego prowadzenia zestawów kołowych.

## 8. Koncepcja systemu sterowania

Na podstawie przeprowadzonych prób i badań została opracowana kompletna koncepcja budowy systemu sterowania radialnego prowadzenia zestawów kołowych. Względy praktyczne wskazują, iż system powinien zawierać sterownik główny, dysponujący dużą mocą obliczeniową, natomiast elementy pomiarowe i wykonawcze powinny stanowić oddzielne, podrzędne, systemy mikroprocesorowe. Komunikacja pomiędzy sterownikiem głównym, a modułami pomiarowymi i wykonawczymi powinna odbywać się przy pomocy cyfrowej magistrali danych, odpornej na zakłócenia zewnętrzne.



Rys. 8.1 Uproszczony schemat blokowy koncepcji systemu sterowania, oprac. własne

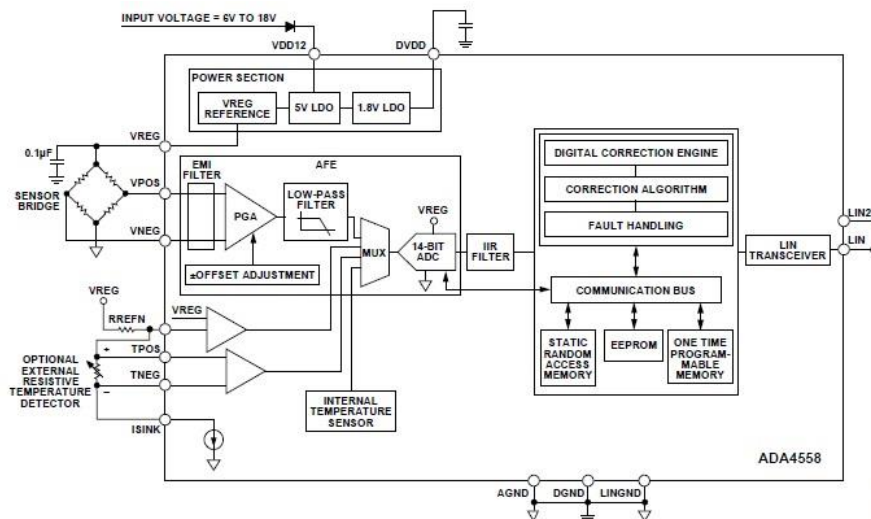
Obwód hydrauliczny systemu bazuje na obwodzie stanowiska 51SB (z uwzględnieniem „rozbicia” obwodu na poszczególne elementy składowe), ze względu na to, że skuteczność działania takiego obwodu została zweryfikowana pomyślnie podczas badań laboratoryjnych – stanowiskowych.

## **8.1. Moduł czujnika pomiarowego siły łożyskowej**

Moduł czujnika pomiarowego zapewniać ma kondycjonowanie sygnału wejściowego, pochodzącego z otensometrowanego przewodnika zestawu kołowego. Bazując na wcześniejszych badaniach, moduł ten wyposażony powinien być również w czujnik temperatury, umożliwiający kompensację temperaturą mostka tensometrycznego. Ze względu na możliwy wysoki poziom zakłóceń zewnętrznych, moduł ten powinien być zabudowany bezpośrednio w przewodniku zestawu kołowego (co jest możliwe w przewodniku przedstawionym na rys. 7.3). W przypadku niemożności zastosowania takiego rozwiązania, moduł powinien być zabudowany w bardzo małej odległości od otensometrowanego przewodnika, w obudowie odpornej na warunki zewnętrzne [28], przymocowanej do ramy wózka lub pudła pojazdu. Należy również pamiętać o konieczności spełnienia właściwych norm, które określają wymagany stopień odporności na poziom wibracji i uderów mechanicznych [29], a także na zewnętrzne źródła promieniowania elektromagnetycznego [26, 27, 29].

### **8.1.1. Budowa sprzętowa**

Przyjmując założenie o zabudowie modułu pomiarowego wewnątrz przewodnika zestawu kołowego, wymiary modułu czujnika są bardzo ograniczone. Zasadne wydaje się więc zastosowanie specjalizowanego układu scalonego, integrującego w swojej strukturze większość wymaganych funkcjonalności. Dobrym przykładem jest układ scalony ADA4558, stanowiący kompletny system pomiarowy, dedykowany do obsługi układów tensometrycznych. [30, 31]



Rys. 8.2 Budowa wewnętrzna układu ADA4558 [30]

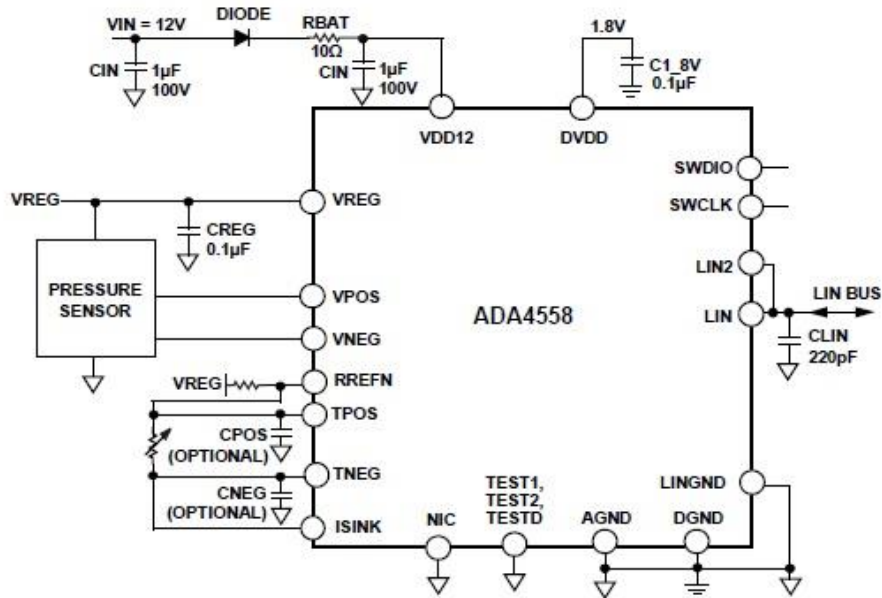
Powyższy układ scalony zawiera w swojej strukturze kompletny analogowy tor pomiarowy, przystosowany do współpracy z mostkiem tensometrycznym oraz opcjonalnym zewnętrznym czujnikiem temperatury (układ również zawiera wewnętrzny czujnik temperatury).

Część cyfrowego przetwarzania danych zawiera przetwornik analogowo/cyfrowy, regulowany filtr cyfrowy typu IIR oraz mikrokontroler.

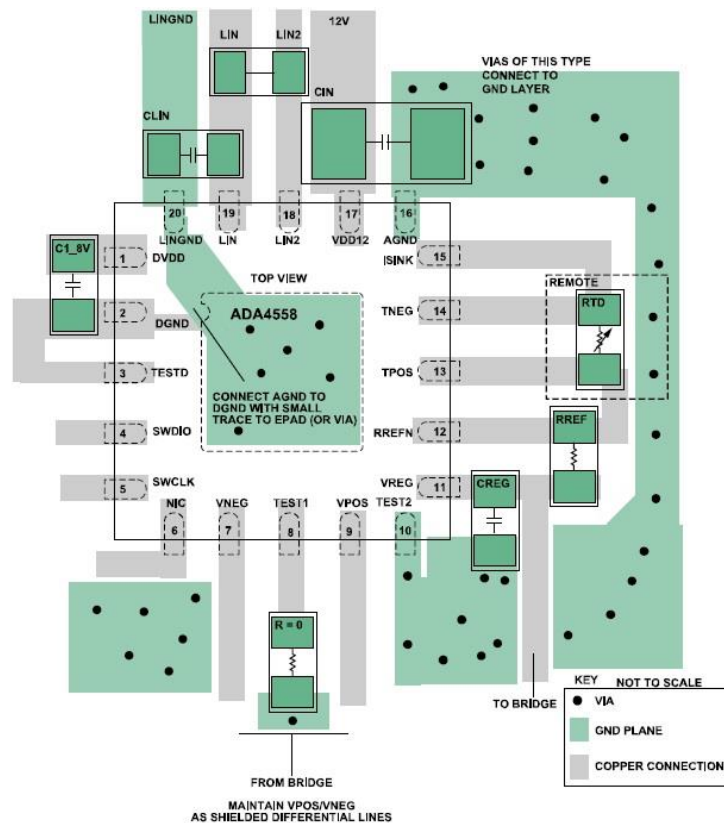
Układ zawiera w swojej strukturze sekcję zasilania, zapewniającą generację niezbędnych do działania napięć, przy zasilaniu zewnętrznym w zakresie 6-12V.

Komunikacja z systemem nadrzędnym zapewniona jest w standardzie LIN (Local Interconnect Network), z wykorzystaniem wewnętrznego interfejsu tej magistrali.

Wszystkie te czynniki stanowią, że do poprawnej pracy wymagana jest minimalna liczba elementów zewnętrznych.



Rys. 8.3 Typowa aplikacja układu ADA4558 [31]

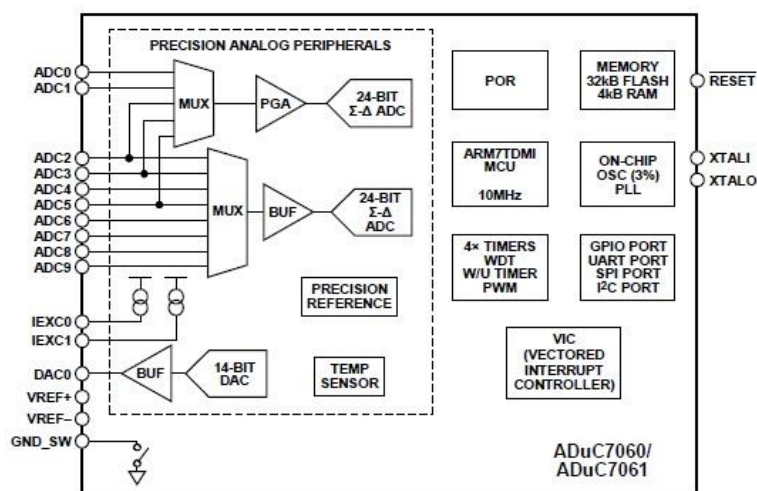


Rys. 8.4 Przykład płytki drukowanej z układem ADA4558 [31]

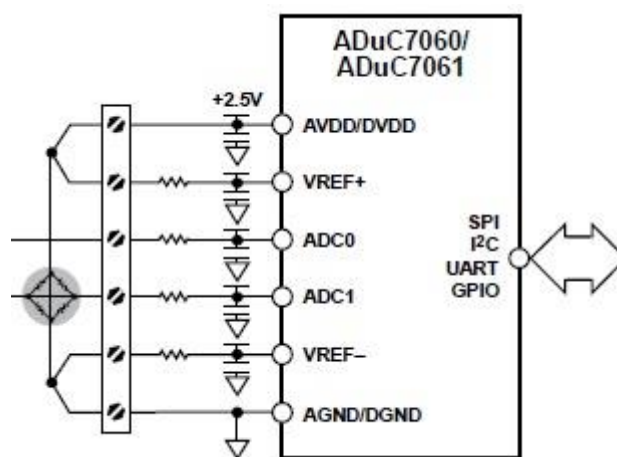
Sam układ scalony ma gabaryty 4mm x 4mm, tak więc kompletny system można zbudować na płycie drukowanej (PCB), nie przekraczającej wymiarami 10mm x 10mm.

W przypadku, gdy powyższy układ nie spełni oczekiwań (choćby ze względu na ograniczone możliwości konfiguracji przez system nadrzędny, lub też ze względu na konieczność zastosowania szybszej lub/i bardziej odpornej na zakłócenia magistrali), możliwe jest zastosowanie układu z typowym mikrokontrolerem, wyposażonym w precyzyjny tor pomiarowy.

Przykładem możliwego do zastosowania mikrokontrolera jest ADuC7061, którego budowa wewnętrzna została przedstawiona poniżej.



Rys. 8.5 Budowa wewnętrzna mikrokontrolera ADuC7061 [33]



Rys. 8.6 Typowa aplikacja układu ADuC7061 [33]

Mikrokontroler ten umożliwia bezpośrednie podłączenie mostka tensometrycznego, co również minimalizuje liczbę niezbędnych komponentów zewnętrznych [33]. W przypadku zastosowania modułu z wykorzystaniem takiego mikrokontrolera, konieczne jest rozbudowanie układu o sekcję zasilania oraz interfejs komunikacyjny.

### 8.1.2. Algorytm działania

Oprogramowanie czujnika pomiarowego powinno zawierać następujące funkcje:

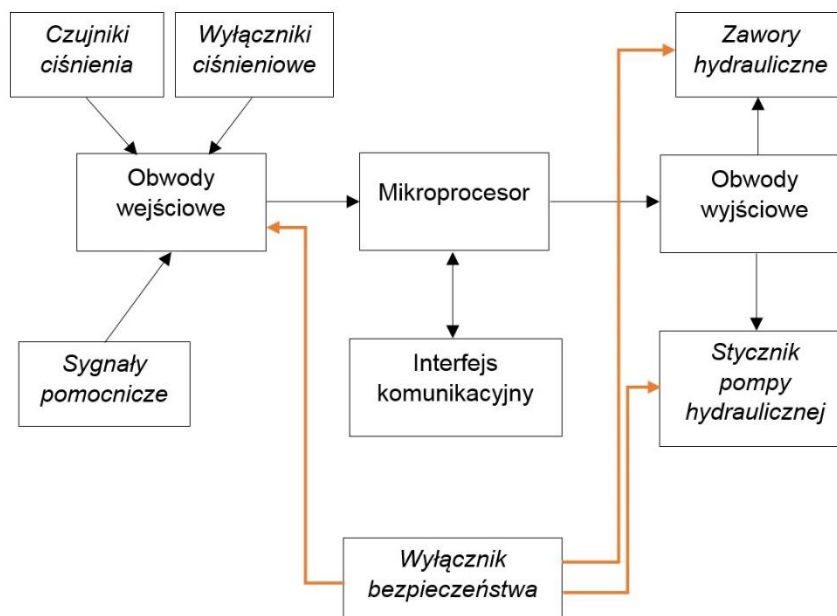
- Diagnostyka obwodu pomiarowego  
Funkcja ta jest wywoływana cyklicznie, w każdym obiegu pętli programowej. Umożliwia kontrolę poprawności podłączenia i działania układu mostka tensometrycznego oraz zewnętrznego czujnika temperatury
- Obliczenie wartości siły łożyskowej  
Funkcja wywoływana cyklicznie, w każdym obiegu pętli programowej. Dane odczytane z mostka tensometrycznego zostają poddane filtracji, z wykorzystaniem algorytmu filtracji cyfrowej FIR lub IIR. Następnie, na podstawie przefiltrowanych danych oraz informacji uzyskanej z czujnika temperatury, zostaje obliczona wartość siły łożyskowej, z wykorzystaniem współczynników korekcyjnych, zachowanych w pamięci nieulotnej modułu czujnika.
- Komunikacja z systemem nadrzędnym  
Funkcja wywoływana cyklicznie, w każdym obiegu pętli programowej. Obliczone wartości siły, temperatury, a także inne dane diagnostyczne, takie jak status czujnika, są przesyłane po magistrali komunikacyjnej do systemu nadrzędnego. Dodatkowo, funkcja umożliwia także przyjmowanie rozkazów od systemu nadrzędnego.
- Tryb diagnostyczny/kalibracji  
Funkcja wywoływana wyłącznie na żądanie systemu nadrzędnego. Po wywołaniu moduł pozostaje w tym stanie, do momentu wysłania przez system nadrzędny rozkazu o powrocie do trybu pracy. Funkcja ta umożliwia pracę modułu w trybie kalibracji, co daje możliwość wycechowania mostka tensometrycznego, a także określenie innych parametrów pracy, takich jak wartość częstotliwości granicznej filtru cyfrowego. Dane te są zapisywane w pamięci nieulotnej modułu. W trybie tym możliwe jest także sprawdzenie poprawności działania wszystkich elementów modułu.

## 8.2. Moduł wykonawczy sterownika obwodu zasilania hydraulicznego

Sterownik ma za zadanie kontrolować ciśnienie w obwodzie akumulatora hydraulicznego, a w razie konieczności uruchamiać pompę hydrauliczną. Powinien być zabudowany bezpośrednio przy zespole zasilania hydraulicznego, składającego się z pompy hydraulicznej, akumulatora hydraulicznego, czujnika ciśnienia, wyłącznika ciśnieniowego i niezbędnych zaworów.

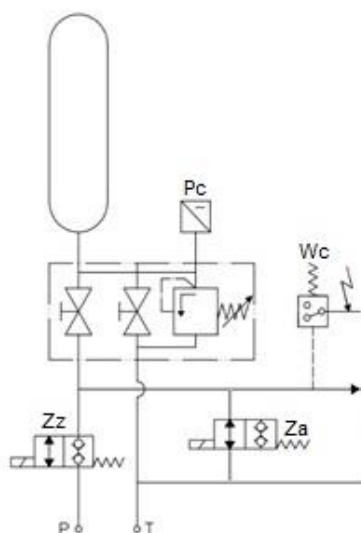
### 8.2.1. Budowa sprzętowa

Moduł powinien stanowić mały, niezależny system mikroprocesorowy, komunikujący się z systemem nadrzędnym za pośrednictwem odpornej na zakłócenia magistrali danych. Sygnałami wejściowymi dla modułu są: sygnał o wartości ciśnienia w akumulatorze hydraulicznym, sygnały sprzętowe z wyłączników ciśnieniowych, sygnały pomocnicze (np. o obecności napięcia w obwodzie zasilania elektrycznego zespołu pompy hydraulicznej) oraz sygnał sprzętowy z wyłącznika bezpieczeństwa systemu. Sygnałami wyjściowymi są wyjścia sterujące zaworami zespołu zasilania hydraulicznego. Sygnał z wyłącznika bezpieczeństwa dodatkowo, sprzętowo, umożliwia realizację funkcji zatrzymania awaryjnego.



Rys. 8.7 Schemat blokowy modułu sterownika pompy z obwodami współpracującymi, oprac. własne





Rys. 8.8 Schemat obwodu hydraulicznego modułu zasilania hydraulicznego, oprac. własne na podst. [13]

(Pc – przetwornik ciśnienia, Wc – wyłącznik ciśnieniowy, Zz – zawór zasilania, Za – zawór awaryjny)

### 8.2.2. Algorytm działania

Oprogramowanie modułu sterownika powinno zawierać następujące funkcje:

- Diagnostyka czujników

Funkcja wywoływana cyklicznie, w każdym obiegu pętli programowej. Kontroluje poprawność wskazań z analogowych czujników ciśnienia (zakres sygnału prądowego 4-20mA), a także weryfikuje poprawność ich wskazań poprzez porównanie wskazań analogowego czujnika ciśnienia i wyłączników ciśnieniowych.

- Utrzymanie właściwego poziomu ciśnienia w akumulatorze hydraulicznym

Funkcja wywoływana cyklicznie, w każdym obiegu pętli programowej. Moduł kontroluje wartość ciśnienia hydraulicznego w akumulatorze hydraulicznym, na podstawie danych otrzymanych z czujnika ciśnienia (Pc). W razie awarii czujnika ciśnienia sterowanie odbywa się z wykorzystaniem sprzętowych wyłączników ciśnieniowych (Wc). W przypadku zbyt niskiego ciśnienia funkcja zapewnia wysterowanie wyjścia odpowiadającego za załączenie pompy hydraulicznej i załączenie zaworu zasilającego akumulator (Zz). Sterowanie pompą hydrauliczną odbywa się z niezbędną wartością histerezy ciśnień.

- **Zatrzymanie awaryjne**

Funkcja wywoływana przez aktywację wejścia sprzętowego lub rozkaz otrzymany z nadrzędnego systemu sterowania. Wywołanie tej funkcji zatrzymuje pracę sterownika obwodu wykonawczego. Powrót to stanu pracy możliwy jest po usunięciu awarii i zresetowaniu całego systemu. Bezwarunkowo zatrzymywana jest praca pompy hydraulicznej, odcięte zostaje zasilanie obwodu (zawór Zz – wyłączony). Dodatkowo poprzez otwarcie odpowiednich zaworów hydraulicznych w obwodzie (zawór Za – otwarty) akumulator hydrauliczny zostaje rozładowany. Funkcja ta dubluje analogiczną funkcję, realizowaną na drodze sprzętowej.

- **Komunikacja z systemem nadrzędnym**

Funkcja wywoływana cyklicznie, w każdym obiegu pętli programowej. Wartość ciśnienia w akumulatorze, stan pompy, a także inne dane diagnostyczne, takie jak status całego obwodu, są przesyłane po magistrali komunikacyjnej do systemu nadrzędnego. Dodatkowo, funkcja umożliwia także przyjmowanie rozkazów od systemu nadrzędnego.

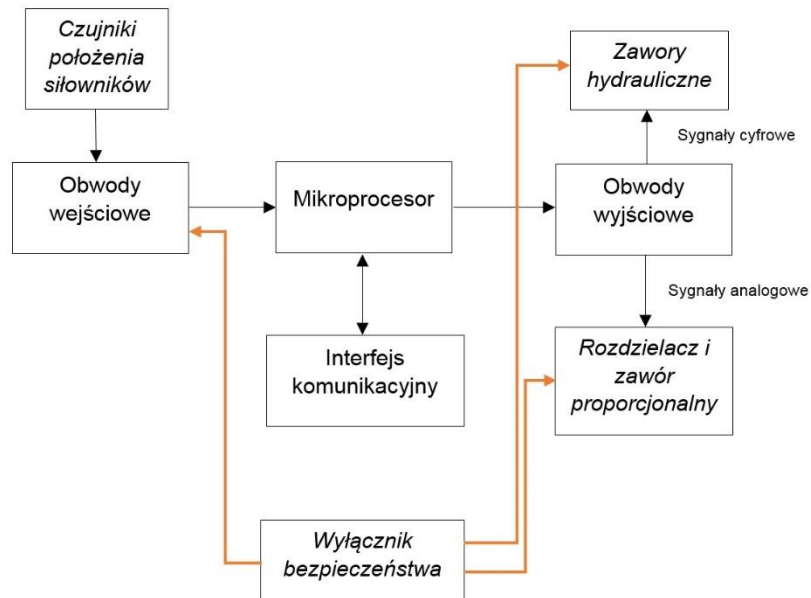
### **8.3. Moduł wykonawczy sterownika siłowników hydraulicznych**

Moduł ten ma za zadanie wysterować parę siłowników hydraulicznych, wraz z zapewnieniem kontroli ich położenia. Sterownik umożliwia pracę pary siłowników jako układu wspomagającego obrót wózka lub jako układ tłumika. Wyboru trybu pracy dokonuje system nadrzędny.

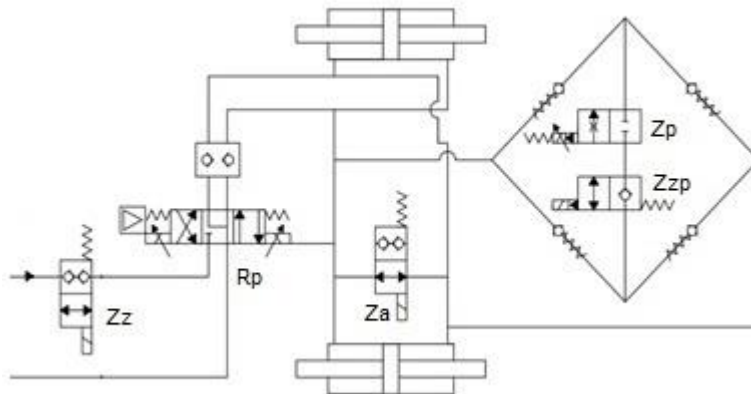
#### **8.3.1. Budowa sprzętowa**

Moduł powinien stanowić mały, niezależny system mikroprocesorowy, komunikujący się z systemem nadrzędnym za pośrednictwem odpornej na zakłócenia magistrali danych. Sygnałami wejściowymi dla modułów są sygnały z czujników położenia siłowników (sygnał liniowy - analogowy, informujący o wartości wysunięcia tłoczyska siłownika oraz sygnały cyfrowe, informujące o osiągnięciu punktów skrajnych oraz położenia środkowego), oraz sygnał sprzętowy z wyłącznika bezpieczeństwa. Sygnałami wyjściowymi są sygnały cyfrowe, sterujące zaworami hydraulicznymi, przełączającymi tryby pracy i zapewniającymi zasilanie hydrauliczne oraz sygnały analogowe, umożliwiające sterowanie rozdzielaczem proporcjonalnym (praca obwodu jako wspomaganie obrotu wózka) oraz zaworem

proporcjonalnym (praca obwodu jako aktywny tłumik). Sygnał z wyłącznika bezpieczeństwa dodatkowo, sprzętowo, umożliwia realizację funkcji wyłączenia obwodu sterowania.



Rys. 8.9 Schemat blokowy modułu sterowania siłownikami z obwodami współpracującymi, oprac. własne



Rys. 8.10 Schemat obwodu hydraulicznego modułu sterowania siłownikami, oprac. własne na podst. [13]

(Zz – zawór zasilania, Rp – rozdzielacz proporcjonalny,  
Za – zawór awaryjny, Zp – zawór proporcjonalny,  
Zzp – zawór odcinający zawór proporcjonalny)

### 8.3.2. Algorytm działania

- Diagnostyka czujników położenia  
Funkcja wywoływana cyklicznie, w każdym obiegu pętli programowej. Kontroluje poprawność wskazań z czujników położenia, a także weryfikuje poprawność ich wskazań poprzez wzajemne porównanie ich wskazań, a także porównanie wskazań z wyłącznikami informującymi o położeniu „zerowym” i położeniach skrajnych.
- Wybór trybu pracy modułu  
Funkcja wywoływana cyklicznie, w każdym obiegu pętli programowej. Zapewnia odpowiednią konfigurację modułu, aby umożliwić realizację pracy w trybie aktywnego tłumika lub układu wspomagania obrotu wózka. Zmiana trybu pracy odbywa się na podstawie sygnału sterującego otrzymanego z systemu nadrzędnego. W przypadku braku komunikacji moduł realizuje tryb „bezpieczny”, tj. wyłącza zawór hydrauliczny (zawór Za - normalnie otwarty), który umożliwia bezpośrednie zamknięcie obwodu siłowników, co powoduje swobodny przepływ cieczy hydraulicznej.
- Wyłączenie awaryjne  
Funkcja wywoływana przez aktywację wejścia sprzętowego lub rozkaz otrzymany z nadrzędnego systemu sterowania. Wywołanie tej funkcji skutkuje załączeniem trybu „bezpiecznego” w module. Funkcja ta dubluje analogiczną funkcję, realizowaną na drodze sprzętowej.
- Praca jako tłumik  
Funkcja aktywowana w każdym obiegu pętli programowej, pod warunkiem pracy modułu w tym trybie. Na podstawie wartości otrzymywanych od systemu nadrzędnego, możliwy jest regulowany przepływ cieczy hydraulicznej pomiędzy siłownikami. Wykorzystany jest do tego obwód zaworu proporcjonalnego (zawór odcinający Zzp oraz zawór proporcjonalny Zp).
- Praca jako układ obrotu wózka  
Funkcja aktywowana w każdym obiegu pętli programowej, pod warunkiem pracy modułu w tym trybie. Na podstawie wartości otrzymywanych od systemu nadrzędnego, realizowany jest określony obrót wózka o wskazany kąt. Funkcja pracuje z wykorzystaniem zaimplementowanego algorytmu regulatora PID, wykorzystując sygnał analogowy o aktualnym położeniu siłowników hydraulicznych. W zależności od zapotrzebowania, do obrotu wózka wysterowany

jest obwód rozdzielacza proporcjonalnego ( $R_p$ ) lub rozdzielacza i zaworu proporcjonalnego ( $R_p, Z_p, Z_{zp}$ ). Sterowanie odbywa się przy załączonym zaworze zasilającym obwód (zawór  $Z_z$ ).

- Komunikacja z systemem nadrzędnym

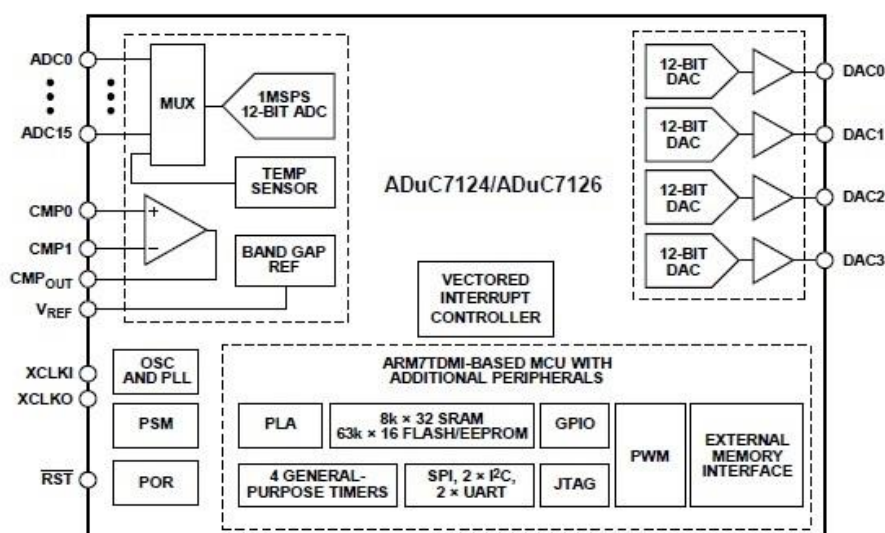
Funkcja wywoływana cyklicznie, w każdym obiegu pętli programowej. Sterownik otrzymuje od systemu nadrzędnego informacje niezbędne do pracy (tryb pracy, wartość przepływu/przesunięcia siłowników). Do systemu nadrzędnego przesyłane są dane o położeniu siłowników, a także inne dane diagnostyczne, takie jak status całego obwodu.

## 8.4. Sterownik centralny

Sterownik centralny pełni rolę systemu nadrzędnego dla modułów czujników oraz modułów wykonawczych. Komunikuje się z nimi za pośrednictwem magistrali danych, nadzoruje ich pracę, realizując jednocześnie algorytm sterujący całym systemem sterowania układu radialnego prowadzenia zestawów kołowych.

### 8.4.1. Budowa sprzętowa

Sterownik centralny wyposażony jest w mikrokontroler ADuC7126 firmy Analog Devices.

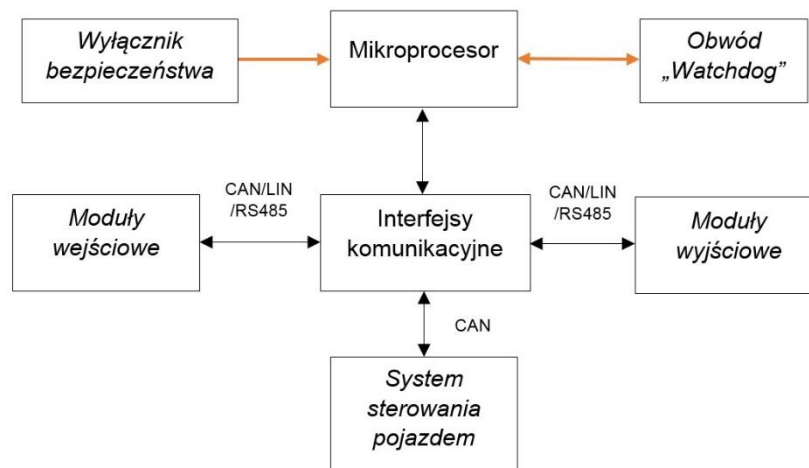


Rys. 8.11 Budowa wewnętrzna mikrokontrolera ADuC7126 [34]

Jest to mikrokontroler 32-bitowy należący do rodziny procesorów ARM, z rdzeniem typu ARM7TDMI. Wyposażony jest w 126 kB pamięci FLASH/EEPROM oraz 32 kB pamięci

SRAM, moc obliczeniowa sięga 41 MIPS (milionów instrukcji na sekundę) [34]. Taka konfiguracja zapewnia wystarczającą moc obliczeniową dla systemu sterowania, jednocześnie umożliwiając podłączenie zewnętrznych modułów za pośrednictwem interfejsów komunikacyjnych.

Konieczne wydaje się wyposażenie sterownika centralnego w dodatkowy, niezależny obwód nadzorujący („Watchdog”). Obwód ten ma za zadanie natychmiastowe zatrzymanie pracy całego systemu w przypadku „zawieszenia się” programu, czy innej usterki powodującej brak reakcji procesora. Należy podkreślić, że obwód taki (timer „Watchdog”) jest również zaimplementowany wewnątrz procesora, jednakże zastosowanie niezależnego obwodu realizującego również tą funkcję znacznie zwiększa bezpieczeństwo pracy systemu sterowania.



Rys. 8.12 Schemat blokowy modułu centralnego, wraz z elementami współpracującymi, oprac. własne

Interfejsy komunikacyjne w module centralnym powinny posiadać separację galwaniczną, zapewniając ochronę sterownika i poszczególnych elementów systemu przed uszkodzeniem.

#### **8.4.2. Sygnały wejściowe**

Sterownik centralny wykorzystywać będzie następujące sygnały wejściowe w swoim algorytmie pracy:

- Sygnały pochodzące z systemu sterowania pojazdu:
  - Żądanie załączenia systemu sterowania układu radialnego prowadzenia zestawów kołowych
  - Prędkość pojazdu
  - Kierunek jazdy
- Sygnały pochodzące z modułów czujników siły łożyskowej
  - Wartość siły łożyskowej z poszczególnych prowadników
  - Stan modułu (sprawność, usterki)
- Sygnały pochodzące z modułu sterowania zasilaniem hydraulicznym
  - Gotowość systemu do pracy
  - Stan modułu (sprawność, usterki)
- Sygnały pochodzące z modułów sterowania siłownikami
  - Położenie siłowników
  - Stan modułu (sprawność, usterki)
- Sygnały dodatkowe
  - Sygnał z wyłącznika bezpieczeństwa

#### **8.4.3. Sygnały wyjściowe**

Sterownik centralny wypracowywać będzie następujące sygnały:

- Sygnały do systemu sterowania pojazdem
  - Sygnały diagnostyczne (sprawność, usterki, aktualny tryb pracy)
  - Sygnał o zadziałaniu wyłącznika bezpieczeństwa / nagłej awarii systemu
- Sygnały do modułów sterowania siłownikami
  - Sygnał o trybie pracy
  - Sygnał o wartości przepływu lub przesunięciu siłownika
  - Sygnał o zadziałaniu wyłącznika bezpieczeństwa / nagłej awarii systemu
- Sygnały do modułu sterowania zasilaniem hydraulicznym
  - Sygnał o zadziałaniu wyłącznika bezpieczeństwa / nagłej awarii systemu

#### 8.4.4. Algorytm działania

Algorytm działania sterownika głównego można podzielić na kilka funkcji.

- Funkcja nadzorująca

Funkcja wywoływana jest w każdym obiegu pętli programu, cyklicznie. Zapewniona zostaje weryfikacja poprawności komunikacji z poszczególnymi modułami zewnętrznymi. W przypadku niesprawności danego modułu (brak komunikacji lub zgłoszenie przez moduł usterki) system podejmuje decyzję o przejściu w tryb ograniczonej funkcjonalności lub o całkowitym zawieszeniu/wyłączeniu pracy. Funkcja ta również zapewnia obsługę wyłącznika bezpieczeństwa – po zadziałaniu wyłącznika zawieszana jest praca głównego algorytmu, a informacja o tym jest wysłana do wszystkich modułów wykonawczych. Dodatkowo – w ramach tej funkcji obsługiwany jest wewnętrzny i zewnętrzny układ nadzorujący „watchdog”. Polega to na cyklicznym generowaniu sygnału, kasującego liczniki układów nadzorujących. W przypadku, gdy licznik taki nie zostanie skasowany, generuje sygnał resetu (restartu) procesora. Program rozpoznaje przyczynę restartu i w takim przypadku wstrzymuje dalszą pracę systemu, generując informację o zadziałaniu obwodu nadzorującego.

- Funkcja wyboru trybu pracy

Funkcja wywoływana jest w każdym obiegu pętli programu, cyklicznie. W przypadku sprawności całego systemu sprawdzane są warunki dla wystąpienia jednego z trybów pracy systemu.

- W przypadku, gdy położenie siłowników hydraulicznych jest w położeniu bliskim ich punktu zerowego (środkowym), uśrednione wartości sił łożyskowych dla danego wózka i różnica sił z prowadników pochodzących z obu stron prowadników na samej osi są poniżej określonej granicy, to system sterowania pracuje w trybie aktywnego tłumika wężykowania,
- W przypadku nie spełnienia któregokolwiek z powyższych warunków powoduje przełączenie pracy systemu na tryb aktywnego wspomaganie obrotu wózków.

Funkcja zapewnia też niezbędną filtrację i uśrednianie sygnałów, aby krótkie zakłócenia pochodzące od przyczyn zewnętrznych (nierówności, wybożenia toru) nie powodowały niepotrzebnych zmian trybu pracy systemu.



W przypadku niesprawności systemu, nie jest wykonywany dalszy algorytm sterowania, a cały system jest ustawiany w stan „bezpieczny”.

- Funkcja pracy jako aktywny tłumik wężykowania

Funkcja jest wywoływana cyklicznie, w każdym obiegu pętli, wyłącznie gdy system sterowania jest w tym trybie pracy. Informacja o tym trybie pracy jest przesyłana do modułów wykonawczych. Dla uzyskania pożądanej charakterystyki tłumienia obwodu wykorzystywany jest sygnał o prędkości pojazdu. Zastosowane zostanie sterowanie rozmyte, tj. sygnał o prędkości pojazdu jest porównywany z określonymi przedziałami prędkości, zapisanymi w sterowniku (z uwzględnieniem odpowiedniej histerezy). W zależności od przedziału prędkości, w którym pojazd się znajduje, do modułów wykonawczych zostaje przesłana określona wartość przepływu, definiująca stopień otwarcia zaworu proporcjonalnego. Takie rozwiązanie daje możliwość sterowania obwodem tłumiącym w stosunkowo prosty sposób, bez konieczności wykonywania skomplikowanych obliczeń zmiennoprzecinkowych w procesorze.

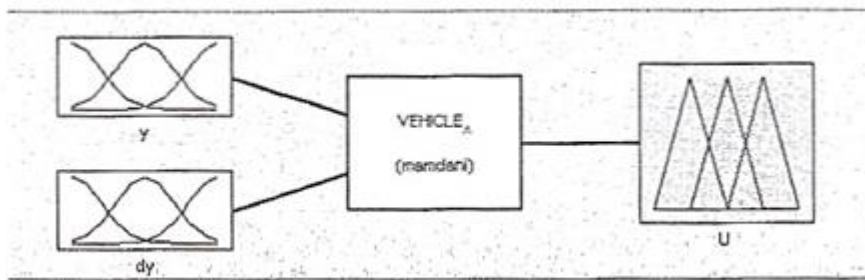
Możliwe jest także wykorzystywanie informacji o przemieszczeniu siłowników (pracujących jako tłumiki) do implementacji dodatkowego algorytmu o działaniu ciągłym (na przykład PID), sterującego przepływem, jednakże nie wydaje się konieczne tak precyzyjne sterowanie.

- Funkcja pracy jako system aktywnego wspomaganie obrotu wózków

Funkcja jest wywoływana cyklicznie, w każdym obiegu pętli, wyłącznie gdy system sterowania jest w tym trybie pracy. Informacja o tym trybie pracy jest przesyłana do modułów wykonawczych. Jako podstawowe sygnały wejściowe wykorzystywane są sygnały o wartościach siły łożyskowej otrzymywane z prowadników zestawów kołowych oraz, pomocniczo, sygnały o prędkości i kierunku jazdy pociągu. Również w tym przypadku zasadne wydaje się zastosowanie regulatora rozmytego, zbudowanego z wykorzystaniem pewnych sformalizowanych metod syntezy regulatora analitycznego opracowanych przez MacVicar'a Whelan'a. Regulator taki wykorzystuje macierz, która umożliwia stworzenie zestawu reguł dla systemu sterowania. [2]

Reguły mają postać „Jeżeli  $a = X$  oraz  $b = Y$ , to  $c = Z$ ”,

Gdzie  $a$  oraz  $b$  są zmiennymi wejściowymi macierzy,  $X$  oraz  $Y$  definiują przedziały, w których te zmienne się znajdują,  $c$  jest zmienną wyjściową, a  $Z$  wartością, jaką przyjmuje w danym przypadku zmienna  $c$ .



Rys. 8.13 Ogólna struktura regulatora rozmytego [2]

W przypadku systemu sterowania danymi wejściowymi będą:

- różnica wartości sił łożyskowych  $F_R = (F_L - F_P)$
- zmiana różnicy wartości sił łożyskowych  $dF_R = d(F_L - F_P)$

Przykładowa macierz regulatora rozmytego dla takiego systemu ma postać:

Tab. 8.1 Przykładowa macierz regulatora, oprac. własne na podst. [2]

$dF_R \setminus F_R$	LP	MP	MMP	ZP	ZN	MMN	MN	LN
LP	LN	LN	LN	LN	LN	MN	MMP	ZN
MP	LN	LN	MN	MN	MN	MMN	ZN	MMP
MMP	LN	MN	MMN	MMN	MMN	ZN	MMP	MP
ZP	LN	MN	MMN	ZN	ZP	MMP	MP	LP
ZN	LN	MN	MMN	ZN	ZP	MMP	MP	LP
MMN	MN	MMN	ZP	MMP	MMP	MMP	MP	LP
MN	MMN	ZP	MMP	MP	MP	MP	LP	LP
LN	ZP	MP	MP	LP	LP	LP	LP	LP

Gdzie, oznaczenia symboli - zakresów:

- LN – large negative (duży ujemny)
- MN – medium negative (średni ujemny)
- MMN – small negative (mały ujemny)
- ZN – zero negative („zero ujemne”)
- ZP – zero positive („zero dodatnie”)
- MMP – small positive (małe dodatni)
- MP – medium positive (średnie dodatni)
- LP – large positive (duże dodatni)

Dzięki podzieleniu wartości różnicy sił łożyskowych na zakresy, możliwe jest zoptymalizowanie pracy modułów wykonawczych do pracy z konkretnymi wartościami przesunięcia (obrotu) wózka. Wartości te są wysyłane przez sterownik centralny, bezpośrednio po określeniu spodziewanej wartości obrotu wózka. Możliwe jest stworzenie całej rodziny takich macierzy, uwzględniających zakresy prędkości pojazdu, lub też możliwa jest modyfikacja wartości parametrów wyjściowych w zależności od prędkości pojazdu. Oba te rozwiązania umożliwiają zwiększenie precyzji działania systemu sterowania.

- Funkcja komunikacji z modułami

Funkcja wywoływana cyklicznie, w każdym obiegu pętli programowej. Sterownik zapisuje w strukturach dane otrzymane od modułów podrzędnych, na ich podstawie wykonuje funkcje algorytmu pracy. Po ich wykonaniu zapisuje dane wyjściowe do struktur dla modułów podrzędnych i zapewnia ich wysyłkę.

- Funkcja komunikacji z systemem sterowania pojazdem

Funkcja wywoływana cyklicznie, w każdym obiegu pętli programowej. Sterownik zapisuje w strukturach dane otrzymane sterownika pojazdu, z ich wykorzystaniem wykonuje funkcje algorytmu pracy. Po ich wykonaniu zapisuje dane o stanie pracy i diagnostyczne do struktury i zapewnia jej wysyłkę.

## 9. Podsumowanie

### 9.1. Wnioski

Na wstępie zostały przeanalizowane i omówione spotykane w literaturze fachowej rozwiązania sterujące pracą układów biegowych wszelkich typów pojazdów szynowych (systemy radialnego ustawiania zestawów kołowych). Na świecie są projektowane i realizowane w tym zakresie zarówno systemy pasywne, jak i aktywne. W ostatnich latach dominują projekty dla rozwiązań aktywnych mechatronicznych. Na podstawie zebranych informacji wyselekcjonowano i zaproponowano kilka rozwiązań mogących zrealizować najpilniejsze potrzeby taboru kolejowego używanego w Polsce. Podstawowym celem było obniżenie oddziaływania poprzecznego na tor - dlatego za bazę ćwiczebną wybrano trzy serie lokomotyw produkcji krajowej z lat 70 i 80-tych ubiegłego stulecia, które są jeszcze bardzo licznie eksploatowane na PLK i nie posiadają zbyt dobrych parametrów współpracy z torem. Są to lokomotywy serii ET22, SU45 i SU46.

Następnie przedstawiono kilka koncepcji budowy systemów wspomaganie pracy zestawów kołowych i całych wózków wybranych lokomotyw, a na tej podstawie opracowano modele matematyczne układów akwizycji wielkości na podstawie, których można stworzyć bazę parametrów zadanych do sterowania układami wykonawczymi.

Na podstawie analizy technicznej do realizacji systemu wykonawczego wybrano siłowniki hydrauliczne. Opracowano dwa modele matematyczne takich siłowników - w tym jeden z nich z uwzględnieniem elastyczności oleju. Wytypowano cztery sposoby wykorzystania takich siłowników do wspomaganie pracy wózków na trasach zakrzywionych (łukach i rozjazdach). Sposoby te uznano za oryginalne i zgłoszono do opatentowania.

Został wykonany projekt modelu-stanowiska i zrealizowano go. Stanowisko to następnie uruchomiono i rozpoczęto na nim doświadczenia ze sprawdzaniem, czy realizuje ono wybrane przebiegi czasowe zadanych położeń siłowników przy różnych obciążeniach siłowych stanowiska. Próby te wielokrotnie powtarzano przy jednoczesnej regulacji działania układu zasilania olejem hydraulicznym, aż uzyskano planowane przebiegi czasowe siłowników wykonawczych.

Została opracowana i przetestowana autorska koncepcja zastosowania sygnałów o sile poprzecznej (łożyskowej) z przewodników zestawów kołowych jako podstawowego źródła sygnału dla systemu sterowania układu radialnego prowadzenia zestawów kołowych. Przeprowadzono próby symulacyjne, laboratoryjne i poligonowe dla dwóch wybranych typów

przewodników. Jeden z nich stosowany jest w istniejących od wielu lat na polskich torach seriach ciężkich lokomotyw. Uwzględniono także nowo budowane modele lokomotyw, to jest lokomotywy z rodziny 111E i typy pochodne. Próby przeprowadzone na obu typach przewodników przebiegły pomyślnie, świadcząc o słuszności przyjętej koncepcji.

Opracowany model systemu sterowania wymaga niewielu zmian w konstrukcji lokomotywy. Konieczne jest zastąpienie pasywnych tłumików wężykowania siłownikami hydraulicznymi, zamiana przewodników zestawów kołowych na takie same przewodniki, lecz wyposażone w moduł czujnika sił łożyskowych oparty na układzie mostka tensometrycznego oraz zabudowa niewielkiego, rozproszonego systemu sterowania z obwodami hydraulicznymi – o budowie modułowej.

Osiągnięte wyniki przeprowadzonych prac pozwalają na pełne potwierdzenie założonej tezy pracy, tj.

*Możliwe jest opracowanie koncepcji uniwersalnego systemu radialnego prowadzenia zestawów kołowych, przystosowanego do zabudowy w eksploatowanych oraz nowych pojazdach, przy minimalnej liczbie modyfikacji dokonywanych w pojeździe.*

Pozytywny rezultat badań, potwierdzający postawioną tezę, pozwolić może na zastosowanie opracowanego systemu w praktyce.

## **9.2. Kierunki dalszych prac**

Zagadnienie, przedstawione w niniejszej pracy, można uznać za rozwiązane, przede wszystkim teoretycznie. Naturalną kontynuacją niniejszej pracy mogą być następujące działania:

- wykonanie i zabudowa modułów czujnika pomiarowego siły łożyskowej na wózku lokomotywy (aby zapewnić pomiar na skrajnych przewodnikach osi zewnętrznych wózka), wykonanie jazd próbnych i rejestracja danych,
- wykonanie pełnej symulacji dynamicznej ruchu pojazdu z wykorzystaniem zarejestrowanych sygnałów,
- wprowadzenie algorytmu sterowania do symulacji dynamicznej i sprawdzenie skuteczności zaproponowanego algorytmu sterowania opartego o regulator rozmyty,
- wykonanie praktyczne kompletnego systemu sterowania układu radialnego prowadzenia zestawów kołowych,
- przeprowadzenie jazd próbnych na pojeździe z zabudowanym systemem, rejestracja danych.

## 10. Bibliografia

- [1] Bejenka, K., Marciniak, Z., Medwid, M., *Zmodernizowane układy smarowania obrzeży kół pojazdów trakcyjnych*, Materiały XII Konferencji Naukowej „Pojazdy Szynowe”, Poznań-Rydzyna, 1996, str. 31-37.
- [2] Choromański W., Gałgorowski A., *Mechatroniczne zawieszania pojazdów szynowych*, Materiały XV Konferencji Naukowej „Pojazdy Szynowe”, Szklarska Poręba, 2002, str. 59-68.
- [3] Cierniewski, M., Mielniczuk, J., Milecki, S., Sienicki, A., *Radial active steering of locomotive bogies on the track curves*. Metallurgical Journal, Vol. LXIV, 7, 2011, str. 14-19.
- [4] Cierniewski, M., Mielniczuk, J., Milecki, S., Sienicki, A., *Mechatronic tilting systems of frame-shell constructions*, The 16th international Polish-Slovak Scientific Conference on Machine Modeling and Simulations 2011.
- [5] Cierniewski, M., Mielniczuk, J., *Mechatronic radial guiding system of railway vehicle wheelsets*, The 25th international Polish-Slovak Scientific Conference on Machine Modeling and Simulations 2020.
- [6] Piątek, S., Węclewski, S., Żałopa, J., *Lokomotywy elektryczne serii ET22*, WKŁ, Warszawa 1991.
- [7] Polach, O., *Coupled single-axle running gears – a new radial steering design*, Proc Instn Mech Engrs Vol 216 Part F: J Rail and Rapid Transit, 2002, str. 197-206.
- [8] Wysłouch, W., *Radialne ustawianie się zestawów kołowych sterowanych hydraulicznie*. Pojazdy Szynowe, 3, 1980, str. 54-59.
- [9] OR-9548, *Analiza pasywnych i aktywnych systemów radialnego sterowania elementów układów biegowych*, praca zbior., IPS „Tabor”, Poznań 2009, opracowanie wewnątrz Instytutu.
- [10] OR-9549, *Koncepcja układów sterowania ze szczególnym uwzględnieniem sposobu rejestracji informacji wejściowych*, praca zbior., IPS „Tabor”, Poznań 2009, opracowanie wewnątrz Instytutu.
- [11] OR-9550, *Rozpoznanie sterowników mikroprocesorowych do układów wychyłnych*, praca zbior., IPS „Tabor”, Poznań 2009, opracowanie wewnątrz Instytutu.
- [12] OR-9825, *Koncepcja układów sterowania obrotem wózków w łukach torowych – opracowanie modeli matematycznych lokomotyw ET22, SU45 oraz SU(T)46 wraz z układami sterującymi i serwomechanizmami*, praca zbior., IPS „Tabor”, Poznań 2010, opracowanie wewnątrz Instytutu.
- [13] OR-9826, *Projekt i wykonanie laboratoryjnego modelu układu do symulacji obracania wózka lokomotywy typu Co-Co na łukach torowych – stanowisko badawcze SB-51 z elektronicznym mikroprocesorowym układem sterowania, układem hydraulicznym wykonawczym i urządzeniami do pomiaru sił i wychyleń*, praca zbior., IPS „Tabor”, Poznań 2010, opracowanie wewnątrz Instytutu.
- [14] OR-9975, *Opracowanie modelu lokomotywy ET22 (201E) z zastosowaniem układu wspomagania wymuszonym obrotem wózków na krzywiznach linii kolejowych*, praca zbior., IPS „Tabor”, Poznań 2010, opracowanie wewnątrz Instytutu.
- [15] OR-9975a, *Analiza symulacyjna modelu lokomotywy serii ET22 z uwzględnieniem sterowania wymuszonym kątem obrotu wózka względem osi pionowej poprzez mierzone sygnały przyspieszeń poprzecznych i wartości sił*

- łożyskowych zestawu kołowego*, praca zbior., IPS „Tabor”, Poznań 2011, opracowanie wewnętrzne Instytutu.
- [16] OR-9976, *Opracowanie modelu lokomotywy SU45 (301Db) na krzywiznach linii kolejowych z zastosowaniem układu wspomagania wymuszonym przesuwem kątowo-poprzednim wózków zaopatrzonych w sprzęg międzywózkowy*, praca zbior., IPS „Tabor”, Poznań 2010, opracowanie wewnętrzne Instytutu.
- [17] OR-9976a, *Analiza symulacyjna modelu lokomotywy serii SU45 z wymuszonym przesuwem kątowo-poprzednim wózka z pomocą siłownika umieszczonego w sprzęgu międzywózkowym z uwzględnieniem sterowania tego przesuwu poprzez mierzone siły przyspieszeń poprzednich i wartości sił łożyskowych zestawu kołowego prowadzącego*, praca zbior., IPS „Tabor”, Poznań 2011, opracowanie wewnętrzne Instytutu.
- [18] OR-9977, *Opracowanie modelu lokomotywy SU46 z zastosowaniem układu wspomagania przesuwem i obrotem środkowej osi wózków na krzywiznach linii kolejowych*, praca zbior., IPS „Tabor”, Poznań 2010, opracowanie wewnętrzne Instytutu.
- [19] OR-9977a, *Analiza symulacyjna modelu lokomotywy serii SU46 z wymuszonym przesuwem poprzednim środkowego zestawu kołowego z uwzględnieniem sterowania tego przesuwu poprzez mierzone sygnały przyspieszeń poprzednich i wartości sił łożyskowych zestawu kołowego prowadzącego*, praca zbior., IPS „Tabor”, Poznań 2011, opracowanie wewnętrzne Instytutu.
- [20] OR-9978, *Podsumowanie wyników prac wykonanych w ramach projektu badawczego własnego nr N N502 365435 pt. "Mechatroniczne układy wychylne sprzężonych przegubowo konstrukcji ramowo powłokowych niwelujące siły odśrodkowe"*, praca zbior., IPS „Tabor”, Poznań 2012, opracowanie wewnętrzne Instytutu.
- [21] OR-9979, *Porównanie wyników uzyskanych na modelu laboratoryjnym z wynikami równolegle przeprowadzonej symulacji komputerowej*, praca zbior., IPS „Tabor”, Poznań 2010, opracowanie wewnętrzne Instytutu.
- [22] OR-10317, *Przegląd i analiza istniejących metod budowy algorytmów sterowania układami mechatronicznymi*, Cegielski, K., Milecki, S., IPS „Tabor”, Poznań 2013, opracowanie wewnętrzne Instytutu.
- [23] OR-10318, *Schemat algorytmu sterującego wraz z opisem stanowiska badawczego i wynikami badań*, Cegielski, K., Milecki, S., IPS „Tabor”, Poznań 2013, opracowanie wewnętrzne Instytutu.
- [24] RP-1660, *Określenie bezpieczeństwa jazdy oraz spokojności biegu lokomotywy typu 111Ed-20. Badania ruchowe*, praca zbior., IPS „Tabor”, Poznań 2019, opracowanie wewnętrzne Instytutu.
- [25] Polska Norma PN-EN 14363:2016 +A1:2019-02, *Kolejnictwo - Badania i symulacje modelowe właściwości dynamicznych pojazdów szynowych przed dopuszczeniem do ruchu - Badania właściwości biegowych i próby stacjonarne*.
- [26] Polska Norma PN-EN 50121-3-2:2017-04 +A1:2019-07, *Zastosowania kolejowe - Kompatybilność elektromagnetyczna - Część 3-2: Tabor – Aparatura*.
- [27] Polska Norma PN-EN 50155:2018-01, *Zastosowania kolejowe - Tabor - Wyposażenie elektroniczne*.
- [28] Polska Norma PN-EN 60529:2003 +A2:2014-07, *Stopnie ochrony zapewnianej przez obudowy (Kod IP)*.

- [29] Polska Norma PN-EN 61373:2011 +AC:2017-11, *Zastosowania kolejowe - Wyposażenie taboru kolejowego - Badania odporności na udary mechaniczne i wibracje*.
- [30] Analog Devices, *ADA4558 Bridge Sensor Signal Conditioner IC with LIN Interface, Nonlinearity Correction, Temperature Compensation – Data Sheet*, <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADA4558.pdf> (dostęp 02.2021).
- [31] Analog Devices, *ADA4558 - Hardware Reference Manual UG-1487*, <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/ADA4558-Hardware-Reference-Manual-UG-1487.pdf> (dostęp 02.2021).
- [32] Analog Devices, *ADuC841/ADuC842/ADuC843 MicroConverter 12-Bit ADCs and DACs with Embedded High Speed 62 kB Flash MCU – Data Sheet*, [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADUC841\\_842\\_843.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADUC841_842_843.pdf) (dostęp 01.2009).
- [33] Analog Devices, *ADuC7060/ADuC7061 Low Power, Precision Analog Microcontroller, Dual Sigma-Delta ADCs, Flash/EE, ARM7TDMI – Data Sheet*, [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADuC7060\\_7061.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADuC7060_7061.pdf) (dostęp 02.2020).
- [34] Analog Devices, *ADuC7124/ADuC7126 Precision Analog Microcontroller, 12-Bit Analog I/O, Large Memory, ARM7TDMI MCU with Enhanced IRQ Handler – Data Sheet*, [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADuC7124\\_7126.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADuC7124_7126.pdf) (dostęp 02.2020).
- [35] Bombardier, *FLEXX Tronic Technology*, [www.bombardier.com](http://www.bombardier.com) (dostęp 05.2012).
- [36] Liebherr, *Liebherr Hydraulic Systems*, [www.liebherr.com](http://www.liebherr.com) (dostęp 05.2012).
- [37] Siemens, *The Vectron – Siemens' new generation of locomotives for rail transportation in Europe*, [www.siemens.com](http://www.siemens.com) (dostęp 04.2010).
- [38] Dokumentacja konstrukcyjna lokomotywy 111DE, IPS „Tabor”, Poznań 2019
- [39] Dokumentacja konstrukcyjna lokomotywy 201Em, IPS „Tabor”, Poznań 2003
- [40] Dokumentacja konstrukcyjna lokomotywy 303Da, IPS „Tabor”, Poznań 2010