



POLITECHNIKA KRAKOWSKA
im. Tadeusza Kościuszki



Wydział
Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej

Autoreferat rozprawy doktorskiej

Tomasz Makowski

**Hybrydowe wyrzutnie wielomodułowe – modelowanie,
charakterystyki sterowania i analiza porównawcza**

Promotor: prof. dr hab. inż. Krzysztof Kluszczyński

Kraków, 2019

1. Teza pracy oraz jej główne cele	3
2. Zasady działania wyrzutni elektromagnetycznych oraz rys historyczny ich rozwoju	5
3. Kompleksowy rekonfigurowalny model matematyczny hybrydowej wyrzutni typu PCR w środowisku LabVIEW umożliwiający analizę wybranej konfiguracji	9
4. Drzewa sterowań dla hybrydowych wyrzutni typu PCR oraz warianty drzew sterowań.....	23
5. Charakterystyki sterowania hybrydowej wyrzutni 3-modułowej względem jednej zmiennej sterującej oraz względem dwóch zmiennych sterujących	24
6. Definicja różnych trybów pracy hybrydowej wyrzutni typu PCR	26
7. Analiza porównawcza różnych konfiguracji hybrydowych wyrzutni wielomodułowych	32
8. Podsumowanie i główne osiągnięcia	37
9. Bibliografia	38

1. Teza pracy oraz jej główne cele

Przez **wyrzutnię wielomodułową** rozumie się wyrzutnię składającą się z co najmniej dwóch modułów, a przez **wyrzutnię hybrydową** – wyrzutnię, zawierającą moduły o różnych zasadach działania (czyli składającą się z co najmniej z dwóch modułów o różnych zasadach działania). Wyrzutnia hybrydowa może zawierać: **moduły pneumatyczne (moduł P)**, **moduły cewkowe (moduł C)** oraz **moduły szynowe (moduł R)**.

Literatura poświęcona wyrzutniom wielomodułowym, a zwłaszcza wyrzutniom hybrydowym skupia się przede wszystkim na zagadnieniach konstrukcyjnych i technologicznych. Brak jest prac opisujących w sposób usystematyzowany i uporządkowany właściwości wyrzutni w różnych stanach pracy i przy różnych sposobach sterowania, jak też przedstawiających w sposób zbiorczy charakterystyki dynamiczne i statyczne wynikające z przyjętego modelu matematycznego. Niniejsza rozprawa doktorska jest pomyślana jako ta, która ma ową lukę – wyraźnie widoczną w literaturze przedmiotu – wypełnić, stwarzając aparat pojęciowy oraz wprowadzając definicje, określenia i charakterystyki, które pozwolą mówić o całościowym (kompleksowym) opisie teoretycznym hybrydowej wyrzutni wielomodułowej jako obiektu sterowania.

Stąd też przyjęta **teza rozprawy doktorskiej** brzmi:

Jest możliwe zdefiniowanie dla różnych konfiguracji hybrydowej wyrzutni wielomodułowej trybów pracy oraz statycznych i dynamicznych charakterystyk pozwalających na analizę różnych wariantów połączeń modułów napędowych (czyli różnych konfiguracji wyrzutni).

Cele pracy obejmują:

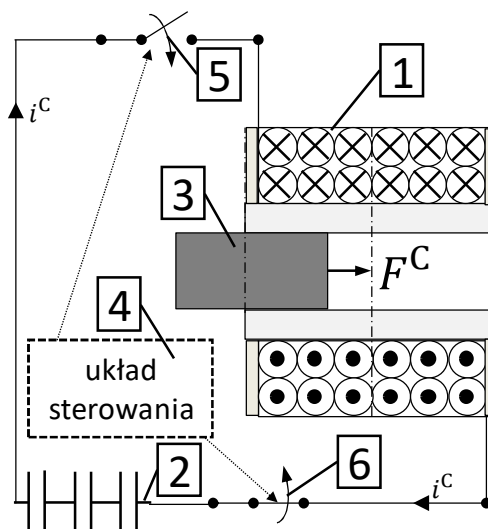
- Opracowanie rekonfigurowalnego modelu matematycznego wielomodułowej wyrzutni hybrydowej w środowisku programistycznym LabVIEW, pozwalającego na realizację szerokiego programu badań symulacyjnych.
- Zdefiniowanie zbioru charakterystyk statycznych i dynamicznych opisujących w sposób wyczerpujący pracę hybrydowych wyrzutni wielomodułowych i możliwości ich sterowania.
- Opracowanie podstaw matematycznych dla tak zwanych drzew sterowań i gałęzi sterowań hybrydowych wyrzutni wielomodułowych, pozwalających na uproszczony graficzny opis różnych trybów pracy wyrzutni.
- Dokonanie analizy różnych rodzajów drzew sterowań oraz zaproponowanie ich klasyfikacji.
- Zdefiniowanie trybów pracy hybrydowej wyrzutni wielomodułowej, pozwalających na ustalenie zakresu zmian wielkości sterujących, ujednoczenie opisu właściwości wyrzutni oraz umożliwienie porównywania różnych wariantów połączeń modułów (różnych konfiguracji wyrzutni).
- Zbadanie i wyjaśnienie wpływu prędkości początkowej pocisku na pracę modułu cewkowego.
- Przeprowadzenie analizy porównawczej różnych wariantów połączeń modułów (konfiguracji wyrzutni) ze względu na możliwość uzyskania maksymalnej prędkości pocisku przy uwzględnieniu różnych zakresów zmian wielkości sterujących (trybów pracy).

2. Zasady działania wyrzutni elektromagnetycznych oraz rys historyczny ich rozwoju

Wyrzutnia elektromagnetyczna jest specyficznym rodzajem przetwornika elektromechanicznego, działającego w sposób impulsowy [5], w którym w odróżnieniu od maszyn elektrycznych liniowych – element ruchomy nie jest na stałe związany z urządzeniem, ale po nadaniu mu odpowiedniej prędkości – opuszcza go [14]. Wyrzutnie elektromagnetyczne (z ang. electromagnetic launcher EML) [31] są nazywane również: działami elektromagnetycznymi (DELM), elektromagnetycznymi układami miotającymi [12] [29], bądź też akceleratorami [31]. Wyrzutnie elektromagnetyczne – ze względu na zasadę działania – można podzielić na dwa podstawowe typy: wyrzutnie elektromagnetyczne typu cewkowego (ang. coil-gun) oraz wyrzutnie elektromagnetyczne typu szynowego (ang. rail-gun) [12] [29].

Konstrukтором pierwszej wyrzutni elektromagnetycznej był norweski naukowiec Kristian Birkeland. Skonstruował on w 1901 r. wyrzutnię, zawierającą kilka cewek napędowych (określaną mianem „Birkeland gun”) [9]. Odnośnie do wyrzutni typu szynowego, to badania nad nimi zostały zainicjowane we Francji w 1916 r. przez inżyniera Fauchon-Villeplee [24].

Zasada działania wyrzutni elektromagnetycznej typu cewkowego (w niniejszej rozprawie będzie to **elektromagnetyczny moduł cewkowy C**) wynika ze zjawiska oddziaływania pola magnetycznego na element ferromagnetyczny umieszczony w tymże polu [11]. Wytwarzana siła jest nazywana siłą reluktancyjną. Na rys. 2.1 przedstawiano w sposób schematyczny budowę wyrzutni elektromagnetycznej typu cewkowego.

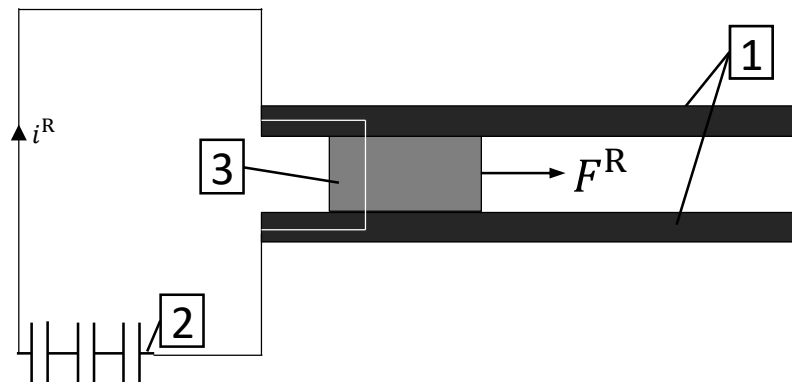


Rys. 2.1. Schematyczne przedstawienie budowy wyrzutni elektromagnetycznej typu cewkowego: 1 – cewka napędowa, 2 – bateria kondensatorów, 3 – ferromagnetyczny element ruchomy, 4 – układ sterowania, 5 – element zamykający obwód zasilania cewki, 6 – element otwierający obwód zasilania cewki

Wchodzące w skład wyrzutni typu cewkowego dwie główne części to: cewka napędowa (1) wytwarzająca pole magnetyczne (zasilana impulsowo ze źródła prądu stałego, którym najczęściej jest bateria kondensatorów (2)) oraz ferromagnetyczny ruchomy element

(pocisk) (3). Siła reluktancyjna F^C dąży do wciągnięcia pocisku do środka cewki napędowej i umiejscowienia go w połowie długości cewki, czego konsekwencją jest to, że moduł cewkowy wymaga układu sterującego (4), który zamyka obwód zasilania cewki (5) (powodując przepływ prądu i^C) w chwili wlotu pocisku do modułu, a następnie otwiera go (6) po minięciu przez pocisk położenia środkowego [14] [25].

Wyrzutnia elektromagnetyczna typu szynowego (w niniejszej rozprawie będzie to **elektromagnetyczny moduł szynowy R**) uchodzi za prostszą w budowie, gdyż nie wymaga układu sterującego dla obwodu zasilania szyn [12]. Budowę wyrzutni przedstawiono schematycznie na rys. 2.2.



Rys. 2.2. Schematyczne przedstawienie budowy wyrzutni szynowej z zaznaczonymi podstawowymi elementami: 1 – para szyn napędowych, 2 – bateria kondensatorów, 3 – przewodzący element ruchomy

W wyrzutni typu szynowego dwie równoległe szyny napędowe (1) są podłączone do źródła prądu stałego (2) (najczęściej baterii kondensatorów) [26]. Obwód elektryczny w chwili wystrzału (czyli w chwili uruchomienia wyrzutni) składa się ze źródła zasilania (2), przewodzących szyn (1) oraz pocisku (3) wykonanego z przewodzącego materiału (stanowiącego z elektrycznego punktu widzenia przesycającą się zworę) [12]. Prąd i^R przepływa z jednej szyny do drugiej szyny poprzez pocisk, powodując powstanie siły elektrodynamicznej F^R , która nosi nazwę siły Lorentza [1] [25] [28] [32].

Wyrzutnie mogą się składać z jednego modułu napędowego lub też z kilku modułów napędowych [15]. Zasada działania wyrzutni wielomodułowej jest analogiczna, jak dla pojedynczego modułu.

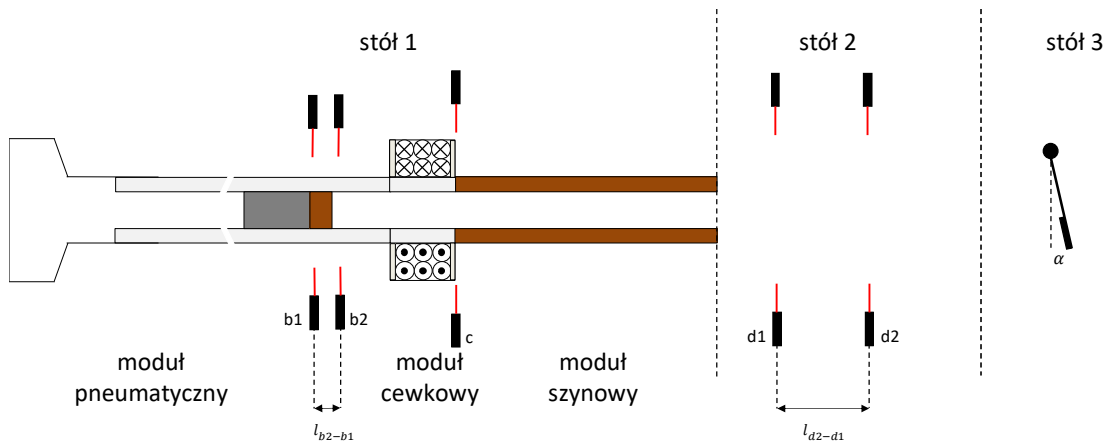
W latach 2005 – 2006 [27] [69] pojawiły się pierwsze doniesienia dotyczące wyrzutni składających się z dwóch lub trzech modułów o różnych zasadach działania. Następnie idea hybrydowych wyrzutni została podjęta, ale już na szerszą skalę w Katedrze Mechatroniki na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej. W wyniku realizacji w latach 2008 – 2010 grantu badawczego Rady Nauki MNiSzW o nazwie „Kompleksowy, zintegrowany model polowo – obwodowy, konstrukcja oraz badania wyrzutni elektromagnetycznej ze wspomaganiami pneumatycznym” (kierownik prof. dr hab. inż. Krzysztof Kluszczyński) powstał prototyp wyrzutni 3-modułowej, składającej się z modułu pneumatycznego P, modułu cewkowego C i modułu szynowego R (rys. 2.3).

W literaturze prototyp ten był opisywany przez autorów jako **hybrydowa wyrzutnia elektromagnetyczna** (hybrid electromagnetic launcher) lub też jako **hybrydowa wyrzutnia elektromagnetyczna ze wspomaganie pneumatycznym** (hybrid electromagnetic launcher with pneumatic assist). Rezultatem wieloletnich badań były dwie prace doktorskie: [3] i [16] oraz znaczna liczba publikacji w czasopismach krajowych i zagranicznych [5] [6] [7] [13] [14] [19] [20] [21] [22], jak też referatów, prezentowanych na konferencjach międzynarodowych i krajowych [2] [4] [8] [17] [18] [23]. Stąd też w niniejszej rozprawie doktorskiej rozważania teoretyczne i badania symulacyjne dotyczące hybrydowych wyrzutni wielomodułowych przeprowadzono na przykładzie wyrzutni 3-modułowej typu PCR stanowiącej reprezentatywny, a zarazem najprostszy przypadek. Ta hybrydowa wyrzutnia 3-modułowa typu PCR oraz stanowisko do jej badania jest zlokalizowana na trzech niezależnych stołach oznaczonych na rys. 2.3 jako: stół 1, stół 2, stół 3. W skład stanowiska wchodzi również element ruchomy (pocisk) zbudowany z dwóch części: części ferromagnetycznej z warstwą izolacyjną (część aktywna magnetycznie podczas przemieszczania się pocisku w module cewkowym) oraz części przewodzącej (część aktywna elektrycznie podczas przemieszczania się pocisku w module szynowym).



Rys. 2.3. Widok ogólny stanowiska hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej typu PCR zlokalizowanej na trzech niezależnych stołach: 1, 2, 3 (opracowano na podstawie [16])

Stanowisko hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej, uwidocznione na rys. 2.3, można przedstawić w sposób schematyczny tak, jak to uczyniono na rys. 2.4.



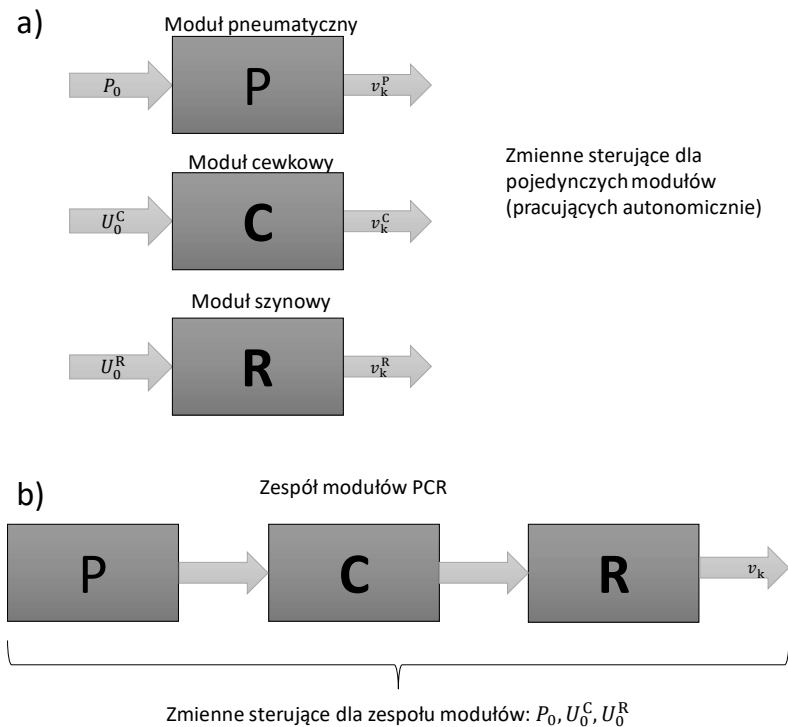
Rys. 2.4. Schematyczne przedstawienie hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej z rys. 2.3 wraz z rozmieszczeniem czujników do pomiaru prędkości pocisku

Znacząca część światowej literatury, związanej z wyrzutniami elektromagnetycznymi, jest poświęcona ich konstrukcji oraz zagadnieniom technologicznym, bądź też opracowywaniu coraz to dokładniejszych modeli symulacyjnych wyrzutni. Brakuje natomiast prac związanych z systematyzowaniem pojęć, uporządkowanym opisem właściwości eksploatacyjnych, klasyfikacją wyrzutni elektromagnetycznych, czy też metodologią ich projektowania. Jedynie dwie publikacje o zasięgu międzynarodowym poruszają powyższe zagadnienia. Pierwsza pozycja z 1989 r. [30] jest związana z porządkiem terminologii. Druga pozycja z 2017 r. [10] wskazuje na niedostatek prac o charakterze teoretycznym i zawiera propozycję definicji wyrzutni elektromagnetycznej (EML) jako wyrzutni, która wykorzystuje energię elektryczną, energię magnetyczną lub ich kombinację, do bezpośredniego generowania siły napędzającej pocisk. Ponadto zawiera klasyfikację oraz propozycję podziału i nazewnictwa wyrzutni w zależności od sposobu wytwarzania tej siły. W klasyfikacji tej użyto pojęcia wyrzutni hybrydowej jako wyrzutni, wykorzystującej w ramach jednej konstrukcji różne zasady wytwarzania siły napędowej, a więc w takim samym rozumieniu, jak w niniejszej rozprawie doktorskiej.

3. Kompleksowy rekonfigurowalny model matematyczny hybrydowej wyrzutni typu PCR w środowisku LabVIEW umożliwiającą analizę wybranej konfiguracji

3.1. Hybrydowa wyrzutnia jako obiekt sterowania o trzech zmiennych sterujących

Budowa rekonfigurowalnego modelu matematycznego hybrydowej wyrzutni typu PCR wymaga uprzedniego opracowania modeli poszczególnych modułów (rys. 3.1 a), a następnie złożenia ich w jeden kompleksowy model (rys. 3.1 b). Zmienne sterujące poszczególnych modułów składają się na zbiór zmiennych sterujących dla wybranej konfiguracji modułów. Charakterystyka sterowania dla zespołu trzech modułów PCR (czyli wyrzutni 3-modułowej) jest funkcją trzech zmiennych $v_k = f(P_0, U_0^C, U_0^R)$.



Rys. 3.1. Zmienne sterujące dla: a) poszczególnych modułów, b) zespołu modułów

3.2. Model matematyczny modułu pneumatycznego oraz jego implementacja w środowisku LabVIEW

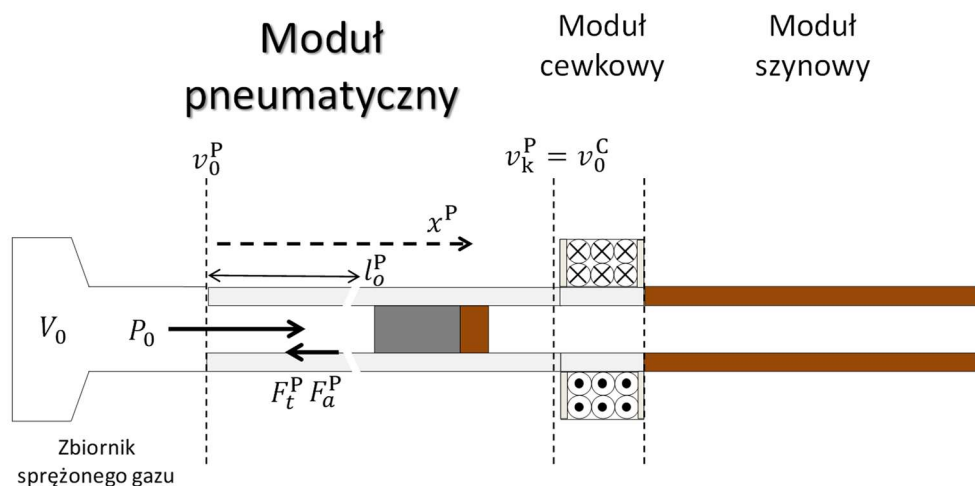
Moduł pneumatyczny hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej można opisać następującym równaniem ruchu [3]:

$$\frac{d^2 x^P}{dt^2} = \frac{1}{m^{\text{pocisk}}} \left(S_p^{\text{pocisk}} P_0 \frac{V_0^\kappa}{\left(V_0 + S_p^{\text{pocisk}} (x^P - l^{\text{pocisk}}) \right)^\kappa} - (F_t^P + F_a^P) \right) \quad (3.1)$$

gdzie:

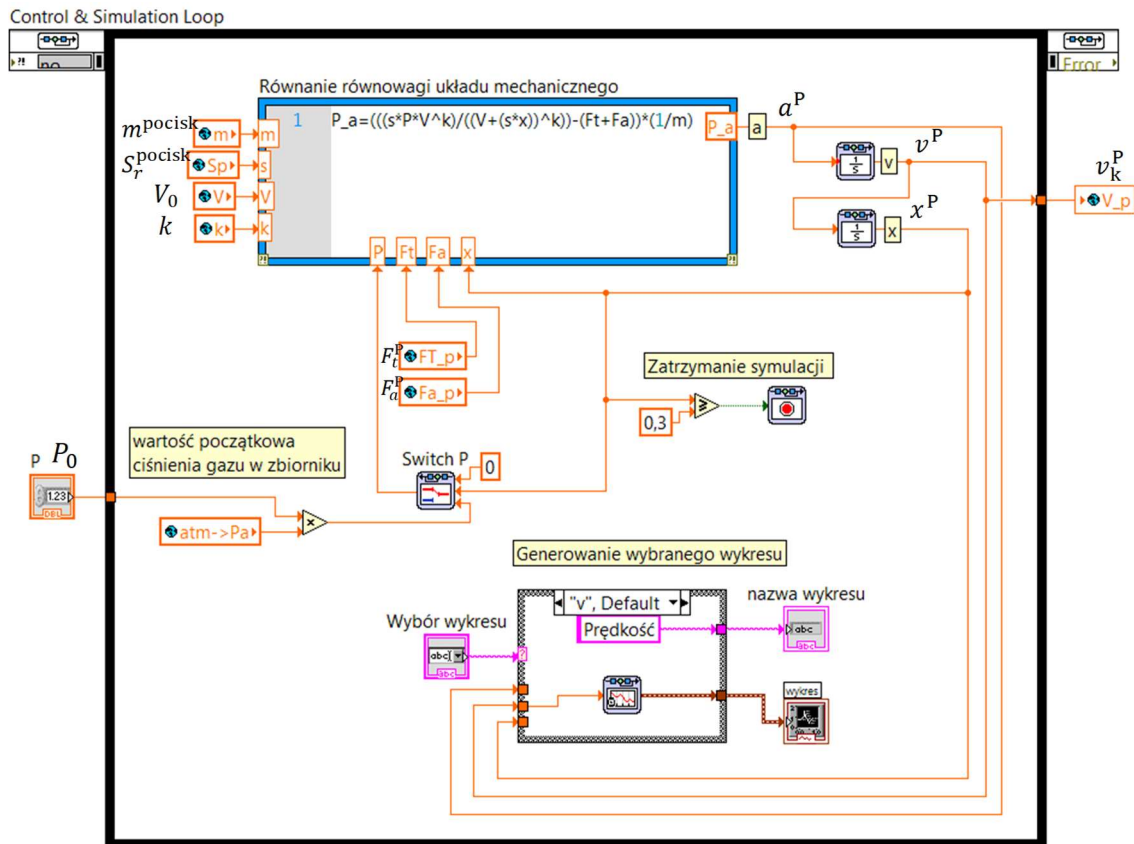
- P_0 – wartość początkowa ciśnienia gazu w zbiorniku modułu pneumatycznego,
- x^P – lokalna współrzędna (oddzielna dla każdego modułu) przemieszczenia elementu ruchomego wzdłuż modułu pneumatycznego,
- F_t^P – wartość siły tarcia powierzchni zewnętrznej elementu ruchomego o cylinder w module pneumatycznym,
- F_a^P – siła oporu aerodynamicznego w module pneumatycznym,
- l^{pocisk} – długość całkowita elementu ruchomego (pocisku),
- m^{pocisk} – masa elementu ruchomego (pocisku),
- S_p^{pocisk} – pole powierzchni podstawy elementu ruchomego (pocisku),
- V_0 – objętość zbiornika gazu w zbiorniku modułu pneumatycznego,
- κ – wykładnik adiabaty gazu roboczego w module pneumatycznym.

Parametry konstrukcyjne i wielkości fizyczne związane z działaniem modułu pneumatycznego zostały uwidocznione na rys. 3.2.



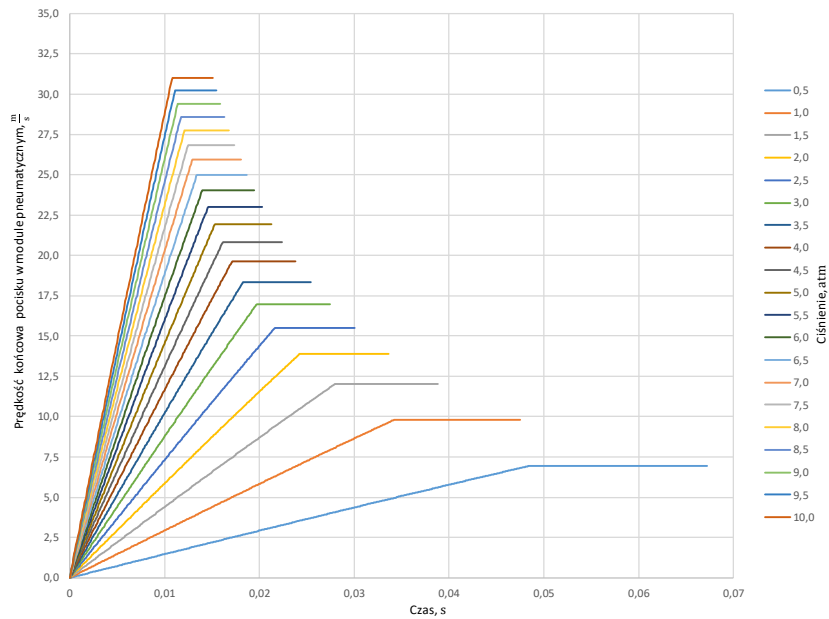
Rys. 3.2. Parametry i wielkości fizyczne modułu pneumatycznego na tle schematu wyrzutni hybrydowej

Równanie ruchu dla modułu pneumatycznego hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej (3.1) zostało zaimplementowane w środowisku programistycznym LabVIEW. Sposób implementacji modelu matematycznego modułu przedstawia rys. 3.3.

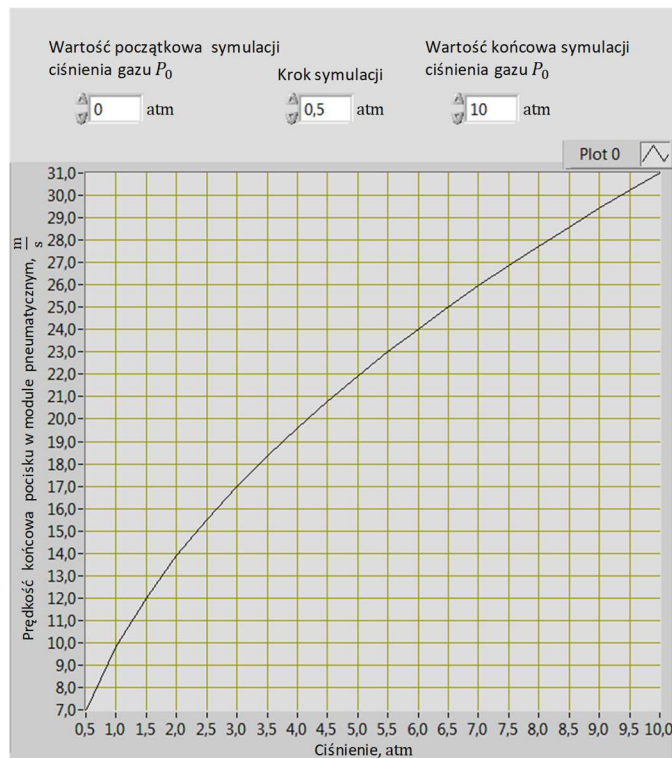


Rys. 3.3. Implementacja modelu matematycznego modułu pneumatycznego w środowisku LabVIEW – model symulacyjny modułu pneumatycznego

Opracowany program daje m.in. możliwość graficznego przedstawienia rodziny funkcji: przebiegów czasowych prędkości pocisku sparametryzowanych względem wartości początkowej ciśnienia gazu P_0 (rys. 3.4). Znajomość rodziny funkcji czasowych pozwala na wyznaczenie charakterystyki sterowania modułu pneumatycznego: prędkości wylotowej pocisku w funkcji ciśnienia początkowego gazu P_0 (rys. 3.5). Należy zwrócić uwagę, że symulacje zostały przeprowadzone przy braku tarcia i oporu aerodynamicznego.



Rys. 3.4. Przykładowa rodzina charakterystyk dynamicznych: przebiegów czasowych prędkości pocisku w module pneumatycznym sparametryzowana względem wartości początkowej ciśnienia P_0 (wartość początkowa dla iteracji $P_0 = 0$ atm, wartość końcowa dla iteracji $P_0 = 10$ atm, zadany krok symulacji = 0,5 atm)



Rys. 3.5. Charakterystyka sterowania modułu pneumatycznego: prędkość elementu ruchomego v_k^P w funkcji wartości początkowej ciśnienia gazu P_0

3.3. Model matematyczny modułu cewkowego oraz jego implementacja w środowisku LabVIEW

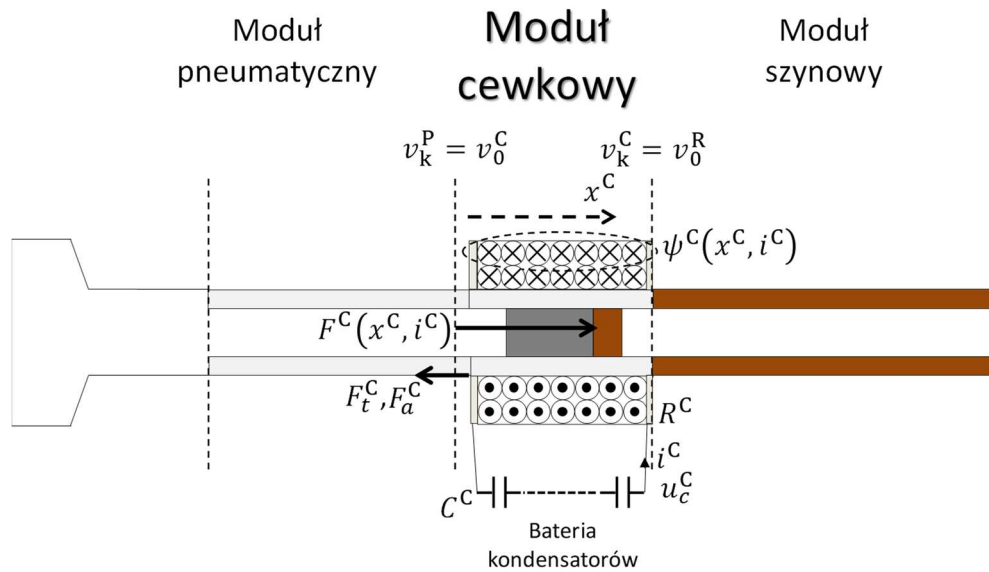
Moduł cewkowy hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej można opisać następującym układem równań dla części elektromagnetycznej i mechanicznej [3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 u_c^C}{dt^2} = - \frac{1}{\frac{\partial \psi^C(x^C, i^C)}{\partial i^C} \Big|_{x^C=const} C^C} \cdot \left(u_c^C(t) + R^C(i^C) C^C \frac{du_c^C}{dt} + \frac{\partial \psi^C(x^C, i^C)}{\partial x^C} \Big|_{i^C=const} v^C \right) \\ \frac{d^2 x^C}{dt^2} = \frac{1}{m^{pocisk}} \left(F^C(x^C, i^C) - (F_t^C + F_a^C) \right) \end{array} \right. \quad (3.2)$$

gdzie:

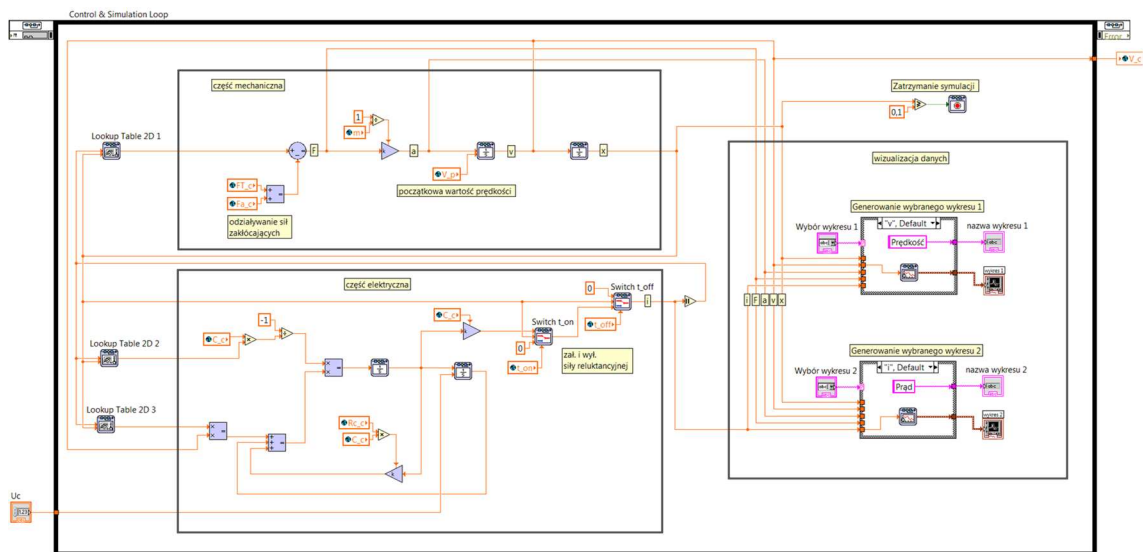
- u_c^C – wartość napięcia na baterii kondensatorów zasilających moduł cewkowy,
- x^C – lokalna współrzędna (oddzielna dla każdego modułu) przemieszczenia elementu ruchomego wzdłuż modułu cewkowego,
- i^C – prąd rozładowania baterii kondensatorów zasilających moduł cewkowy,
- F_t^C – siła tarcia powierzchni zewnętrznej elementu ruchomego o karkas cewki napędowej w module cewkowym,
- F_a^C – siła oporu aerodynamicznego w module cewkowym,
- $F^C(x^C, i^C)$ – wartość siły napędzającej element ruchomy wytworzona przez moduł cewkowy,
- $\psi^C(x^C, i^C)$ – strumień magnetyczny skojarzony dla modułu cewkowego,
- v^C – prędkość elementu ruchomego dla modułu cewkowego,
- C^C – pojemność znamionowa baterii kondensatorów zasilających moduł cewkowy,
- R^C – rezystancja obwodu modułu cewkowego,
- m^{pocisk} – masa elementu ruchomego (pocisku).

Parametry konstrukcyjne i wielkości fizyczne związane z działaniem modułu cewkowego zostały uwidocznione na rys. 3.6.



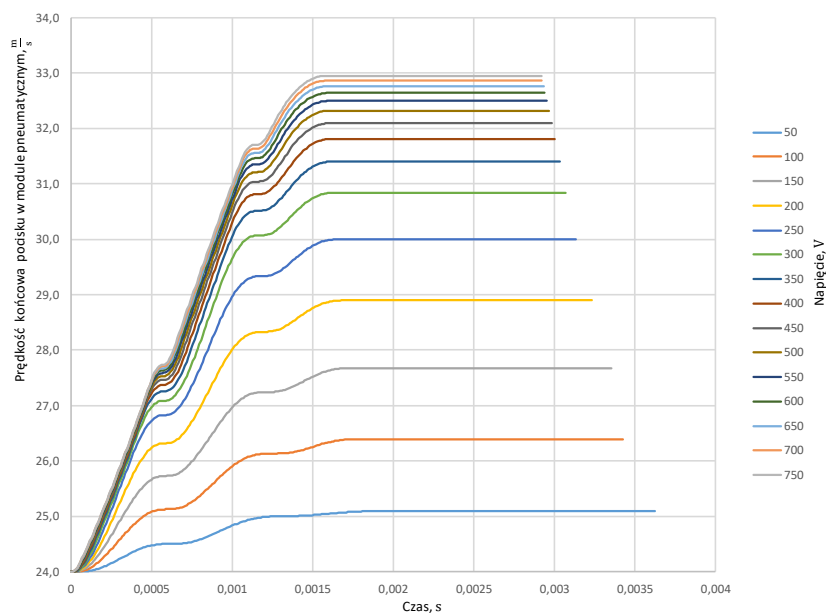
Rys. 3.6. Parametry i wielkości fizyczne modułu cewkowego na tle schematu wyrzutni hybrydowej

Układ równań różniczkowych dla modułu cewkowego hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej (3.2), zaimplementowany w środowisku programistycznym LabVIEW, został przedstawiony na rys. 3.7.

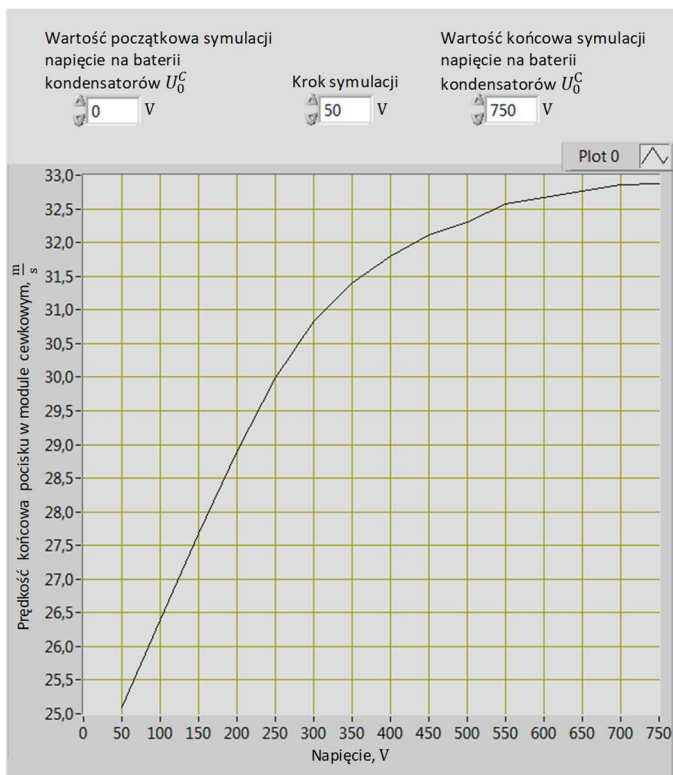


Rys. 3.7. Implementacja modelu matematycznego modułu cewkowego w środowisku LabVIEW – model symulacyjny modułu cewkowego

Program umożliwia graficzne przedstawienie rodziny funkcji: przebiegów czasowych prędkości pocisku sparametryzowanych względem wartości początkowej napięcia na baterii kondensatorów U_0^C (rys. 3.8). Pozwala także na wyznaczenie charakterystyki modułu cewkowego: prędkości końcowej pocisku w funkcji napięcia początkowego na baterii kondensatorów U_0^C (rys. 3.9). tak jak poprzednio, symulacje przeprowadzono przy braku tarcia i oporu aerodynamicznego.



Rys. 3.8. Przykładowa rodzina charakterystyk dynamicznych: przebiegów czasowych prędkości pocisku w module cewkowym sparametryzowana względem wartości początkowej napięcia na baterii kondensatorów U_0^C , przy założeniu prędkości początkowej $v_0^C = 24 \frac{m}{s}$ (wartość początkowa dla iteracji $U_0^C = 0 \text{ V}$, wartość końcowa dla iteracji $U_0^C = 750 \text{ V}$, zadany „krok symulacji” = 50 V)



Rys. 3.9. Charakterystyka sterowania modulem cewkowym: prędkość elementu ruchomego v_k^C w funkcji wartości początkowej napięcia na baterii kondensatorów U_0^C przy założeniu prędkości początkowej pocisku $v_0^C = 24 \frac{m}{s}$

3.4. Model matematyczny modułu szynowego oraz jego implementacja w środowisku LabVIEW

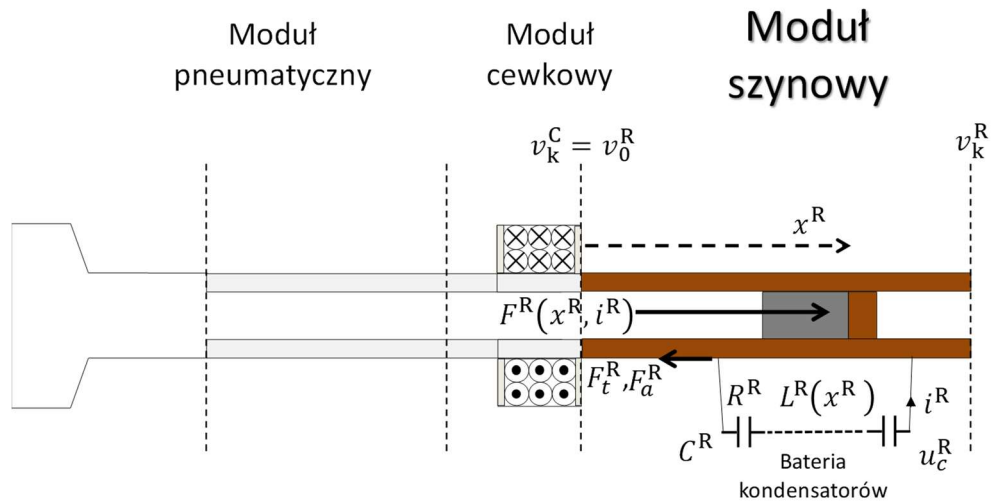
Moduł szynowy hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej można opisać układem równań różniczkowych dla części elektromagnetycznej i mechanicznej [3]:

$$\begin{cases} \frac{d^2 u_c^R}{dt^2} = -\frac{1}{L^R(x^R) \cdot C^R} \cdot \left(u_c^R(t) + \left(R^R(x^R) + \frac{dL^R(x^R)}{dx^R} v^R \right) C^R \frac{du_c^R}{dt} \right) \\ \frac{d^2 x^R}{dt^2} = \frac{1}{m^{\text{pocisk}}} \left(F^R(x^R, i^R) - (F_t^R + F_a^R) \right) \end{cases} \quad (3.3)$$

gdzie:

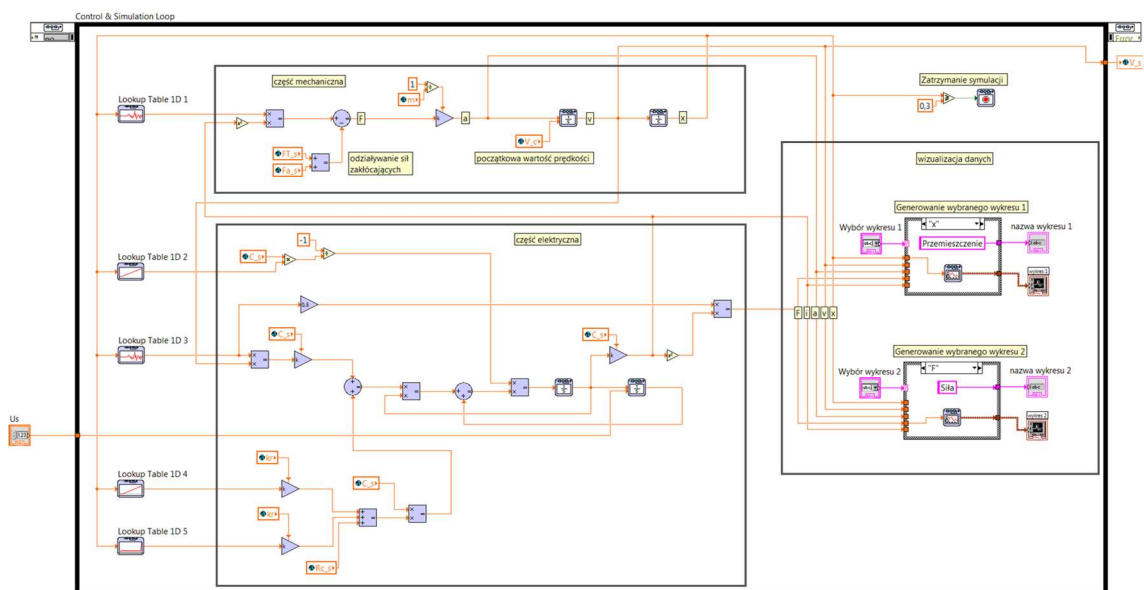
- u_c^R – wartość napięcia na baterii kondensatorów zasilających moduł szynowy,
- x^R – lokalna współrzędna (oddzielna dla każdego modułu) przemieszczenia elementu ruchomego wzdłuż modułu szynowego,
- i^R – prąd rozładowania baterii kondensatorów zasilających moduł szynowy,
- F_t^R – siła tarcia powierzchni zewnętrznej elementu ruchomego o szyny napędowe w module szynowym,
- F_a^R – siła oporu aerodynamicznego w module szynowym,
- $F^R(x^R, i^R)$ – siła napędzająca element ruchomy wytworzona przez moduł szynowy,
- v^R – prędkość elementu ruchomego dla modułu szynowego,
- $R^R(x^R)$ – rezystancja obwodu modułu szynowego w funkcji położenia elementu ruchomego,
- C^R – pojemność znamionowa baterii kondensatorów zasilających moduł szynowy,
- $L^R(x^R)$ – indukcyjność własna obwodu elektromagnetycznego modułu szynowego w funkcji współrzędnej przemieszczenia elementu ruchomego,
- m^{pocisk} – masa elementu ruchomego (pocisku).

Parametry konstrukcyjne i wielkości fizyczne związane z działaniem modułu szynowego zostały uwidocznione na rys. 3.10.



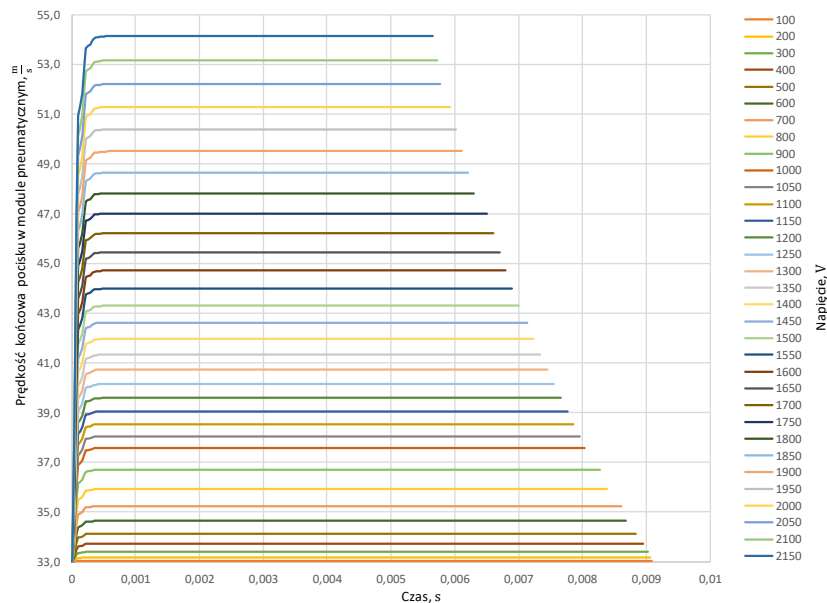
Rys. 3.10. Parametry i wielkości fizyczne modułu szynowego na tle schematu wyrzutni hybrydowej

Zaimplementowany układ równań równowagi dla modułu szynowego hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej (3.3) w środowisku programistycznym LabVIEW został przedstawiony na rys. 3.11.

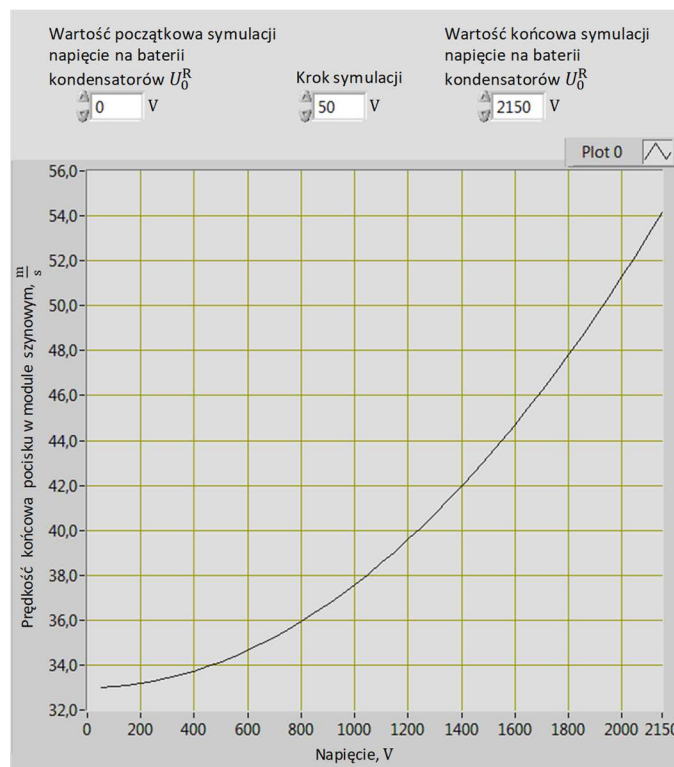


Rys. 3.11. Implementacja modelu matematycznego modułu szynowego w środowisku LabVIEW – model symulacyjny modułu szynowego

Program umożliwia graficzne przedstawienie rodziny funkcji: przebiegów czasowych prędkości pocisku sparametryzowanych względem wartości początkowej napięcia na baterii kondensatorów U_0^R . Przykładowy wynik symulacji, zrealizowany przy założeniu braku tarcia i oporu aerodynamicznego, przedstawiono na rys. 3.12. Wyznaczono również charakterystyki sterowania prędkości końcowej w funkcji napięcia początkowego na baterii kondensatorów U_0^R , co ilustruje rys. 3.13.



Rys. 3.12. Przykładowa rodzina charakterystyk dynamicznych: przebiegów czasowych prędkości pocisku w module szynowym sparametryzowana względem wartości początkowej napięcia na baterii kondensatorów U_0^R , przy założeniu prędkości początkowej $v_0^R = 33 \frac{m}{s}$ (wartość początkowa dla iteracji $U_0^R = 0 \text{ V}$, wartość końcowa dla iteracji $U_0^R = 2150 \text{ V}$, zadany „krok symulacji” = 50 V)



Rys. 3.13. Charakterystyka sterowania modulem szynowym: prędkości elementu ruchomego v_k^R w funkcji wartości początkowej napięcia na baterii kondensatorów U_0^R , przy założeniu prędkości początkowej pocisku $v_0^R = 33 \frac{m}{s}$

3.5. Klasyfikacja możliwych wariantów połączeń modułów napędowych w hybrydowej wyrzutni typu PCR oraz ich oznaczenia

Przykładowa wyrzutnia typu PCR posiada trzy niezależne moduły napędowe:

- moduł pneumatyczny P,
- moduł cewkowy C,
- moduł szynowy R,

które mogą być zestawiane w różne konfiguracje, służące do rozpędzania pocisku (tab. 3.1). Wybrana konfiguracja może w ogólności obejmować: trzy moduły, dwa moduły lub tylko jeden moduł oraz różne konfiguracje wyrzutni.

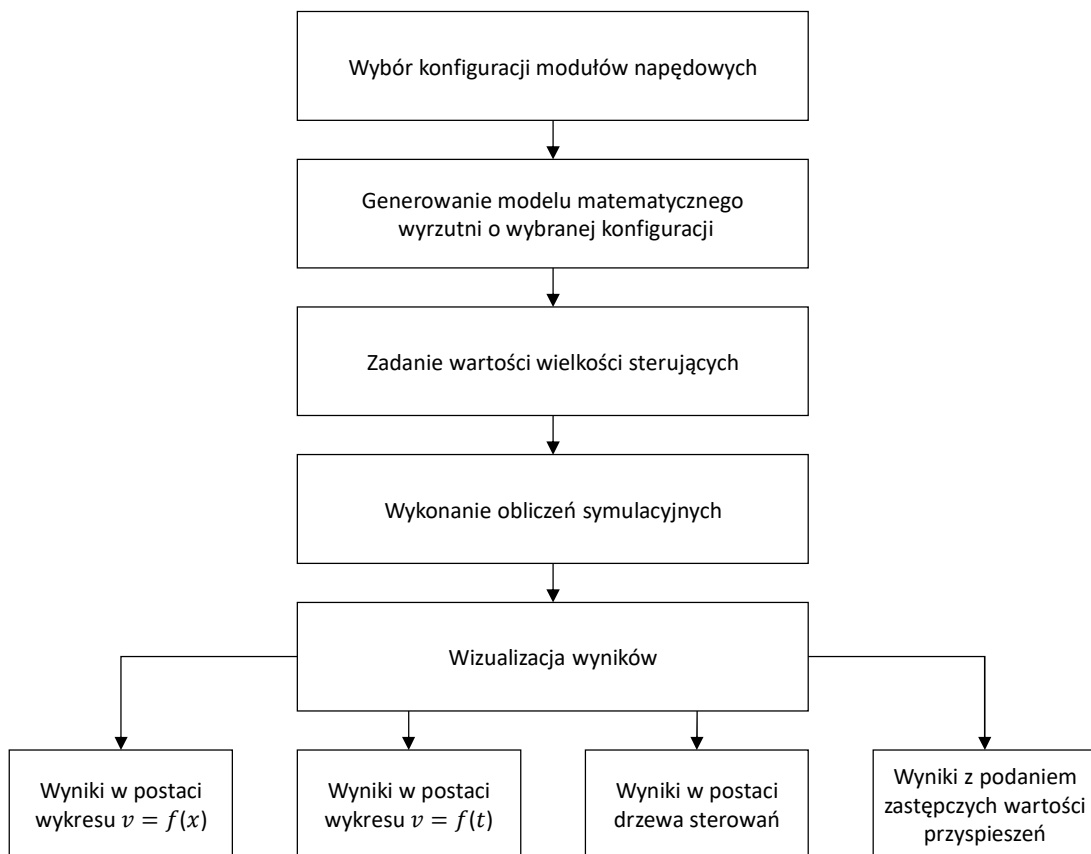
Tab. 3.1. Możliwe konfiguracje modułów napędowych P, C i R

Opis słowny wybranej konfiguracji modułów napędowych	Oznaczenie graficzne wybranej konfiguracji modułów napędowych	Oznaczenie literowe wybranej konfiguracji modułów napędowych	Wielkości sterujące wyrzutnią o wybranej konfiguracji	Liczba aktywnych modułów napędowych
Moduł pneumatyczny		P	P_0	1
Moduł cewkowy		C	U_0^C	1
Moduł szynowy		R	U_0^R	1
Moduł pneumatyczny + moduł cewkowy		P C	$P_0; U_0^C$	2
Moduł cewkowy + moduł szynowy		C R	$U_0^C; U_0^R$	2
Moduł pneumatyczny + moduł szynowy		P R	$P_0; U_0^R$	2
Moduł pneumatyczny + moduł cewkowy + moduł szynowy		P C R	$P_0; U_0^C; U_0^R$	3

Szeroka możliwość tworzenia różnych konfiguracji modułów napędowych wymaga opracowania programu komputerowego pozwalającego na prowadzenie symulacji w odniesieniu do szerokiej gamy wyrzutni o różnych sposobach rozpędzania elementu ruchomego. Aby możliwe było prowadzenie takich komputerowych badań symulacyjnych konieczne jest opracowanie uogólnionego modelu matematycznego wyrzutni typu PCR, generującego automatycznie modele matematyczne wyrzutni o zadanych konfiguracjach. Model taki będzie w dalszej części rozprawy nazywany **kompleksowym rekonfigurowalnym modelem matematycznym wyrzutni**.

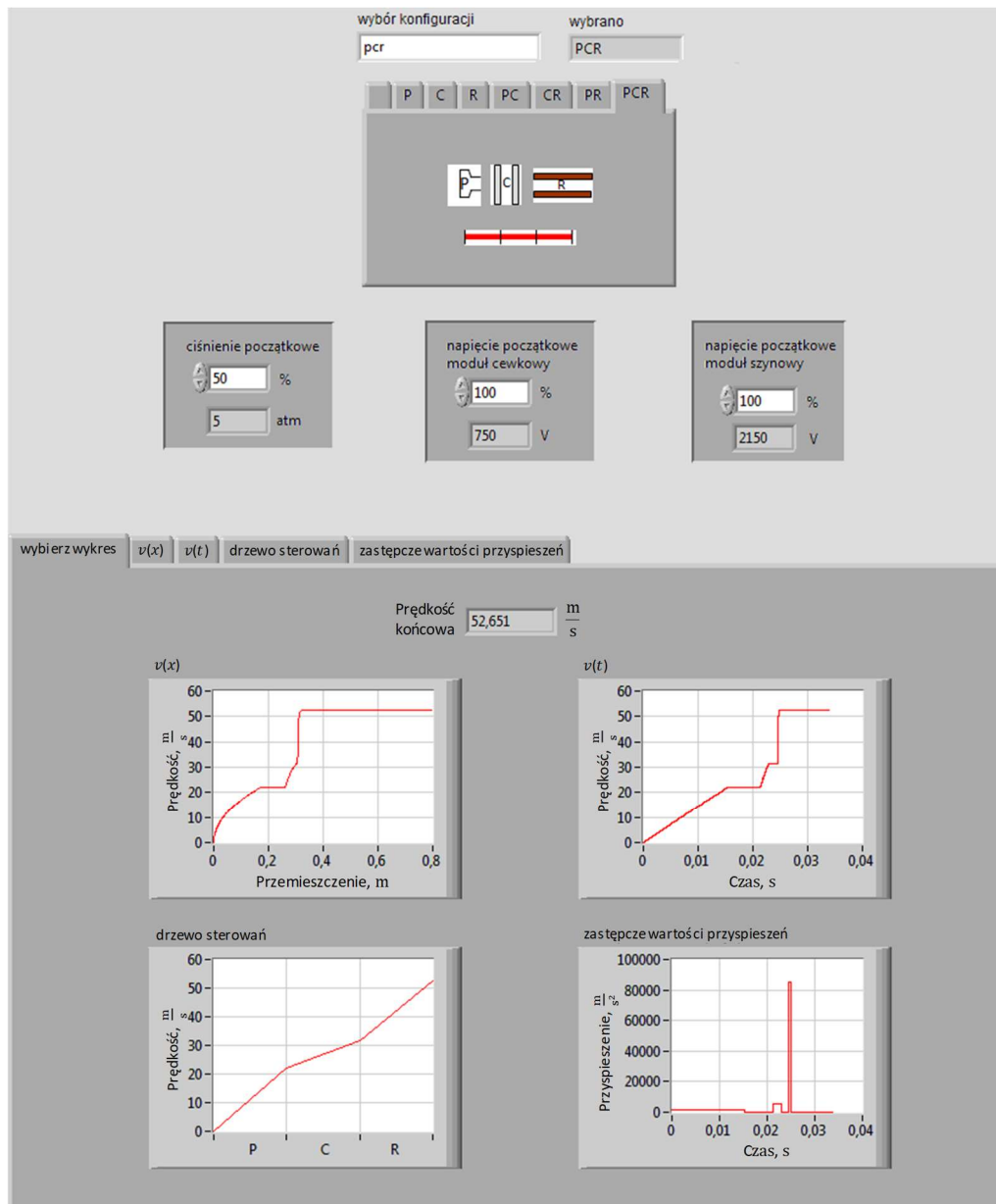
3.6. Okno kompleksowego rekonfigurowalnego modelu matematycznego hybrydowej wyrzutni typu PCR

Program opracowany na podstawie kompleksowego rekonfigurowalnego modelu matematycznego oraz procedury formułowania modelu matematycznego i planowania procesu symulacji w hybrydowej wyrzutni 3-modułowej zostały przedstawione w graficzny sposób w formie schematu blokowego na rys. 3.14.



Rys. 3.14. Ideowy schemat blokowy dla programu rekonfigurowalnego modelu symulacyjnego hybrydowej wyrzutni typu PCR

Panel użytkownika dla opracowanego programu związanego z rekonfigurowalnym modelem matematycznym hybrydowej wyrzutni typu PCR przedstawiono na rys. 3.15. Program ten daje możliwość wyświetlenia każdego z wygenerowanych wykresów wspólnie (jak to pokazano na rys. 3.15) lub oddzielnie w powiększonej skali.

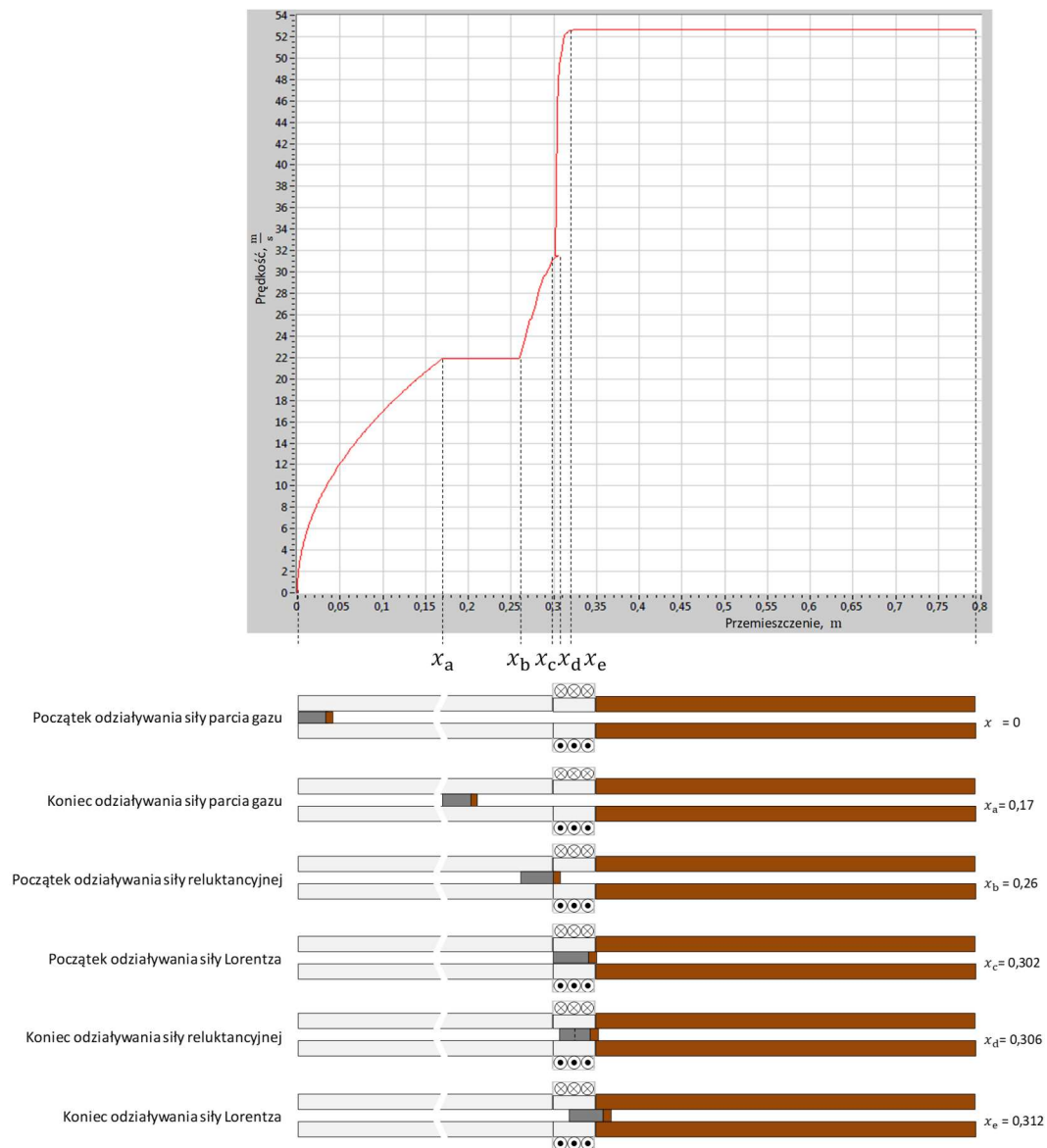


Rys. 3.15. Widok panelu użytkownika dla rekonfigurowalnego modelu matematycznego hybrydowej wyrzutni w postaci zestawienia zbiorczego (cztery wykresy obok siebie) dla konfiguracji PCR dla przykładowych danych: $P_0 = 5 \text{ atm}$, $U_0^C = 750 \text{ V}$, $U_0^R = 2150 \text{ V}$

Wykresy prędkości w funkcji przemieszczenia $v = f(x)$ oraz w funkcji czasu $v = f(t)$ umożliwiają badanie oddziaływania kolejnych modułów hybrydowej wyrzutni na pocisk w trakcie jego przemieszczania się wewnątrz wyrzutni.

3.7. Przebieg prędkości pocisku hybrydowej wyrzutni typu PCR na tle jego charakterystycznych położenia w kolejnych modułach

Na rysunku rys. 3.16 przedstawiono przykładowy wynik symulacji: prędkość pocisku w funkcji przemieszczenia dla podstawowej konfiguracji typu PCR. Wykres ten pokazuje, w jaki sposób pocisk jest rozpędzany przez kolejne trzy moduły. Prędkość pocisku wzrasta wtenczas, gdy na pocisk działa siła napędzająca (odpowiednio siła parcia gazu, siła reluktancyjna oraz siła Lorentza). We fragmentach, w których na pocisk nie działa siła rozpędzająca, pocisk porusza się wyłącznie siłą bezwładności. Dla prezentowanej symulacji przyjęto, że siła tarcia i opór aerodynamiczny są równe 0, wskutek czego prędkość w tych fragmentach jest stała.



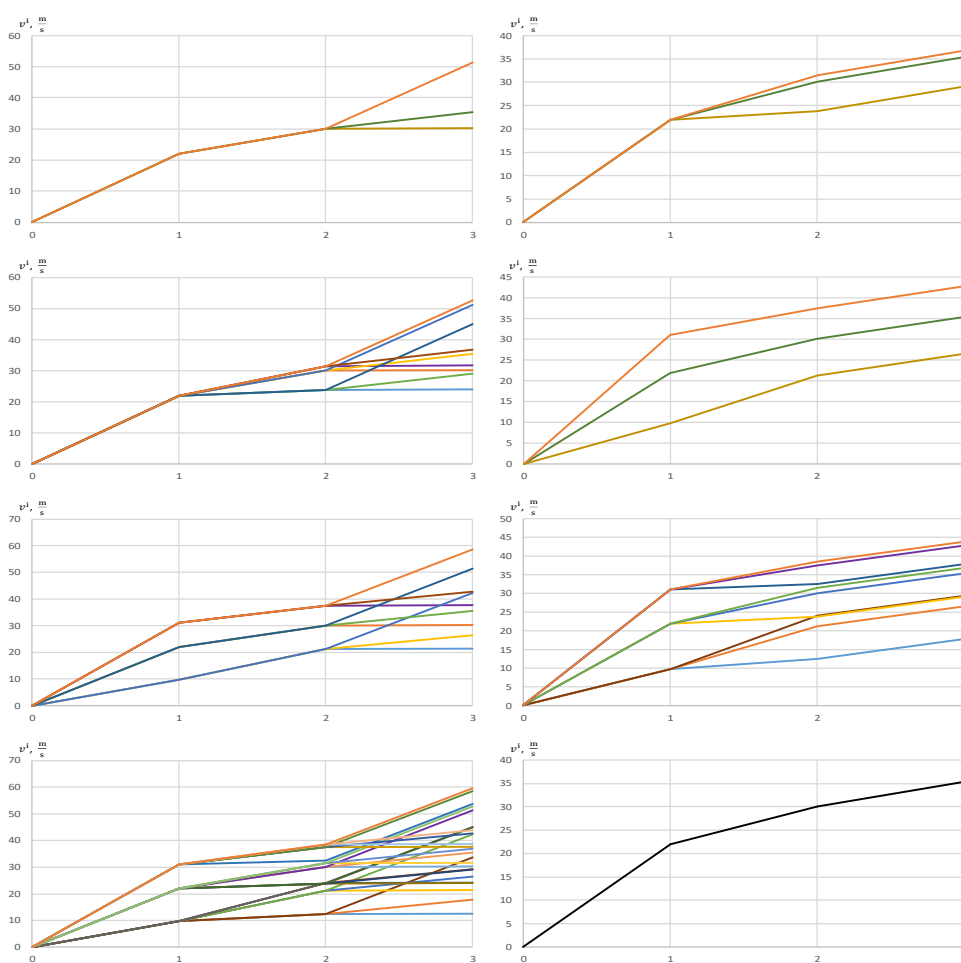
Rys. 3.16. Przykładowa charakterystyka prędkości pocisku w funkcji przemieszczenia dla globalnej współrzędnej x (wspólnej dla całej wyrzutni) – pod wykresem pokazano położenia pocisku, odpowiadające punktom nieciągłości pierwszej pochodnej prędkości, a dodatkowo z prawej strony podano skorelowane z nimi wartości współrzędnej globalnej dla przykładowej wyrzutni z rys. 2.4

4. Drzewa sterowań dla hybrydowych wyrzutni typu PCR oraz warianty drzew sterowań

W niniejszej rozprawie zdefiniowano w sposób formalny i ścisły matematycznie pojęcie „gałęzi sterowania” i „drzewa sterowań”. W sposób intuicyjny – bez podania podstaw fizycznych i matematycznych – koncepcja drzewa sterowań była wprowadzona w pracach [3] [16].

Drzewo sterowań w sposób uproszczony i syntetyczny opisuje pracę różnych konfiguracji modułów przy różnych wartościach zmiennych sterujących i przy różnych wartościach prędkości początkowych pocisku (dla wielu różnych możliwych przypadków na raz). Drzewo sterowań umożliwia łatwe i szybkie porównanie wielu różnych przypadków nastaw zmiennych sterujących wyrzutni hybrydowej, pozwala łatwo określić udział poszczególnych modułów w rozpędzaniu się pocisku, jak też określić prędkość końcową (wylotową) pocisku dla różnych sterowań.

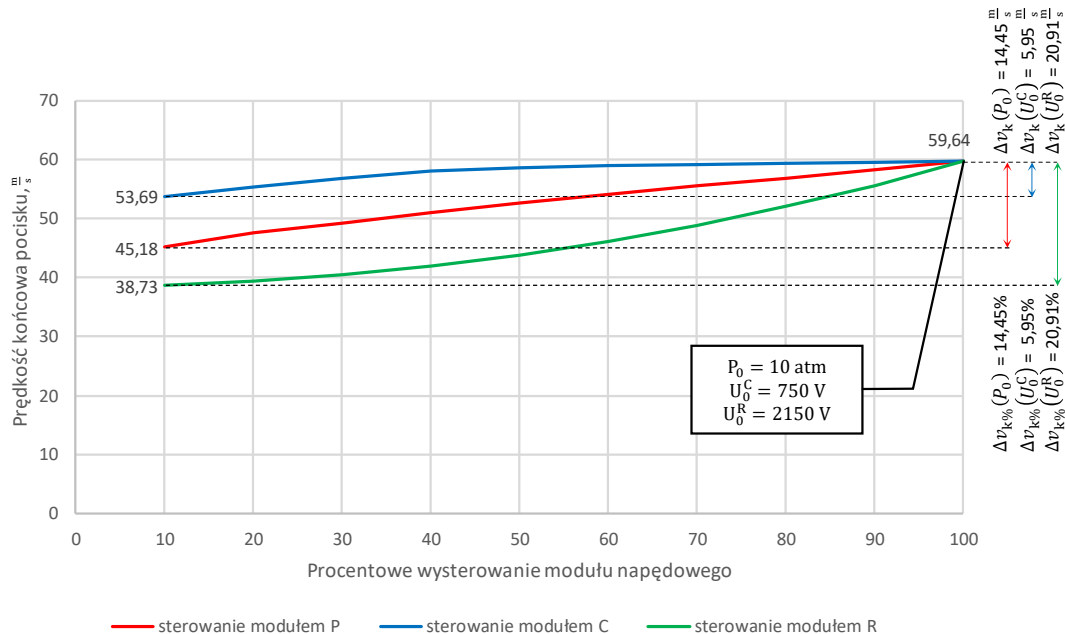
Drzewo sterowań dla odpowiednio dużej liczby różnych przypadków przyjmuje strukturę „rozgałęziającego się” lub też „rozkrzewiającego się” grafu. Przykładowe reprezentatywne przypadki przedstawiono na rys. 4.1.



Rys. 4.1. Zestawienie różnych wariantów drzew sterowań

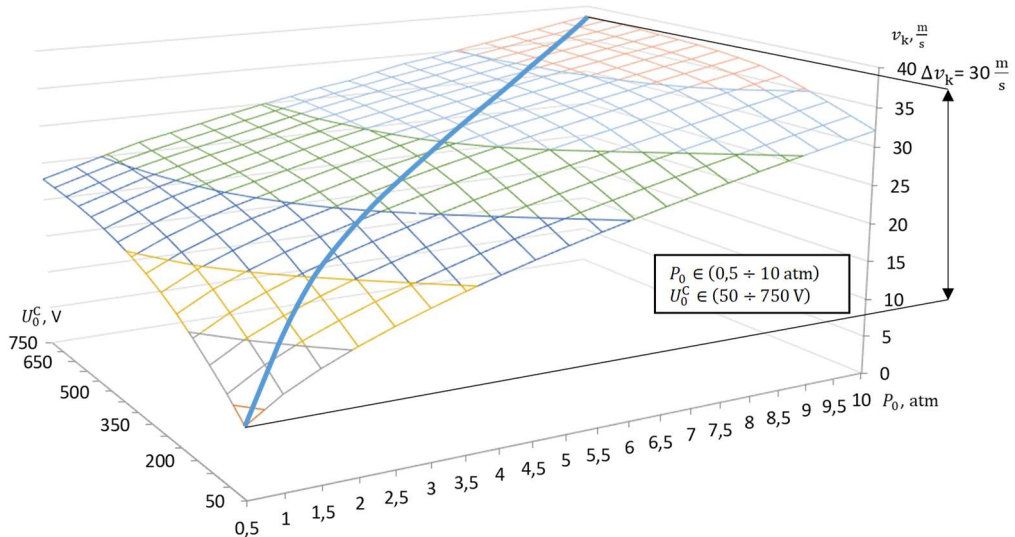
5. Charakterystyki sterowania hybrydowej wyrzutni 3-modułowej względem jednej zmiennej sterującej oraz względem dwóch zmiennych sterujących

Charakterystyki sterowania wyrzutnią 3-modułową względem wszystkich trzech zmiennych sterujących przedstawiono na rys. 5.1. Wprowadzono pojęcie zmienności prędkości końcowej pocisku względem wybranej zmiennej sterującej, którą to zmienność dla kolejnych modułów oznaczono odpowiednio przez $\Delta v_k(P_0)$, $\Delta v_k(U_0^C)$, $\Delta v_k(U_0^R)$. Parametr ten „zmienności prędkości końcowej pocisku względem wybranej zmiennej sterującej” jest równy zmianie (spadkowi) prędkości wylotowej przy zmianie wielkości sterującej w rozważanym module z wartości równej 100% do wartości równej 10%, przy maksymalnymysterowaniu dwóch pozostałych modułów.

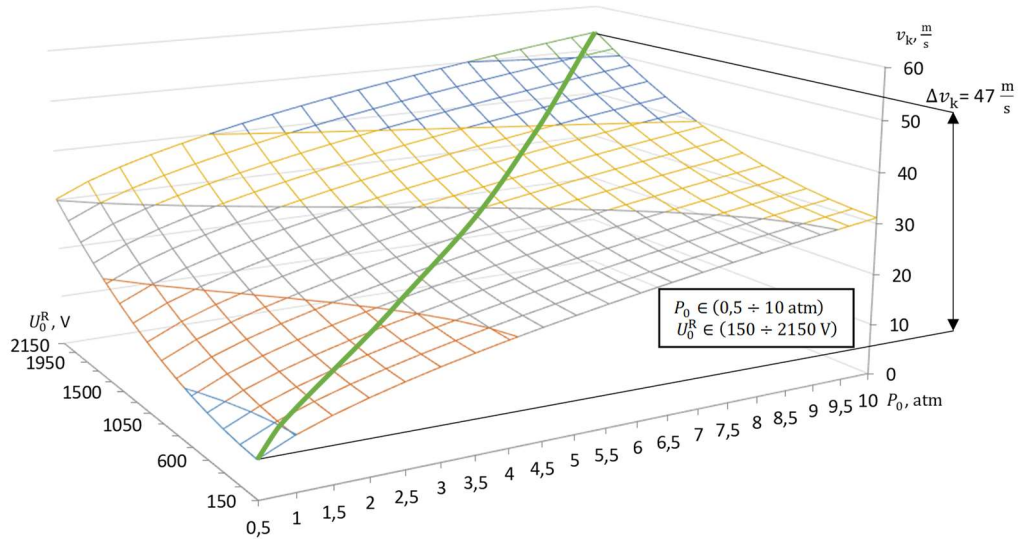


Rys. 5.1. Zestawienie charakterystyk sterowania wyrzutnią 3-modułową z uwidocznioną zmiennością prędkości końcowej pocisku względem wszystkich trzech zmiennych sterujących

Charakterystyki sterowania 3-modułowej wyrzutni hybrydowej względem wybranych dwóch zmiennych sterujących można przedstawić w postaci wykresów przestrzennych (3-wymiarowych) wraz z pokazaniem zmienności prędkości końcowej pocisku przy równoczesnej zmianie dwóch zmiennych sterujących. Na rys. 5.2 przedstawiono charakterystykę sterowania dla dwóch zmiennych sterujących: ciśnienia gazu P_0 i napięcia na baterii kondensatorów modułu cewkowego U_0^C , zaś na rys. 5.3 przedstawiono charakterystykę sterowania dla zmiennych sterujących: ciśnienia gazu P_0 i napięcia na baterii kondensatorów modułu szynowego U_0^R .



Rys. 5.2. Charakterystyka sterowania z uwidocznieniem zmienności prędkości końcowej pocisku przy równoczesnej zmianie dwóch zmiennych sterujących: modułu pierwszego P_0 oraz modułu drugiego U_0^C



Rys. 5.3. Charakterystyka sterowania z uwidocznieniem zmienności prędkości końcowej pocisku przy równoczesnej zmianie dwóch zmiennych sterujących: modułu pierwszego P_0 oraz modułu trzeciego U_0^R

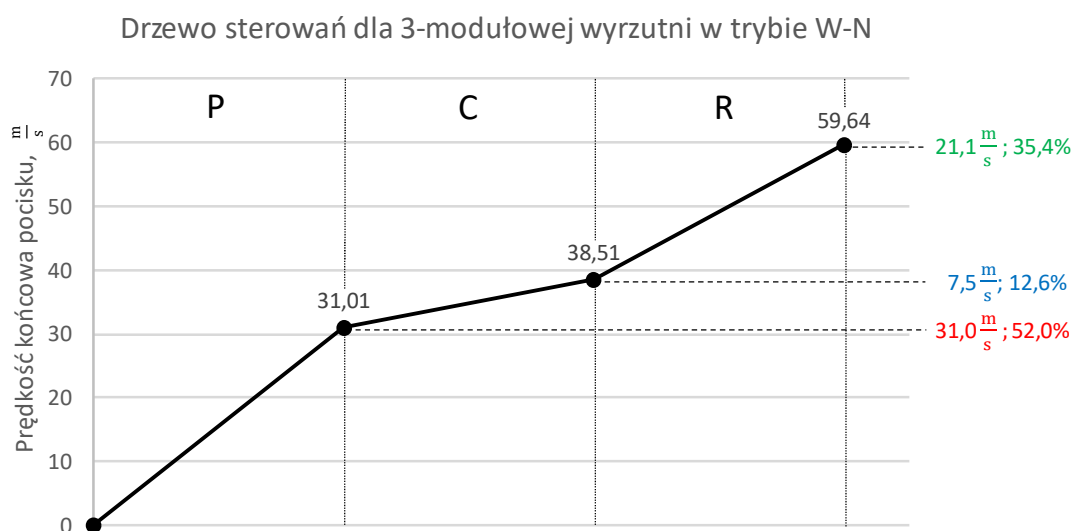
6. Definicja różnych trybów pracy hybrydowej wyrzutni typu PCR

6.1. Tryb pracy nominalny W-N

Każdy z modułów rozważanej przykładowej wyrzutni PCR został zaprojektowany i skonstruowany na określoną dopuszczalną wartość wielkości sterującej, wynikającą z przyjętych założeń projektowych: mechanicznych i elektrycznych. Pracę wyrzutni przy zakresie zmian wielkości sterujących od 0 do wartości dopuszczalnych będziemy dalej nazywać trybem pracy nominalnym, oznaczanym przez W-N. Te wartości znamionowe dla trybu W-N (odpowiadające wartościom dopuszczalnym dla poszczególnych modułów) wraz z prędkościami końcowymi pocisku, uzyskiwanymi przy tych wartościach wielkości sterujących, wynoszą:

- $P_{0\ W-N} = 10\ \text{atm}\ (1,01\ \text{MPa})$ dla modułu pneumatycznego P – $v_k^P = 31\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$,
- $U_{0\ W-N}^C = 750\ \text{V}$ dla modułu cewkowego C – $v_k^C = 19,6\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$,
- $U_{0\ W-N}^R = 2150\ \text{V}$ dla modułu szynowego R – $v_k^R = 21,2\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Udziały poszczególnych modułów w procesie rozpędzania pocisku przy maksymalnych nastawach hybrydowej wyrzutni w trybie pracy nominalnej W-N są różne. Udziały te, zarówno w wartościach bezwzględnych, jak i w wartościach procentowych, przedstawiono na rys. 6.1.

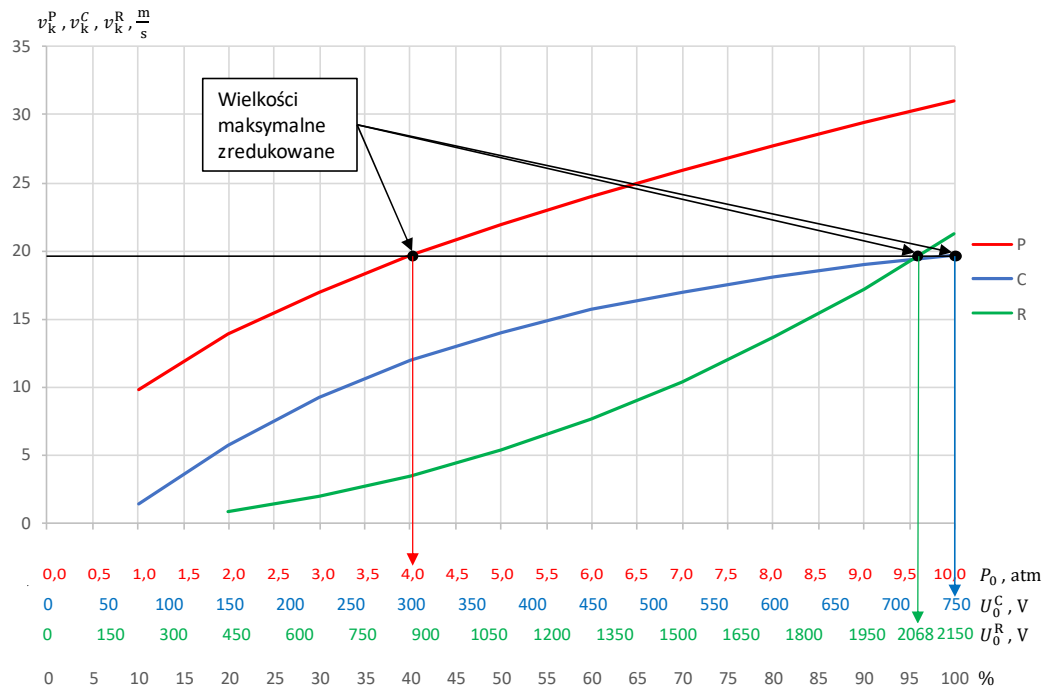


Rys. 6.1. Udziały poszczególnych modułów napędowych w rozpędzaniu pocisku przy maksymalnych nastawach 3-modułowej hybrydowej wyrzutni w trybie W-N

6.2. Tryb pracy zredukowany W-R

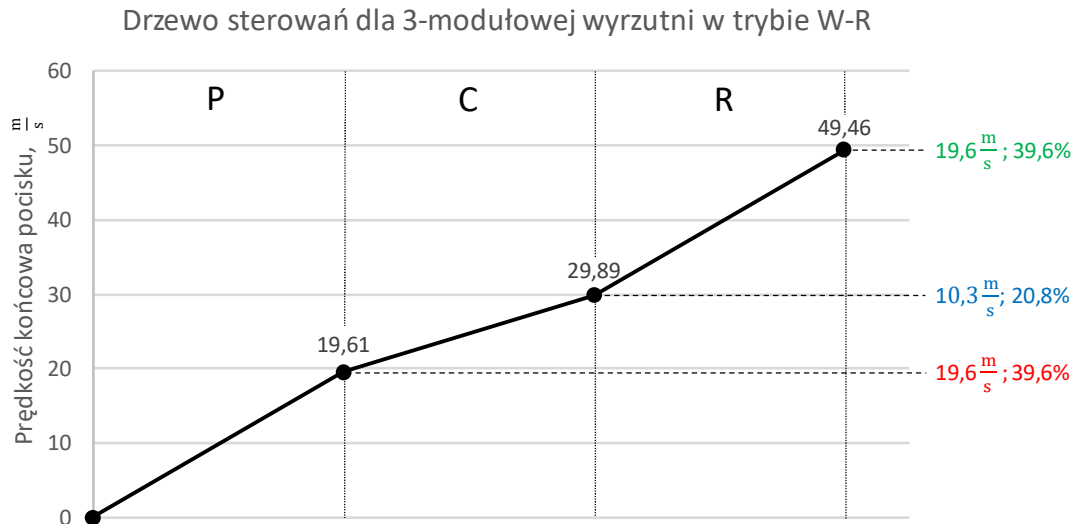
Zestawienie zbiorcze (rys. 6.2) pozwala określić w sposób graficzny wartości, przy których każdy z modułów, pracując autonomicznie, będzie rozpędzał pocisk do takiej samej prędkości końcowej. Pracę hybrydowej wyrzutni typu PCR przy tak określonym zakresie zmian wielkości sterujących będziemy dalej nazywać trybem zredukowanym i oznaczać jako tryb W-R. Wartości znamionowe wielkości sterujących dla trybu W-R to:

- dla modułu pneumatycznego $P_{0\ W-R} = 4\ \text{atm}$ (0,41 MPa), albowiem $v_k^P = 19,6\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$,
- dla modułu cewkowego $U_{0\ W-R}^C = 750\ \text{V}$, albowiem $v_k^C = 19,6\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$,
- dla modułu szynowego $U_{0\ W-R}^R = 2068\ \text{V}$, albowiem $v_k^R = 19,6\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$.



Rys. 6.2. Wyznaczenie wartości odniesienia (wartości zredukowanych) dla pracy hybrydowej wyrzutni w trybie pracy W-R

Udział poszczególnych modułów w procesie rozpędzania pocisku przy maksymalnych nastawach hybrydowej wyrzutni dla trybu W-R (w wartościach bezwzględnych, jak i w wartościach procentach) przedstawiono na rys. 6.3.



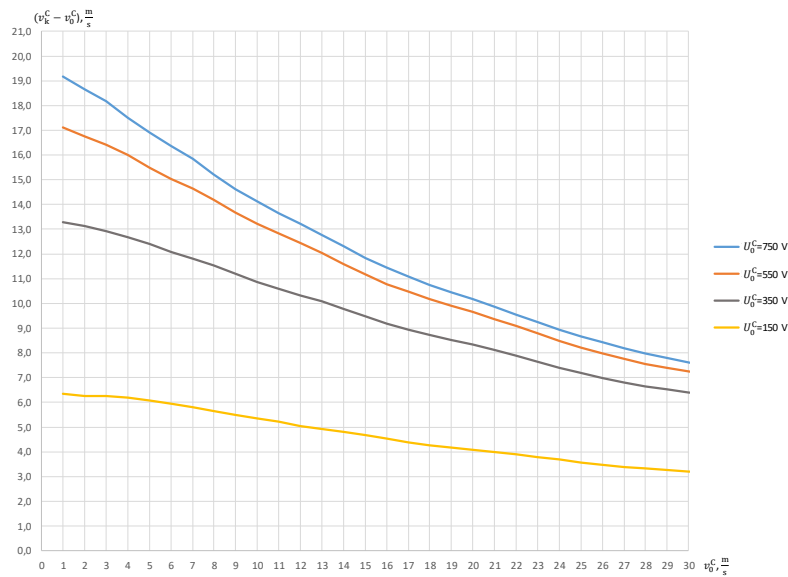
Rys. 6.3. Udziały poszczególnych modułów napędowych w rozpędzaniu pocisku przy maksymalnych nastawach 3-modułowej wyrzutni w trybie W-R

Jak widać na rys. 6.2, w trybie pracy W-R modułem w pełni wykorzystanym będzie moduł C ($U_0^C = U_{0\text{W-R}}^C = 750\text{ V}$), moduł R będzie wykorzystany w 96% ($U_0^R = U_{0\text{W-R}}^R = 2068\text{ V}$), zaś moduł P – tylko w 40% ($P_0 = P_{0\text{W-R}} = 4\text{ atm}$).

6.3. Analiza wpływu prędkości początkowej pocisku na jego prędkość końcową w module cewkowym i szynowym

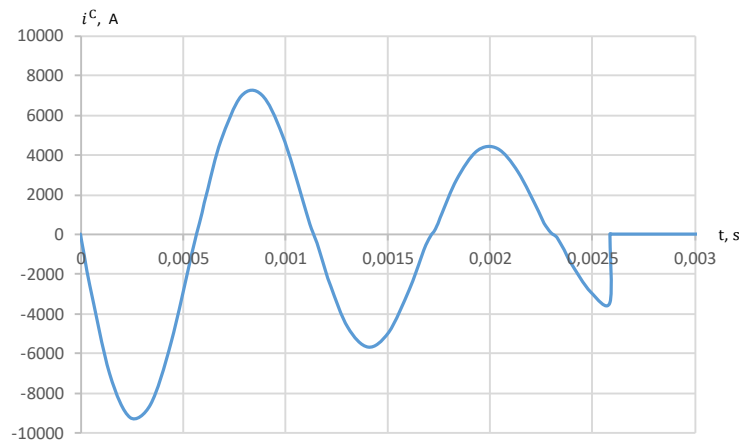
Jak widać na rys. 6.3 moduł cewkowy w trybie pracy W-R przy połączeniu kaskadowym modułów ma mniejszy udział w procesie rozpędzania pocisku, niż pozostałe dwa moduły napędowe (mimo tego, że pracując autonomicznie rozpędza pocisk do tej samej prędkości). Dla wyjaśnienia tego zjawiska rozważmy pracę samego modułu C (jego pracę samodzielną), ale przy założeniu różnych prędkości początkowych pocisku.

Przedstawiona na rys. 6.4 charakterystyka potwierdza, że wraz ze wzrostem wartości początkowej prędkości v_0^C , przyrost prędkości pocisku uzyskiwany w module cewkowym monotonicznie maleje. Zjawisko to jest tym wyraźniejsze, im większa jest wartość napięcia na baterii kondensatorów.

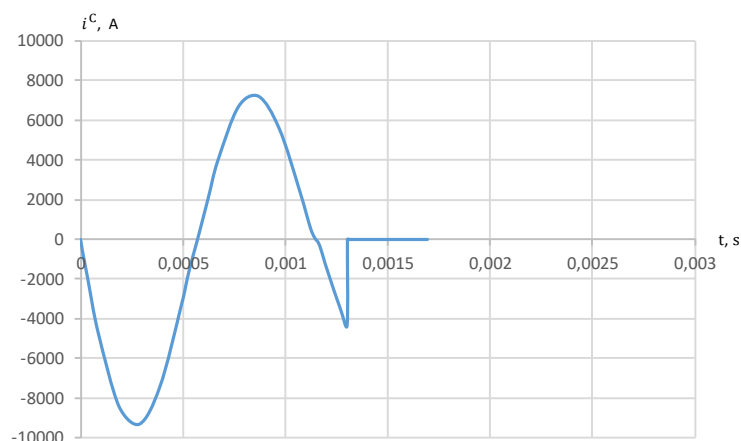


Rys. 6.4. Charakterystyka sterowania modułem cewkowym: przyrost prędkości elementu ruchomego ($v_K^C - v_0^C$) w funkcji wartości początkowej prędkości v_0^C przy założeniu różnych wartości początkowych napięcia na baterii kondensatorów: $U_0^C = 750 \text{ V}$, $U_0^C = 550 \text{ V}$, $U_0^C = 350 \text{ V}$, $U_0^C = 150 \text{ V}$

W kolejnym kroku rozważmy przebiegi czasowe prądu rozładowania baterii kondensatorów zasilających moduł cewkowy dla dwóch różnych wartości prędkości początkowej. Z porównania tych wykresów wynika, że na skutek tego, że prąd rozładowania musi być wyłączony po osiągnięciu przez pocisk połowy długości cewki (rozdział 2, rys. 2.1), energia elektryczna związana z prądem rozładowania jest wraz ze wzrostem prędkości początkowej pocisku coraz to mniejsza. Najprostszą miarą pomniejszania się energii elektrycznej może być sama liczba impulsów do chwili wyłączenia prądu rozładowania, co widać wyraźnie na rys. 6.5 i rys. 6.6. Konsekwencją tego zjawiska jest przekazywanie pociskowi coraz to mniejszej energii w miarę wzrostu jego prędkości początkowej – przyrost prędkości pocisku w module cewkowym staje się coraz mniejszy.

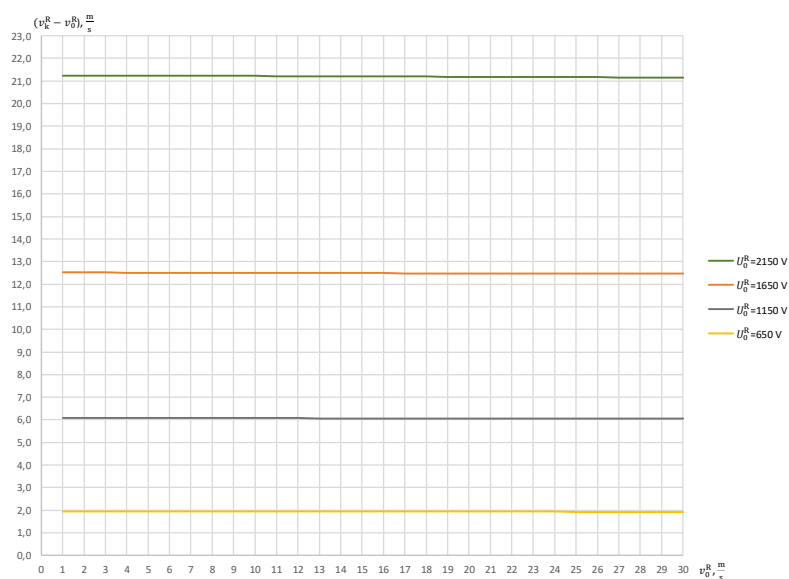


Rys. 6.5. Przebieg prądu rozładowania baterii kondensatorów zasilających moduł cewkowy i^C , dla wielkości: $U_0^C = 750 \text{ V}$, $v_0^C = 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ($P_0 = 1 \text{ atm}$) – 4 pełne impulsy i zacząty impuls 5 do chwili wyłączenia prądu rozładowania



Rys. 6.6. Przebieg prądu rozładowania baterii kondensatorów zasilających moduł cewkowy i^C , dla wielkości: $U_0^C = 750 \text{ V}$, $v_0^C = 31 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ($P_0 = 10 \text{ atm}$) – 2 pełne impulsy i zaczęty impuls 3 do chwili wyłączenia prądu rozładowania

Warto jeszcze uzupełnić powyższy rozdział o analizę wpływu prędkości początkowej na pracę modułu szynowego R. Ze względu na to, że w przypadku modułu szynowego nie zachodzi potrzeba przerywania prądu i prąd ten zanika w sposób naturalny, prędkość początkowa pocisku praktycznie nie ma wpływu na przyrost prędkości w module szynowym, co widać wyraźnie na rys. 6.7.



Rys. 6.7. Charakterystyka sterowania modułem szynowym: przyrost prędkości elementu ruchomego $(v_k^R - v_0^R)$ w funkcji wartości początkowej prędkości v_0^R przy założeniu różnych wartości początkowych napięcia na baterii kondensatorów: $U_0^R = 2150 \text{ V}$, $U_0^R = 1650 \text{ V}$, $U_0^R = 1150 \text{ V}$, $U_0^R = 650 \text{ V}$

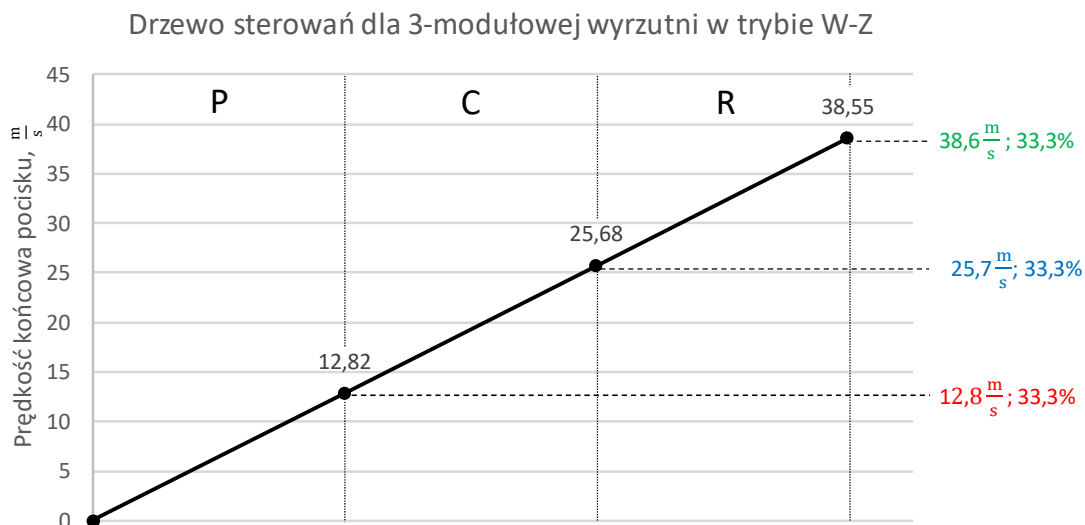
6.4. Tryb pracy zrównoważonej W-Z

Przedstawione rozważania wpływu prędkości początkowej na pracę modułów, dają podstawy do zdefiniowania jeszcze jednego trybu pracy hybrydowej wyrzutni 3-modułowej, a mianowicie trybu, w którym poszczególne moduły połączone w jedną całość (czyli w hybrydową wyrzutnię wielomodułową) zapewniają jednakowy udział w rozpędzaniu pocisku.

Ten nowy tryb pracy, który zapewnia jednakowy udział wszystkich modułów napędowych w procesie rozpędzania elementu ruchomego będziemy nazywać trybem pracy zrównoważonym i oznaczać poprzez W-Z. Wartości znamionowe wielkości sterujących dla trybu W-Z dla konfiguracji PCR określone na drodze badań symulacyjnych, wynoszą:

- dla modułu pneumatycznego $P_{0\ W-Z} = 1,72\ \text{atm}$ (0,1 MPa),
- dla modułu cewkowego $U_{0\ W-Z}^C = 750\ \text{V}$,
- dla modułu szynowego $U_{0\ W-Z}^R = 1677\ \text{V}$.

Przedstawione drzewo sterowań w trybie pracy W-Z na rys. 6.8 ukazuje jednakowy udział poszczególnych modułów napędowych w procesie rozpędzania pocisku: trójodcinkowa gałąź sterowania jest funkcją stałą.

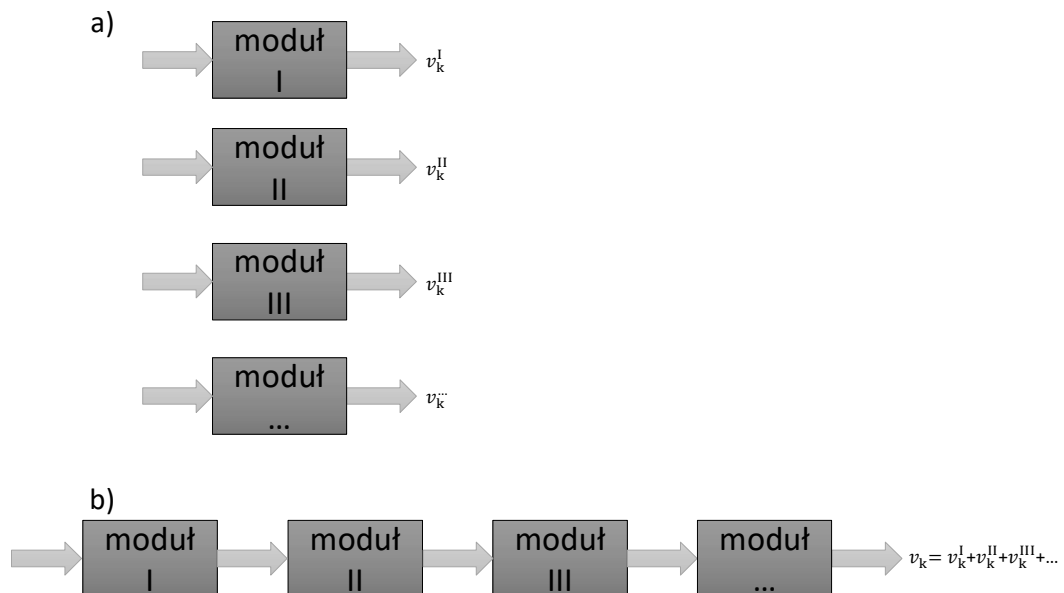


Rys. 6.8. Drzewo sterowań dla hybrydowej wyrzutni w trybie pracy zrównoważonej W-Z

7. Analiza porównawcza różnych konfiguracji hybrydowych wyrzutni wielomodułowych

7.1. Możliwe efekty współdziałania modułów połączonych w ramach 3-modułowej wyrzutni kaskadowej – wyrzutnie klasy pierwszej i drugiej

Kaskadowe połączenie modułów napędowych w strukturę wielomodułową ma na celu uzyskanie jak największej prędkości końcowej pocisku. Efektem pożądanym jest więc uzyskanie prędkości końcowej pocisku, która byłaby równa sumie prędkości końcowych, uzyskiwanych w każdym z tych modułów przy ich pracy samotnej (autonomicznej). To oczekiwanie projektanta charakteryzuje rys. 7.1. Przypadek ten będziemy określać terminem „hybrydowej wyrzutni wielomodułowej klasy pierwszej” .



Rys. 7.1. Pożądany efekt połączenia kaskadowego modułów: a) prędkości końcowe modułów pracy samotnej, b) prędkości końcowe dla modułów połączonych kaskadowo – **hybrydowa wyrzutnia wielomodułowa klasy pierwszej**

Okazuje się, że dla niektórych połączeń jest możliwe uzyskanie efektu przedstawionego na rys. 7.1, zaś dla niektórych – jest to niemożliwe (rys. 7.2). Przypadek przedstawiony na rys. 7.2 będziemy określać terminem „hybrydowej wyrzutni wielomodułowej klasy drugiej” .



Rys. 7.2. Przypadek połączenia kaskadowego modułów, w którym prędkość końcowa jest mniejsza od sumy prędkości końcowych poszczególnych modułów – **hybrydowa wyrzutnia wielomodułowa klasy drugiej**

Uzyskanie efektu przedstawionego na rys. 7.1 b, opisanego równaniem:

$$v_k = v_k^I + v_k^{II} + v_k^{III} + \dots \quad (7.1)$$

jest możliwe w przypadku, gdy łączone są w kaskadę (w hybrydową wyrzutnię wielomodułową) moduły pneumatyczne P oraz moduły szynowe R. Jak wynika z rozważań przedstawionych w rozdziale 6.3, w przypadku, gdy w skład konfiguracji hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej wchodzi moduł cewkowy C (i nie jest on modułem pierwszym), to mamy do czynienia z efektem przedstawionym na rys. 7.2, opisanym nierównością:

$$v_k < v_k^I + v_k^{II} + v_k^{III} + \dots \quad (7.2)$$

Reasumując, wyrzutnie klasy drugiej, spełniające równanie (7.2), to wyrzutnie zawierające – oprócz modułów pneumatycznych i szynowych – moduły cewkowe.

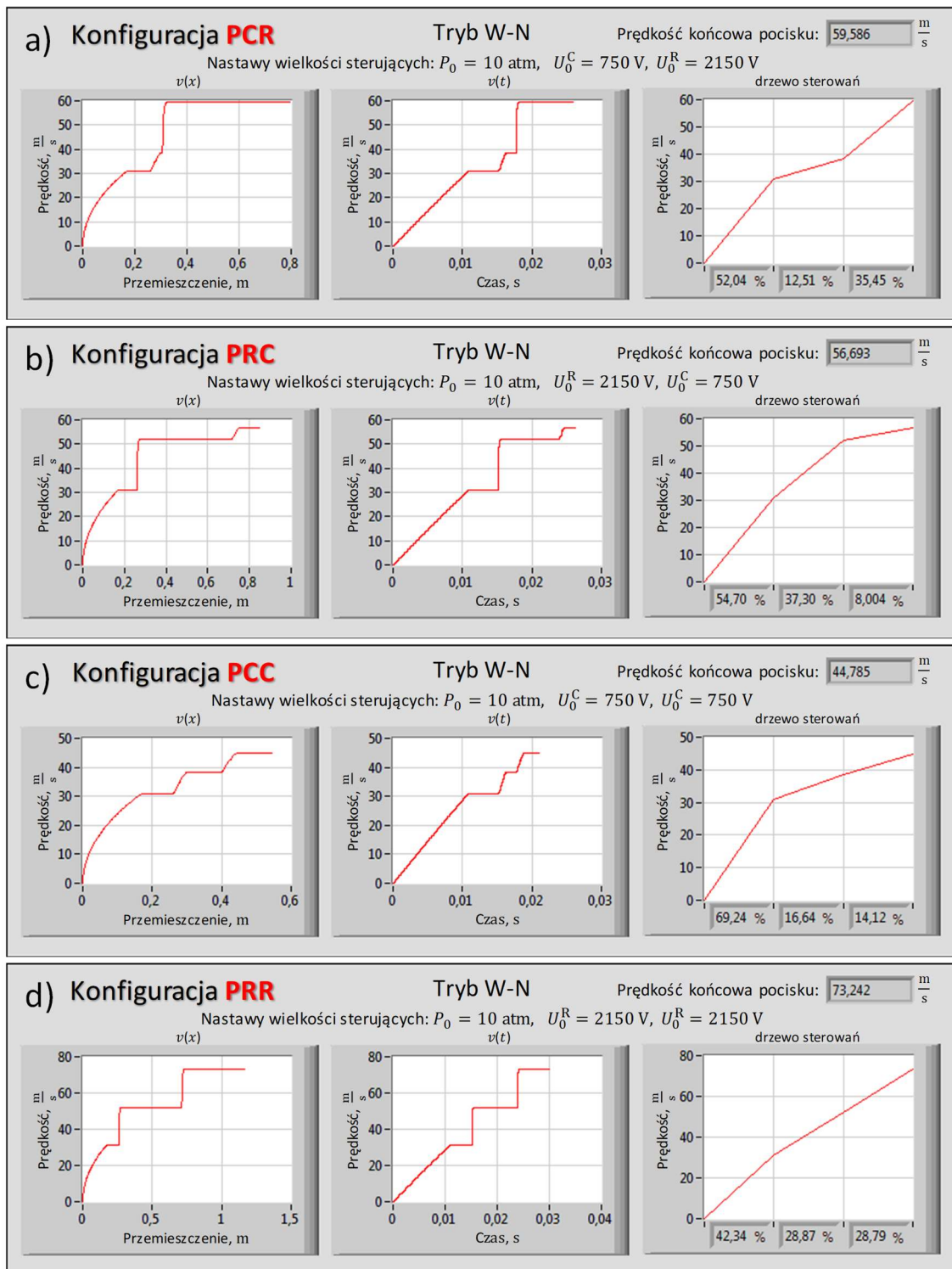
7.2. Analiza porównawcza różnych konfiguracji hybrydowych wyrzutni wielomodułowych z punktu widzenia maksymalnej prędkości pocisku i przy różnych trybach pracy

Dokonano porównania następujących konfiguracji: PCR, PRC, PCC, PRR dla trzech różnych zdefiniowanych w rozprawie trybów pracy W-N, W-R, W-Z (związanych z różnymi zakresami zmian wielkości sterujących).

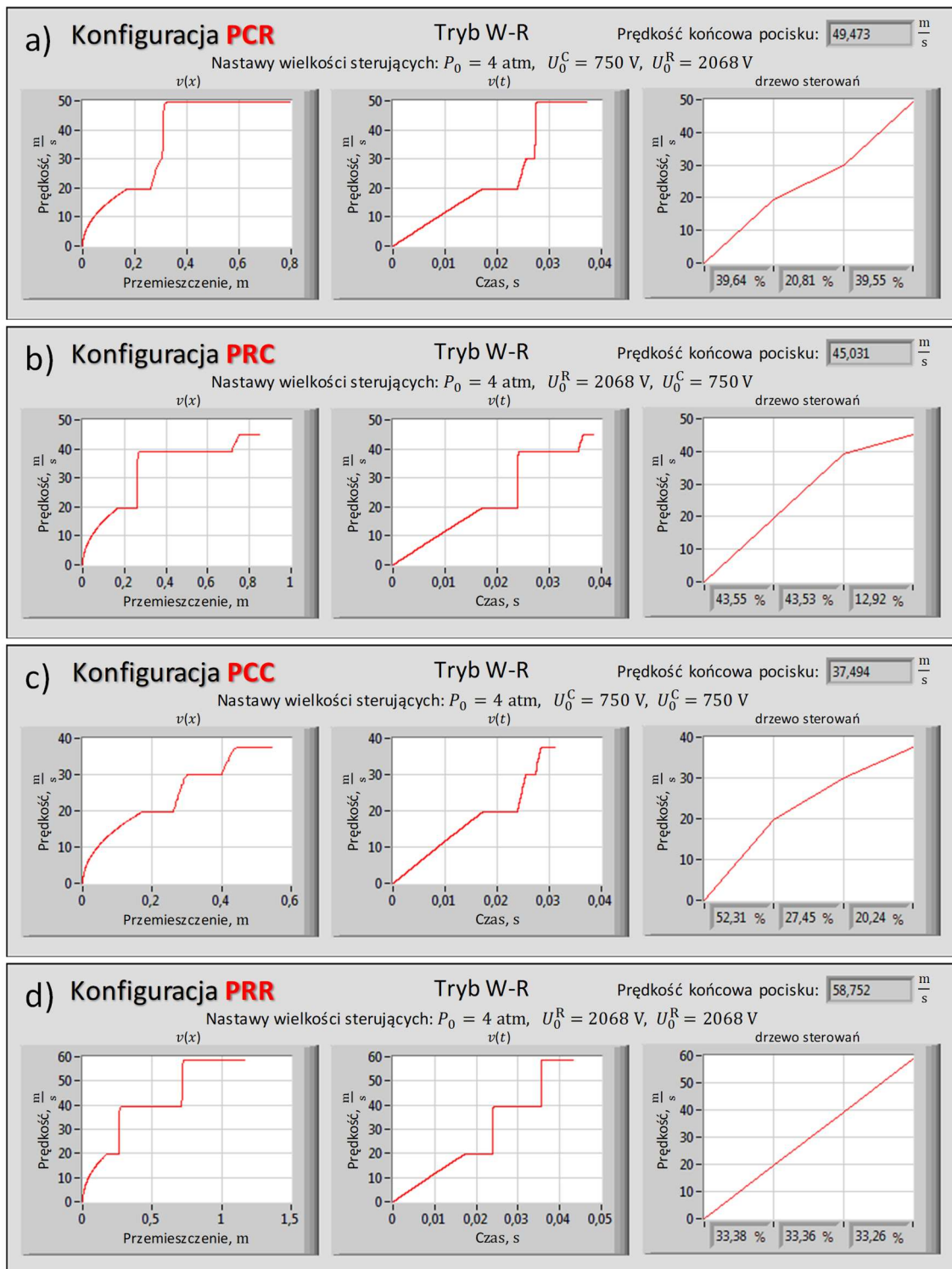
Zestawienia wyników symulacyjnych dla trybów W-N, W-R, W-Z przedstawiają odpowiednio rys. 7.3, rys. 7.4 i rys. 7.5. Rysunki te pozwalają określić: maksymalne uzyskiwane prędkości pocisku, czasy przelotu pocisku przez wyrzutnię, udziały poszczególnych modułów w rozpędzaniu pocisku (przyrosty prędkości są widoczne na gałęziach sterowania oraz są dodatkowo podane w procentach) oraz zakresy zmian wielkości sterujących.

Należy podkreślić, że dla trybu pracy W-Z wartości znamionowe wielkości sterujących zależą od przyjętej konfiguracji.

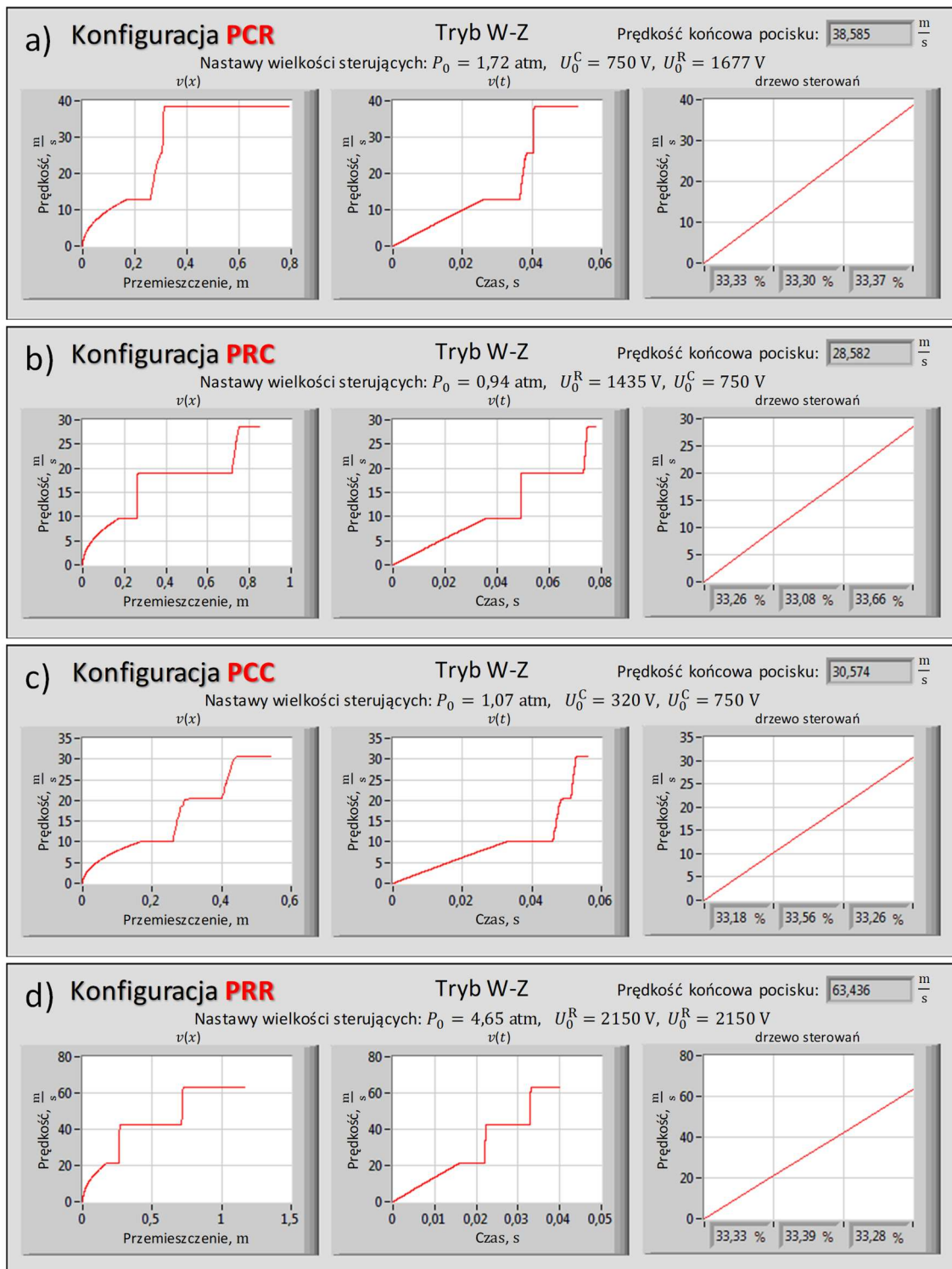
Jak można zauważyć na rys. 7.3, rys. 7.4 i rys. 7.5, proces celowego zmniejszenia zakresu zmian wielkości sterującej dla trybu W-R i W-Z (dla uzyskania określonego kształtu drzewa sterowań) skutkuje zmniejszeniem maksymalnej prędkości końcowej pocisku w stosunku do trybu W-N, z drugiej zaś strony pomniejszone zakresy zmian wielkości sterujących, pozwalają na użycie mniejszych kompresorów (sprężarek), jak też na zastosowanie baterii kondensatorów na mniejsze napięcia. Otwiera to drogę do dalszych badań o charakterze optymalizacyjnym.



Rys. 7.3. Zestawienie wyników symulacyjnych dla konfiguracji: a) PCR, b) PRC, c) PCC, d) PRR – w trybie pracy W-N



Rys. 7.4. Zestawienie wyników symulacyjnych dla konfiguracji: a) PCR, b) PRC, c) PCC, d) PRR – w trybie pracy W-R



Rys. 7.5. Zestawienie wyników symulacyjnych dla konfiguracji: a) PCR, b) PRC, c) PCC, d) PRR – w trybie pracy W-Z

8. Podsumowanie i główne osiągnięcia

Przedstawiono zasady działania wyrzutni elektromagnetycznych, omówiono historię ich budowy oraz dokonano przeglądu literatury (rozdział 1 rozprawy doktorskiej). Szczególny nacisk położono na wskazanie perspektyw rozwojowych wyrzutni, jak też możliwych nowych zastosowań.

Opracowano **kompleksowy rekonfigurowalny model matematyczny hybrydowej wyrzutni wielomodułowej** w środowisku LabVIEW, na przykładzie wyrzutni typu PCR (rozdziały 3 i 4 rozprawy doktorskiej). Rozwiązano **problem spójnej i przejrzystej, graficznej prezentacji szerokiej klasy charakterystyk statycznych i dynamicznych** w postaci stopniowo rozwijanych okien programu LabVIEW: okno – Front Panel z możliwością wyboru dowolnych charakterystyk (rozdział 4 rozprawy doktorskiej). Dokonano również klasyfikacji i zbiorczego zestawienia różnych możliwych konfiguracji połączeń modułów napędowych (rozdział 5 rozprawy doktorskiej).

Rozdział 6 rozprawy doktorskiej poświęcono stworzeniu podstaw matematycznych dla tak zwanych **drzew sterowań**. Wprowadzono pojęcie zastępczych charakterystyk czasowych prędkości pocisku oraz pojęcie zastępczych wartości przyspieszeń. Opisano i przedstawiono przykłady różnych wariantów drzew sterowań oraz ich klasyfikację.

Zdefiniowano trzy **tryby pracy hybrydowej wyrzutni wielomodułowej**: tryb nominalny W-N i tryb zredukowany W-R (rozdział 7 rozprawy doktorskiej) oraz tryb zrównoważony W-Z (rozdział 10 rozprawy doktorskiej), co pozwoliło na opracowanie metodologii badania współpracy modułów napędowych o różnych zasadach działania (rozdział 8 rozprawy doktorskiej).. Ponadto w rozdziale tym zdefiniowano charakterystyki sterowania hybrydowych wyrzutni wielomodułowych względem jednej wybranej zmiennej sterującej, jak też względem dwóch wybranych zmiennych sterujących.

Wyjaśniono i **przeanalizowano wpływ prędkości początkowej pocisku na pracę modułu cewkowego i szynowego** (rozdział 9 rozprawy doktorskiej).

Przeprowadzono **analizę porównawczą różnych konfiguracji wyrzutni wielomodułowych** z punktu widzenia maksymalnych prędkości pocisku przy różnych trybach pracy: W-N, W-R, W-Z, związanych z różnymi zakresami zmian wielkości sterujących (rozdział 11 rozprawy doktorskiej).

Cele osiągnięto na podstawie badań symulacyjnych, bazujących jednakże na modelach matematycznych, które zostały zweryfikowane doświadczalnie m.in. w pracach [3] i [16]. Stąd też można powiedzieć, że cele i wnioski są zweryfikowane w sposób pośredni.

9. Bibliografia

Wybrane pozycje z bibliografii zawartej w rozprawie doktorskiej, obejmującej 91 pozycji.

- [1] **Buchacz J. i Raczyński Z.** Analiza efektywności układów wytwarzających pole magnetyczne w wyrzutni szynowej. *Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe*. 2010, 1 (25).
- [2] **Domin J.** *Hybrid electromagnetic launcher with pneumatic assist — Influence of coil-gun “switch on” and “switch off” time upon missile velocity*. Rzeszów: 13th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE), 2016.
- [3] **Domin J.** Praca doktorska. *Sprzężony model polowo - obwodowy wyrzutni elektromagnetycznej*. Gliwice: Politechnika Śląska Wydział Elektryczny, 2012. (promotor: prof. dr. hab. inż. Krzysztof Kluszczyński)
- [4] **Domin J. i Kluszczyński K.** *Hybrid electromagnetic launcher with pneumatic assist - influence of input supply data upon final velocity missile*. Bochum, Germany: 16th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM), 2015.
- [5] **Domin J. i Kluszczyński K.** Hybrid pneumatic-electromagnetic launcher - general concept, mathematical model and results of simulation. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2013, Tom 89, 12.
- [6] **Domin J. i Kroczyk R.** Moduł szynowy hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej ze wspomaganie pneumatycznym – obliczenia elektromechaniczne. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2010, Tom 86, 12.
- [7] **Domin J. i Kroczyk R.** Ogranicznik prądu rozruchowego dla elektromagnetycznego modułu napędowego z szynami. *Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe*. 2015, 3 (107).
- [8] **Domin J. i Kroczyk R.** *Porównanie wyników modelowania wyrzutni elektromagnetycznej uzyskanych za pomocą wybranych środowisk symulacyjnych*. Wiśła: XI International PhD Workshop OWD 2009, 2009.
- [9] **Egeland A. i Leer E.** Professor Kr. Birkeland: His Life and Work. *IEEE Transactions on Plasma Science*, Tom 14, 6.
- [10] **Engel T. G.** Scientific Classification Method for Electromagnetic Launchers. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017, Tom 45, 7.
- [11] **Halliday D., Resnick R. i Walker J.** *Podstawy fizyki*. Warszawa: PWN, 2003. Tom 3.
- [12] **Janiszewski J. i Woźniak R.** Analiza stanu techniki w dziedzinie elektromagnetycznego miotania pocisków. *Problemy Techniki Uzbrojenia*. 2015, Tom 135, 3.
- [13] **Kluszczyński K. i Domin J.** Two module electromagnetic launcher with pneumatic assist: Modelling, computer simulations and laboratory investigations. *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. 2015, Tom 34, 3.

- [14] **Kluszczyński K., Kroczek R. i Domin J.** Wyznaczenie optymalnych wymiarów cewki napędowej wyrzutni elektromagnetycznej. *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*. 2015, 3 (107).
- [15] **Kondratiuk M. i Gosiewski Z.** Comparison of Electromagnetic Coil Launcher Model with Real-Device Characteristics. *Solid State Phenomena*. 2014, Tom 214.
- [16] **Kroczek R.** Praca doktorska. *Metodologia projektowania, zagadnienia konstrukcyjne, modelowanie oraz badania wyrzutni elektromagnetycznej o napędzie hybrydowym*. Gliwice: Politechnika Śląska Wydział Elektryczny, 2014.
(promotor: prof. dr. hab. inż. Krzysztof Kluszczyński)
- [17] **Kroczek R. i Domin J.** *A Comsol Multiphysic using for Designing a Hybrid Electromagnetic Launcher*. Paris: COMSOL Conference, 2010.
- [18] **Kroczek R. i Domin J.** *Metodyka projektowania wyrzutni elektromagnetycznej*. Wiśła: XII International PhD Workshop OWD 2010, 2010.
- [19] **Kroczek R. i Domin J.** Projekt pneumatycznego modułu napędowego jako zadajnika prędkości początkowej w hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej. *Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe*. 2015, 4 (108).
- [20] **Kroczek R. i Domin J.** Weryfikacja komputerowych modeli jednostopniowej wyrzutni elektromagnetycznej na stanowisku badawczym single step. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*. 2009, Tom 63, 29.
- [21] **Makowski T.** Hybrydowa wyrzutnia elektromagnetyczna z modułem cewkowym jako ogranicznik prądu w module szynowym. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2016, 2, strony 75-78.
- [22] **Makowski T.** Koncepcja systemu sterowania hybrydową wyrzutnią elektromagnetyczną przy zastosowaniu sterownika czasu rzeczywistego. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2017, Tom 7, 2.
- [23] **Makowski T. i Kluszczyński K.** *Dynamic model of hybrid electromagnetic launcher for simulations in LabVIEW environment*. Nałęczów: International Symposium on Electrical Machines (SME), 2017.
- [24] **McNab I. R.** Early electric gun research. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1999, Tom 35, 1.
- [25] **Raczyński Z.** Model wyrzutni elektromagnetycznej. *Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe*. 2007, 1 (22).
- [26] **Raczyński Z. i Szafraniec A.** Armata elektromagnetyczna jako broń przyszłego pola walki. *Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe*. 2005, 1 (21).
- [27] **Shirong Y. i inni.** A novel type rail-coil hybrid electromagnetic launcher. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2005, Tom 41, 1.
- [28] **Tzeng J. T. i Schmidt E. M.** Comparison of Electromagnetic and Conventional Launchers Based on Mauser 30-mm MK 30-2 Barrels. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2011, Tom 39, 1.

- [29] **Walentynowicz J.** Future weapon systems for all electric combat vehicles. *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2007, Tom 14, 1.
- [30] **Weldon W.F.** A taxonomy of electromagnetic launchers. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1989, Tom 25, 1.
- [31] **Ying W., Marshall R. A. i Shukang C.** *Physics of Electric Launch*. China : Science Press, 2004.
- [32] **Ziv M. i Johnson J. M.** *Electromagnetic Rail Gun: Providing Greater Flexibility for the 21st Century*. Office of Naval Research, 2015.