

Tyczka Mateusz, mgr inż.

e-mail: mateusz.tyczka@polsl.pl

Skarka Wojciech, dr hab. inż. Prof. Pol. Śl.

e-mail: wojciech.skarka@polsl.pl

Politechnika Śląska, Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn

MODEL NUMERYCZNY UKŁADU ODZYSKU ENERGII POJAZDU WYŚCIGOWEGO

Streszczenie: W artykule przedstawiono opis modelu numerycznego układu odzysku energii elektrycznego pojazdu wyścigowego. Dodatkowo w artykule opisano także model fenomenologiczny całego układu odzysku energii oraz przedstawiono elementy składowe zarówno modelu numerycznego jaki modelu fenomenologicznego układu. Sam model numeryczny utworzono w pakiecie Simulink programu Matlab. Wyniki symulacji potwierdzają skuteczność układu odzysku energii w bolidzie.

Słowa kluczowe: model numeryczny, odzysk energii, symulacja, Matlab, Simulink

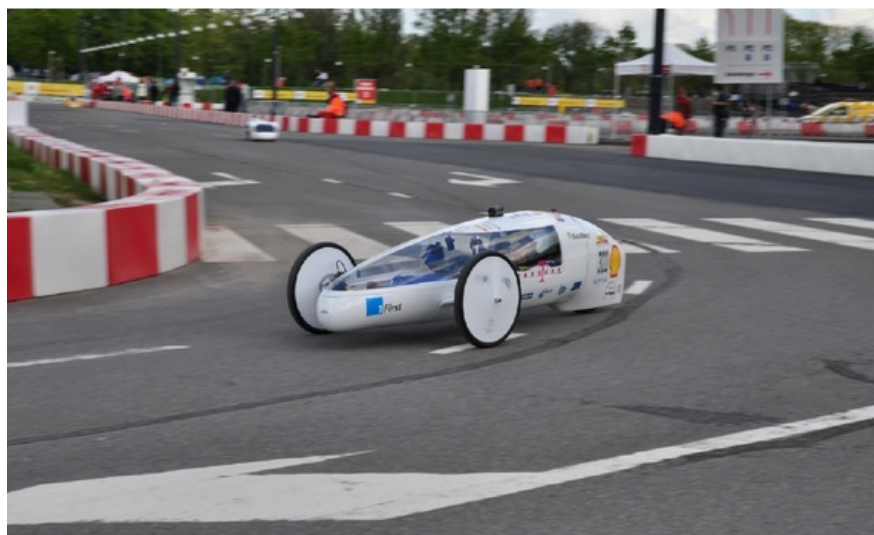
THE NUMERICAL MODEL OF THE ENERGY RECOVERY SYSTEM OF RACING CAR

Abstract: The article describes the numerical model of the energy recovery system of electric racing car. In addition, the article describes a phenomenological model of the energy recovery system and presents elements of the numerical model and the phenomenological model. The numerical model was created in Matlab Simulink package. Simulation results confirm the effectiveness of the energy recovery system in the car.

Keywords: numerical model, energy recovery, simulation, Matlab, Simulink

1. WPROWADZENIE

Model układu odzysku energii powstał na potrzeby Studenckiego Koła Naukowego Modelowania Konstrukcji Maszyn działającego na wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej. W ramach prac koła konstruowany jest energooszczędny bolid elektryczny, startujący w zawodach Shell Eco-marathon. Celem zawodów jest skonstruowanie bolidu mogącego przejechać określony dystans zużywając jak najmniej energii. Zespół startował już w zawodach w 2012 i 2013 roku pod nazwą Smart Power. W 2013 roku bolid MuSHELLka uzyskał wynik 454 km/KWh.



Rys. 1 Bolid MuSHELLka na torze w Rotterdamie (fot. M Wyleżoł)

Zawody w 2012 i 2013 roku rozgrywane były w Rotterdamie. Najbliższa edycja zawodów w 2014 roku odbędzie w tym samym miejscu, co dwie poprzednie edycje. Tor wykorzystywany podczas zawodów Shell Eco-marathon jest torem ulicznym. Choć trasa wyścigu odbywa się na płaskim torze, sama nawierzchnia posiada liczne nierówności i wyboje. Dotychczasowa wersja bolidu, posiadająca sztywne zawieszenie nie radziła sobie dobrze na tego rodzaju nawierzchni, przyczyniając się do większych strat energii i w rezultacie gorszego wyniku. Z tego powodu zdecydowano się na zastosowanie bardziej elastycznego zawieszenia.

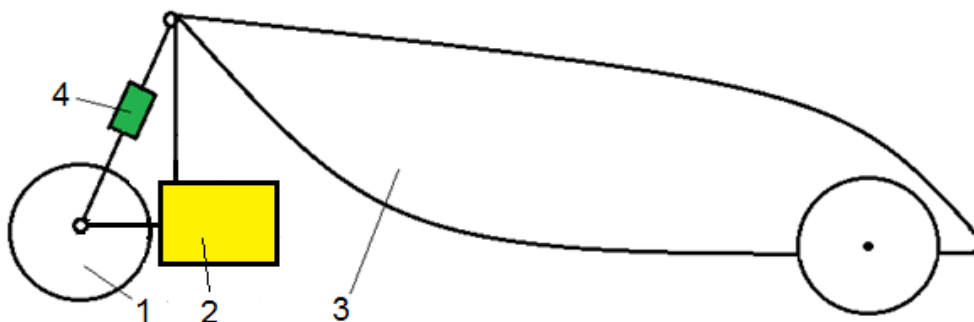
Aby ograniczyć straty powstałe na elastycznym zawieszeniu bolidu zdecydowano się na zastosowanie układu odzysku energii zamiast typowego elementu tłumiącego. W celu określenia ilości energii możliwej do odzyskania oraz optymalizacji parametrów układu odzysku energii opracowano model matematyczny. Ponieważ zadanie odzyskiwania energii z zawieszenia pojazdu jest innowacyjnym i niezwykle rzadko stosowane, brak jest prac związanych z tym zagadnieniem. Trudno też z tego względu, na etapie koncepcji ocenić celowość proponowanego rozwiązania. Budowany model miał rozwiązać te wątpliwości oraz ułatwić dobór cech konstrukcyjnych samego rozwiązania układu. Model został utworzony w pakiecie Simulink programu Matlab.

2. OPIS UKŁADU ZAWIESZENIA

Najważniejszym fragmentem modelu jaki musi zostać poprawnie zamodelowany jest układ zawieszenia. Na podstawie dotychczasowych prób z użyciem bolidu MuSHELLka zdecydowano się na zmianę tylnej części zawieszenia. Przednia część zawieszenia była znacznie bardziej elastyczna od tylnego zawieszenia i spisywała się wystarczająco dobrze podczas zawodów. Wynika to z zastosowania elementów kompozytowych w przedniej części zawieszania. Ostatecznie zdecydowano o pozostawieniu przedniego zawieszenia pojazdu bez zmian i znacznej modyfikacji tylnego zawieszenia, które dotychczas było bardzo sztywne. Sam element odzyskujący energię jest elementem składowym tylnego zawieszenia.

2.1. Opis elementów układu

Zmodyfikowany układ zawieszenia został zlokalizowany w tylnej części pojazdu, za kierowcą. Składa się on z trzech podstawowych elementów: elementu odzyskującego energię, pojedynczego tylnego koła oraz mechanicznego układu zawieszenia. Schemat ideowy układu zawieszenia został zamieszczony na poniższym rysunku.



Rys. 2 Schemat ideowy tylnego zawieszenia bolidu.

Mechaniczny układ zawieszenia (2) umożliwia ruch tylnego koła (1) w kierunku pionowym. Tylnie koło (1) poruszając się w górę i dół przesuwa sztywne cięgno połączone z elementem odzyskującym energię (4). W modelu uwzględniono także wpływ przedniej części bolidu (3).

Główny element zawieszenia, którym jest mechaniczny układ zawieszenia nie może zostać szczegółowo przedstawiony, gdyż rozwiązanie te będzie podlegało opatentowaniu. Koło tylne jest jednocześnie kołem napędowym, dlatego w skład mechanicznego układu zawieszenia wchodzi także silnik wraz z układem przeniesienia napędu.

2.2. Element odzyskujący energię

Element odzyskujący energię zamienia energię mechaniczną na prąd elektryczny, który może zostać następnie wykorzystany do napędzania bolidu. Energia mechaniczna dostarczana jest do niego od drgającego pionowo koła poprzez sztywne cięgno łączące element odzyskujący energię z kołem. Działanie elementu opiera się na wykorzystaniu alternatora oraz odpowiednio połączonych sprzęgieł i przekładni.

3. Model fenomenologiczny

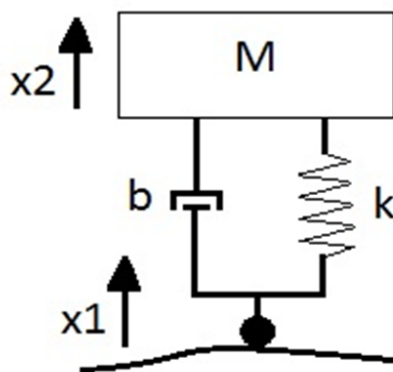
W celu utworzenia modelu numerycznego w programie Matlab lub podobnym, konieczne jest uprzednie utworzenie modelu fenomenologicznego opisującego działanie układu. Podczas tworzenia modelu konieczne jest zastąpienie elementów rzeczywistych ich modelami. W większości przypadków operacja ta nie stwarzała większych problemów. W części przypadków zastąpienie elementów rzeczywistych elementami modelowymi okazało się trudne. Podstawową trudnością było takie dobranie elementów by model był możliwie najprostszy, jednak wystarczająco dokładny do przeprowadzenia obliczeń.

3.1. Tylne koło i element odzyskujący energię

Elementami trudnymi do zamodelowania okazały się element odzyskujący energię oraz tylne koło. Trudność w modelowaniu wynika z budowy tych elementów.

Element odzyskujący energię posiada złożoną budowę. Ze względu na funkcję pełnioną w układzie zawieszenia jest to jednak prosty element rozpraszający energię. Z tego powodu zdecydowano się zastąpić element odzyskujący energię prostym elementem tłumiącym o stałym współczynniku tłumienia. W elemencie odzyskującym energię ilość odzyskiwanej energii także zależy od prędkości z jaką porusza się cięgno podłączone do elementu odzyskującego energię.

W przypadku koła problem okazał się bardziej skomplikowany. Sama felga koła jest prostym elementem o stałej masie. Na feldze znajduje się jednak opona, która jest pneumatykiem. Opona posiada właściwości sprężyste i tłumiące których wpływ nie może zostać pominięty w modelowanym układzie. Ostatecznie zdecydowano się na najczęściej wykorzystywany model koła.[4] Został on przedstawiony na poniższym rysunku:

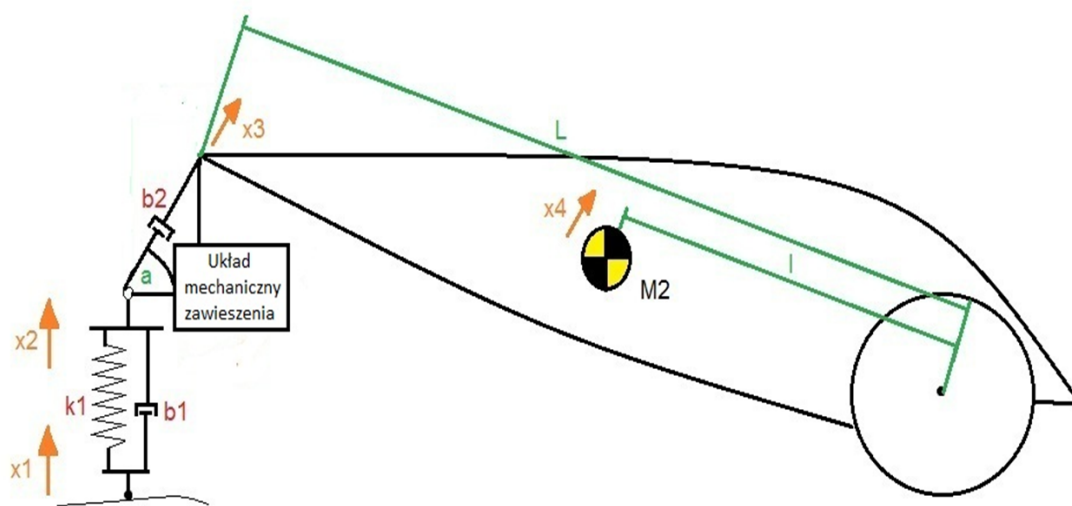


Rys. 3 Model fenomenologiczny koła[4]

W modelu koło zostało zastąpione pojedynczym elementem masowym, sama zaś opona zastąpiona została prostym elementem sprężystym i tłumiącym o stałych parametrach. Takie rozwiązanie uwzględnia w wystarczającym stopniu wpływ opony na drgania koła, nie komplikując przy tym zbytnio całego modelu.[4]

3.2. Schemat modelu i równania ruchu.

Po zastąpieniu wszystkich elementów rzeczywistych modelami utworzono model fenomenologiczny całego zawieszenia. Model został przedstawiony na poniższym rysunku.



Rys. 4 Model fenomenologiczny zawieszenia bolidu

Oznaczenia:

- x1- wymuszenie kinematyczne od nierówności drogi,
- x2- przemieszczenie koła,
- x3- przemieszczenie bolidu w miejscu łączenia z układem odzysku energii,
- x4- przemieszczenie środka ciężkości bolidu,
- k1- sztywność koła,
- b1- tłumienie koła,
- b2- tłumienie elementu odzyskującego energię,
- M2- masa bolidu,
- L, l, a- parametry geometryczne.

Na podstawie modelu utworzono układ równań matematycznych opisujących działanie układu.

$$I1 * \ddot{\varphi}^2 + b1 * (\dot{x}^2 - \dot{x}^1) + k1 * (x^2 - x^1) + k2 * \varphi^2 + b2 * (\dot{\varphi}^2 * r * \cos a - \dot{x}^3) = 0 \quad (1)$$

$$M2 * \ddot{x}^4 + b2 * (\dot{x}^3 - \dot{x}^2 * \sin a) = 0 \quad (2)$$

W równaniach występują cztery zmienne, jednak tylko dwie są zmiennymi niezależnymi. Po uwzględnieniu związków geometrycznych i przekształceniu równań (1) i (2) otrzymano układ równań (3) i (4). Jest on podstawą utworzenia modelu numerycznego w pakiecie Simulink programu Matlab.

$$I1 * \ddot{\varphi}^2 + b1 * (\dot{\varphi}^2 * r - \dot{x}1) + k1 * (\varphi^2 * r - x1) + k2 * \varphi^2 + b2 * (\dot{\varphi}^2 * r * \cos a - \frac{\dot{x}4 * L}{l}) = 0 \quad (3)$$

$$M2 * \ddot{x}4 + b2 * (\frac{\dot{x}4 * L}{l} - \dot{\varphi}^2 * r * \cos a) = 0 \quad (4)$$

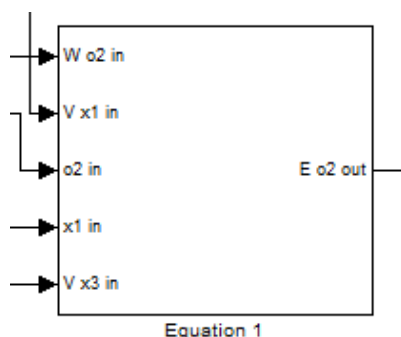
4. Model numeryczny

Model numeryczny układu został utworzony w pakiecie Simulink programu Matlab. Model na podstawie równań (1) i (2) oraz sygnału wymuszenia kinematycznego pochodzącego od nierówności drogi, oblicza ilość energii generowanej przez element odzyskujące energię.

4.1. Bloki modelu numerycznego.

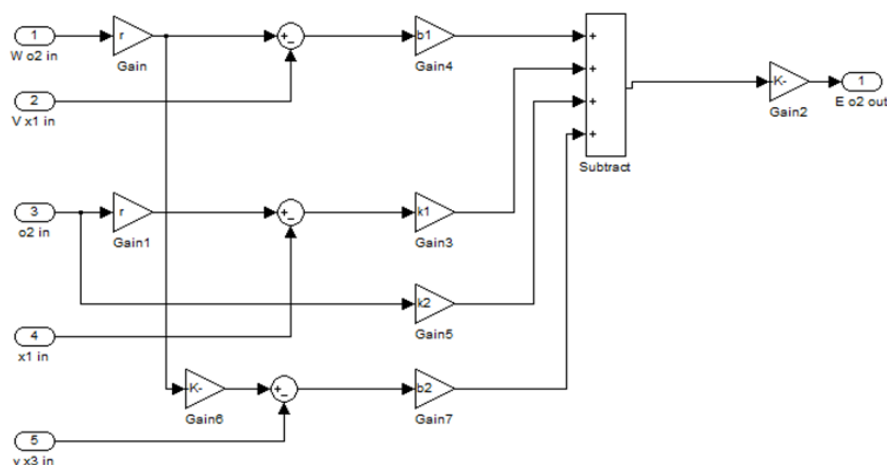
W celu zwiększenia czytelności całego modelu, został on podzielony na bloki. Bloki zostały wyodrębnione na podstawie funkcji realizowanych przez poszczególne grupy elementów modelu.

Najważniejszymi blokami modelu są bloki odpowiedzialne za równania (1) i (2), otrzymane z modelu fenomenologicznego. W modelu występują dwa takie bloki, każdy odpowiada za jedno z równań.



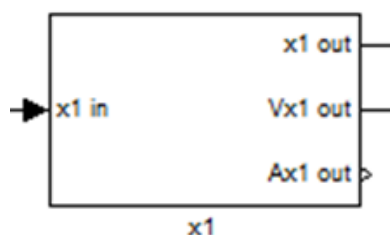
Rys. 5 Blok odpowiedzialny za równanie (1) modelu

Struktura wewnętrzna bloku odpowiada i wynika bezpośrednio z równania (1) modelu. Blok na podstawie wartości odpowiednich zmiennych oraz ich pochodnych oblicza drugą pochodną zmiennej φ^2 . Kolejność przekształceń poszczególnych sygnałów w bloku bezpośrednio odpowiada kolejności przekształceń w równaniu (1) modelu. Blok odpowiedzialny za równanie (2) modelu został utworzony w analogiczny sposób.



Rys. 6 Wewnętrzna część bloku odpowiedzialnego za równanie (3) modelu

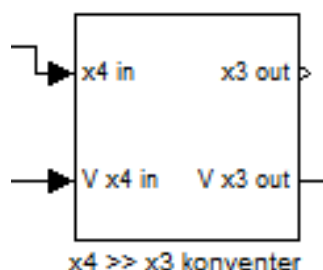
Ważnymi blokami modelu są bloki odpowiedzialne za przeliczenia pomiędzy poszczególnymi pochodnymi zmiennych występujących w równaniu.



Rys. 7 Blok odpowiedzialny za przeliczanie pochodnych wymuszenia x_1

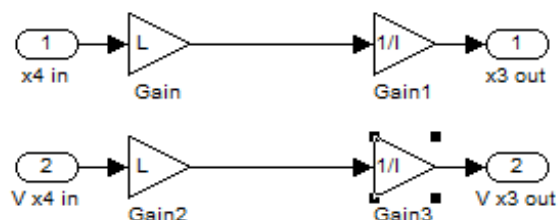
Wewnątrz tych bloków znajdują się odpowiednio połączone bloczki całkujące lub różniczkujące. Dzięki blokom możliwe są łatwe przeliczenia pomiędzy pochodnymi poszczególnych zmiennych.

Kolejną część stanowią bloki odpowiedzialne za związki kinematyczne i geometryczne występujące w modelu. Bloki te przeliczają wartości pomiędzy zmiennymi nie występującymi w równaniach (3) i (4) zmiennymi niezależnymi występującymi w modelu.



Rys. 8 Blok przekształceń

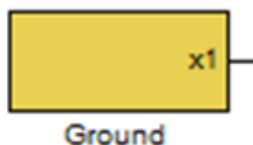
Wewnątrz bloku znajdują się wzmacnienia, których wartość zależy od związków kinematycznych i geometrycznych występujących w modelu.



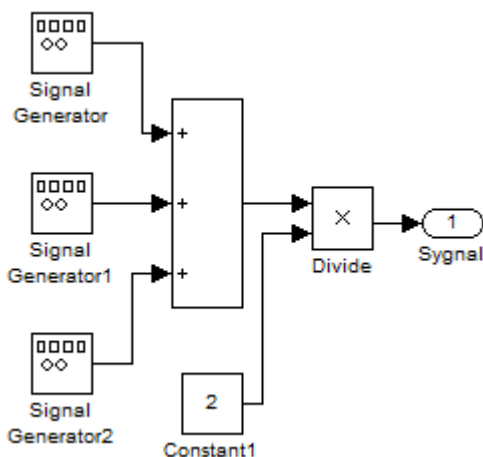
Rys. 9 Wewnętrzna część bloku przekształceń

W modelu występują ponadto blok odpowiedzialny za generowanie sygnału odpowiadającego nierównościom występującym na drodze oraz blok obliczający ilość energii wytwarzanej przez element odzyskujący energię. Blok generujący sygnał składa się z generatorów sygnałów odpowiednio ze sobą połączonych. W generatorach

ustawiono takie parametry, by sygnał wynikowy odpowiadał nierównościom występującym na drodze.

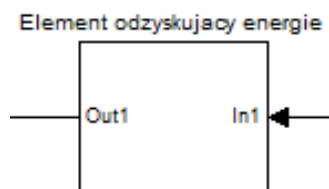


Rys. 10 Blok generujący wymuszenie kinematyczne



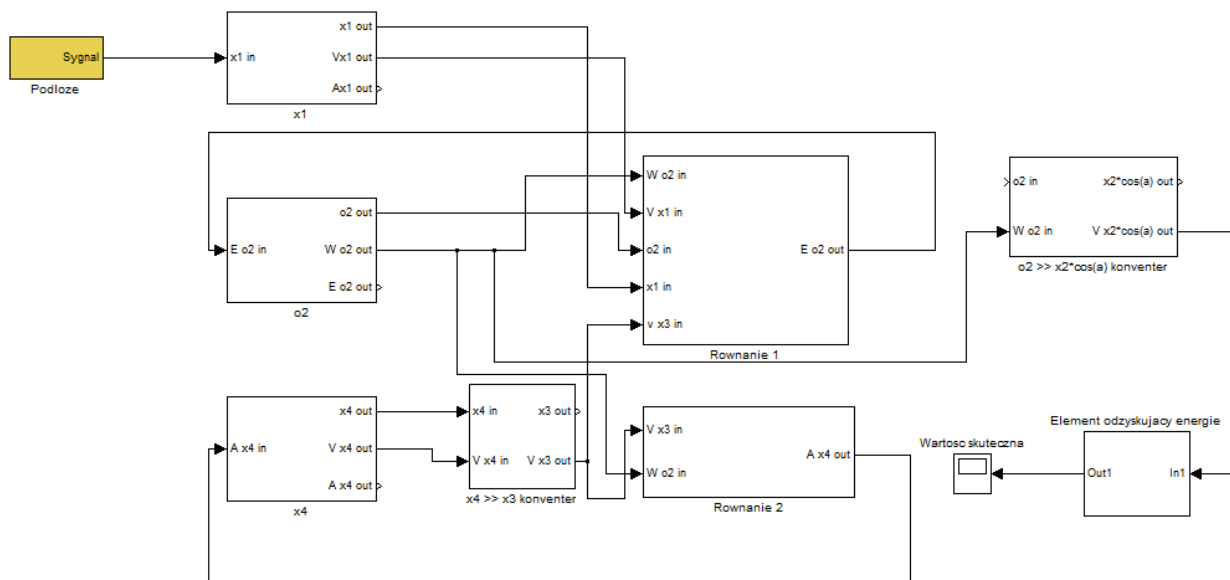
Rys. 11 Wewnętrzna część bloku generującego wymuszenie kinematyczne

Struktura wewnętrzna bloku odpowiedzialnego za obliczanie ilości generowanej energii odpowiada budowie elementu odzyskującego energię. Dokładny opis samego elementu odzyskującego energię nie może zostać przedstawiony ze względu na dobro zespołu. Układ odzysku energii stanowi przewagę w stosunku do innych zespołów startujących w zawodach.



Rys. 12 Blok obliczający ilość generowanej energii

Model numeryczny utworzony w programie Simulink pakiet Matlab wraz ze wszystkimi blokami użytymi w modelu przedstawia poniższy rysunek.

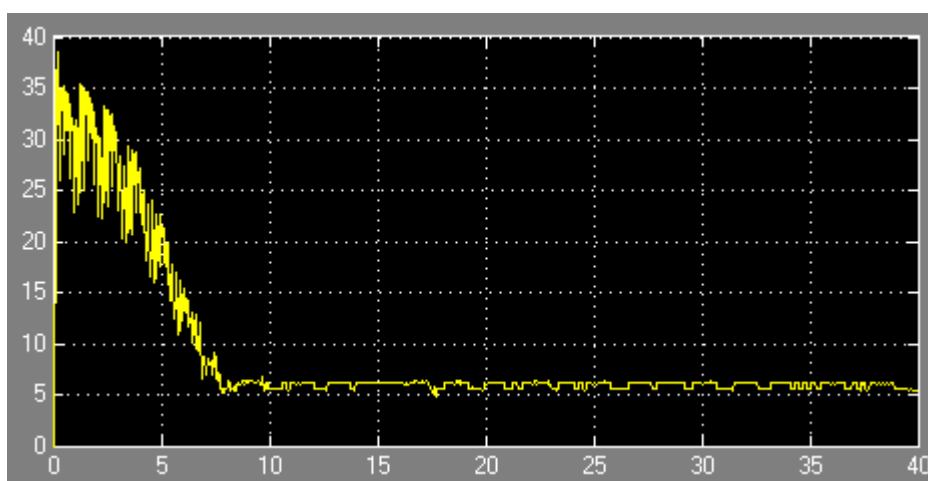


Rys. 13 Blok obliczający ilość generowanej energii

5. Wyniki

W opracowanym modelu wykonano symulacje numeryczne układu odzysku energii. Podczas symulacji jako sygnału wymuszenia użyto sygnałów odpowiadających nierównościom powierzchni występującym na drodze. Wynikiem symulacji był wykres mocy skutecznej generowanej przez element odzyskujący energię.

Podczas symulacji uzyskano wynik 5,5 W mocy skutecznej. Odpowiada to 3,6 Wh energii generowane podczas całego wyścigu. Stanowi to około 10% całkowitej energii zużywanej przez bolid podczas wyścigu. Wykres przedstawiający wyniki symulacji został zamieszczony poniżej.



Rys. 14 Wynik symulacji- wykres wartości mocy skutecznej uzyskany w pakiecie Simulink programu Matlab Oś pionowa: moc skuteczna odzyskiwana [W], Oś pozioma: czas symulacji [s]

Początkowy skok wartości mocy skutecznej, trwający do około 7 s związany jest z inicjowaniem symulacji. Właściwy wynik symulacji rozpoczyna się po około 7 sekundach, kiedy przebieg jest już ustabilizowany.

6. Uwagi końcowe

- W opracowanym modelu niektóre z parametrów podlegają ciągłej weryfikacji i optymalizacji, dotyczy to zwłaszcza parametrów koła oraz parametrów związanych z elementem odzyskującym energię.
- Model jest stale udoskonalany i rozbudowywany, w przyszłości możliwa jest integracja modelu numerycznego układu odzysku energii z modelem energetycznym całego bolidu.
- Wyliczony wynik jest wartością przybliżoną gdyż nie jest znany przebieg wymuszenia dla zawieszenia w trakcie wyścigu na torze w Rotterdamie.
- Możliwe jest polepszenie uzyskanych wyników odzysku energii poprzez dostrojenie parametrów układu zawieszenia, a także poprzez adaptacyjne dostosowanie tych parametrów.
- Na podstawie wstępnych wyników obliczeń można stwierdzić, że montowanie układu odzysku energii w energooszczędnych pojazdach elektrycznych jest uzasadnione względami technicznymi i energetycznymi, a oszczędności z tytułu zastosowania takich układów mogą przynieść wymierne korzyści.

7. LITERATURA

- [1] Cannon R. H.: „Dynamika Układów Fizycznych”. WNT, Warszawa 1973.
- [2] Celmerowski A.: „Modelowanie i symulacja układów fizycznych Matlab/Simulink”. Politechnika Białostocka Białystok 2008
- [3] Mrozek B., Mrozek Z.: „MATLAB i Simulink: poradnik użytkownika”. Helion Gliwice 2010
- [4] Zdanowicz P.: „Model własności promieniowych pneumatyka wykorzystywany do symulacji testu diagnostycznego stanu amortyzatorów” Czasopismo Techniczne. Mechnika, 105, 8, 2008, s. 29- 48
- [5] Trojnacki M. T., Nycz S. „Modelling of mechnisms using SimMechanics toolbox of Matlab/ Simulink packge” International Journal of Applied Mechanics and Engineering, 15, 3, 2010
- [6] Sternal K. Cholewa A. Skarka W. Targosz M.: „Electric vehicle for the students' Shell Eco-marathon competition. Design of the car and telemetry system”, Communications in Computer and Information Science, Telematic in the Transport Environmnt, Springer, Berlin, 2012, vol. 329 s. 26-33
- [7] Targosz M. Szumowski M. Skarka W. Przyszałka P.: „Velocity Planning of an Electric Vehicle Using an Evolutionary Algorithm”, Communications in Computer and Information Science, Activities of Transport Telematics, Springer, Berlin, 2013, vol. 395 s. 171-177
- [8] Skarka W., Otrębska M., Zamorski P., Cichoński K.: „Designing safety systems for electric race car”, Communications in Computer and Information Science, Activities of Transport Telematics, Springer, Berlin, 2013, vol. 395 s. 139-146