



Lodz University of Technology

mgr inż. Paweł Adamski

Promotor: dr hab. inż. Paweł Olejnik, prof. uczelni

Tytuł przewodu doktorskiego:

Analysis of the impact of a supercapacitor on electrically driven wheeled vehicles

Analiza wpływu zastosowania superkondensatora w pojazdach kołowych z napędem elektrycznym

13.06.2023, Łódź

Plan prezentacji

1
O autorze

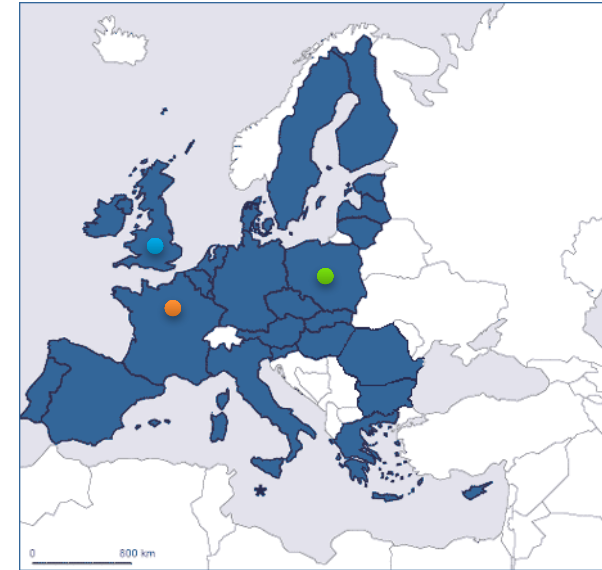
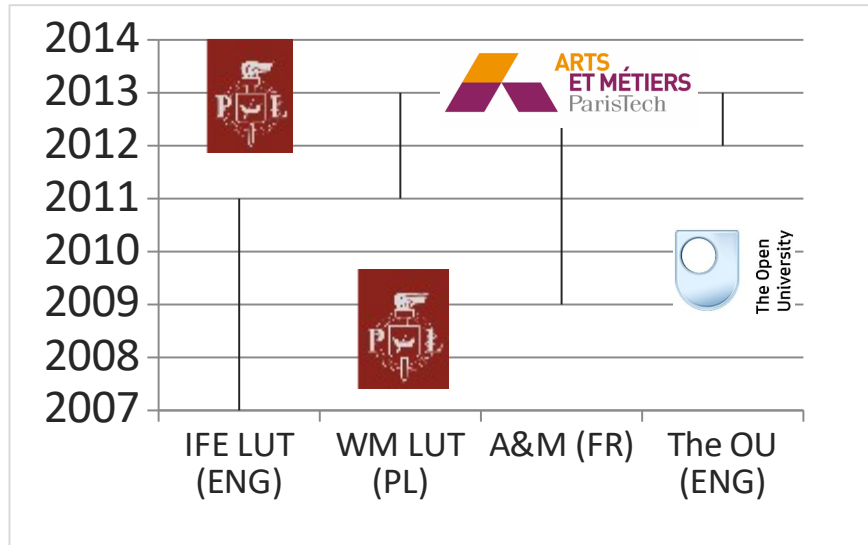
2
Motywacja

3
Realizacja

4
Wyniki

Czas na pytania i dyskusję na końcu prezentacji

Wykształcenie



Praca naukowa:

- 2015 – 2023 – Przygotowywanie **Doktoratu** na Politechnice Łódzkiej p.t.: „Analiza wpływu zastosowania superkondensatora w pojazdach kołowych z napędem elektrycznym”

Dyplomy:

- 2013 – **Magister Inżynier** – Technologia Budowy Maszyn – PŁ [PI]
- 2013 – **Ingénieur grade master** – Arts et Métiers Paristech (ENSAM) [Fr]
- 2011 – **Inżynier** – Mechanical Engineirng & Applied Computer Science – IFE – PŁ [Eng]



Motywacja

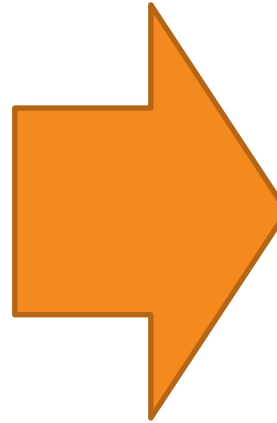
Dlaczego elektromobilność?

Dlaczego superkondensator?

Czyli co warto wiedzieć...

Dlaczego elektromobilność?

1. Mniejsza emisja CO₂
2. Przesunięcie emisji spalin do elektrowni/elektrociepłowni – dalej od ludzi.
3. Użycie surowców nieropopochodnych do napędu pojazdów (transport)



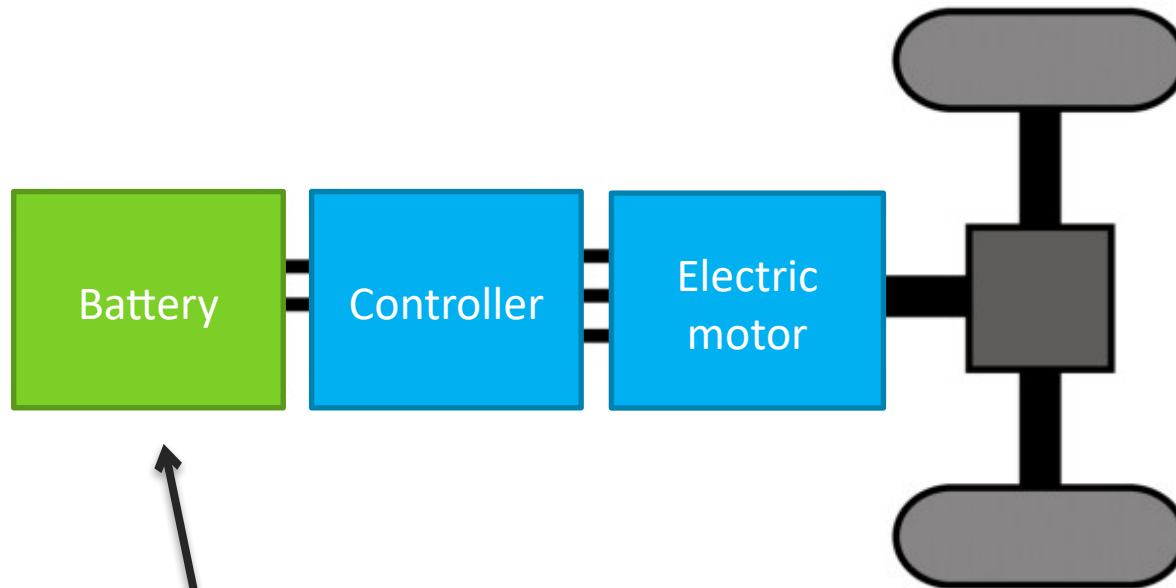
Ekologia!

**Zrównoważony
rozwój!**

**Niezależność
ekonomiczna kraju**

Dlaczego superkondensatory?

Typowy pojazd elektryczny



~ 42% wartości pojazdu

Dlaczego superkondensatory? Dlaczego z Li-ion?

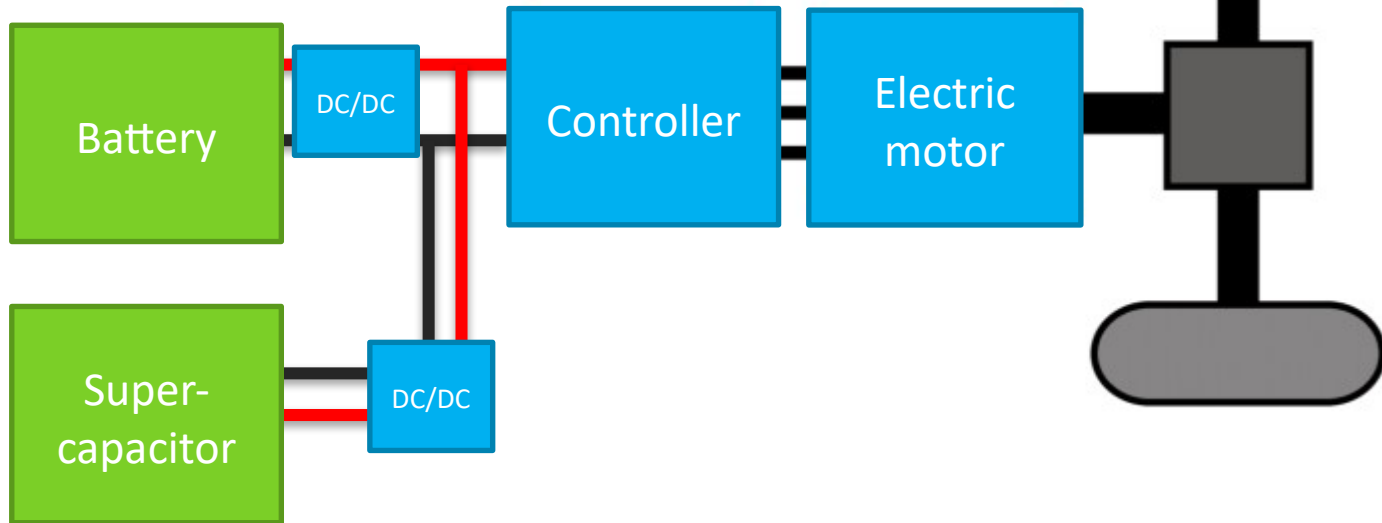
| | W/kg | Wh/kg |
|------------------|------------|------------|
| Bateria li-ion | 208 – 1044 | 35 – 170 |
| Superkondensator | 390 – 5695 | 2,3 – 12,1 |

Zatem: **Warto robić HESS (Hybrid Energy Storage System) z baterii li-ion oraz superkondensatorów**

Źródło: A. Burke, M. Miller / Journal of Power Sources 196 (2011) 514–522

Jak dołączyć superkondensatory?

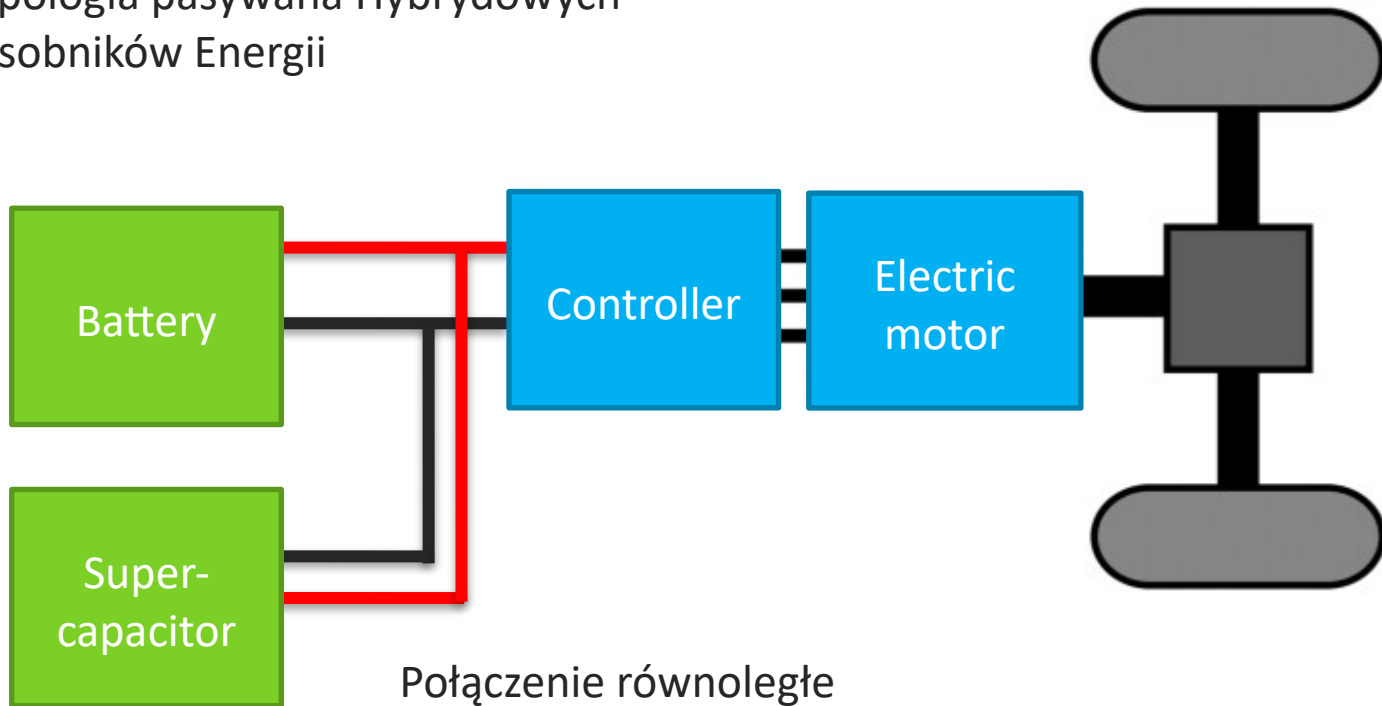
Wysoka gęstość energii
[kWh/kg] oraz [kWh/l]
Główny magazyn energii



Wysoka gęstość mocy [kW/kg]
oraz [kW/l]
Pomocniczy magazyn energii

Jak dołączyć superkondensatory?

Topologia pasywna Hybrydowych
Zasobników Energii



- **Jak dobrać pojemność?**
- **Czy eksperyment drogowy pokaże to samo co symulacja komputerowa?**
- **Czy można osiągnąć korzyść dla żywotności baterii dzięki zastosowaniu Superkondensatora?**

Rozprawa doktorska:
**Analiza wpływu zastosowania
superkondensatora w pojazdach
kołowych z napędem elektrycznym**





Realizacja

- samochód elektryczny
- superkondensator
- badania symulacyjne
- badania HiL

Teza

Możliwe jest wydłużenie czasu eksploatacji bateryjnych pojazdów elektrycznych dzięki zastosowaniu superkondensatora jako pomocniczego zasobnika energii, z dodatkowym korzystnym efektem ekonomicznym.

Samochód elektryczny

- Silnik trójfazowy asynchroniczny
- 102,4 V
- 10,24 kWh
- Zasięg do 70 km
- Baterie LiFePO₄



Superkondensator

Producent: LS Mtron Ltd. (Korea)
Dystrybutor: Dacpol (Warszawa)

Wymiary: 720 x 405 x 226 mm
Masa: 55 kg



1. Primary specification

| Part number | Capacitance (F) | Resistance DC (m Ω) | Max. Current (A, 1s) ¹ | Leakage Current (mA) |
|----------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| LSUM 129R6C 0062F EA | 62 | 13.2 | 2,200 | < 27 |

2. Power & Energy

| Part number | Usable Specific Power, P_d (W/kg) | Impedance Match Specific Power, P_{max} (W/kg) | Energy Density (Wh/kg) | Stored Energy (Wh) |
|----------------------|-------------------------------------|--|------------------------|--------------------|
| LSUM 129R6C 0062F EA | 2,700 | 5,700 | 2.6 | 144.6 |

Superkondensator

Jaka pojemność?

Taka, żeby pomieścić energię kinetyczną samochodu
@ 100 km/h \equiv 225 Wh

... na podstawie poniższego wzoru:

$$E_k = \frac{1}{2}mv_{\max}^2$$

Gdzie:

E_k – energia kinetyczna rozpędzonego pojazdu

m – masa pojazdu

v_{\max} – maksymalna prędkość pojazdu



Model matematyczny samochodu

$$a = \frac{\left(\frac{F_{\text{mot}}}{\eta_{\text{mech}}} - F_{\text{resist}} \right) \frac{r^2}{k^2}}{J_{\text{eq}}}$$

$$F_{\text{resist}} = F_{\text{grade}} + F_{\text{aero}} + F_{\text{wheel}}$$

a – przyspieszenie pojazdu [m/s^2]

F_{mot} – siła napędowa [N]

η_{mech} – sprawność mechaniczna przeniesienia napędu

r – promień koła pojazdu [m]

k – całkowity współczynnik redukcji

J_{eq} – zredukowany do ruchu prostoliniowego moment bezwładności [kg m^2]

F_{resist} – suma sił oporu [N]

F_{grade} – opór wzniesienia [N]

F_{aero} – opór aerodynamiczny [N]

F_{wheel} – opór kół [N]

Model matematyczny silnika

$$\tau_{\text{mot}} = \tau_{\text{demand}} + \tau_{\text{spin loss}} + J_{\text{mot}} \frac{d\omega_{\text{mot}}}{dt}$$

$$P_{\text{elec}} = \frac{P_{\text{mech}}}{\eta_{\text{mot}}} = \frac{\tau_{\text{mot}} \omega_{\text{mot}}}{\eta_{\text{mot}}(\tau_{\text{mot}}, \omega)}$$

$$I_{\text{mot}} = \frac{P_{\text{elec}}}{U_{\text{terminal}}}$$

τ_{mot} – moment obrotowy silnika [Nm]

τ_{demand} – zapotrzebowanie pojazdu na moment obrotowy [Nm]

$\tau_{\text{spin_loss}}$ – moment obrotowy oporów silnika [Nm]

J_{mot} – moment bezwładności silnika [kg m²]

ω_{mot} – prędkość obrotowa silnika [rad/s]

P_{elec} – moc elektryczna [W]

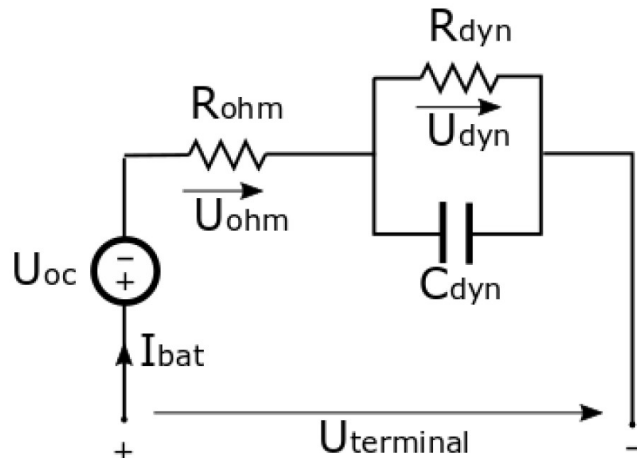
P_{mech} – moc mechaniczna [W]

η_{mot} – sprawność elektryczna silnika

I_{mot} – Prąd silnika [A]

U_{terminal} – napięcie szyny DC pojazdu [V]

Model matematyczny akumulatora



$$U_{\text{terminal}} = U_{\text{oc}} + U_{\text{ohm}} + U_{\text{dynamic}}$$

$$\frac{dU_{\text{terminal}}}{dt} + \frac{U_{\text{terminal}}}{R_{\text{dyn}}C_{\text{dyn}}} = R_{\text{ohm}} \frac{dI_{\text{bat}}}{dt} + \frac{R_{\text{dyn}} + R_{\text{ohm}}}{R_{\text{dyn}}C_{\text{dyn}}} I_{\text{bat}} + \frac{U_{\text{oc}}}{R_{\text{dyn}}C_{\text{dyn}}}$$

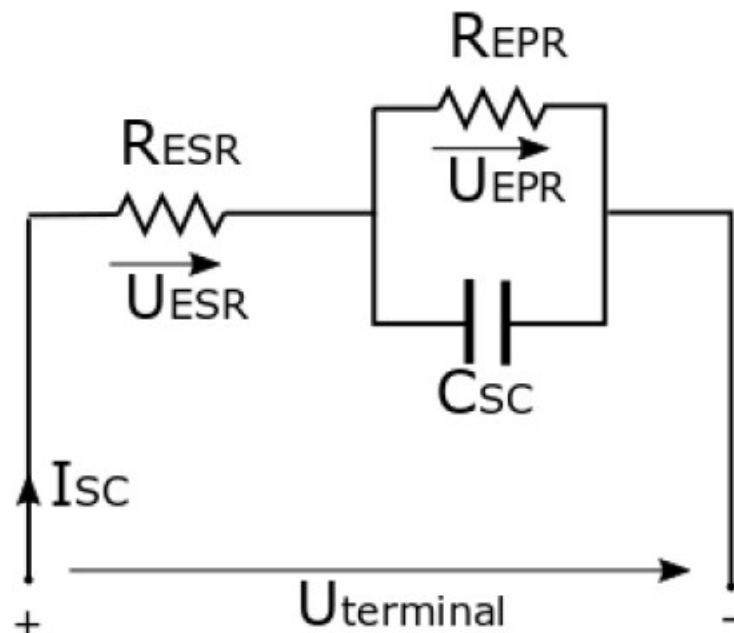
$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t_0) + \frac{1}{3600\text{Cap}_{\text{Ah}}} \int_{t_0}^t I_{\text{bat}}(t) \eta_{\text{bat}}(\text{SOC}, T, \text{sign}(I_{\text{bat}}(t))) dt$$

SOC – Stan naładowania akumulatora (ang. State Of Charge)

Cap_{Ah} – pojemność akumulatora [Ah]

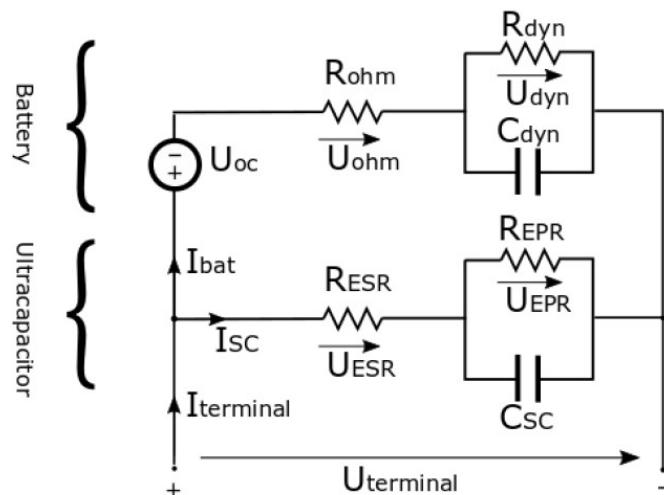
T – temperatura akumulatora [°C]

Model matematyczny superkondensatora



$$\frac{dU_{terminal}}{dt} + \frac{U_{terminal}}{C_{sc}R_{EPR}} = R_{ESR} \frac{dI_{sc}}{dt} + \frac{R_{ESR} + R_{EPR}}{C_{sc}R_{EPR}} I_{sc}$$

Model matematyczny HESS



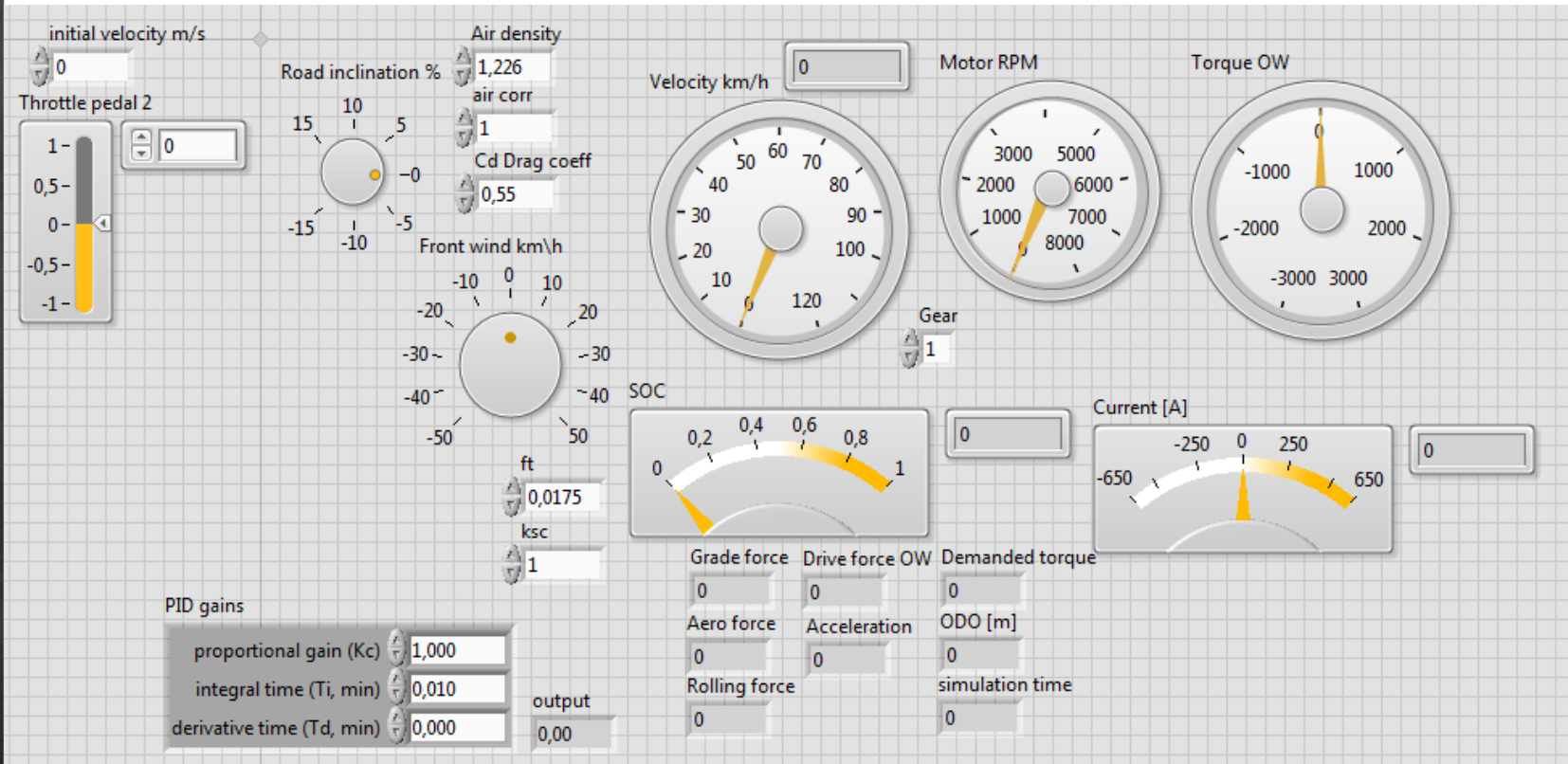
$$\frac{dU_{\text{terminal}}}{dt} + \alpha_1 U_{\text{terminal}} = \alpha_2 \frac{dI_{\text{SC}}}{dt} + \alpha_3 I_{\text{SC}} + \alpha_4 \frac{dI_{\text{bat}}}{dt} + \alpha_5 I_{\text{bat}} + \alpha_6$$

Dla którego stałe przybierają następujące wartości:

$$\alpha_1 = \frac{R_{\text{dyn}} + R_{\text{EPR}}}{(C_{\text{dyn}} + C_{\text{SC}})R_{\text{EPR}}R_{\text{dyn}}}, \quad \alpha_2 = \frac{C_{\text{SC}}R_{\text{ESR}}}{C_{\text{SC}} + C_{\text{dyn}}}, \quad \alpha_3 = \frac{R_{\text{ESR}} + R_{\text{EPR}}}{(C_{\text{dyn}} + C_{\text{SC}})R_{\text{EPR}}},$$

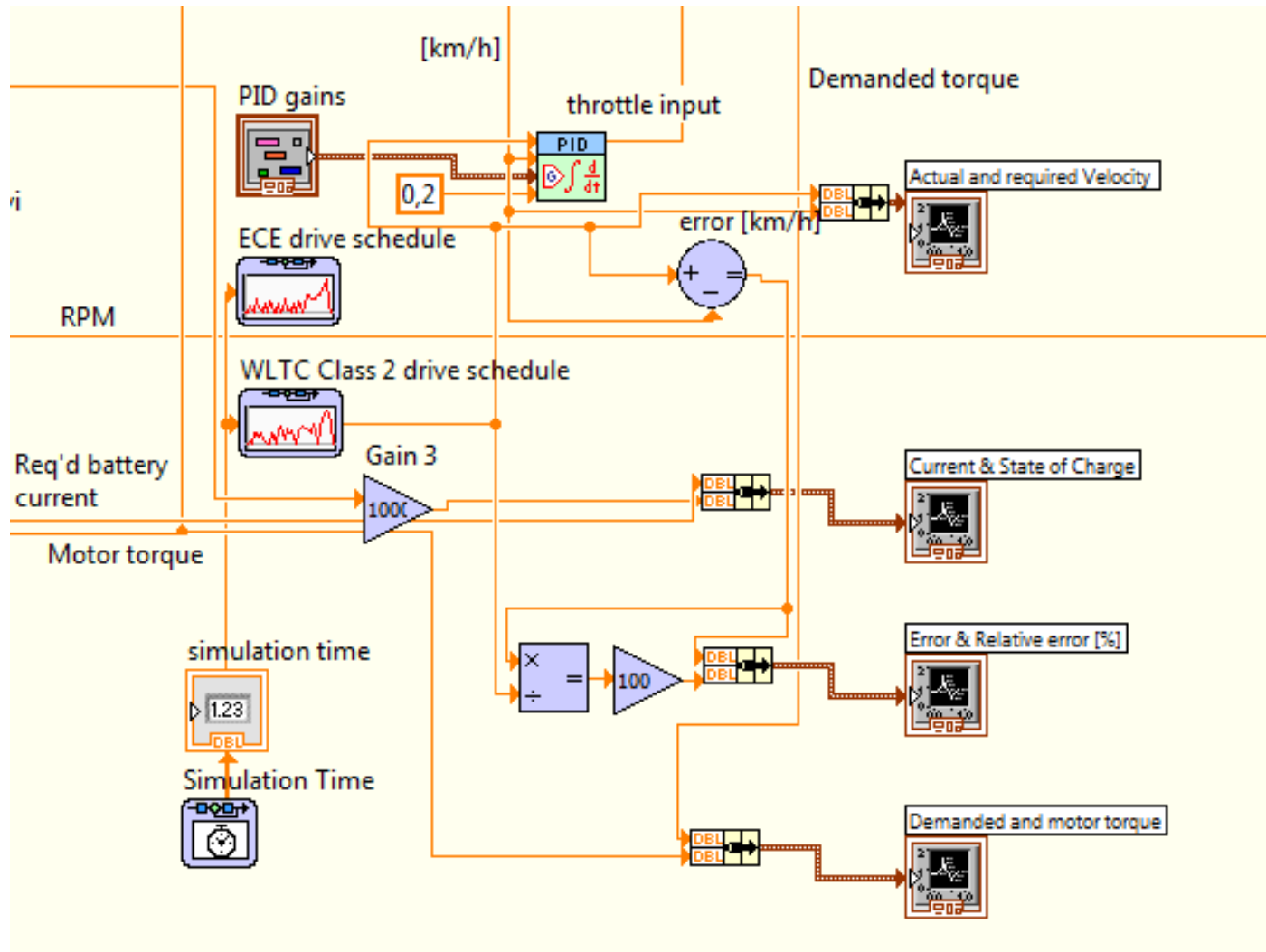
$$\alpha_4 = \frac{C_{\text{dyn}}R_{\text{ohm}}}{C_{\text{SC}} + C_{\text{dyn}}}, \quad \alpha_5 = \frac{R_{\text{ohm}} + R_{\text{dyn}}}{(C_{\text{dyn}} + C_{\text{SC}})R_{\text{dyn}}}, \quad \alpha_6 = \frac{U_{\text{oc}}}{(C_{\text{SC}} + C_{\text{dyn}})R_{\text{dyn}}}.$$

Symulacja

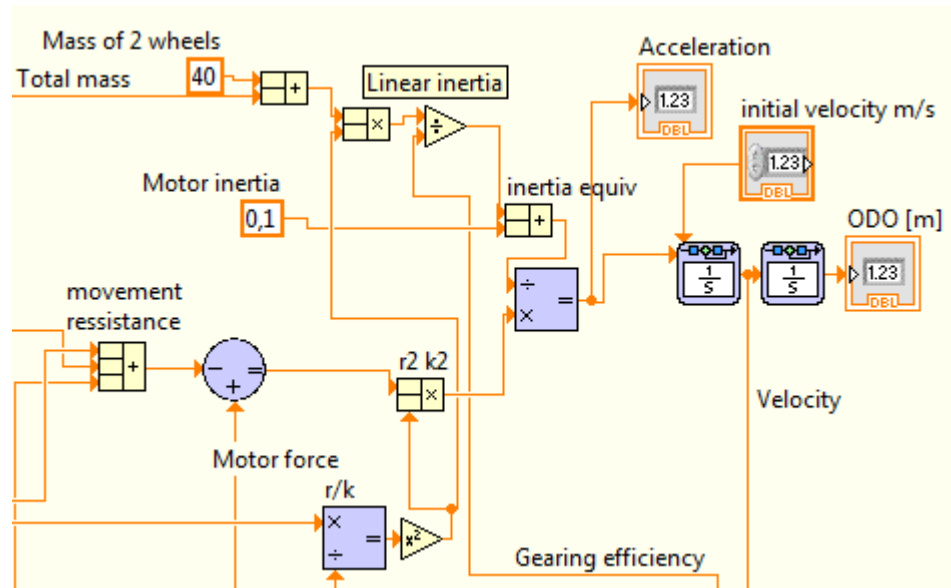


Realizacja

Symulacja

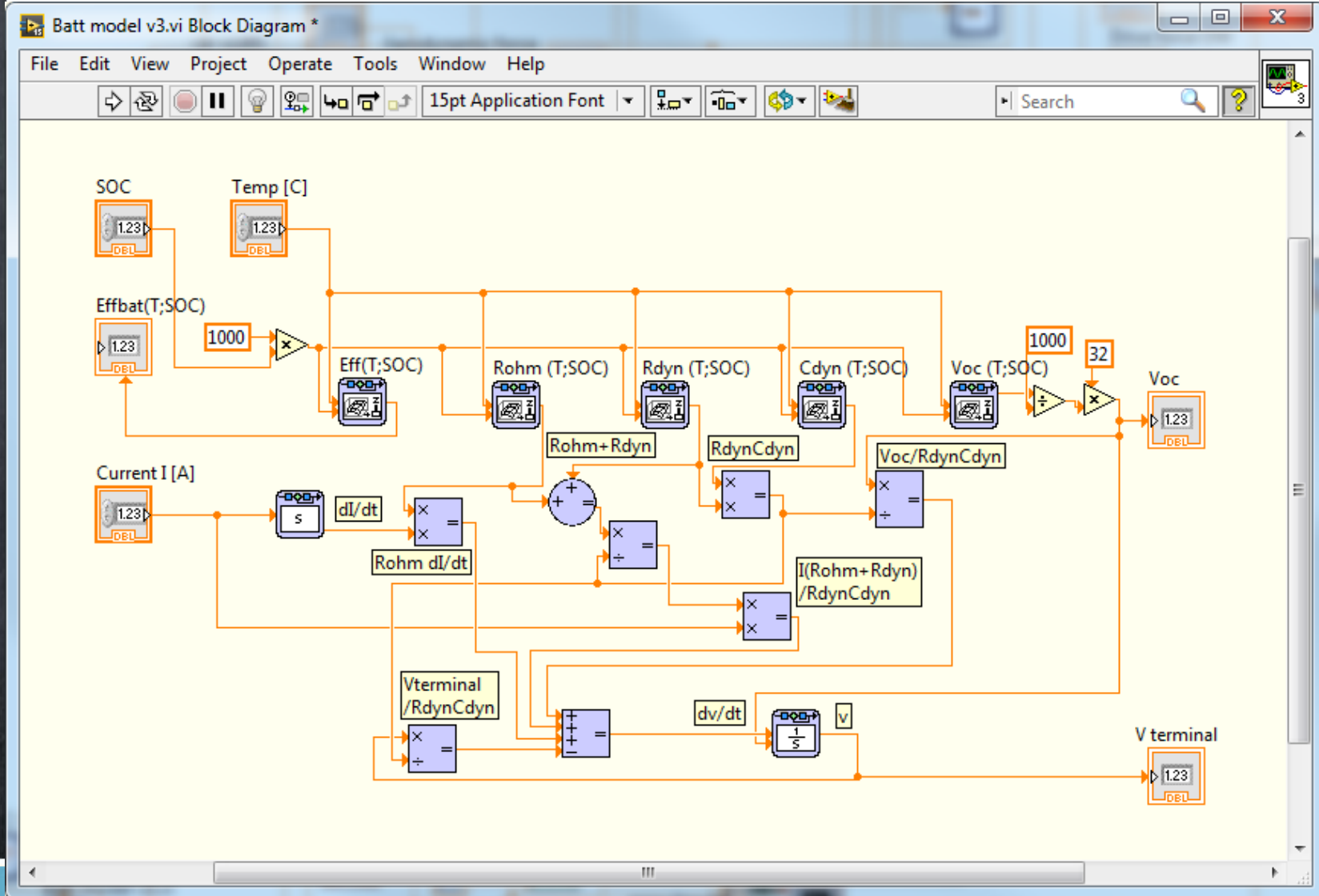


Symulacja

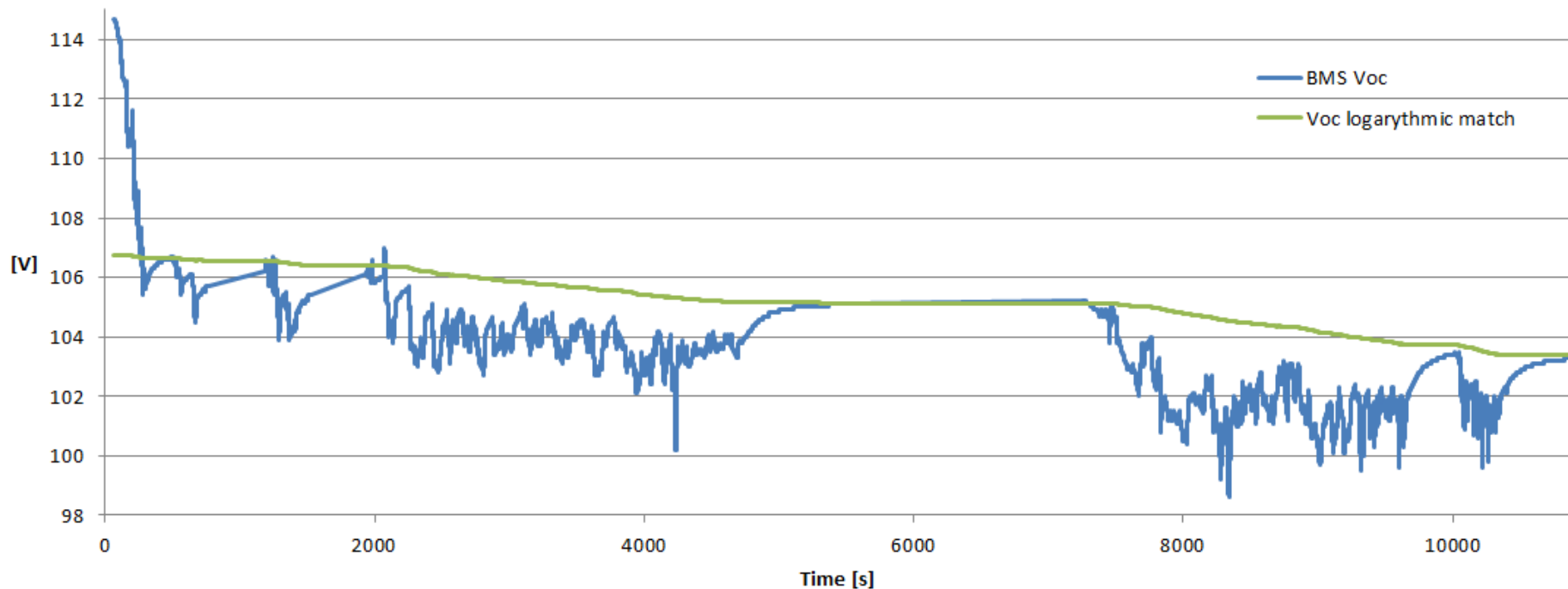


Symulacja – model numeryczny baterii

Realizacja



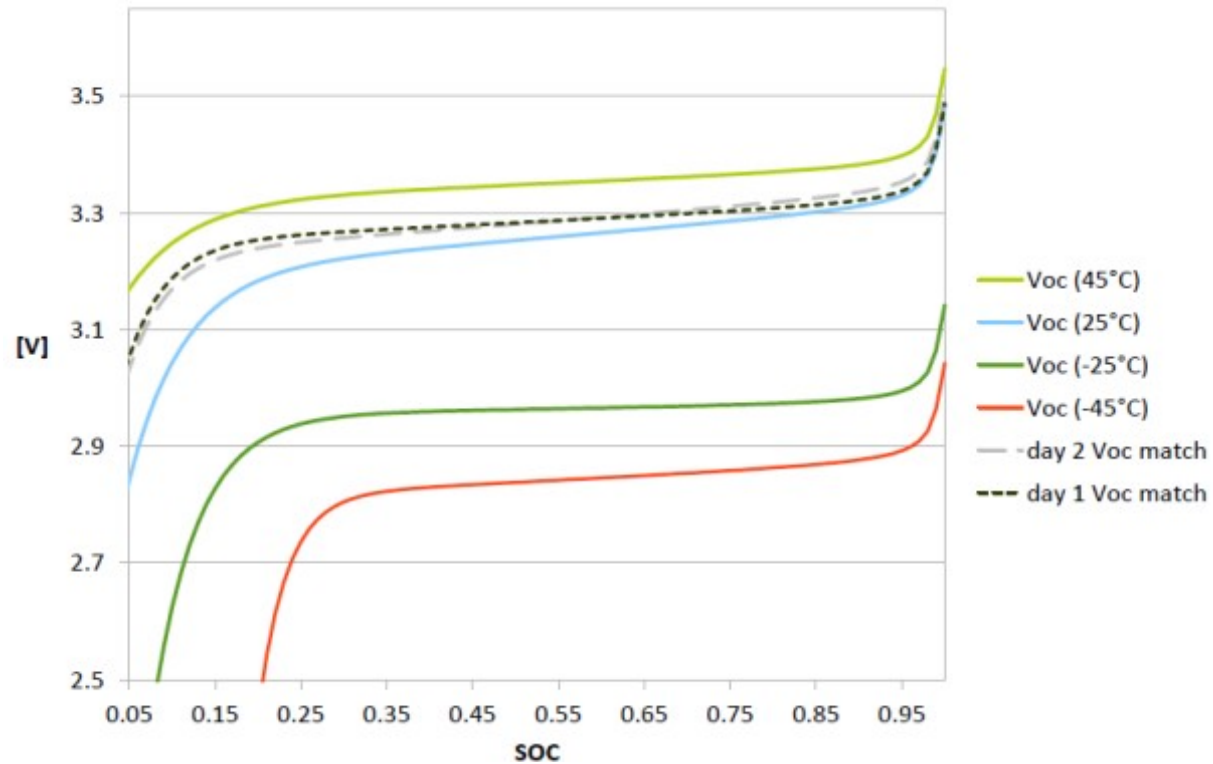
Parametryzacja modelu baterii



Realizacja

Napięcie przy obwodzie otwartym (V_{oc}) wyliczone przez moduł BMS i dopasowanie na podstawie logarytmicznej funkcji stanu naładowania (SOC)

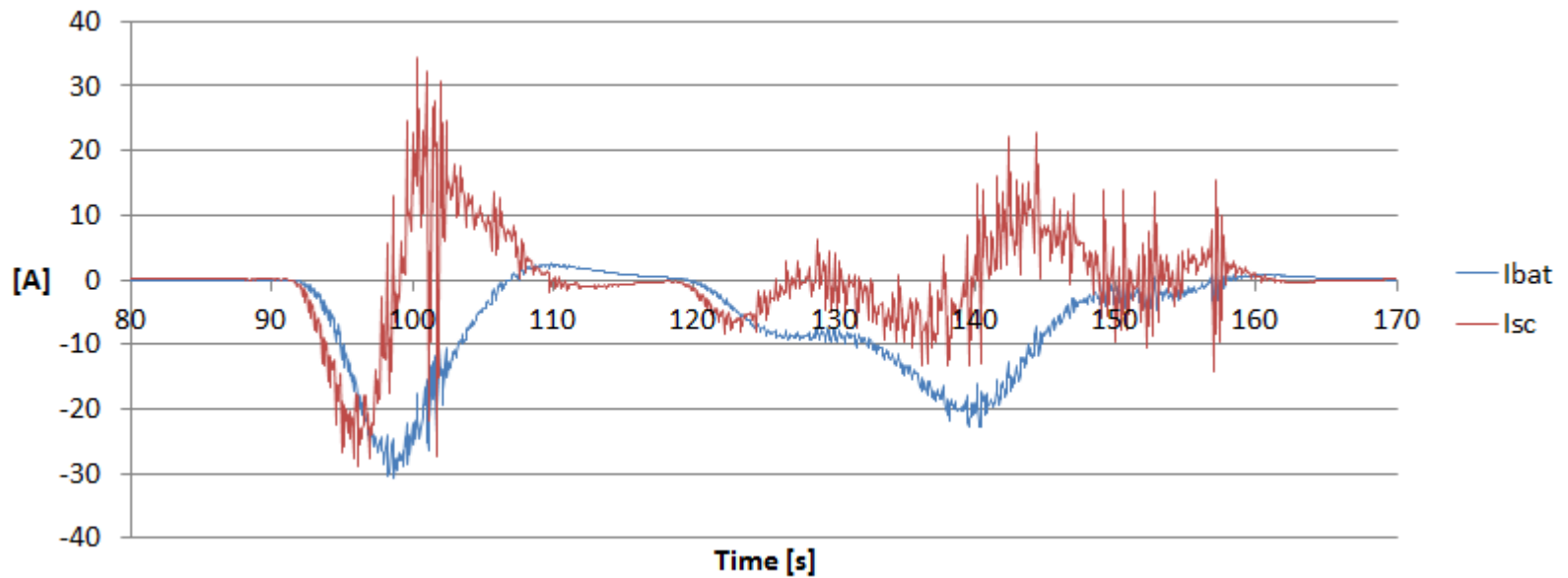
Parametryzacja modelu baterii



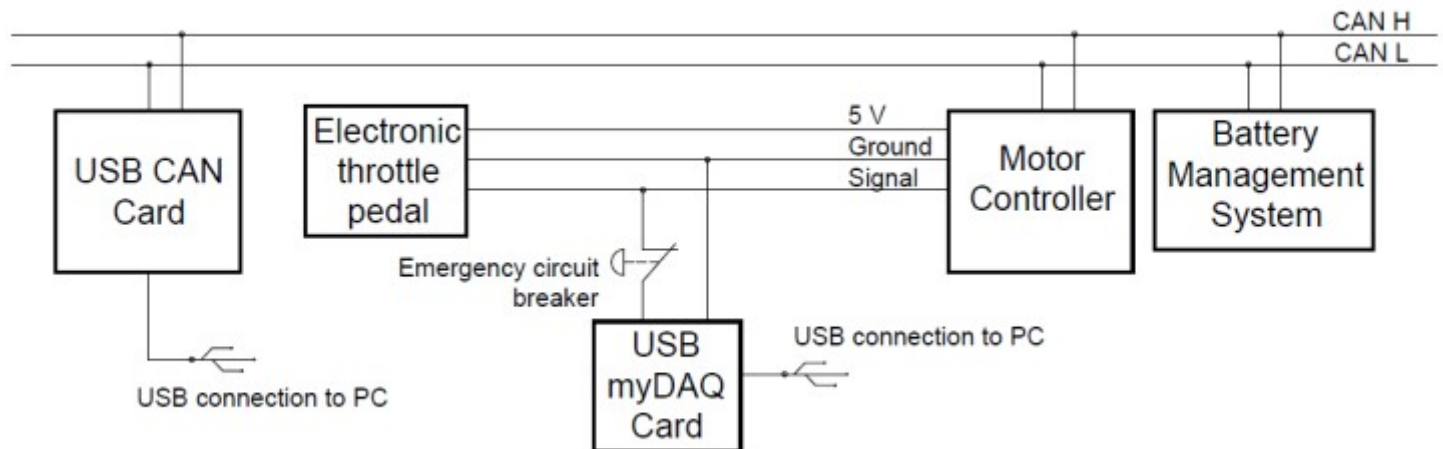
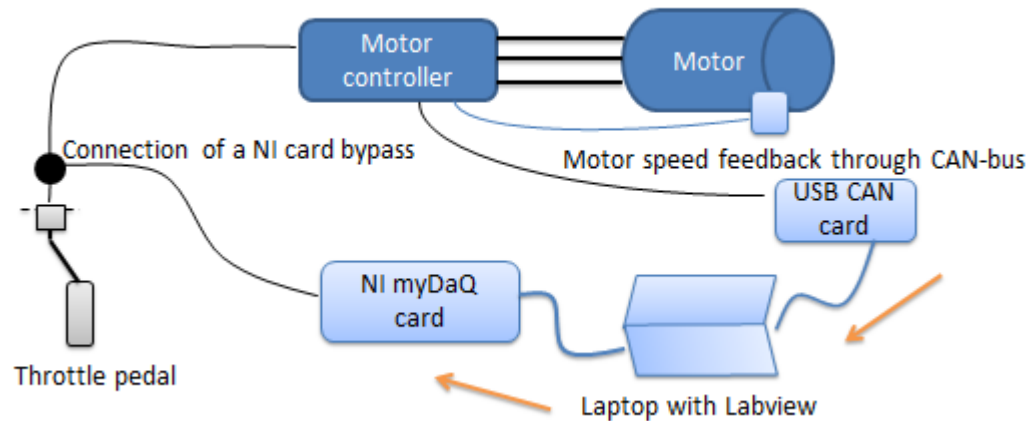
Realizacja

| | | Rohm | | | | | | |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 51.8805 | 0.038 | 0.04 | 0.042 | 0.044 | 0.046 | 0.048 | 0.05 |
| Rdyn | 0.032 | 80.1676 | 72.2106 | 65.9187 | 61.7954 | 60.2809 | 61.5619 | 65.4693 |
| | 0.034 | 64.4387 | 57.2066 | 52.3084 | 50.4197 | 51.8625 | 56.3747 | 63.2975 |
| | 0.036 | 52.6464 | 47.1657 | 44.9537 | 46.4694 | 51.3755 | 58.8229 | 67.9758 |
| | 0.038 | 47.7988 | 45.5016 | 46.8967 | 51.6764 | 59.0165 | 68.0878 | 78.2856 |
| | 0.04 | 51.8805 | 53.0092 | 57.1974 | 63.8379 | 72.2512 | 81.8874 | 92.3598 |
| | 0.042 | 63.1841 | 66.6584 | 72.3711 | 79.8367 | 88.6077 | 98.3307 | 108.747 |
| | 0.044 | 78.6554 | 83.4895 | 89.9855 | 97.8074 | 106.659 | 116.302 | 126.551 |
| | 0.046 | 96.3062 | 101.938 | 108.862 | 116.844 | 125.677 | 135.193 | 145.252 |

Symulacja hybrydowego zasobnika (HESS)



Realizacja badań eksperymentalnych



Realizacja badań eksperymentalnych

Realizacja

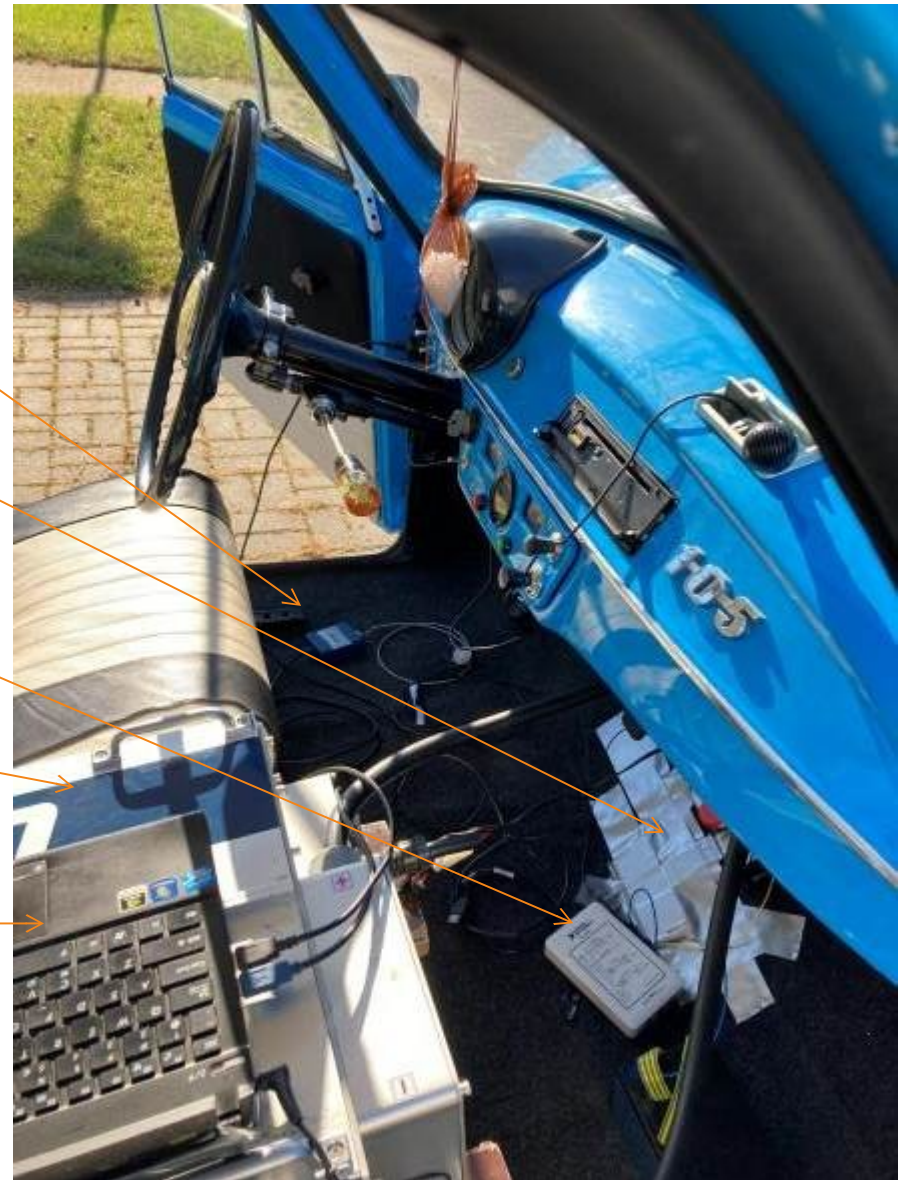
Karta USB do CAN

Wyłącznik bezpieczeństwa

Karta USB MyDAQ do zadawania prędkości

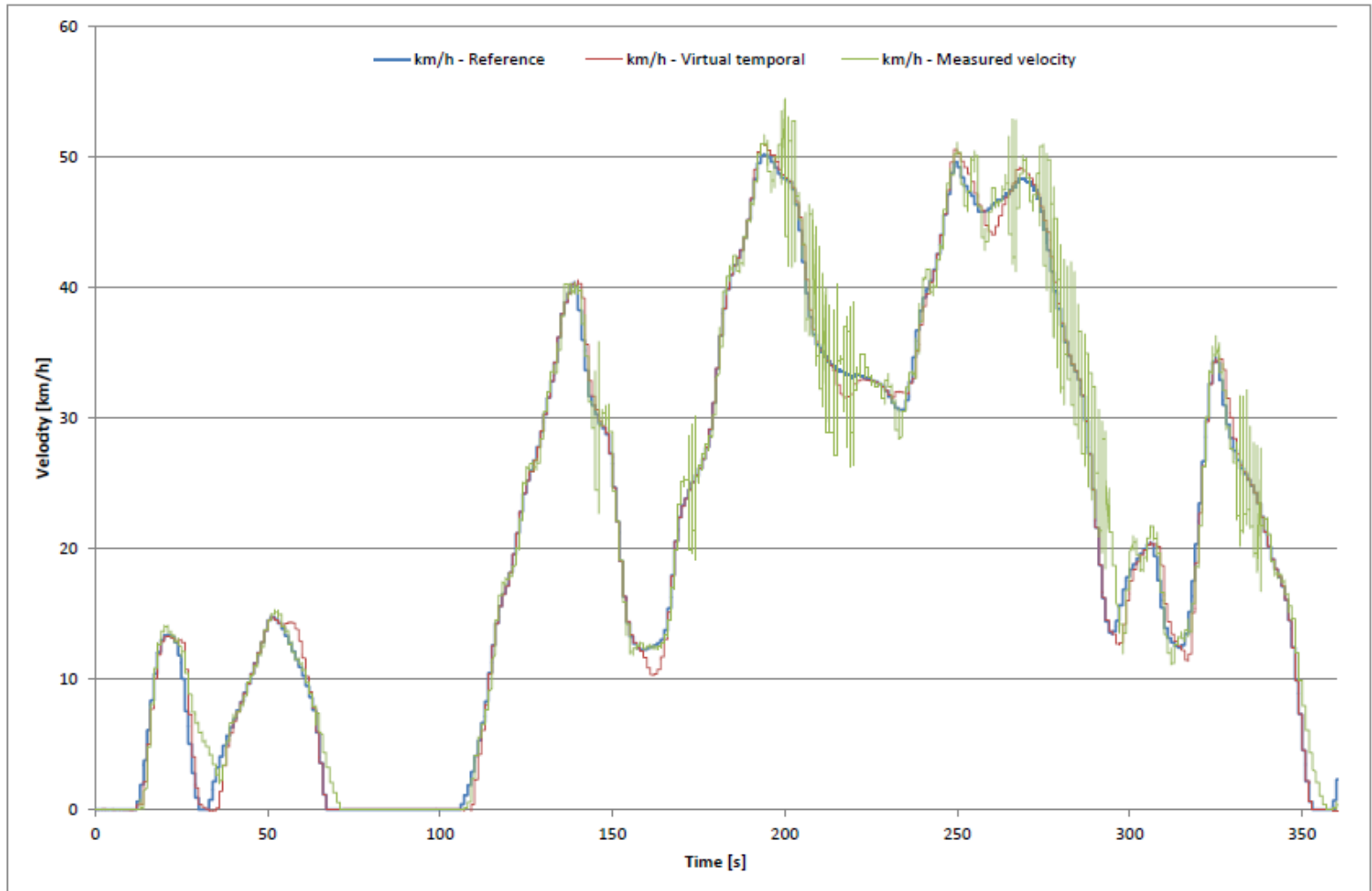
Supekondensator

Komputer z Labview i dodatkiem do symulacji



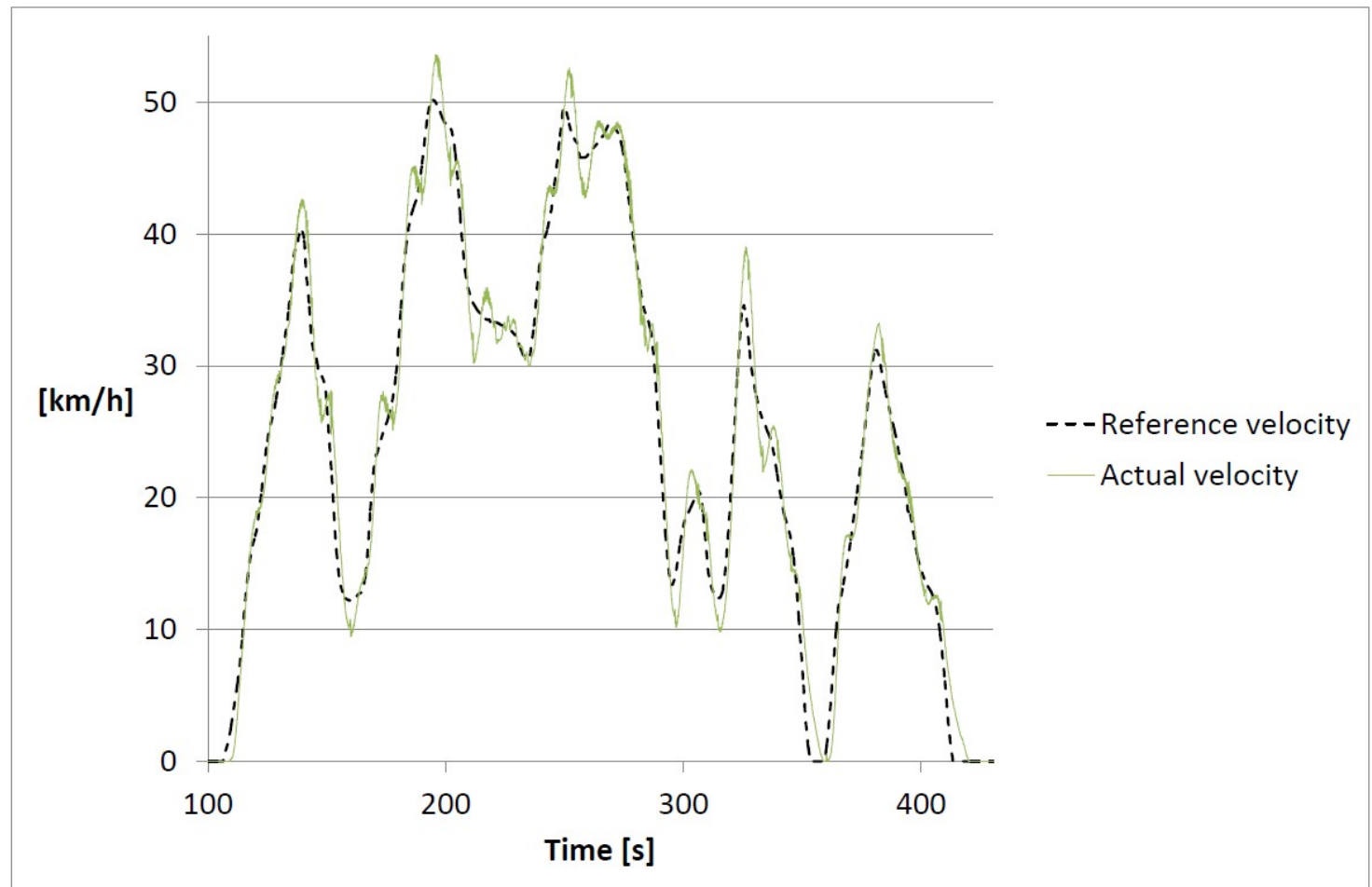
Realizacja badań eksperymentalnych

Problematyka przesterowanego układu nadążnego – oscylacje



Realizacja badań eksperymentalnych

Ostateczne mniej wysilone sterowanie nadążne gwarantowało powtarzalność, pomimo większego błędu prędkości względem referencyjnych cykli jazdy

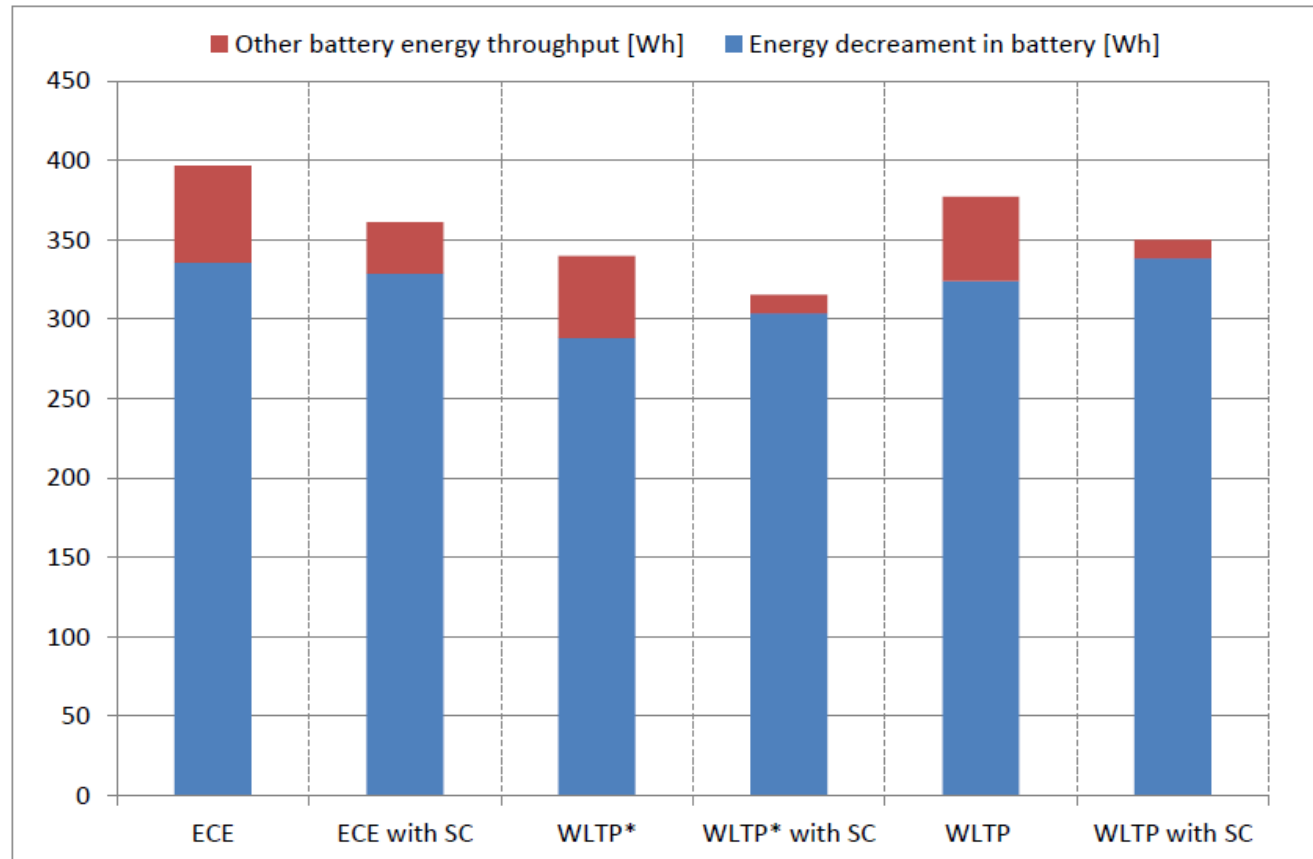




Wyniki

Wpływ superkondensatora na przepływ energii

- Ubytek energii w baterii [Wh]
- Przepustowość (przerób) baterii [Wh] (ang. Throughput)



Wpływ superkondensatora na przepływ energii

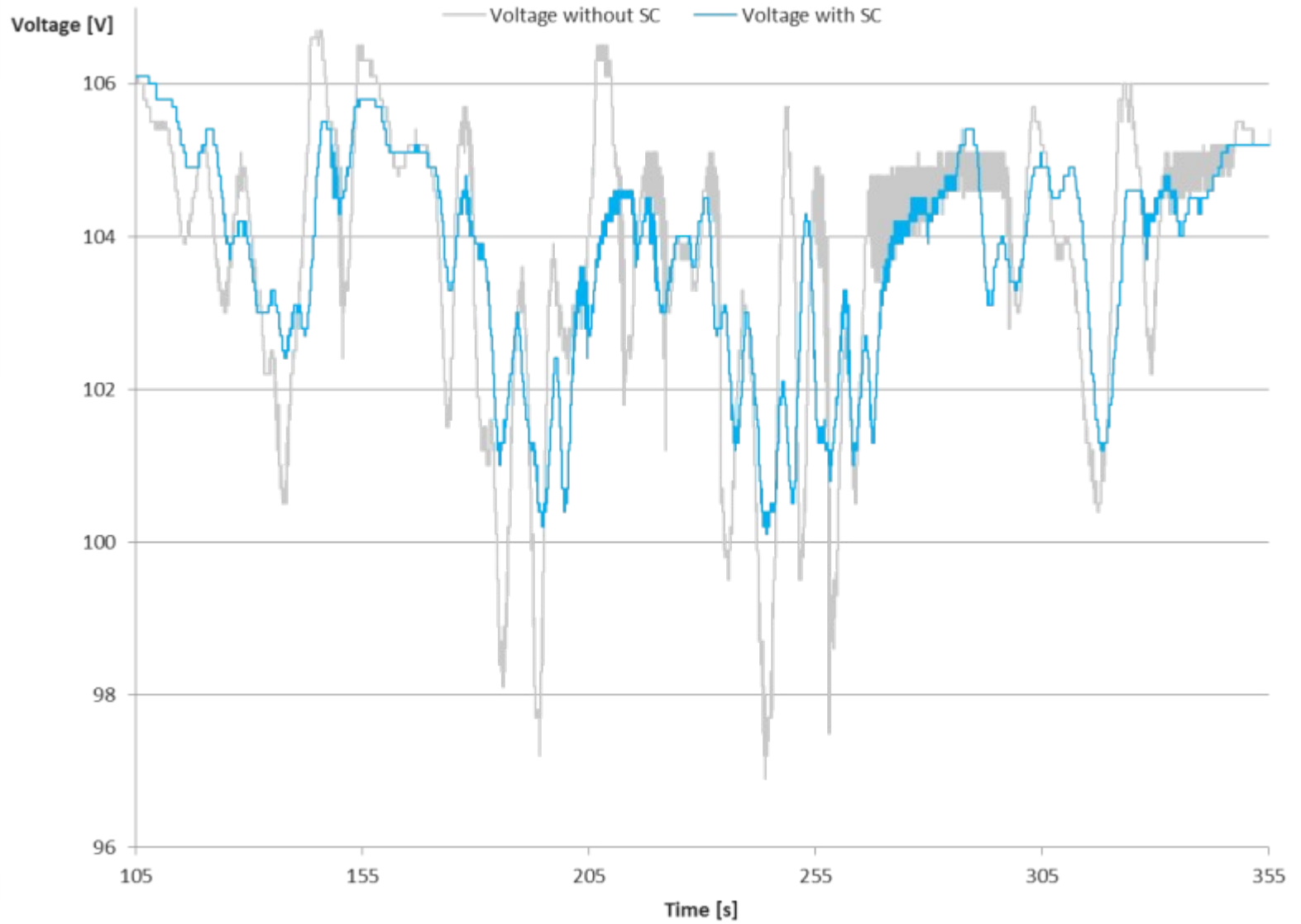
- Ubytek energii w baterii
- Przepustowość (przerób) baterii (ang. Throughput)

| | | Energy decrement in battery | Battery energy throughput |
|------------|------|--------------------------------|------------------------------|
| Simulation | ECE | +0.23% | -9.16% |
| | WLTP | 0.00% | -14.07% |
| Real car | ECE | -2.05% | -9.00% |
| | WLTP | +4.41% | -7.22% |

- Wyliczenie całkowitego wpływu superkondensatora na cykl życia akumulatora

| | | Influence on energy consumption | Influence on range | Overall influence on cycle life |
|------------|------|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| Simulation | ECE | 100.23% | -0.22% | +8.94% |
| | WLTP | 100.00% | 0.00% | +14.07% |
| Real car | ECE | 97.95% | +2.09% | +11.08% |
| | WLTP | 104.41% | -4.22% | +3.00% |

Wpływ na stabilność napięcia DC



Wnioski

1. Zbudowano eksperymentalny pojazd wyposażony w HESS i dokonano pomiarów fizycznych.
2. Przygotowano modele matematyczne i symulacje numeryczne pojazdu wyposażonego w HESS i wszystkich jego elementów istotnych z punktu widzenia przepływów energii.
3. Dokonano parametryzacji modeli numerycznych elementów pojazdu.
4. Wyniki osiągnięte zarówno z symulacji, jak i z pomiarów rzeczywistych pokazują, że obecność pasywnie podłączonego superkondensatora może obniżyć przepustowość energii przez akumulator i w ten sposób wydłużyć jego żywotność.
5. Jeśli cena montażu komercyjnej instalacji superkondensatora nie przekroczy (wykazanych) kilku procent wartości akumulatora, to ma taka instalacja również uzasadnienie ekonomiczne.
6. Instalacja HESS zmniejszająca zużycie akumulatora zawierającego metale ziem rzadkich zmniejsza ślad środowiskowy eksploatacji pojazdu.



Lodz University of Technology

Tytuł przewodu doktorskiego:

Analysis of the impact of a supercapacitor on electrically driven wheeled vehicles

Analiza wpływu zastosowania superkondensatora w pojazdach kołowych z napędem elektrycznym

Dziękuję za uwagę!

mgr inż. Paweł Adamski

Promotor: dr hab. inż. Paweł Olejnik, prof. uczelni

13.06.2023, Łódź