



Instytut Elektroenergetyki
Wydział Elektryczny
Politechnika Warszawska

Elastyczność sieci w świetle wykorzystania nowych zasobów energetycznych oraz decentralizacji systemu elektroenergetycznego

dr inż. Krzysztof Zagrajek

Tytuł projektu: *Koncepcja utworzenia pojazdu specjalnego będącego mobilnym magazynem energii elektrycznej, zawierająca wytyczne w zakresie konstrukcyjnym i tworzenia oprogramowania do synergii odnawialnych źródeł energii i odbiorców w ramach procesu energetyzacji aglomeracji miejskich*

Jednostka organizacyjna: Instytut Elektroenergetyki PW

Kierownik projektu: dr inż. Krzysztof Zagrajek

Partnerzy projektu:

- Stoen Operator
- Urząd m.st. Warszawa oraz ZTM
- Hitachi Energy Polska

Celem projektu jest zatem utworzenie projektów koncepcyjnych takiego pojazdu specjalnego, mobilnego magazynu energii elektrycznej oraz przyłącza elektroenergetycznego, dzięki któremu będzie możliwe przyłączenie takiego pojazdu do instalacji elektroenergetycznej odbiorcy końcowego. W ramach projektu zostaną opracowane wytyczne konstrukcyjne dot. takiego pojazdu (w szczególności dot. jego podwozia i nadwozia, wielkości MMEE, sposobu montażu MMEE i standardu przesyłu energii elektrycznej z pojazdu do instalacji odbiorcy), jak również w zakresie tworzenia oprogramowania do integracji takich rozwiązań z istniejącymi urządzeniami infrastruktury elektroenergetycznej. Planowane jest zaprojektowanie algorytmów zarządzania energią elektryczną w takim MMEE, w taki sposób aby ładować lub rozładowywać go w sposób optymalny, uwzględniając profil odbiorcy końcowego energii elektrycznej i profil wytwarzania energii elektrycznej w OZE





Wytwarzanie energii elektrycznej

Wytwarzanie energii elektrycznej pozwala na: zwiększenie lub obniżenie generacji, odciążenie systemu elektroenergetycznego, poprawę parametrów jakościowych energii elektrycznej, zapewnienie stabilnych dostaw energii do odbiorców



Zarządzanie stroną popytową

Zarządzanie stroną popytową pozwala na: zmniejszenie lub zwiększenie zapotrzebowania w sieci, przesunięcie obciążenia w czasie, kontrolowalny pobór mocy z systemu



Magazynowanie energii elektrycznej

Wykorzystanie magazynów energii elektrycznej pozwala na: przesunięcie obciążenia w czasie, wykorzystania nadwyżek energii elektrycznej wyprodukowanej z instalacji OZE w szczytach zapotrzebowania, redukcję zapotrzebowania



Stacjonarne MEE

Duże pojemności i moce, integracja z OZE, praca interwencyjna, stabilizacja parametrów sieci



Pojazdy elektryczne

Łączy cechy magazynowania energii elektrycznej (technologia pojazd-sieć: V2G) oraz zarządzania stroną popytową (Smart Charging)



Wytwarzanie energii elektrycznej

Wytwarzanie energii elektrycznej pozwala na: zwiększenie lub obniżenie generacji, odciążenie systemu elektroenergetycznego, poprawę parametrów jakościowych energii elektrycznej, zapewnienie stabilnych dostaw energii do odbiorców



Zarządzanie stroną popytową

Zarządzanie stroną popytową pozwala na: zmniejszenie lub zwiększenie zapotrzebowania w sieci, przesunięcie obciążenia w czasie, kontrolowalny pobór mocy z systemu



Magazynowanie energii elektrycznej

Wykorzystanie magazynów energii elektrycznej pozwala na: przesunięcie obciążenia w czasie, wykorzystania nadwyżek energii elektrycznej wyprodukowanej z instalacji OZE w szczytach zapotrzebowania, redukcję zapotrzebowania



Stacjonarne MEE

Duże pojemności i moce, integracja z OZE, praca interwencyjna, stabilizacja parametrów sieci



Pojazdy elektryczne

Łączy cechy magazynowania energii elektrycznej (technologia pojazd-sieć: V2G) oraz zarządzania stroną popytową (Smart Charging)



Mobilne magazyny energii elektrycznej

Relatywnie duży potencjał energetyczny, brak ograniczeń baterii trakcyjnej, uniwersalność w przyłączaniu i świadczeniu usług sieciowych (MESF)

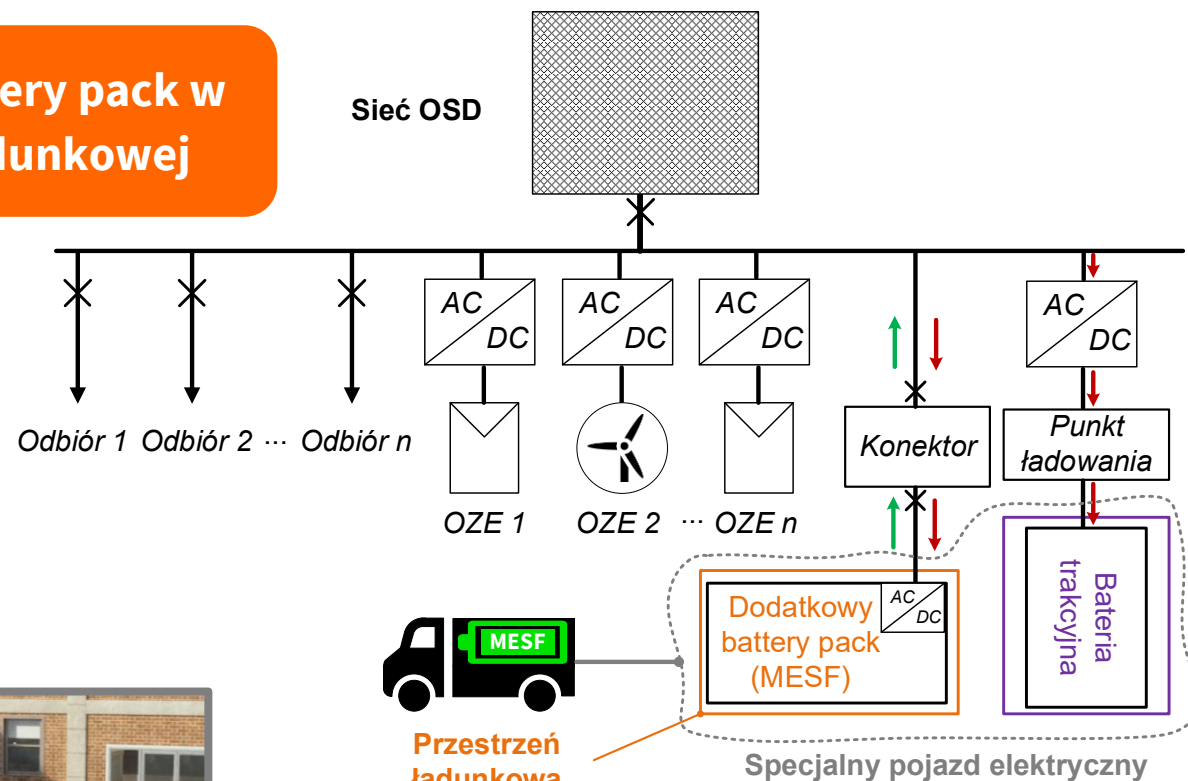
**Pojazd elektryczny
(lekki pojazd ciężarowy/ van)**



**Dodatkowy battery pack w
przestrzeni ładunkowej**

**Specjalny pojazd
elektryczny (ang. Custom
Electric Vehicle – CEV)**

- Pojazd elektryczny jako mobilny magazyn energii
- Wykorzystanie dodatkowego battery packu w pow. ładunkowej – brak uzależnienia od baterii trakcyjnej
- Kluczowe umiejscowienie elementów energoelektronicznych oraz toru wyprowadzenia mocy

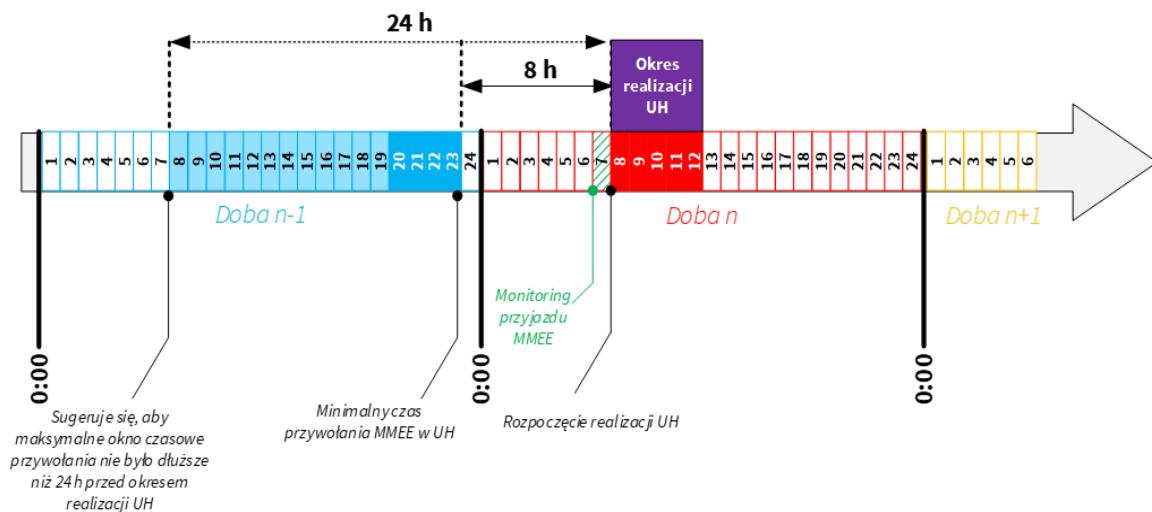


Usługi MESF

Usługi polegające na dostarczaniu dodatkowej zdolności energetycznej z mobilnych magazynów energii elektrycznej, świadczone przez przedsiębiorstwo posiadające koncesję na obrót energią elektryczną na rzecz usługobiorców lub na własne potrzeby, zgodnie z harmonogramem lub w sytuacjach awaryjnych.



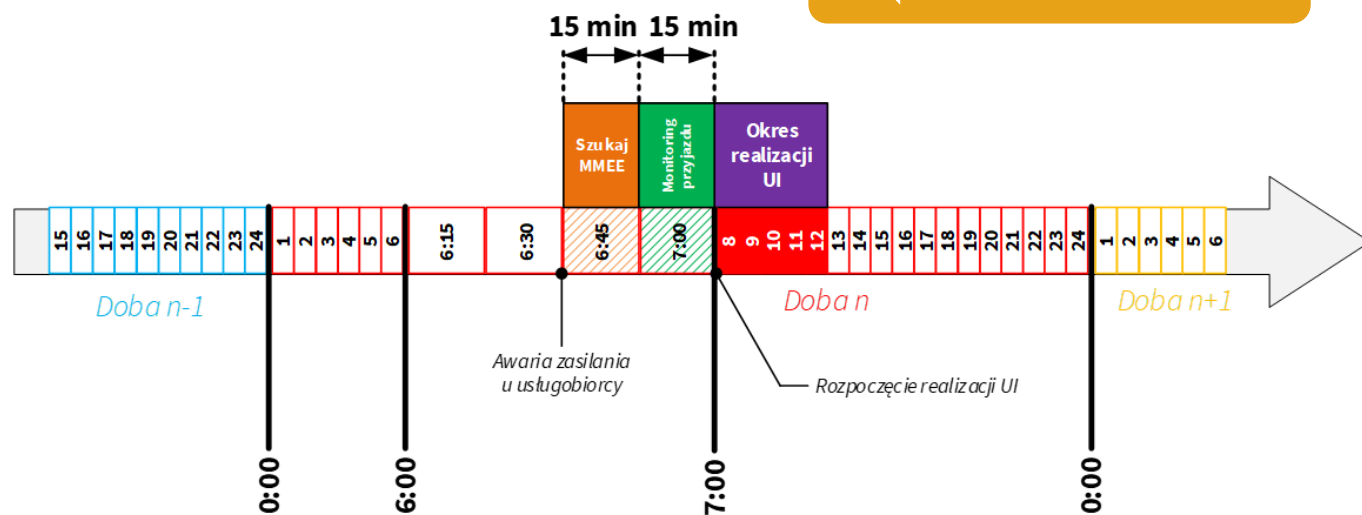
Harmonogramowane



- Rezerwowe zasilanie odbiorcy końcowego (Dodatkowy potencjał energetyczny)
- Przesunięcie czasowe
- Planowane odebranie nadwyżek z OZE



Interwencyjne



- Interwencyjne rezerwowe zasilanie odbiorcy końcowego
- Nadmiarowe ładowanie
- Odbudowa KSE

Usługi MESF dotyczące bezpieczeństwa energetycznego (MESF-ESC):

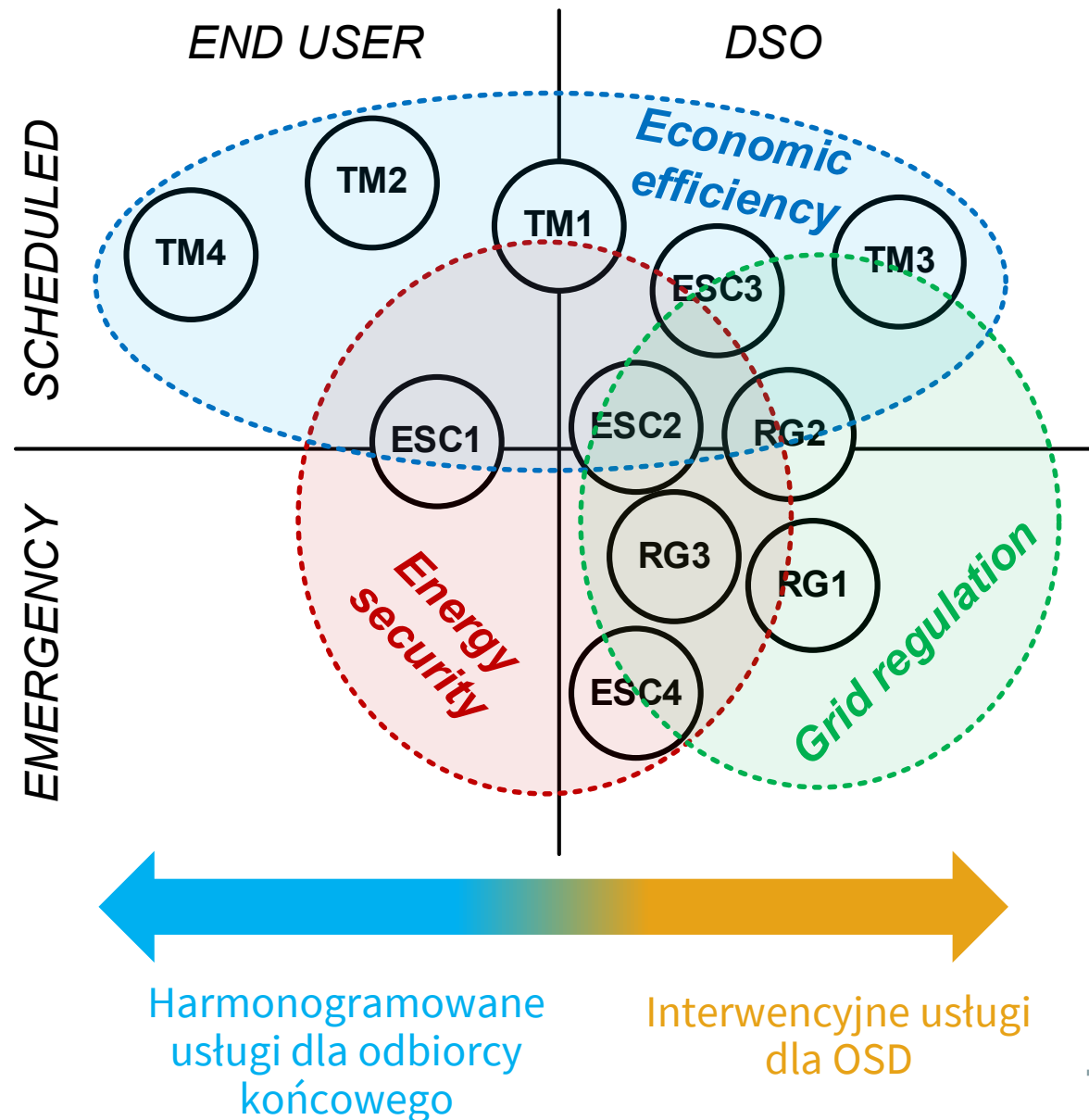
- **ESC1 – Rezerwowe zasilanie odbiorcy końcowego;**
- ESC2 – Rezerwowe zasilanie stacji elektroenergetycznej;
- ESC3 – Utrzymywanie gotowości zasobów dla odbiorców końcowych i OSD;
- ESC4 – Praca w trybie wyspowym.

Usługi MESF dotyczące zarządzania energią w czasie (MESF-TM):

- TM1 – Techniczne przesunięcie czasowe
- **TM2 – Ekonomiczne przesunięcie czasowe;**
- TM3 – Wyrównywanie profilu zapotrzebowania;
- TM4 – Optymalizacja rachunków za energię.

Usługi MESF regulacyjne (MESF-RG):

- RG1 – Regulacja napięcia w węźle;
- RG2 – Odciążanie elementów infrastruktury sieci;
- RG3 – Nadmierne ładowanie MESF – redukcja ograniczeń przesyłowych w redispatchingu.



t = 0

CEV #1

SOC= 30%
C = 100 kWh
P= 80 kW

CEV #2

SOC= 90%
C = 100 kWh
P= 80 kW

Baza CEV

t = 0

Obiekt A

*Spodziewana
nadwyżka produkcji
OZE 50 kW
(t=1) → (t=2)*

t = 0

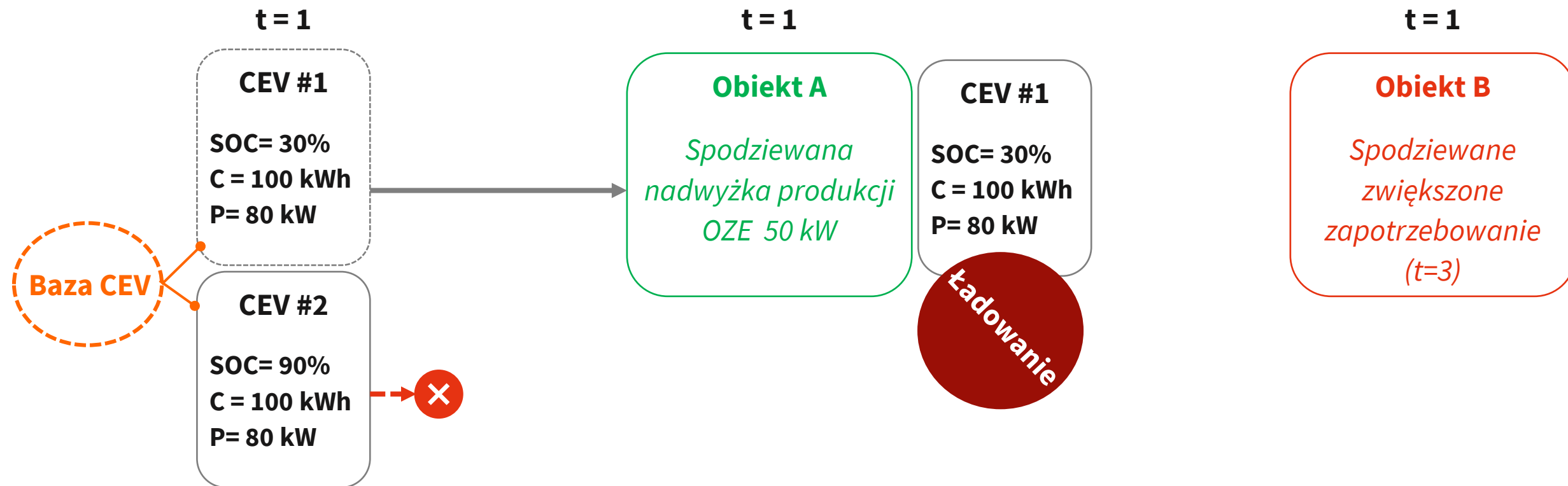
Obiekt B

*Spodziewane
zwiększone
zapotrzebowanie
(t=3)*

W stanie **t = 0**, pojazdy CEV znajdują się w bazie. Każdy z pojazdów jest określony za pomocą: **C** – pojemności użytecznej MESF; **P** – mocy rozładowania/ładowania MESF oraz **SOC** – stanu naładowania MESF

W stanie **t = 0**, dla obiektu A stwierdza się, że w przedziale (t=1) do (t=2) będzie występować nadwyżka produkcji z OZE.
Cel: nie sprzedawać energii do sieci.

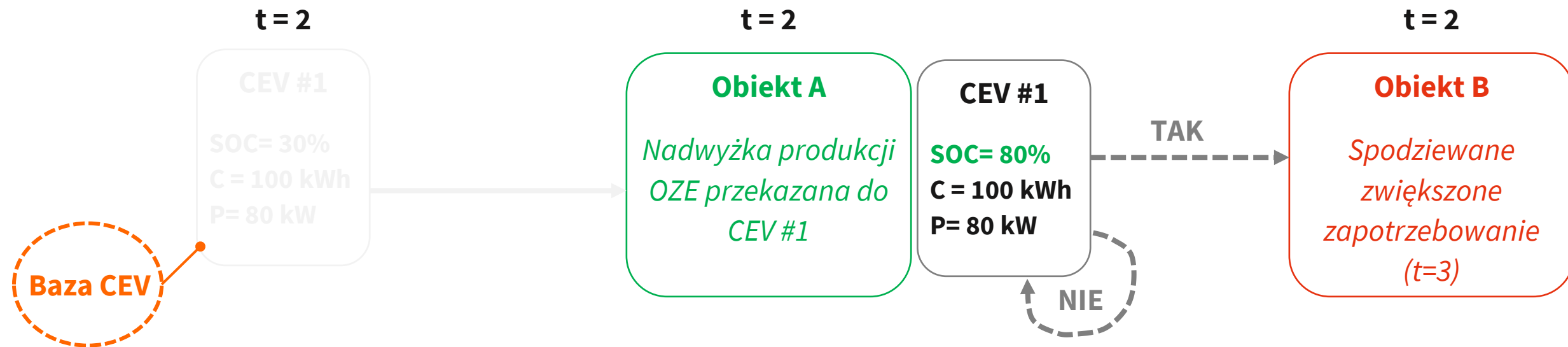
W stanie **t = 0**, dla obiektu B stwierdza się, że w t=3 będzie występować zwiększone zapotrzebowanie na energię. **Cel: wykorzystać nadwyżki energii z OZE**



W stanie **t = 1**, pojazd #1 wyruszył i dotarł do obiektu A. Pojazd #2 nie został zadysponowany, ze względu na stan SOC

W stanie **t = 1**, Pojazd CEV #1 rozpoczyna ładowanie MESF, tak aby zakończyć je w t=2 i odebrać całą nadwyżkę produkcji z OZE

W stanie **t = 1**, dla obiektu B obserwuje się, czy dalej występuje zwiększone zapotrzebowanie na energię



W stanie **t = 2**, normalne funkcjonowanie bazy CEV – uzupełnianie pojemności MESF gdy takie CEV znajdują się w bazie

W stanie **t = 2**, Pojazd CEV #1 zakończył ładowanie MESF. Decyzja, czy przemieszcza się do Obiektu B w t=3

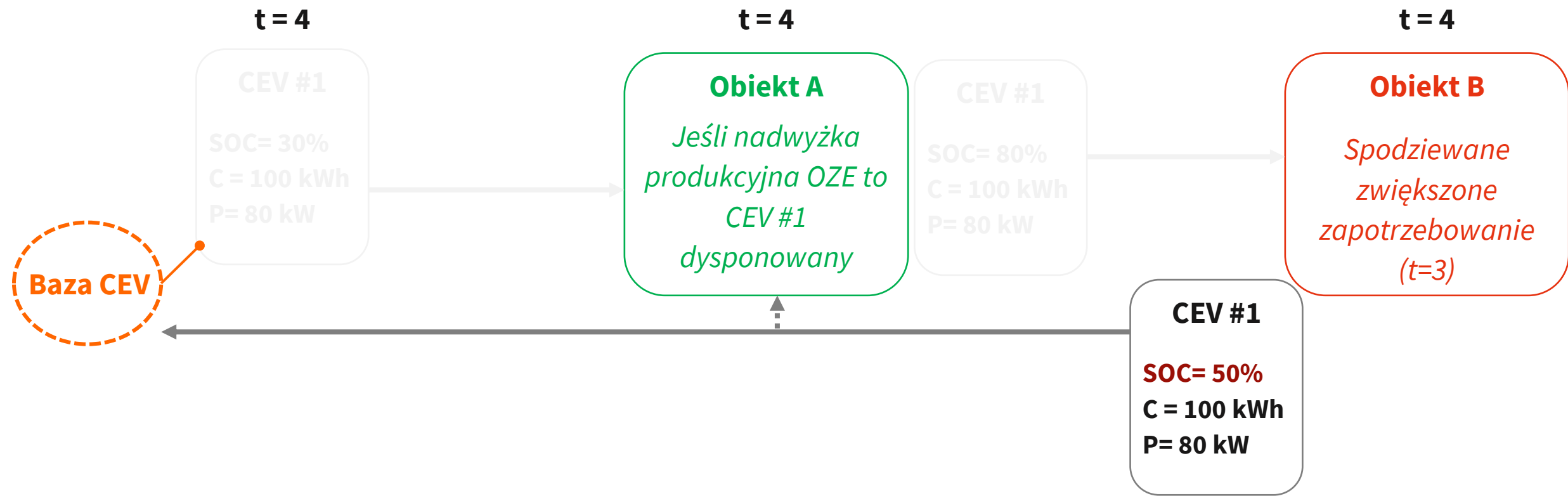
W stanie **t = 2**, dla obiektu B podejmuje się decyzję, czy występuje zapotrzebowanie na usługę w t=3. Jeśli TAK to pojazd #1 przemieszcza się do obiektu B. Jeśli NIE – pozostaje w obiekcie A lub wraca do bazy



W stanie $t=3$, baza rozpoczyna przygotowania do przyjęcia pojazdu #1 w $t=4$

W stanie $t=3$, monitorowanie produkcji OZE. Jeśli w $t=4$ nadwyżka produkcyjna to można zadysponować pojazd #1 po rozładowaniu

W stanie $t=3$, dla obiektu B rozpoczyna się rozładowanie MESF



W stanie $t=4$, baza przygotowania do przyjęcia pojazdu #1

W stanie $t=4$, monitorowanie produkcji OZE lub odbieranie nadwyżek przez CEV #1

W stanie $t=4$, dla obiektu B zakończono proces rozładowania MESF. Powrót do bazy CEV lub dysponowanie do obiektu A

Parameter		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Integration level of power output and power electronics with MESF					
Nominal capacity of MESF [kWh]	Cat. I	96	72	48	24
	Cat. II	192	168	144	120
Maximal discharging/charging power of MESF [kW]	Cat. I	40			
	Cat. II	80			
No. of battery strings	Cat. I	2	1	1	1
	Cat. II	3	3	2	2
Nominal voltage [V]	Cat. I	518*	777	518*	259*
	Cat. II	690.67	604.33	777	647.50
No. of cells per floor	Cat. I	70			
	Cat. II	70			
No. of battery floors	Cat. I	4	3	2	1
	Cat. II	8	7	6	5
Weight of the battery pack [kg]	Cat. I	397.60	298.20	198.80	99.40
	Cat. II	795.20	695.80	596.40	497.00
Weight of power electronic components and auxiliaries [kg]	Cat. I	80			
	Cat. II	130			
Total weight of MESF [kg]	Cat. I	477.60	428.20	428.80	429.40
	Cat. II	875.20	825.80	826.40	827



KAT. I

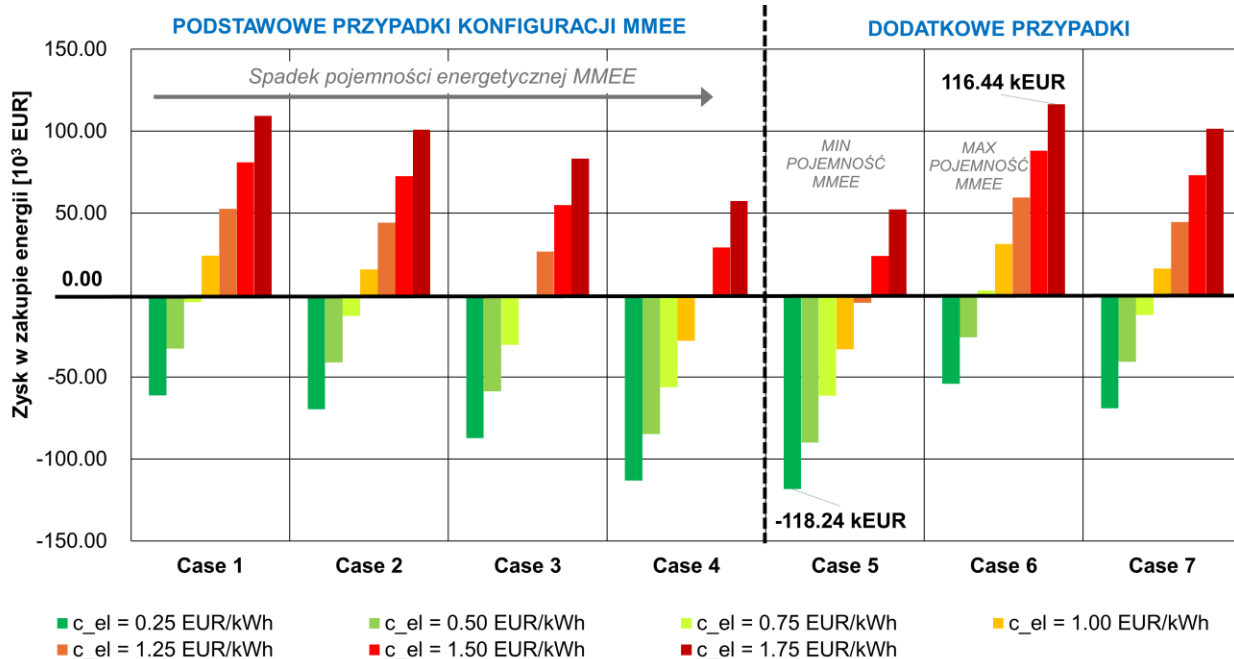
Van (np. Renault Kangoo)



KAT. II

Lekkie pojazdy komercyjne (np. MAN eTGE)

- W zaprezentowanych badaniach – analiza potencjału, bez algorytmu logistycznego
- W przypadku przewożenia elementów toru wyprowadzenia mocy istotnie zmniejszamy pojemność energetyczną MESF
- Planowany zakres nominalnych pojemności MESF wynosi od 24 kWh do 96 kWh dla MESF kategorii I oraz od 120 kWh do 192 kWh dla kategorii II
- Efektywność ekonomiczna realizacji usług przesunięcia czasowego z wykorzystaniem MESF jest możliwa, gdy przeciętna cena zakupu energii wynosiłaby ok 1 EUR/kWh, czyli 4x obecnej ceny**
- Wykorzystanie MESF w systemie elektroenergetycznym budzi szereg wątpliwości prawnych (pojęcie dystrybucji energii)



$t = 0$

CEV #1

SOC= 30%
C = 100 kWh
P= 80 kW

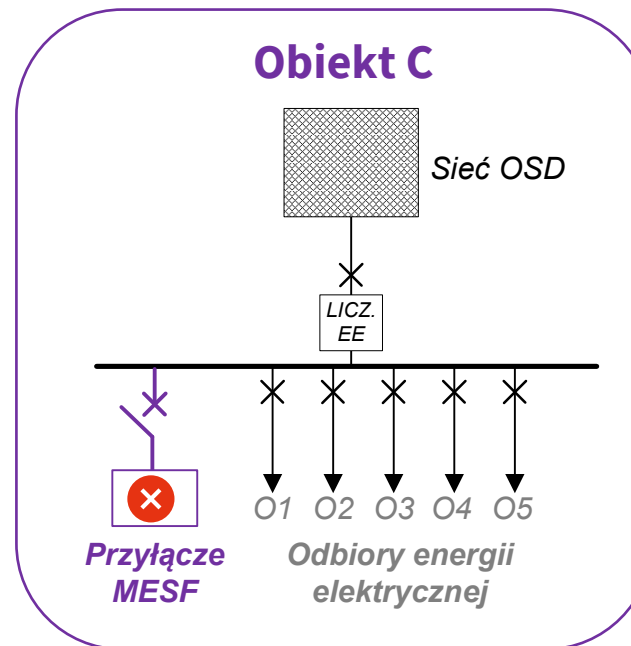
CEV #2

SOC= 90%
C = 100 kWh
P= 80 kW

Baza CEV

$t = 0$

Obiekt C



W stanie $t = 0$, pojazdy CEV znajdują się w bazie. Każdy z pojazdów jest określony za pomocą: **C** – pojemności użytecznej MESF; **P** – mocy rozładowania/ładowania MESF oraz **SOC** – stanu naładowania MESF

W stanie $t = 0$, obiekt C pracuje normalnie, jest przyłączony do sieci elektroenergetycznej. Przylącze dla MESF pozostaje wyłączone. Usługobiorca płaci opłatę za gotowość do uzyskania energii z MESF

t = 1

CEV #1

SOC= 30%
C = 100 kWh
P= 80 kW

CEV #2

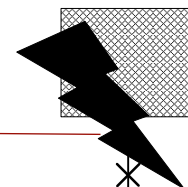
SOC= 90%
C = 100 kWh
P= 80 kW

Baza CEV



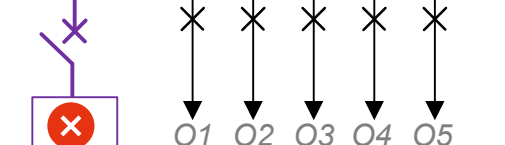
t = 1

Obiekt C



Sieć OSD

LICZ.
EE



Przylącze
MESF

Odbiory energii
elektrycznej

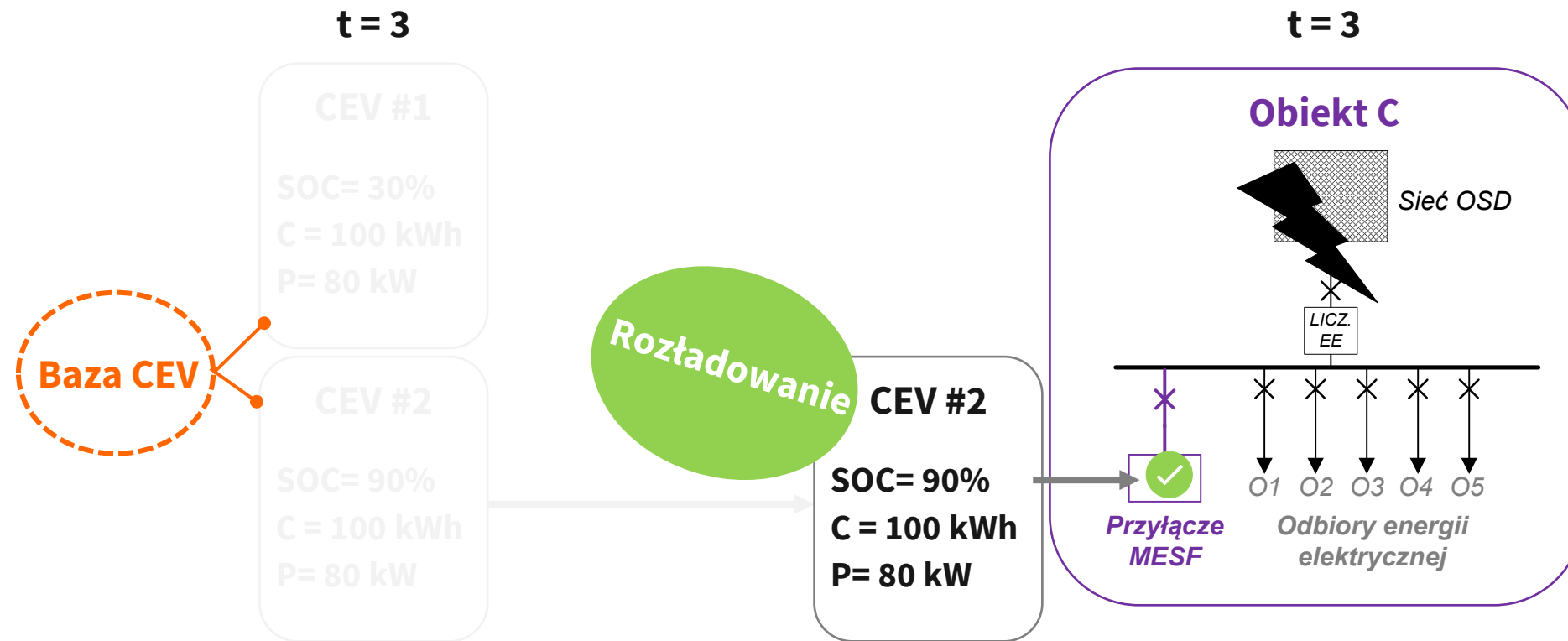
W stanie **t = 1**, pojazdy CEV znajdują się w bazie. Każdy z pojazdów jest określony za pomocą: **C** – pojemności użytecznej MESF; **P** – mocy rozładowania/ładowania MESF oraz **SOC** – stanu naładowania MESF

W stanie **t = 1**, w obiekcie C występuje awaria zasilania z sieci elektroenergetycznej. Zostaje wyzwolony sygnał do wyjazdu dla CEV z MESF



W stanie **t = 2**, sprawdzana jest liczba dostępnych miejsc do realizacji usługi w obiekcie C oraz potrzebny potencjał energetyczny. Pojazd CEV o lepszych parametrach wyrusza do obiektu C

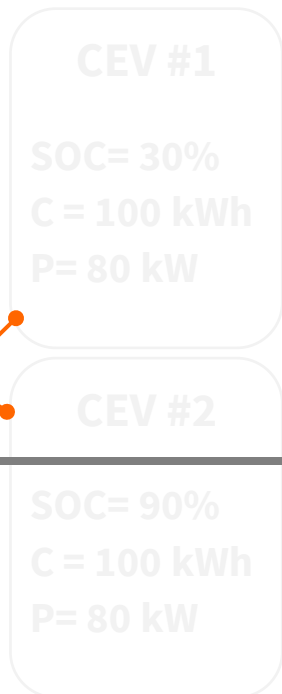
W stanie **t = 2**, w obiekcie C oczekuje się na przybycie pojazdu CEV (#2). W razie potrzeby dokonuje się korekty zapotrzebowania – do operatora floty CEV osobnym kanałem komunikacji



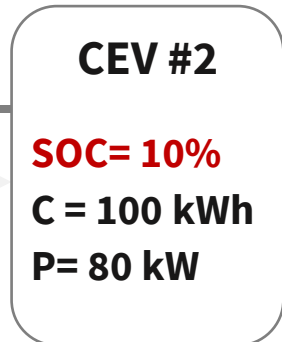
W stanie **t = 3**, w bazie monitorowane są parametry CEV, który realizuje usługę MESF. W przypadku konieczności wysłania kolejnych jednostek monitorowane są parametry innych CEV

W stanie **t = 3**, do obiektu C przyjeżdża pojazd CEV #2 i rozpoczyna proces rozładowania MESF na potrzeby przywrócenia zasilania

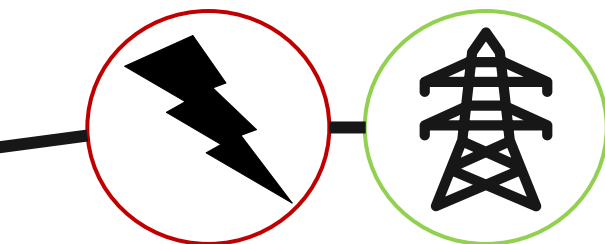
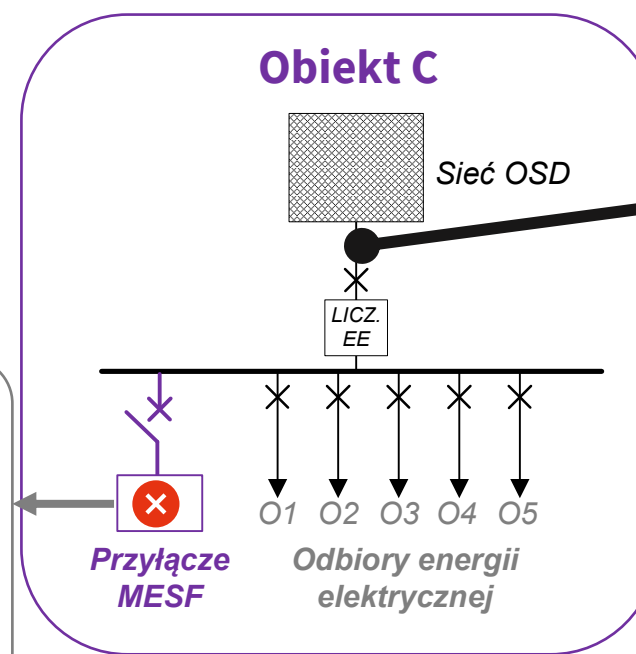
t = 4



Baza CEV



t = 4



Awaria zasilania mogła zostać usunięta lub trwa nadal

W stanie **t = 4**, w bazie oczekuje się powrotu pojazdu CEV #2 po zakończeniu realizacji usługi MESF oraz przygotowanie na jego ponowne naładowanie

W stanie **t = 4**, w obiekcie C pojazd CEV #2 zakończył proces rozładowania, gdyż: a) usunięto awarię w sieci; b) osiągnął minimalny poziom naładowania baterii MESF

Godzinowy koszt eksploatacji CEV Czas realizacji usługi Liczba CEV Koszt realizacji usługi Bilans energii (dodatni – realizacja usługi OK)

Koszt dostarczenia energii z wykorzystaniem CEV

$$\min D_{el}(\tau) = \begin{cases} CS_{CEV,n}^t \cdot \tau \cdot n_{CEV} + Fee_i, & \text{for } E_B \geq 0 \\ CS_{CEV,n}^t \cdot \tau \cdot n_{CEV} + B_i^{COM}, & \text{for } E_B < 0 \wedge B_i^{COM} > 0 \\ CS_{CEV,n}^t \cdot \tau \cdot n_{CEV} + B_i^{SUB}, & \text{for } E_B < 0 \wedge B_i^{SUB} > 0 \end{cases}$$

Przychód w danej godzinie t Współczynniki korekcyjne

$$B_i^{COM} = R_{i,t} \cdot (1 + \mu_i \cdot \alpha) \cdot \tau$$

$$B_i^{SUB} = CS_{el,t,i} \cdot \varepsilon_i \cdot (1 + \mu_i \cdot \alpha) \cdot \tau$$

Procent kosztu za energię elektryczną

Rekompensata finansowa za niedostarczenie energii dla grupy odbiorców domowych

Rekompensata finansowa za niedostarczenie energii dla odbiorcy komercyjnego

ZMIENNE:
 $var(C_{MESF_n}, n_{CEV})$

OGRANICZENIA:

$$C_{MESF_n}^{MIN} \leq C_{MESF_n} \leq C_{MESF_n}^{MAX}$$

$$n_{CEV} \leq n_{CEV,i}^{MAX} \quad \forall i \geq 1$$

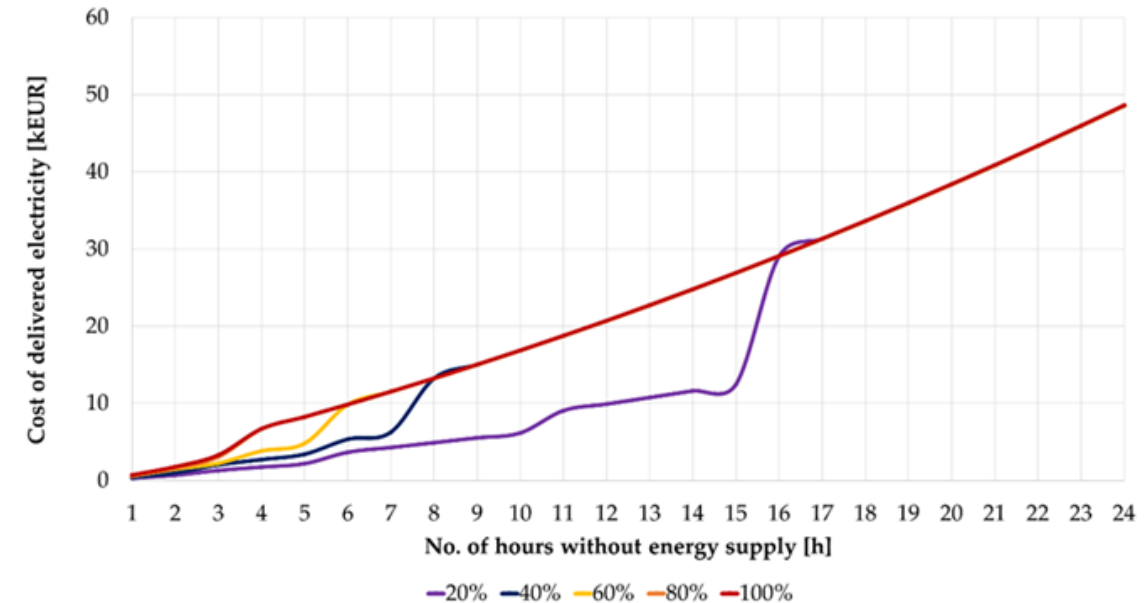
$$E_B(\tau) \geq 0, \quad \forall \tau \geq 1$$



Rezerwowe zasilanie odbiorcy końcowego

Parameter		ELCV		EHCV		Parameter	Entity 3
Option		A	B	C	D	Functionality	Public Utilities
Maximal battery capacity [kWh]	$C_{MESF_n}^{MAX}$	120	192	800	1000	Average hourly energy demand [kWh]	1353.68
Minimal battery capacity [kWh]	$C_{MESF_n}^{MIN}$	40	60	200	250	Average hourly business revenue [EUR]	688.44
Discharge/charge power [kW]				80		Average hourly cost of electricity [EUR]	162.97
Maximal weight of battery pack [kg]		500.4	801.9	3336.0	4170.0	Power backup time- own sources [h] *	0
Nominal DC voltage [V]			600 V–800 V DC			Maximal number of CEV to provide the service	ELCV: 50
Unit cost of MESF battery	$\kappa_{BAT,n}^u$ [EUR/kWh]			350			EHCV: 5
Cost of power electronic and auxiliary circuit [EUR]	$\kappa_{PEL,n}^{MESF}$			20,000			
Unit cost of battery degradation	$\lambda_{deg,n}^{MESF}$ [EUR/kWh]			0.12			

Hours Without Energy Supply [h]	Option	Average Cost of Delivering Electricity in MESF Service [EUR/kWh]				
		$\sigma = 20\%$	$\sigma = 40\%$	$\sigma = 60\%$	$\sigma = 80\%$	$\sigma = 100\%$
1	A	1.06	0.74	0.69	0.58	0.52
	B	0.94	0.66	0.56	0.49	0.50
	C	0.90	0.57	0.48	0.42	0.40
	D	0.91	0.57	0.48	0.42	0.39
4	A	1.59	1.25	1.18	1.54	1.23
	B	1.22	1.15	0.81	0.85	0.82
	C	0.96	0.69	1.30	0.98	0.78
	D	0.97	0.67	0.55	1.02	0.82
24	A	7.48	3.74	2.49	1.87	1.50
	B	3.07	3.83	2.55	1.92	1.53
	C	5.50	2.75	1.83	1.37	1.10
	D	5.55	2.77	1.85	1.39	1.11

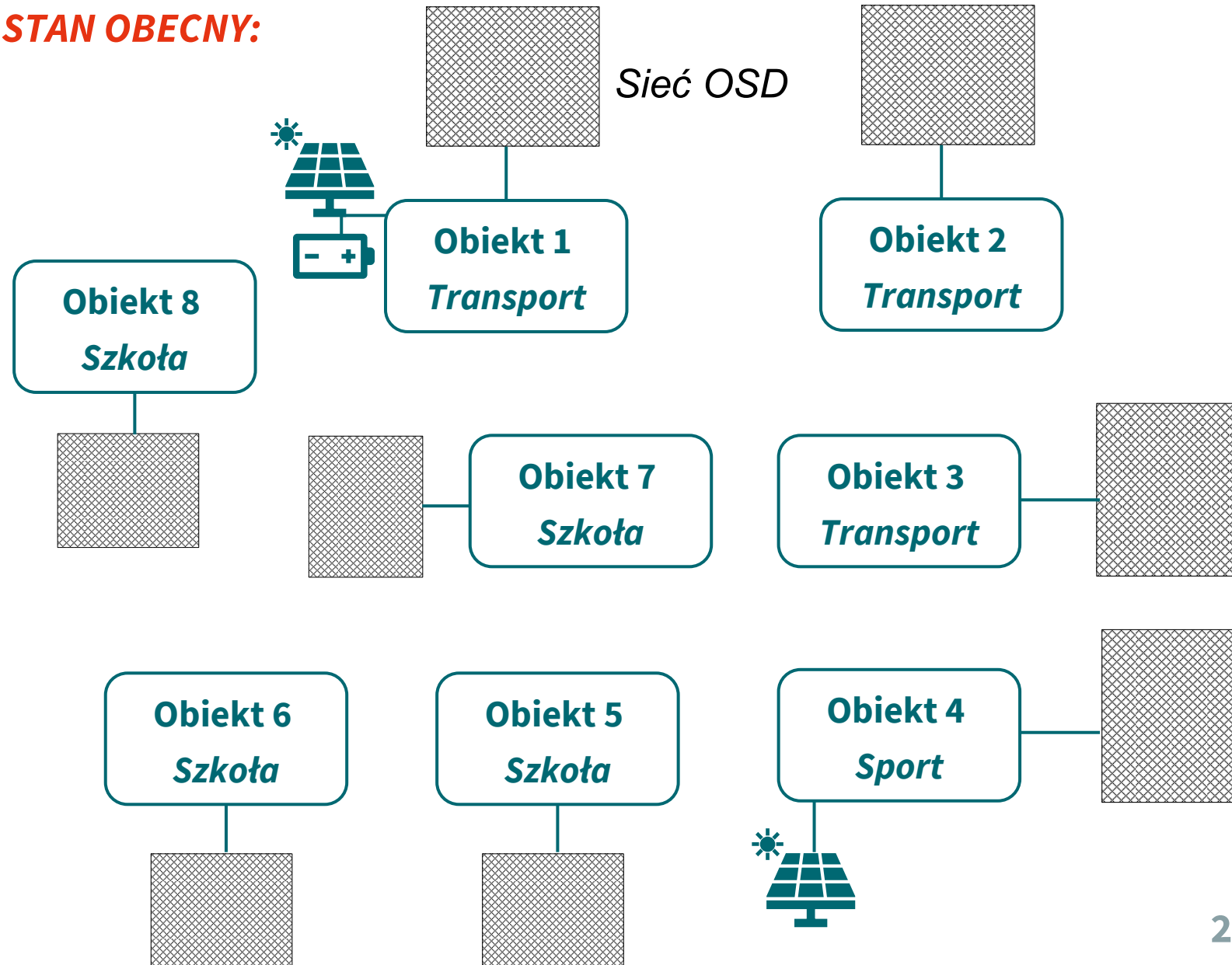


VOLL (URE): 19,88 EUR/kWh

VOLL (ankieta): 37,35 EUR/kWh

- Obecnie trwają w m.st. Warszawa prace nad opracowaniem koncepcji utworzenia instalacji abonenckiej z przyłączonymi instalacją PV, magazynami energii i możliwością wykorzystania pojazdów CEV
- Wyzwanie dotyczy zintegrowania ze sobą obiektów o różnym charakterze w 1 wspólnie działający system na terenie jednej z dzielnic Warszawy
- **Celem jest: podniesienie poziomu bezpieczeństwa energetycznego w obszarze oraz optymalizacja produkcji OZE, aby ograniczyć przepływy energii do sieci**
- W przyszłości takie instalacje abonenckie mogą tworzyć istotne jednostki realizujące elastyczność sieci, dzięki posiadaniu każdego z zasobów: wytwarzanie energii, magazynowanie energii, zarządzanie stroną popytową

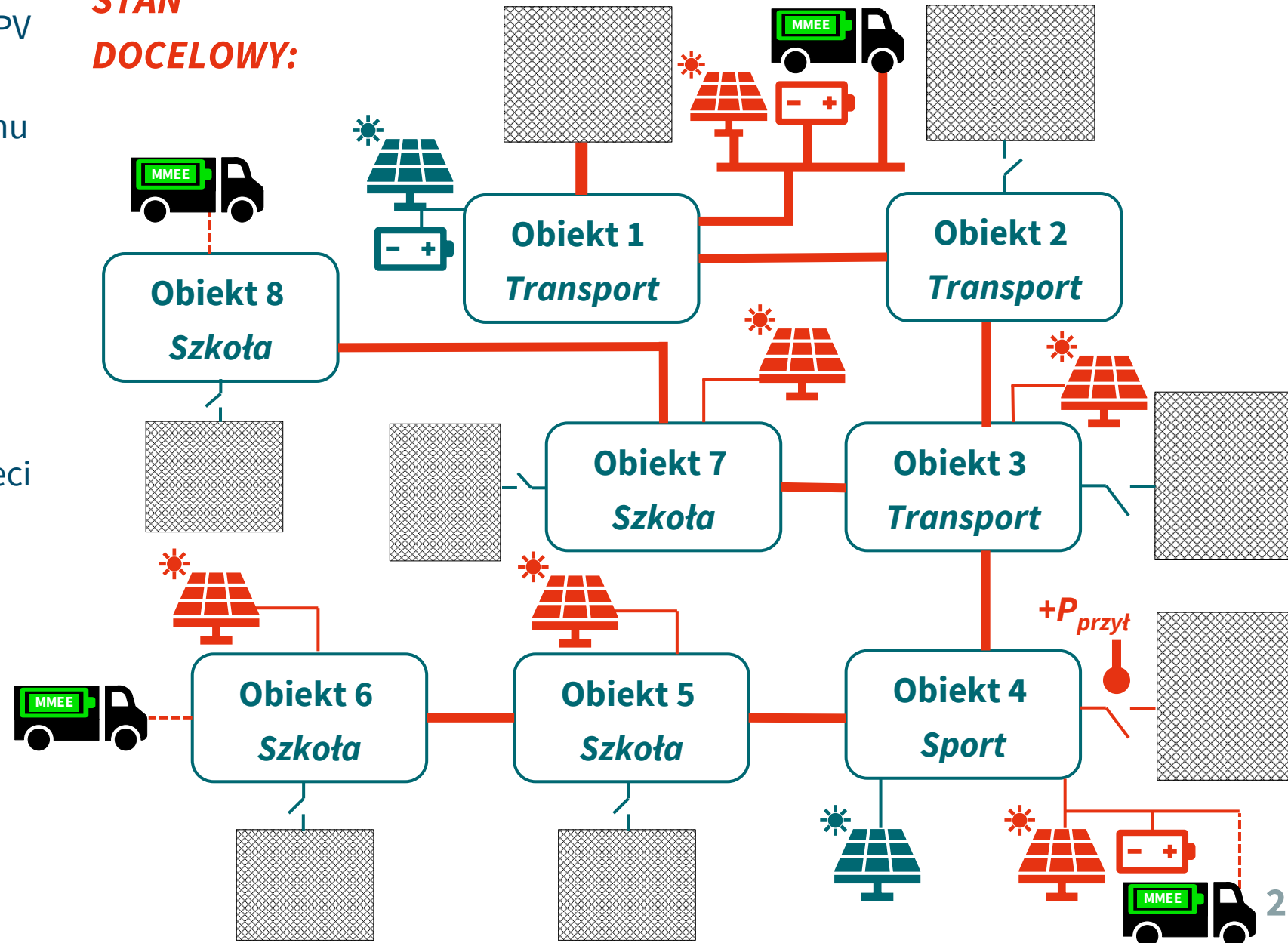
STAN OBECNY:



- Doprojektowane moce wytwórcze PV oraz magazyny energii elektrycznej
- Uwzględnienie mobilnego magazynu energii elektrycznej oraz potencjalnych przyłączy (linia kreskowana)
- 1 punkt styku z siecią OSD
- Brak likwidacji przyłączy
- Praca wyspowa układu
- Możliwość rekonfiguracji układu sieci
- Obiekt 4 może zasilić instalacje abonencką z drugiej strony (lokalizacyjnie i energetycznie)
- **Instalacja abonencka idealna do świadczenia usług elastyczności**

STAN

DOCELOWY:



Dziękuję za uwagę

dr inż. Krzysztof Zagrajek

Zakład Trakcji i Gospodarki Elektroenergetycznej



Instytut Elektroenergetyki
Politechnika Warszawska



Gmach Elektrotechniki kl. C 401
Ul. Koszykowa 75, Warszawa



krzysztof.zagrajek@pw.edu.pl



+48 665 696 763