



Politechnika  
Śląska



# ANALIZA I OPTYMALIZACJA PRACY UKŁADU ZASILANIA ODBIORCY INDYWIDUALNEGO WYPOSAŻONEGO W ŹRÓDŁO FOTOWOLTAICZNE

Wydział Elektryczny Politechniki Śląskiej  
Katedra Elektroenergetyki i Sterowania Układów

Promotor:

Dr hab. inż. Roman Korab prof. PŚ

Promotor pomocniczy:

Dr inż. Marcin Połomski

---

mgr inż. Tomasz Naczyński

# Geneza problemu badawczego – rozwój mikroinstalacji PV w Polsce



Łączna liczba mikroinstalacji. Źródło: PTPIREE



Sumaryczna moc mikroinstalacji. Źródło: PTPIREE

Łączna liczba mikroinstalacji: 1 539 527 szt.

Łączna moc mikroinstalacji: 12,63 GW

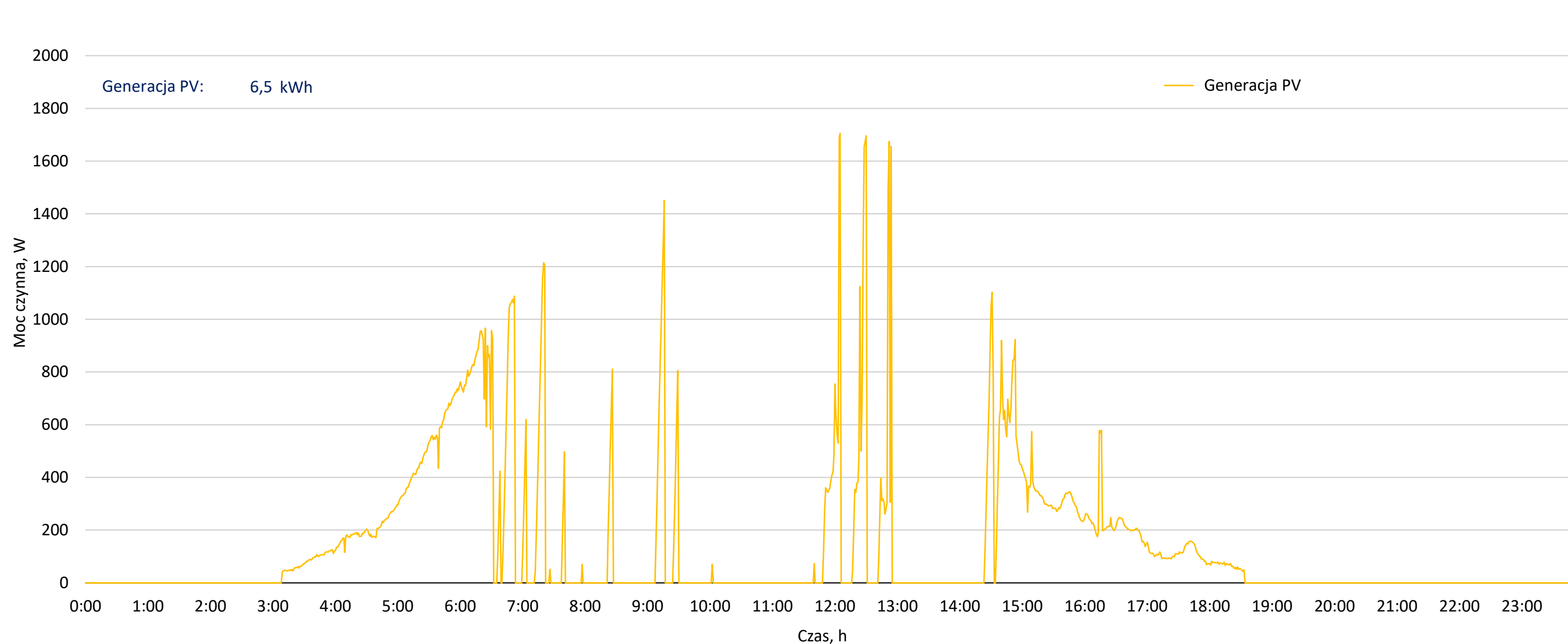
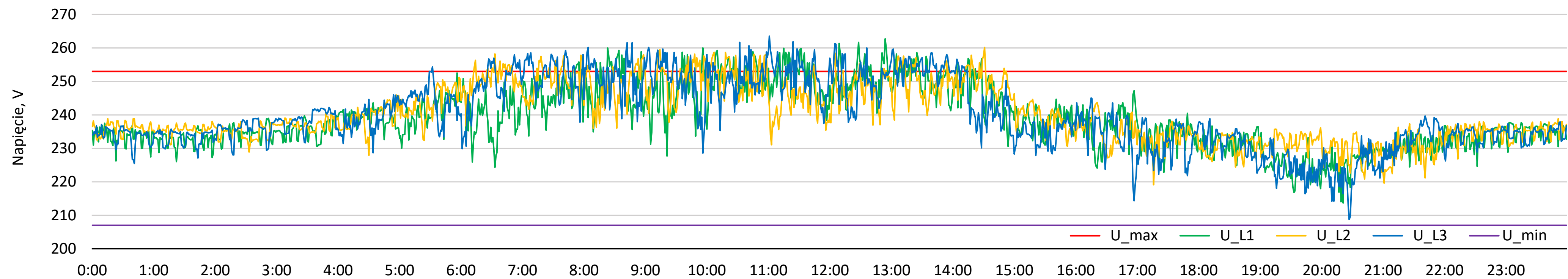
Średnia moc mikroinstalacji ≈ 8,2 kW

# Geneza problemu badawczego – problemy w pracy sieci nN

Problemy sieci elektroenergetycznych nN oraz ich konsekwencje dla instalacji prosumenckich

1. **wzrost napięcia powyżej wartości dopuszczalnej, tj. 110%  $U_n$  ( $U_n$  – napięcie znamionowe sieci),**
2. przekroczenie prądu dopuszczalnego długotrwale dla danego elementu sieci,
3. pojawienie się odwrotnych przepływów mocy czynnej, czyli przepływów z sieci niskiego napięcia do sieci średniego napięcia (SN),
4. wzrost strat sieciowych w stosunku do pracy tej samej sieci bez źródeł PV,
5. wzrost niesymetrii napięć (głównie składowej zerowej),
6. konsekwencje wzrostu napięcia powyżej wartości dopuszczalnej → wyłączenie falowników PV (przerwy w generacji energii).

# Geneza problemu badawczego – konsekwencje przekroczenia dopuszczalnego napięcia



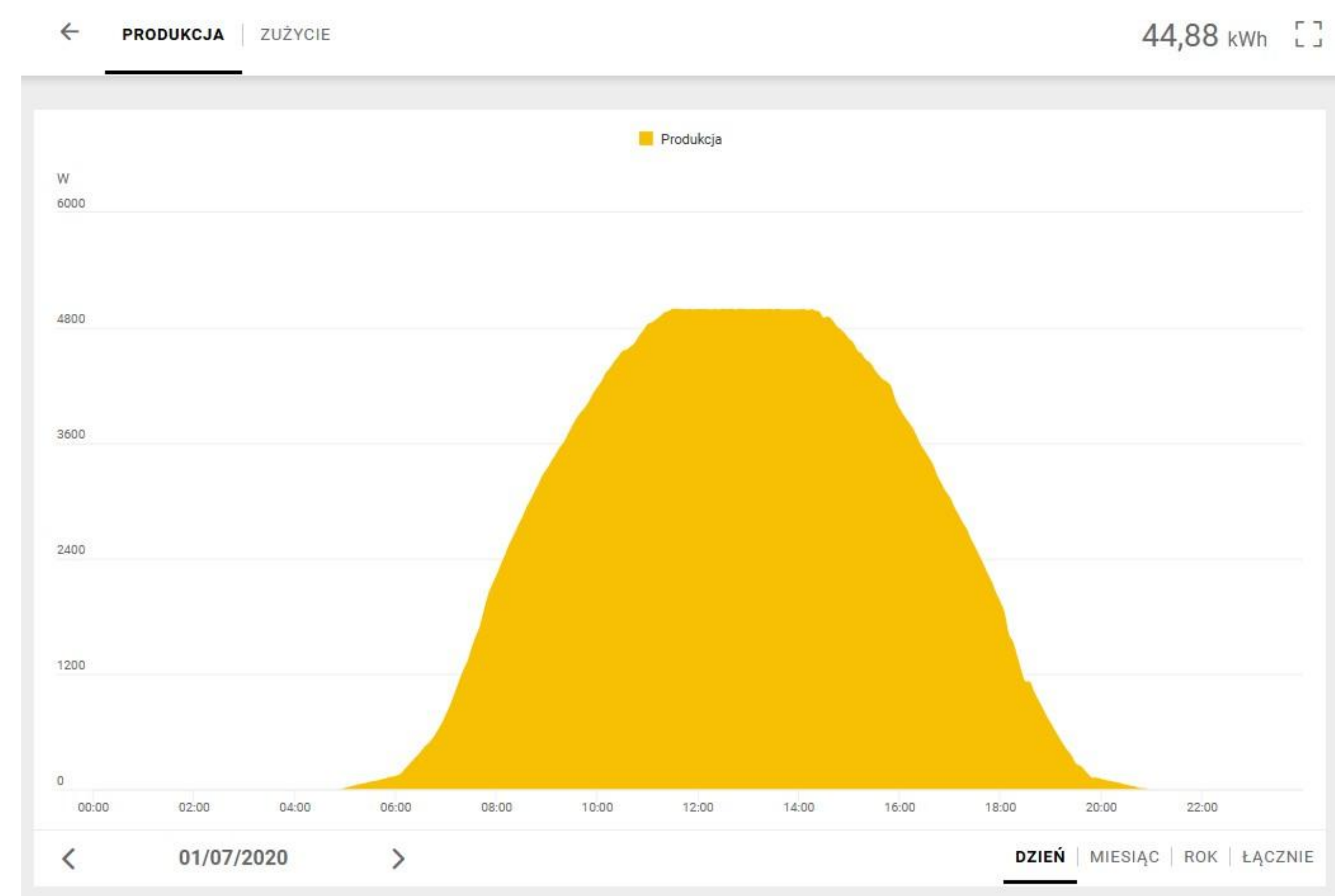
Czas, h Zbyt wysokie poziomy napięć w sieci elektroenergetycznej

Wyłączenie falownika i straty spowodowane brakiem generacji w okresach największego nasłonecznienia

# Geneza problemu badawczego – konsekwencje przekroczenia dopuszczalnego napięcia



Wyłączenie falownika i straty spowodowane brakiem generacji w okresach największego nasłonecznienia



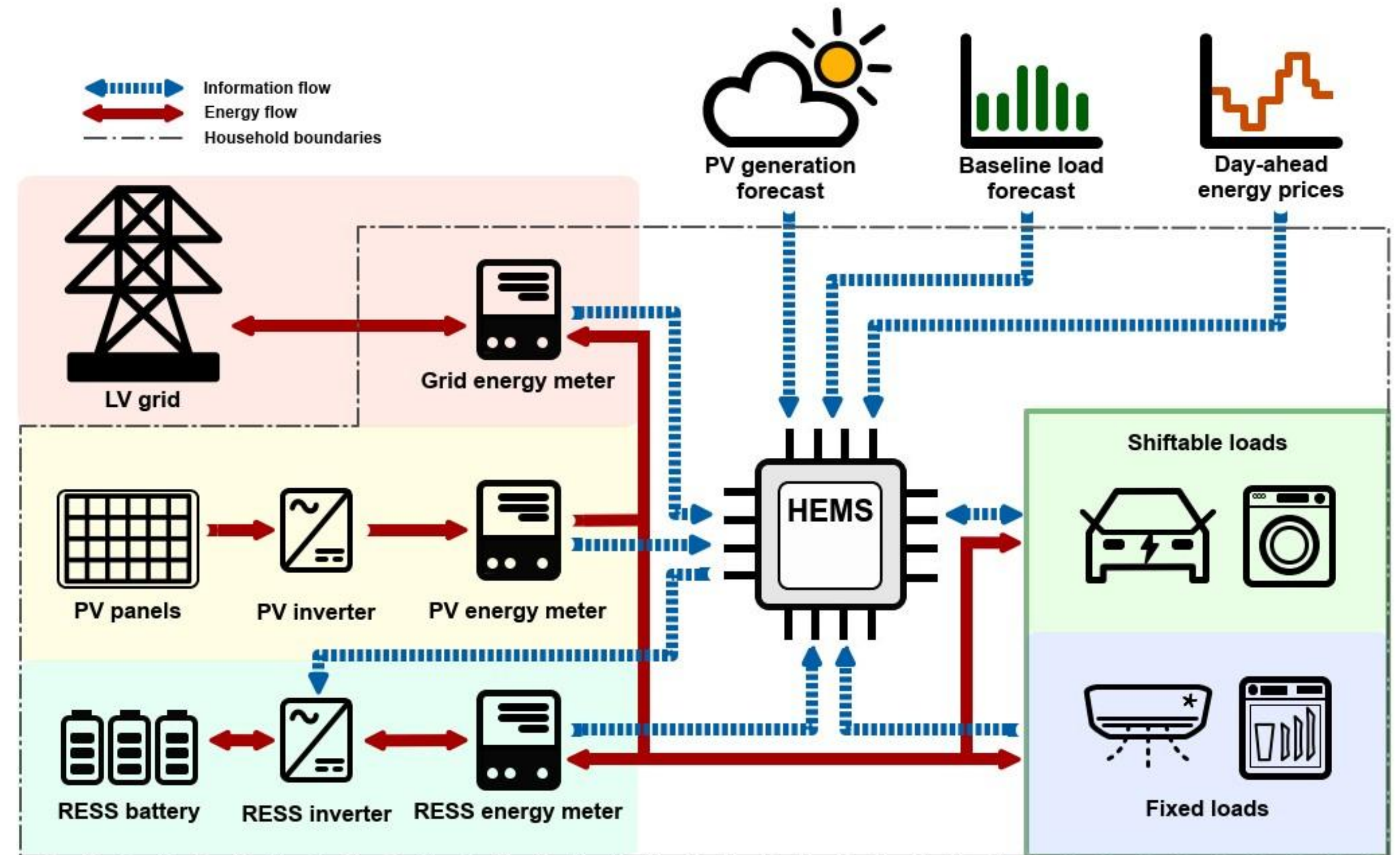
Pełna generacja w źródle PV

Strata związane z brakiem generacji w porównaniu z pełną generacją źródła PV wynosi  $\approx 75\%$

# System HEMS (Home Energy Management System)

Typowa architektura systemu HEMS

Cel działania systemu HEMS –  
wzrost autokonsumpcji  
i zmniejszenie oddziaływania  
mikroinstalacji PV na sieć nN



Źródło: Korab R., Połomski M., Naczyński T.: Optimal scheduling of energy storage and shiftable loads in grid-connected residential building with photovoltaic micro-installation.<sup>6</sup>

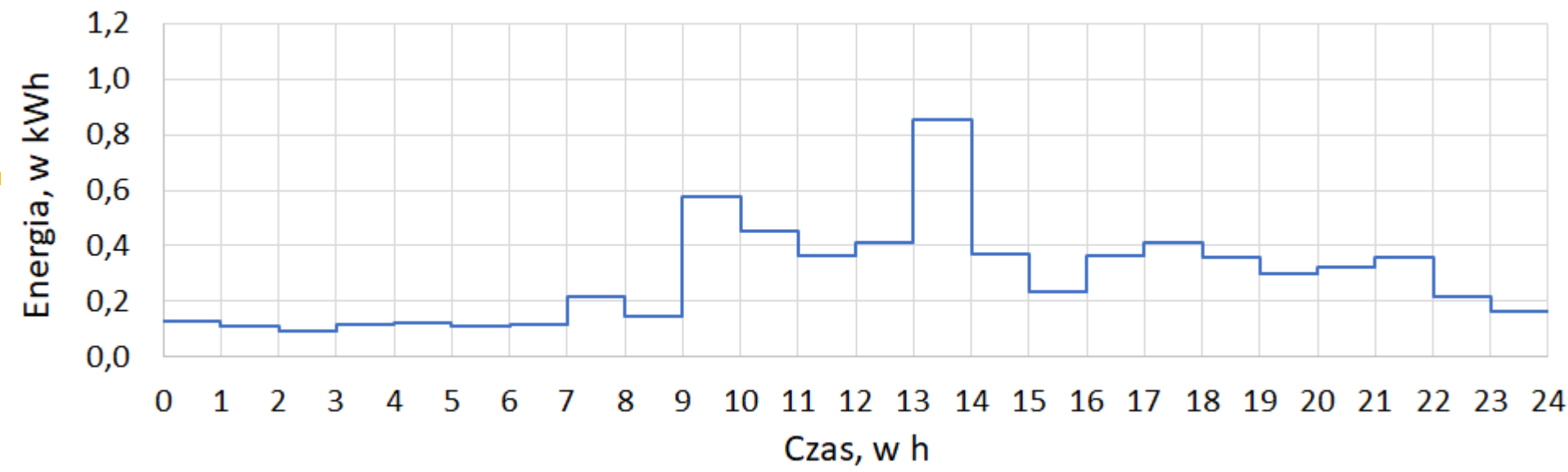
# Cel i zakres pracy

## Główny cel pracy – opracowanie i zaprojektowanie oraz przetestowanie systemu HEMS w rzeczywistych warunkach pracy (w gospodarstwie domowym)

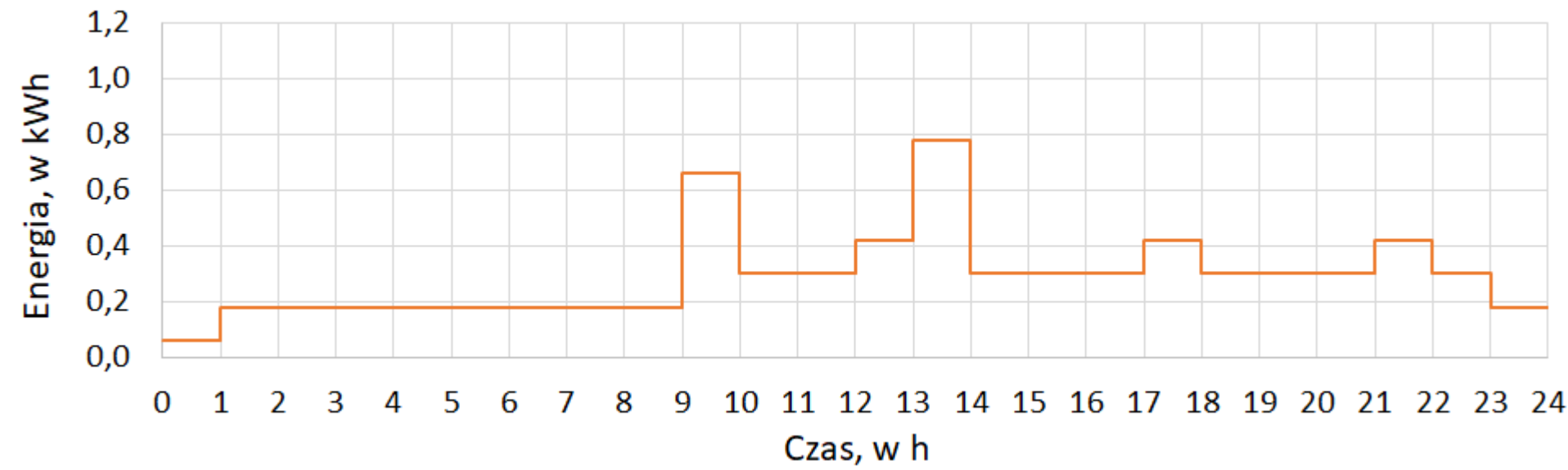
Etapy pracy badawczo-wdrożeniowych:

1. Opracowanie metody prognozowania bazowego zapotrzebowania odbiorcy na energię elektryczną
2. Opracowanie metody prognozowania generacji energii elektrycznej w źródle fotowoltaicznym na podstawie danych pogodowych
3. Opracowanie algorytmu optymalizującego pracę urządzeń zainstalowanych w badanym obiekcie obejmujących baterijny magazyn energii oraz odbiorniki o elastycznym czasie załączania,
4. Budowa stanowiska badawczego umożliwiająca sterowanie magazynem i odbiornikami według harmonogramu wyznaczonego przez algorytm optymalizacyjny
5. Przeprowadzenie badań pozwalających na ocenę efektywności działania opracowanego algorytmu optymalizacyjnego oraz poprawności funkcjonowania wdrożonego systemu pomiarowo-sterującego w badanym obiekcie (w rzeczywistym budynku mieszkalnym)

# Prognozowanie bazowego zapotrzebowania na energię elektryczną – metodyka badań



Średnie obciążenie odbiorcy komunalno-bytowego



Statystycznie najczęstsze obciążenie odbiorcy komunalno-bytowego

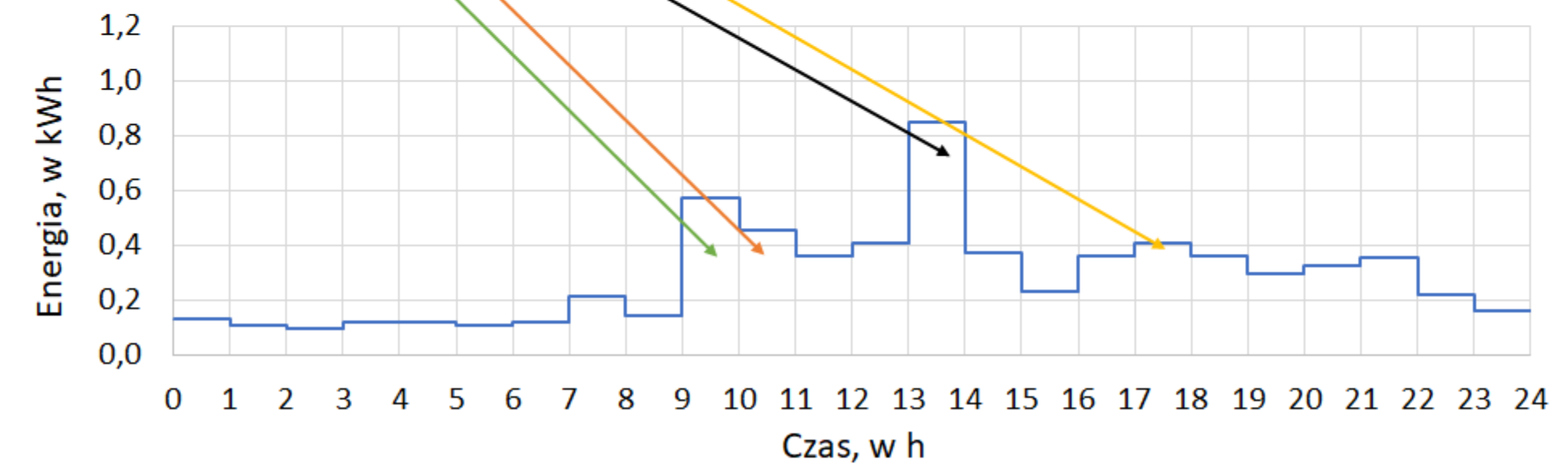
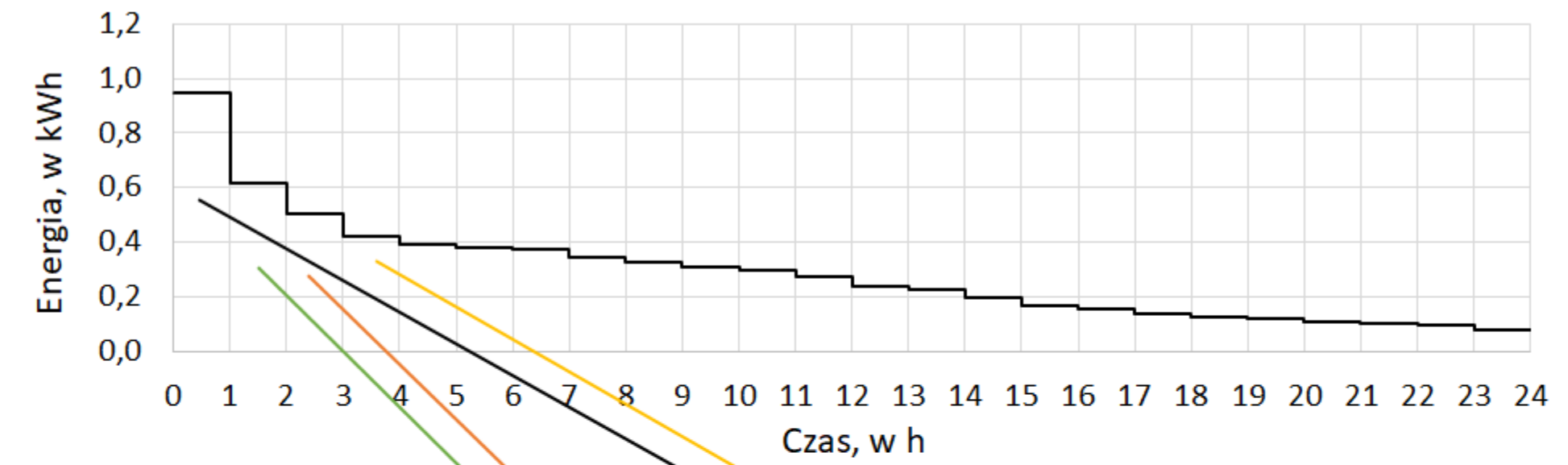
$$E_{np}(h) = w_1 E_{\acute{s}r}(h) + w_2 E_{typ}(h) + w_3 E_{st}(h),$$

$E_{\acute{s}r}(h)$  - „średnie” zużycie energii w godzinie  $h$ ,

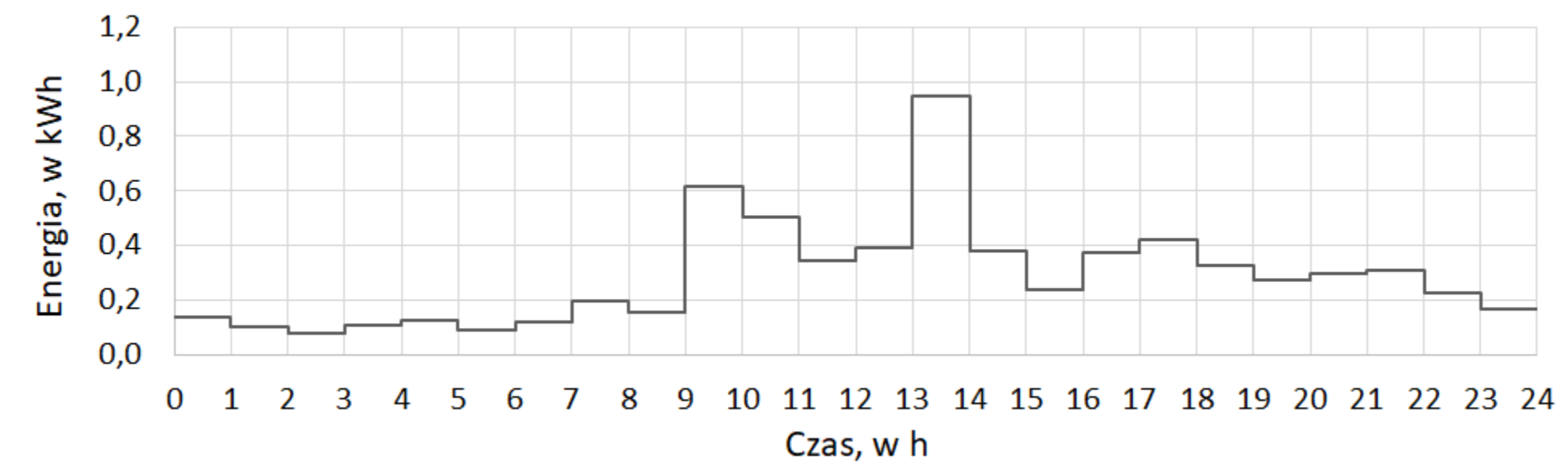
$E_{typ}(h)$  - „typowe” zużycie energii w godzinie  $h$ ,

$E_{st}(h)$  - statystycznie najczęstsze zużycie energii w godzinie  $h$ ,

$w_1, w_2, w_3$  - wagi poszczególnych składników prognozy



Ilustracja metody tworzenia „typowego” grafiku obciążenia odbiorcy komunalno-bytowego



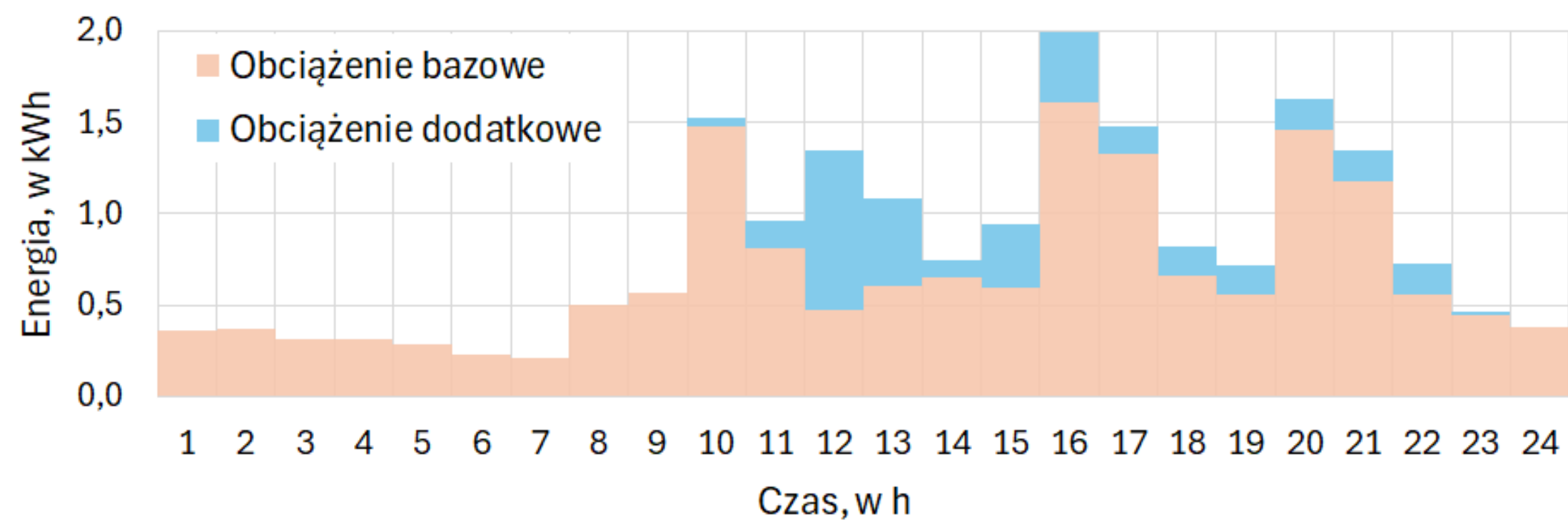
„Typowe” obciążenie odbiorcy komunalno-bytowego

Źródło: Naczyński T., Korab R., Połomski M.: Krótkoterminowe prognozowanie bazowego obciążenia odbiorcy komunalno-bytowego z wykorzystaniem danych historycznych. 8



# Prognozowanie bazowego zapotrzebowania na energię elektryczną – wyniki badań

Przykładowe wyniki prognozy bazowego obciążenia odbiorcy

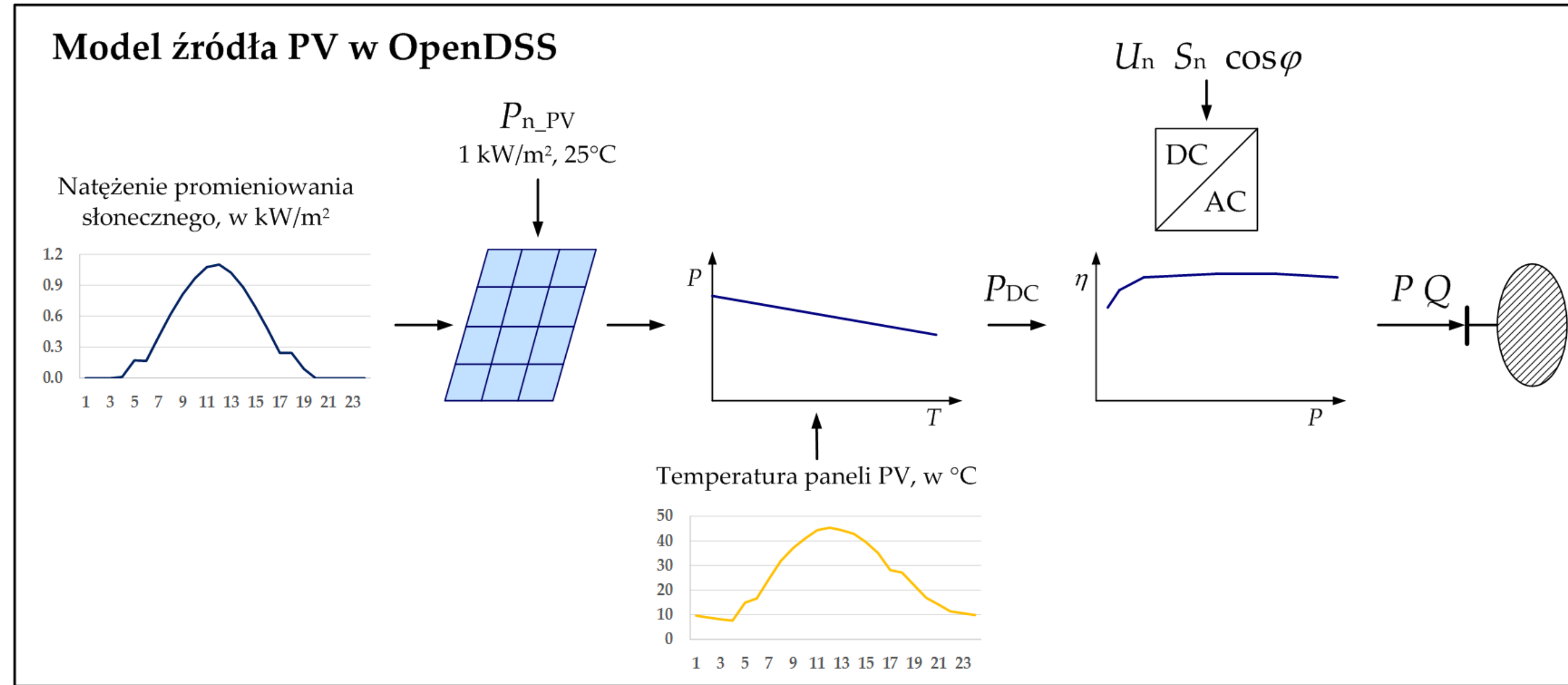


Zarejestrowane obciążenie bazowe oraz obciążenie dodatkowe (odbiorniki o sterowanym czasie załączania) analizowanego odbiorcy komunalno-bytowego w sobotę, 31 sierpnia 2024 r.

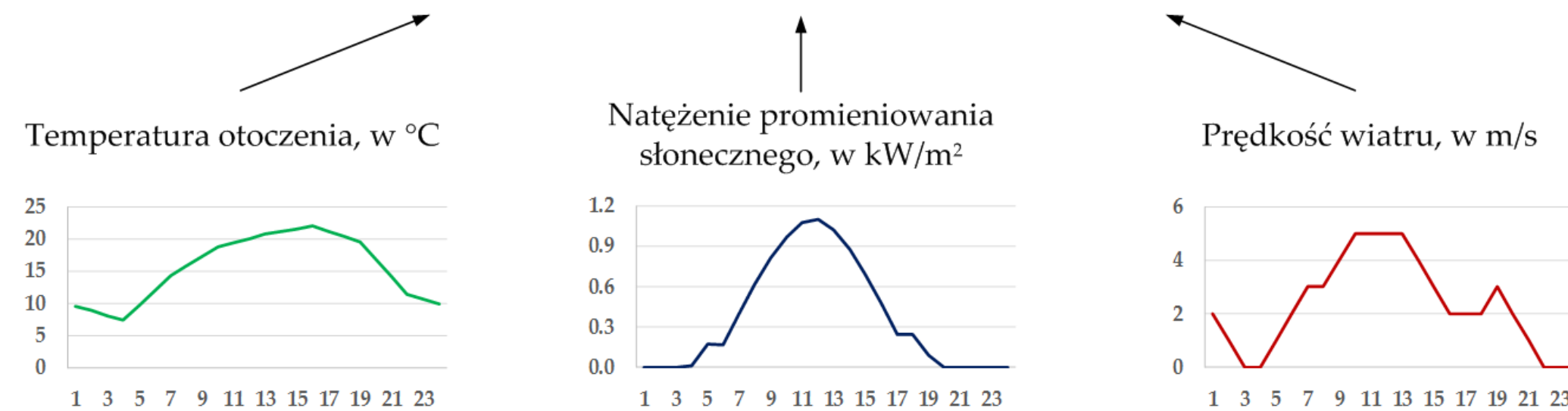
Dzień prognozy n	Liczba dni poprzedzających N	Bazowe zużycie energii		Błędy prognozy		
		rzeczywiste, kWh	prognozowane, kWh	MAE kWh	RMSE kWh	MAPE %
03.07	3	11,79	10,92	0,13	0,18	25,34
	4		10,87	0,14	0,21	24,89
	5		10,84	0,12	0,19	22,30
10.07	3	12,49	11,89	0,11	0,16	23,00
	4		11,18	0,11	0,15	20,73
	5		10,88	0,10	0,14	18,14
17.07	3	12,39	12,36	0,16	0,24	29,80
	4		11,88	0,15	0,23	27,19
	5		11,29	0,16	0,25	27,25

Źródło: Naczyński T., Korab R., Połomski M.: Krótkoterminowe prognozowanie bazowego obciążenia odbiorcy komunalno-bytowego z wykorzystaniem danych historycznych. 9

# Prognozowanie generacji PV – zastosowany model źródła PV

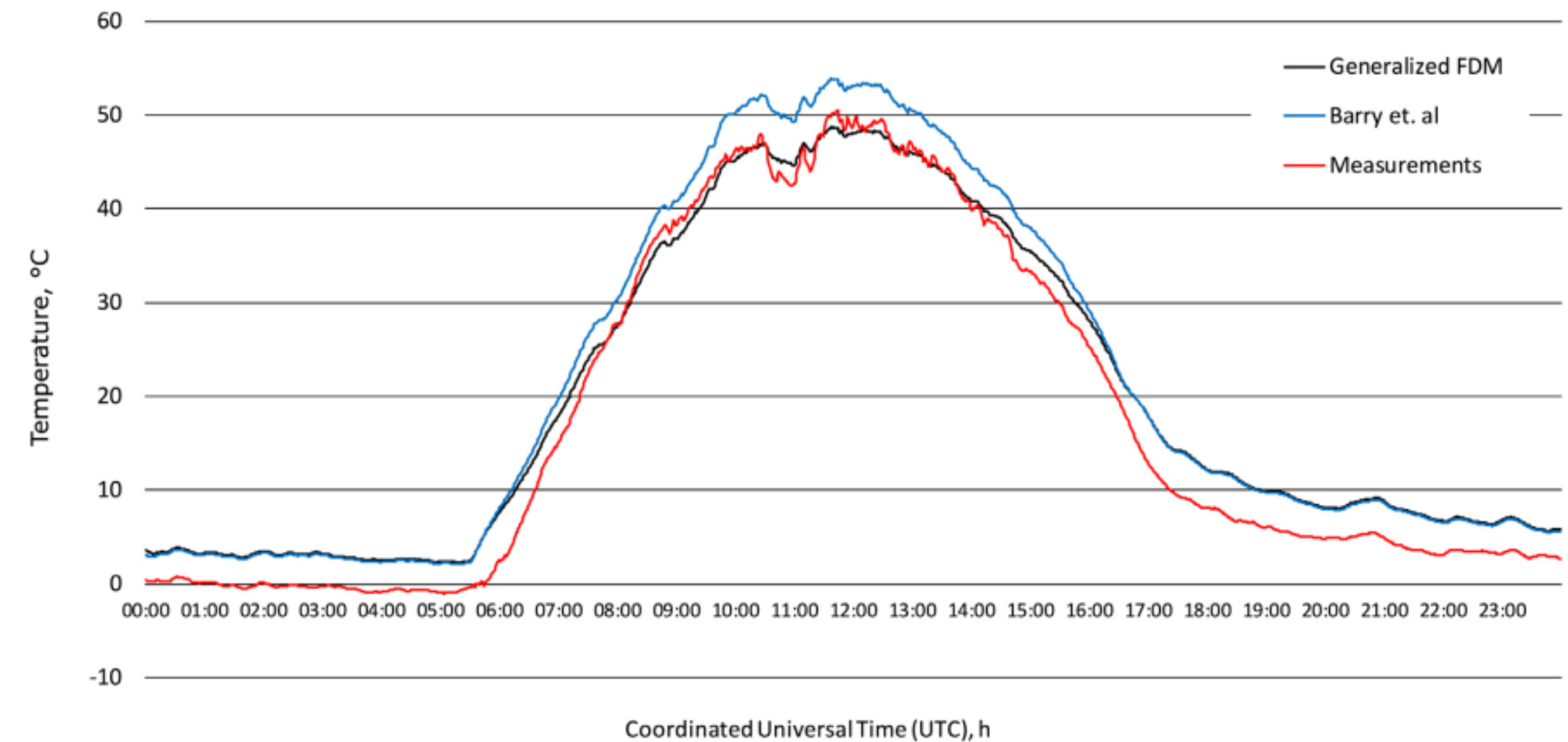
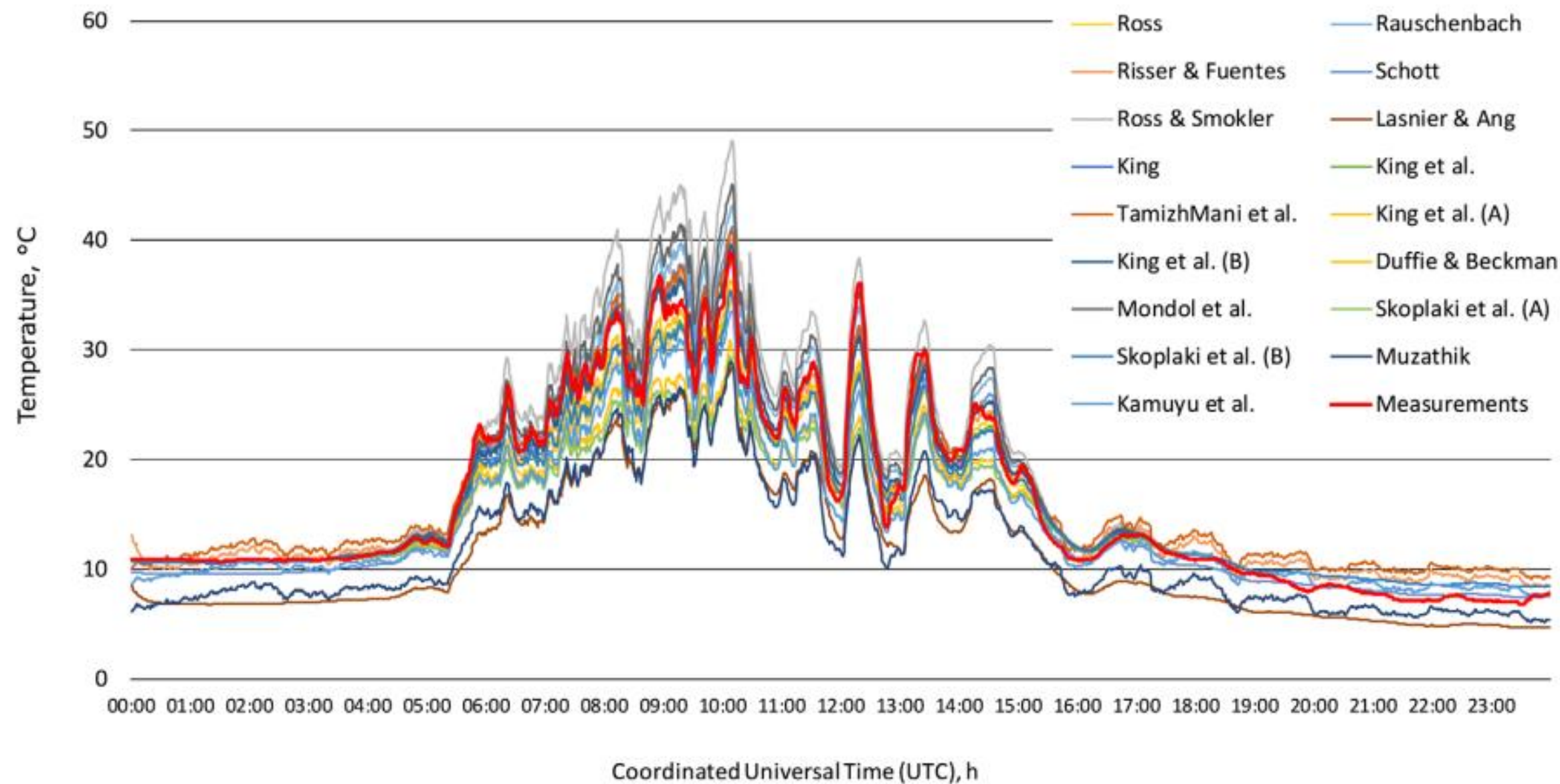


## Model obliczający temperaturę paneli PV



Źródło: Naczyński T., Korab R., Połomski M.: Krótkoterminowe prognozowanie bazowego obciążenia odbiorcy komunalno-bytowego z wykorzystaniem danych historycznych. 10

# Prognozowanie generacji PV – obliczanie temperatury panelu



Temperatura modułu fotowoltaicznego obliczona przy użyciu różnych modeli różnic skończonych w porównaniu ze zmierzonymi warunkami temperaturowo-atmosferycznymi w rozdzielczości 1 min

Temperatura modułu fotowoltaicznego obliczona przy użyciu uogólnionej postaci modelu różnic skończonych i modelu dynamicznego Barry'ego i in. a zmierzona temperatura-atmosfera w rozdzielczości 1 min, 27 września 2018 r.

$$\bar{T}_{PV}(t) = \frac{1}{pq} \sum_{j=1}^{q=3} T_{PV}(t)_{i,j},$$

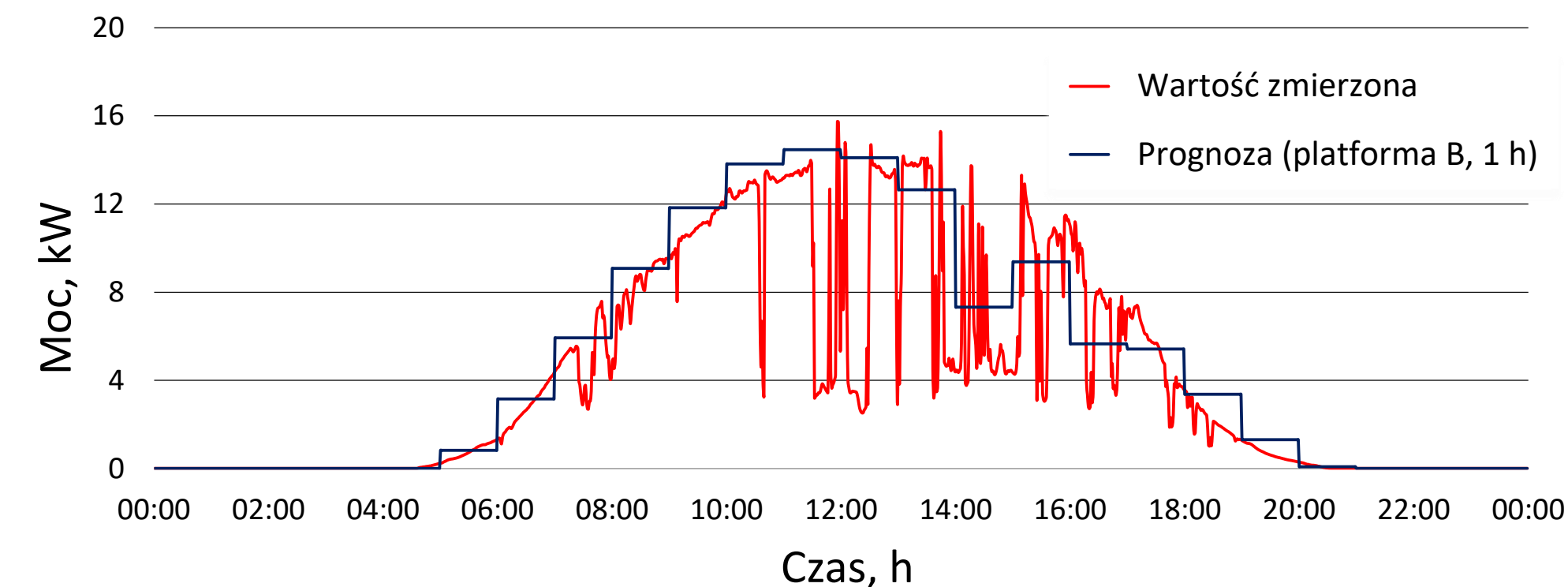
gdzie:  $\Delta T_{PV}(t)_{i,j}$  - wzrost temperatury modułu fotowoltaicznego obliczony przy użyciu jednego z ogólnych wzorów ( $i = 1, \dots, p$ ) ( $j = 1, \dots, q$ ),

$$T_{PV}(t)_{i,j} = T_{PV}(t-1)_{i,j} + \Delta T_{PV}(t)_{i,j},$$

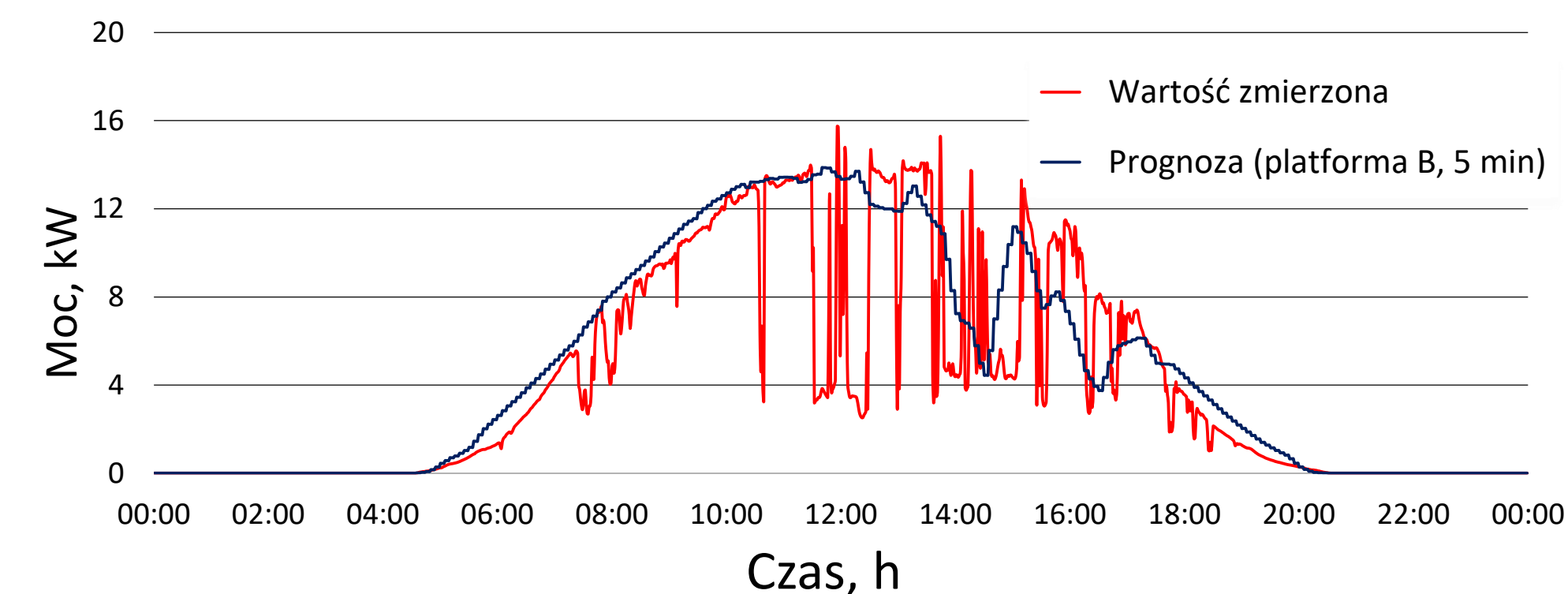
$p$  - liczba ogólnych postaci wzorów określających wzrost temperatury modułu PV  
 $q$  - liczba funkcji celu liczba funkcji celu przyjętych do optymalizacji skończonej modeli termicznych

# Prognozowanie generacji PV – przykładowe wyniki

Dzień	Platforma, rozdzielczość	Dzienna produkcja energii			Błąd MAPE
		Zmierzona kWh	Obliczona kWh	Różnica [%] %	
27 czerwiec	A, 1 h	98,6	124,5	26,3	87,1
	B, 1 h		118,3	20,1	59,7
	B, 5 min		114,2	15,9	53,4
29 wrzesień	A, 1 h	38,5	72,0	86,9	124,7
	B, 1 h		40,3	4,6	28,5
	B, 5 min		39,9	3,6	26,5

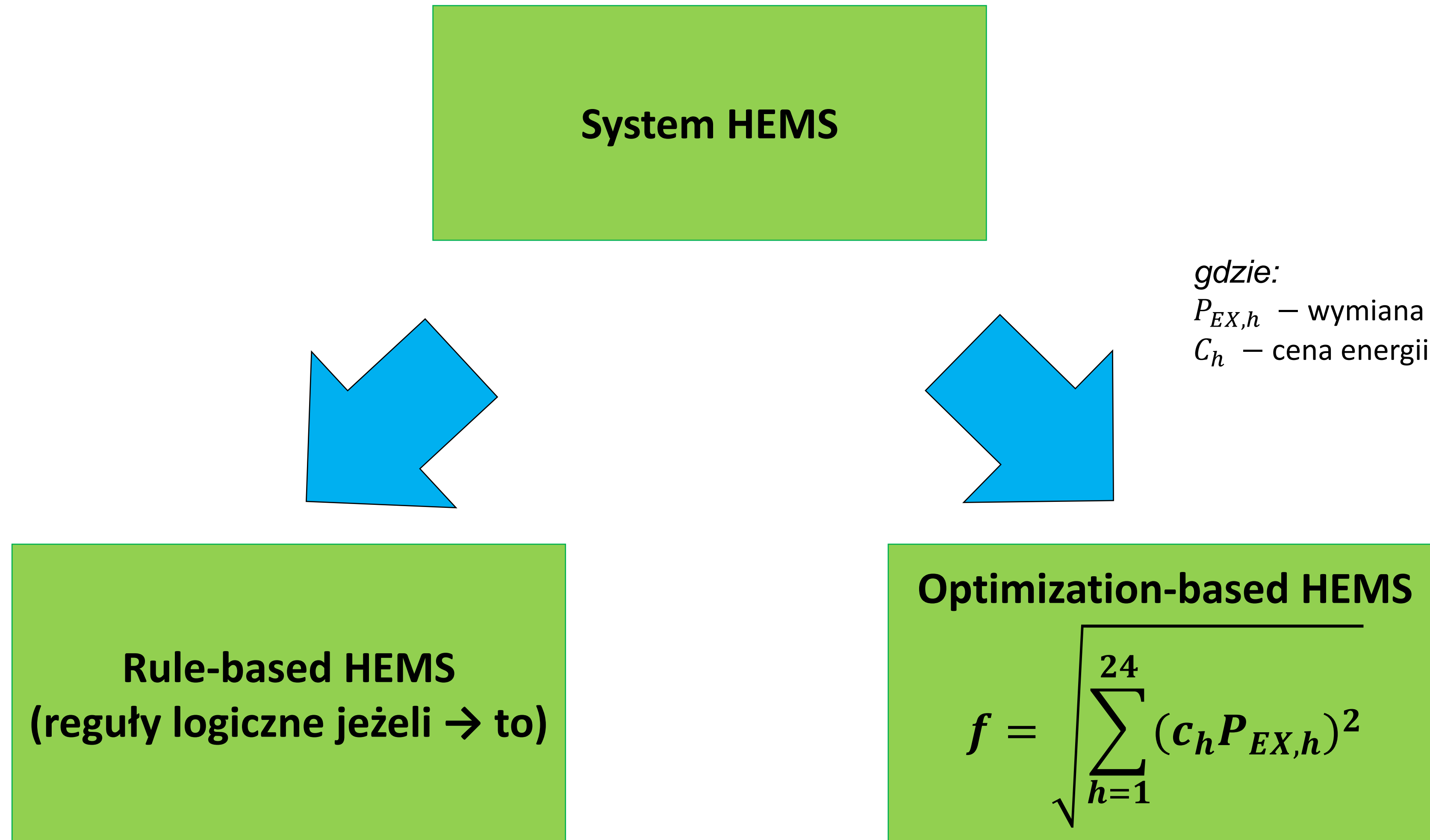


Prognoza w rozdzielczości godzinowej

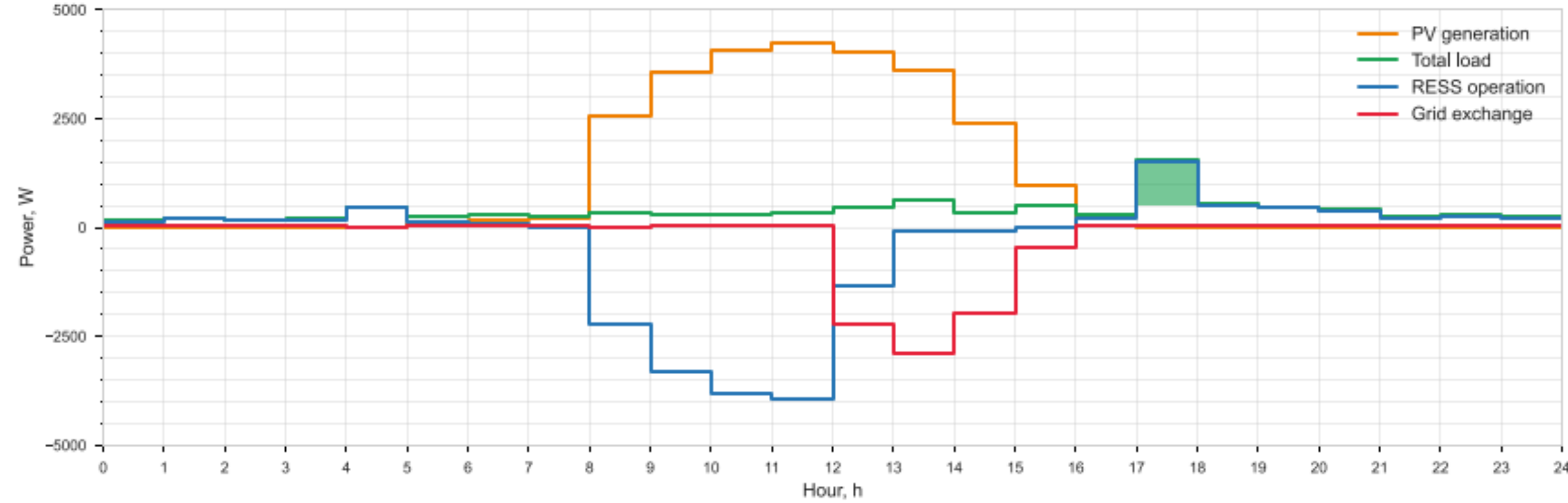


Prognoza w rozdzielczości 5-cio minutowej

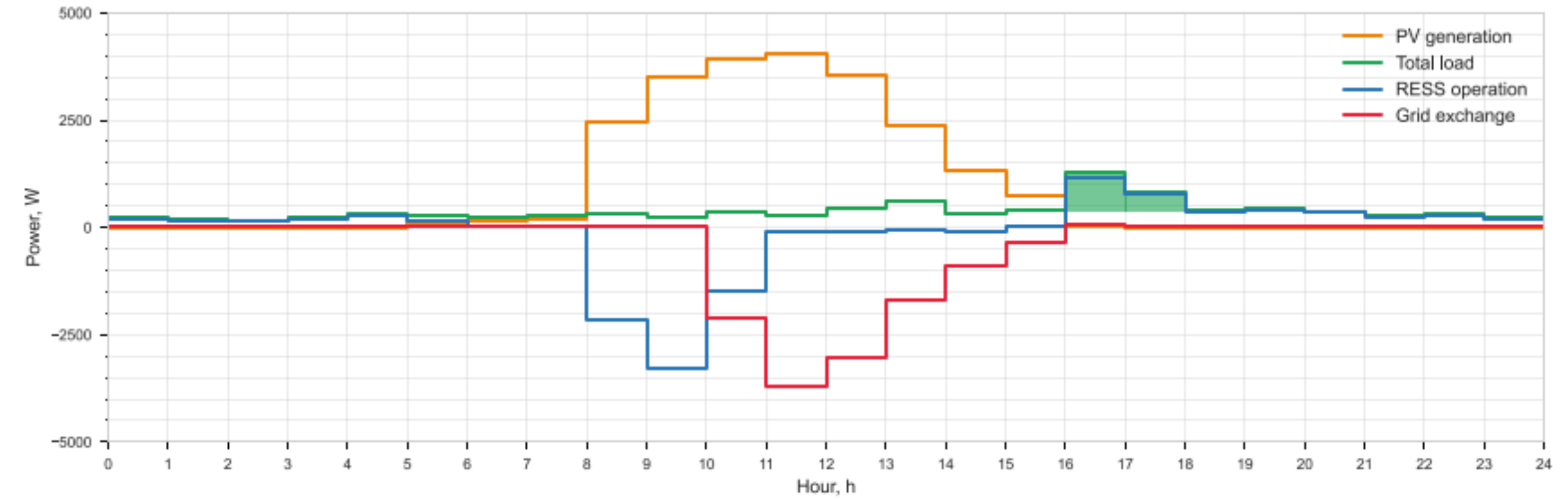
# Podstawowe rodzaje systemów HEMS (Home Energy Management System)



# Pomiary – działanie systemu HEMS wg metody rule-based

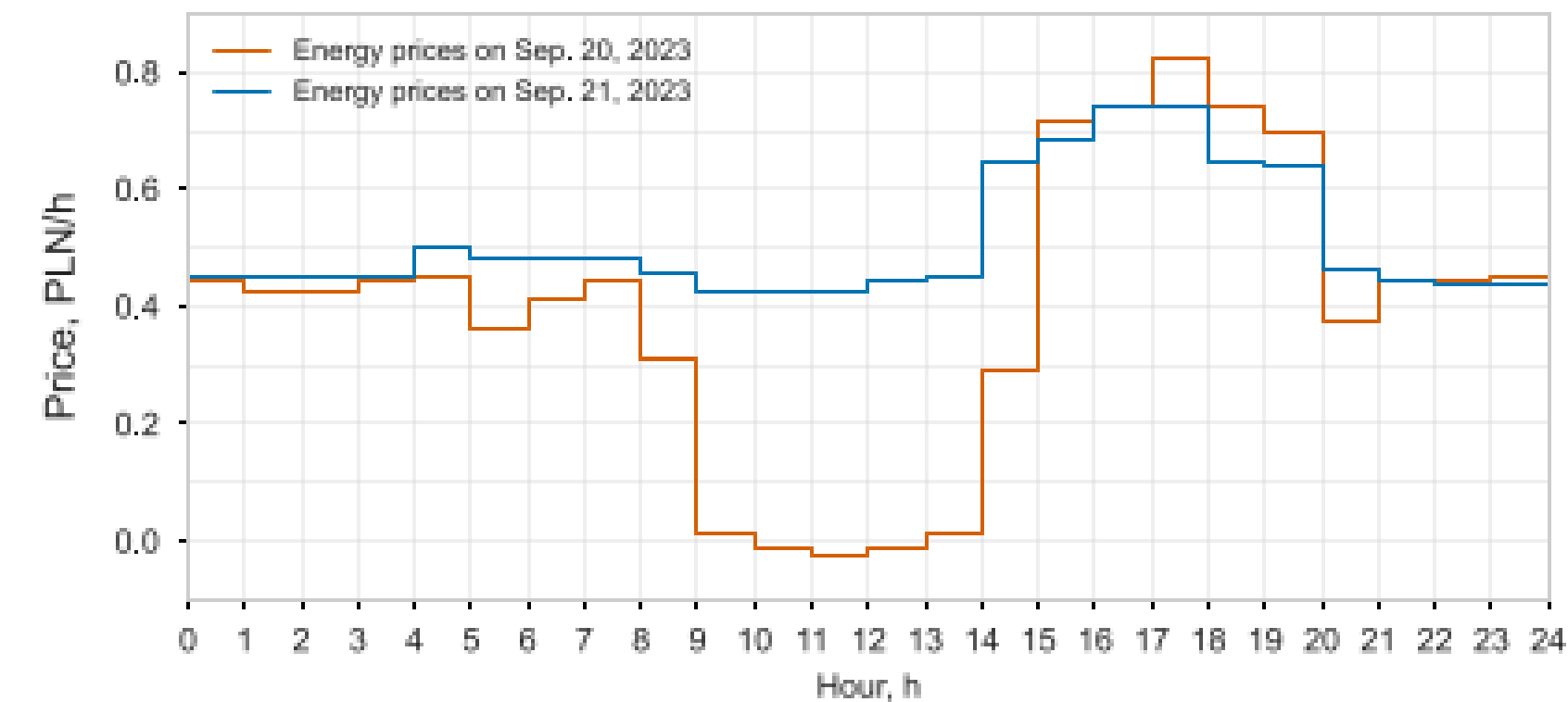


Generacja PV, całkowite obciążenie, działanie RESS i wymiana energii z siecią w dniu 20 września 2023 r., przedstawiona w rozdzielczości godzinowej



Generacja PV, całkowite obciążenie, działanie RESS i wymiana energii z siecią w dniu 21 września 2023 r., przedstawiona w rozdzielczości godzinowej

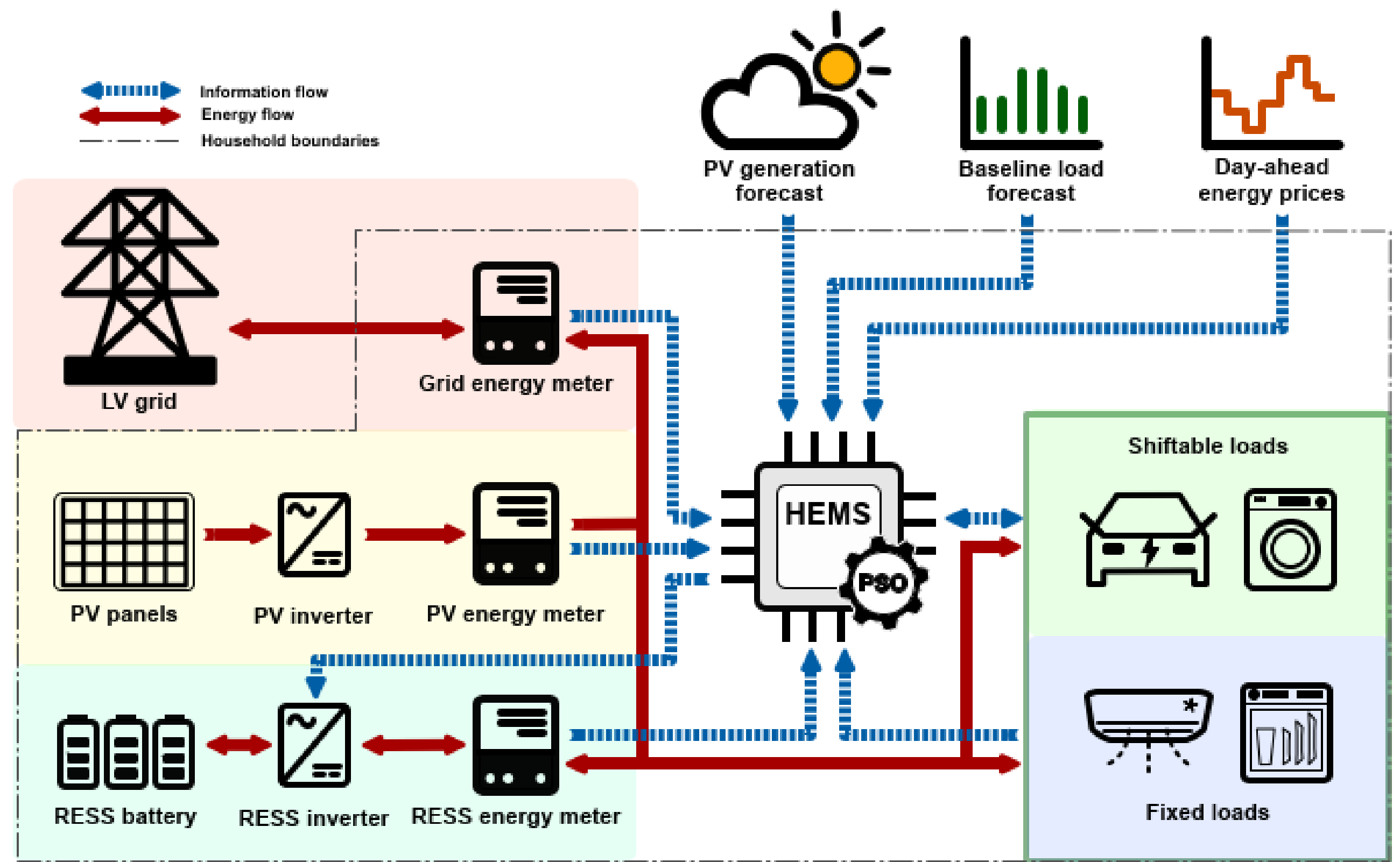
## Ceny energii – dane do metody optimization-based



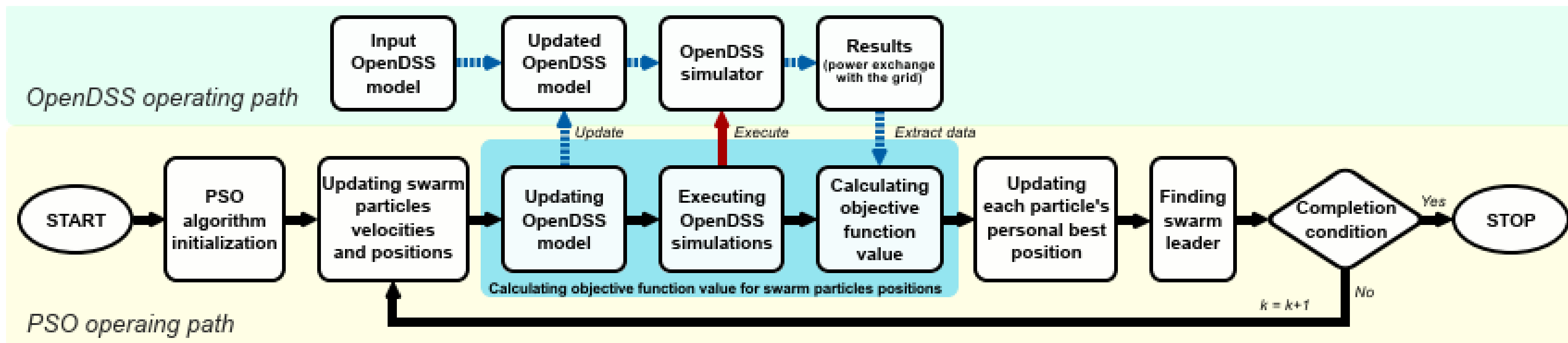
Godzinowe ceny rynkowe energii elektrycznej w dniach 20 września i 21 września 2023 r., wykorzystane w symulacjach

Źródło: Korab R., Połomski M., Naczyński T.: Optimal scheduling of energy storage and shiftable loads in grid-connected residential building with photovoltaic micro-installation. <sup>14</sup>

# Algorytm PSO w systemie HEMS



Schemat blokowy algorytmu optymalizacji opartego na PSO



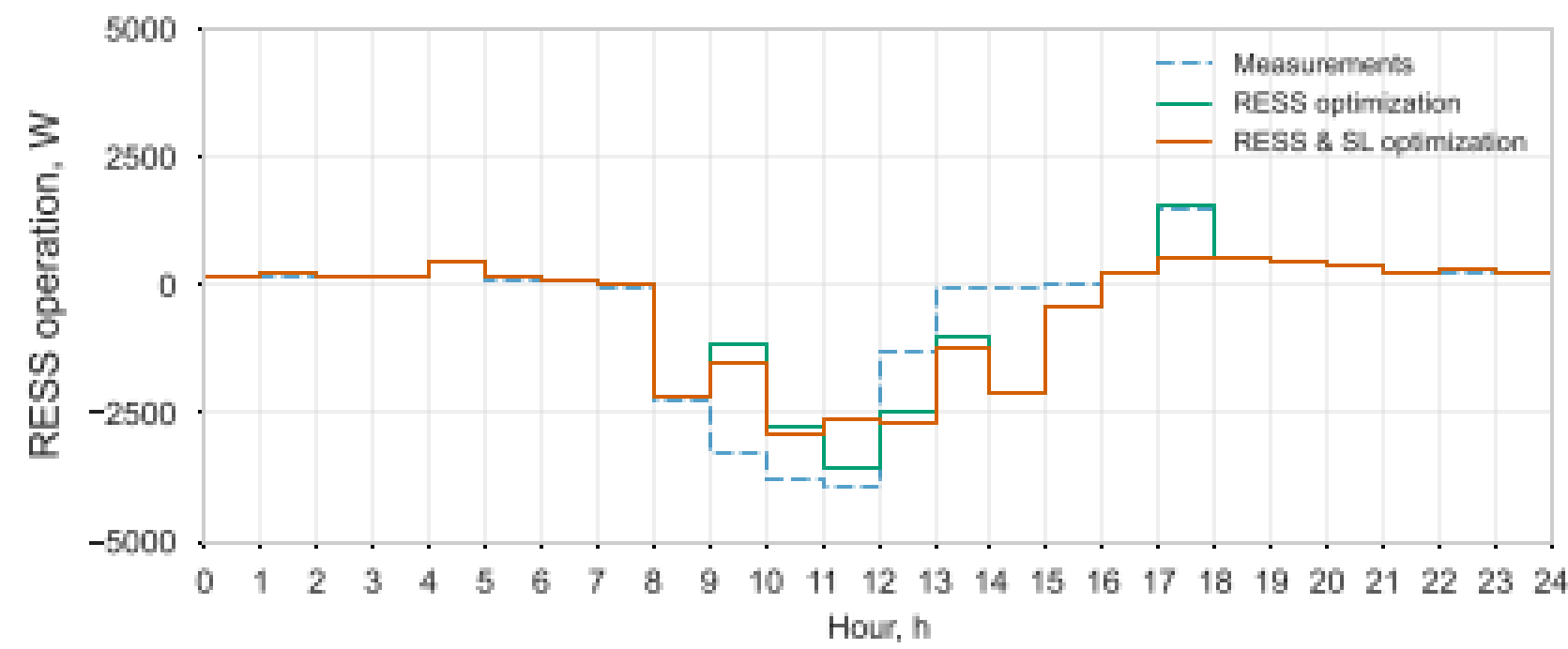
Architektura systemu HEMS wykorzystująca metodę PSO

Źródło: Korab R., Połomski M., Naczyński T.: Optimal scheduling of energy storage and shiftable loads in grid-connected residential building with photovoltaic micro-installation.

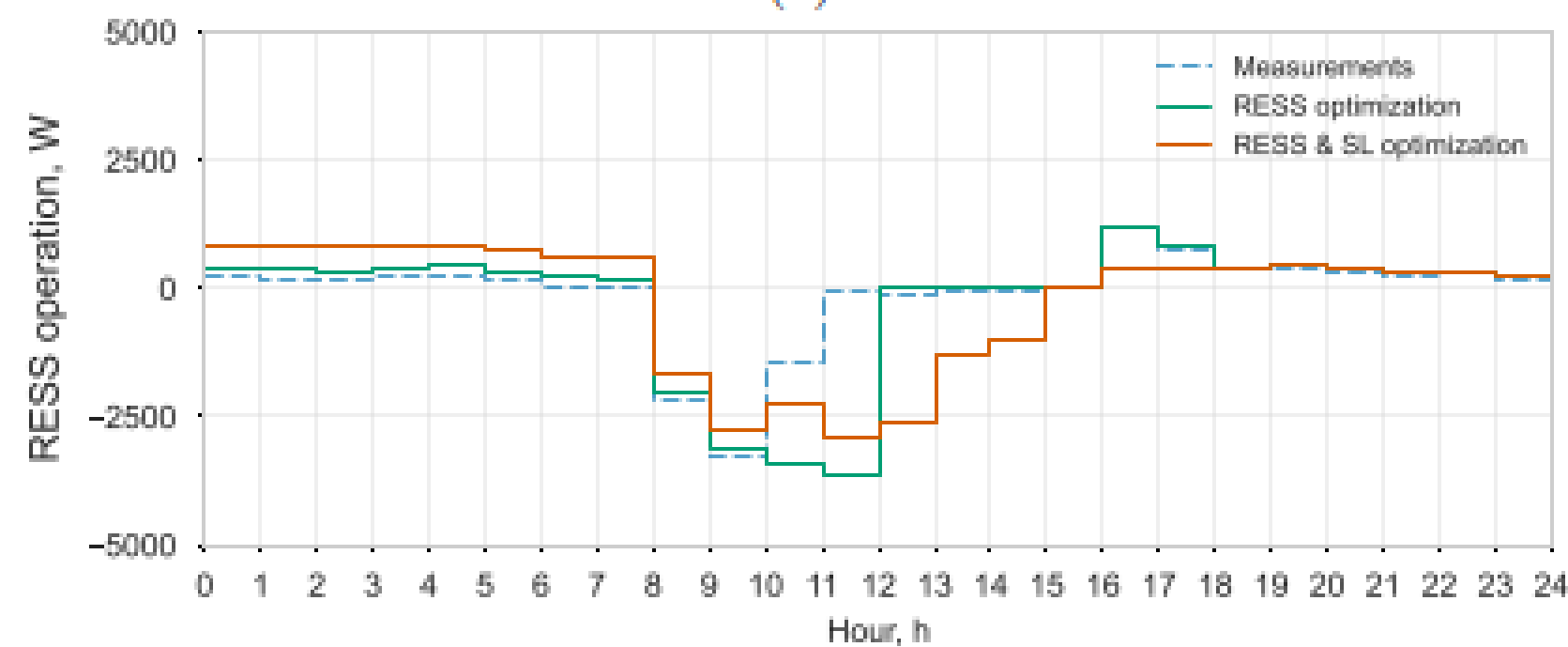
# Porównanie wyników – pomiary vs optymalizacja (1)

Zmierzone i zoptymalizowane dzienne profile działania RESS

(a) w dniu 20 września 2023 r., (b)  
w dniu 21 września 2023 r.

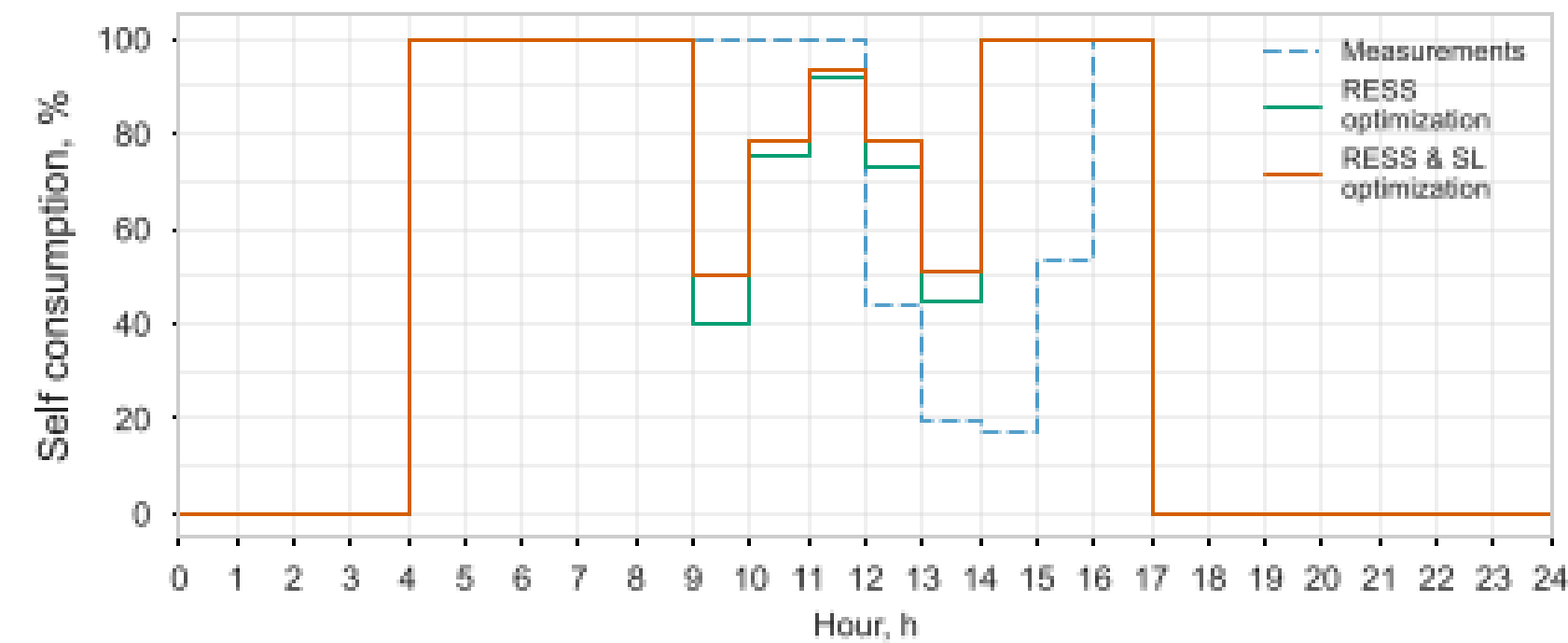


(a)

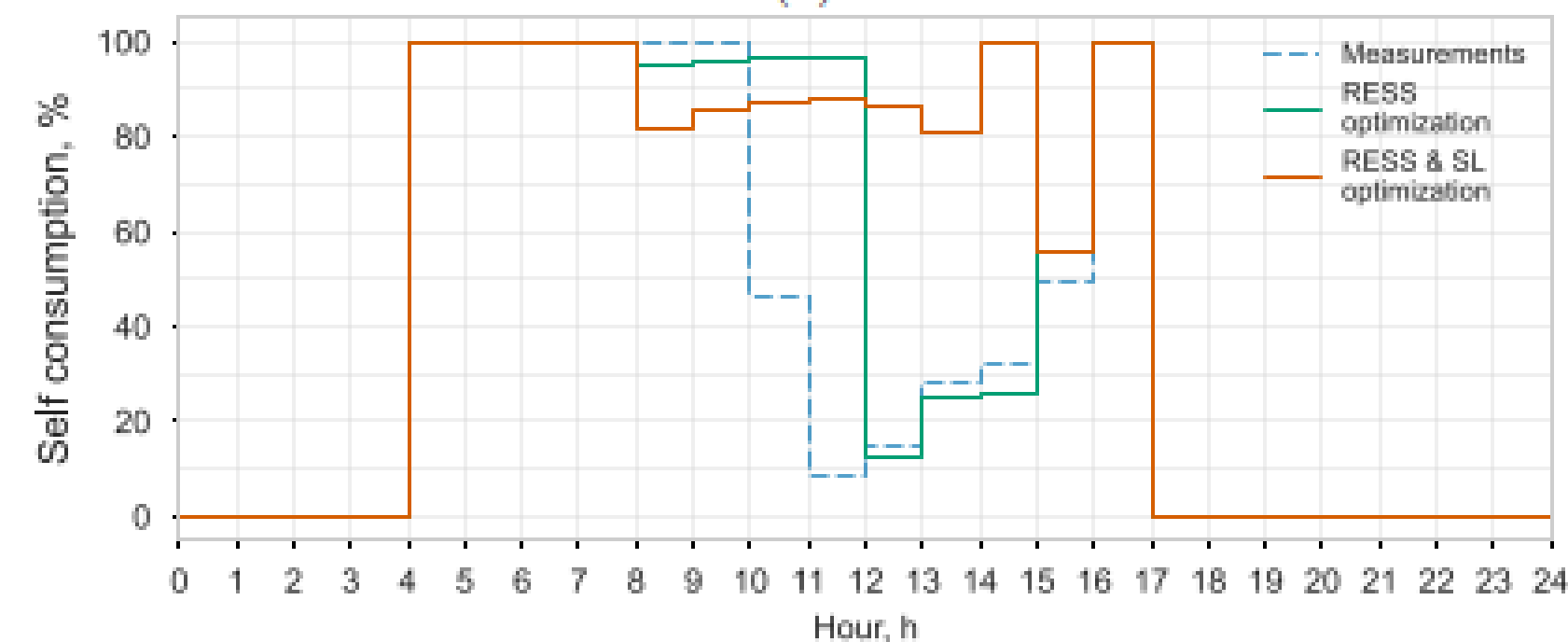


(b)

Poziom autokonsumpcji energii PV wynikające ze  
zmiierzonych i zoptymalizowanych profili pracy profili  
operacyjnych RESS i zmiennego obciążenia (a) w dniu 20  
września 2023 r., (b) w dniu 21 września 2023 r.

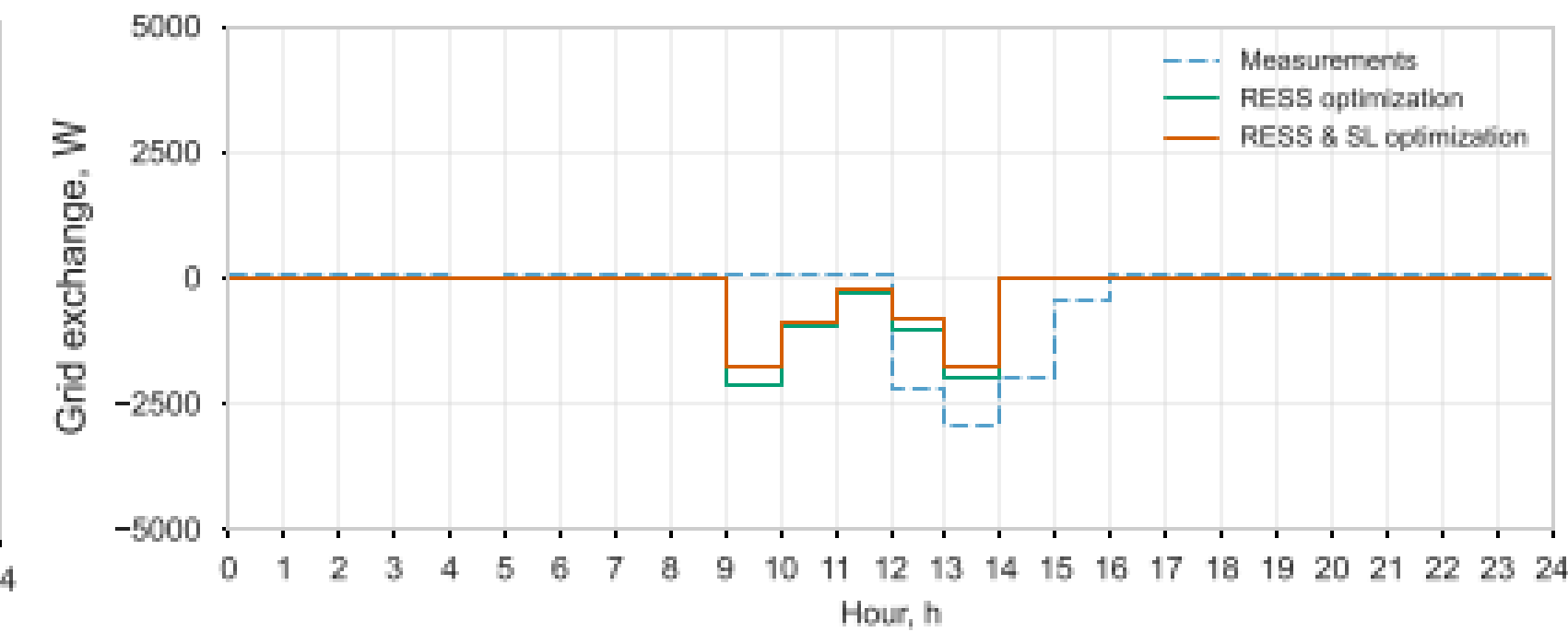


(a)

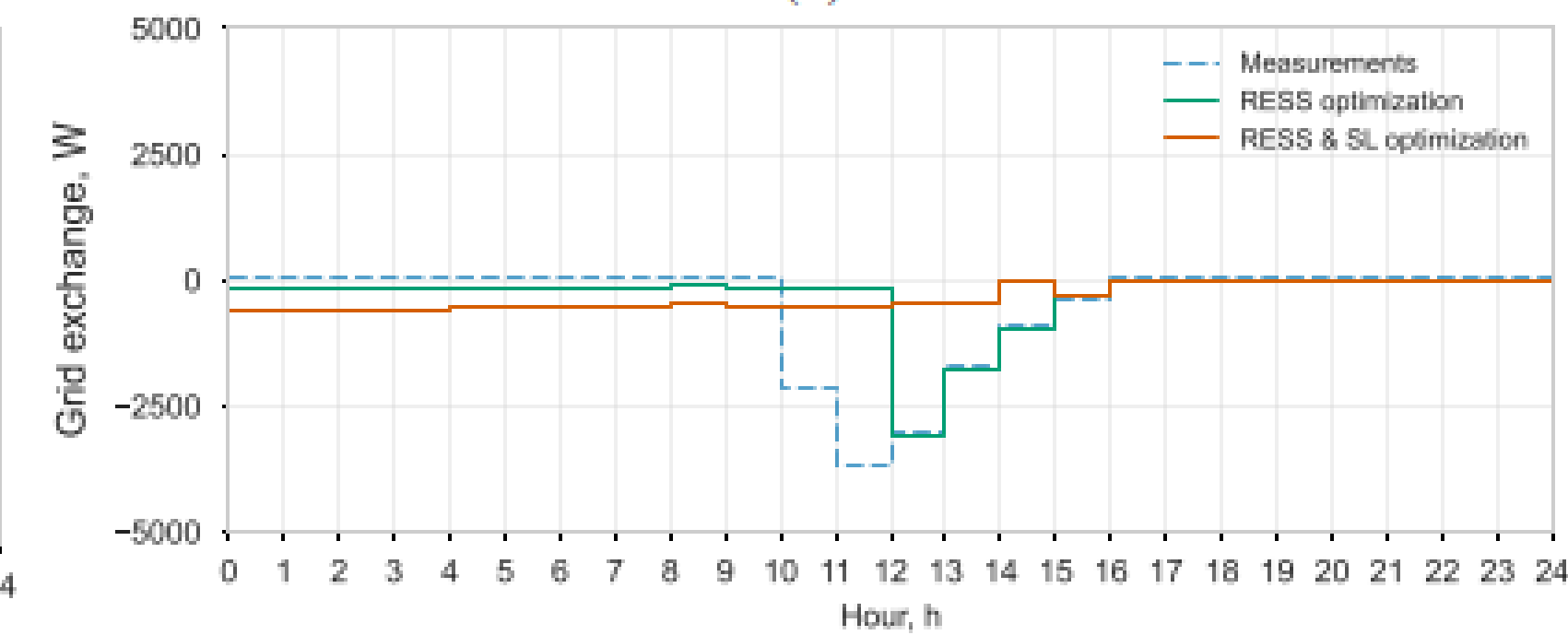


(b)

Wymiana energii z siecią wynikająca ze zmierzonych i  
zoptymalizowanych profili pracy profili operacyjnych RESS  
i zmiennego obciążenia (a) w dniu  
20 września 2023 r., (b) w dniu 21 września 2023 r.



(a)



(b)

Źródło: Korab R., Połomski M., Naczyński T.: Optimal scheduling of energy storage and shiftable loads in grid-connected residential building with photovoltaic micro-installation. 16



# Porównanie wyników – pomiary vs optymalizacja (2)

Metoda badań	Generacja źródła PV	Obciążenie	Magazyn energii (RESS)		Wymiana z siecią		Autokonsumpcja	Funkcja celu
			Ładowanie	Rozładowanie	Pobór	Oddanie		
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	%	[PLN]
Pomiar	26,0	9,3	14,8	5,1	0,6	7,6	43,1	-0,65
Optymalizacja RESS	26,0	9,3	15,7	5,6	0	6,6	46,9	0
Optymalizacja RESS i SL	26,0	9,3	15,7	4,6	0	5,6	48,0	0

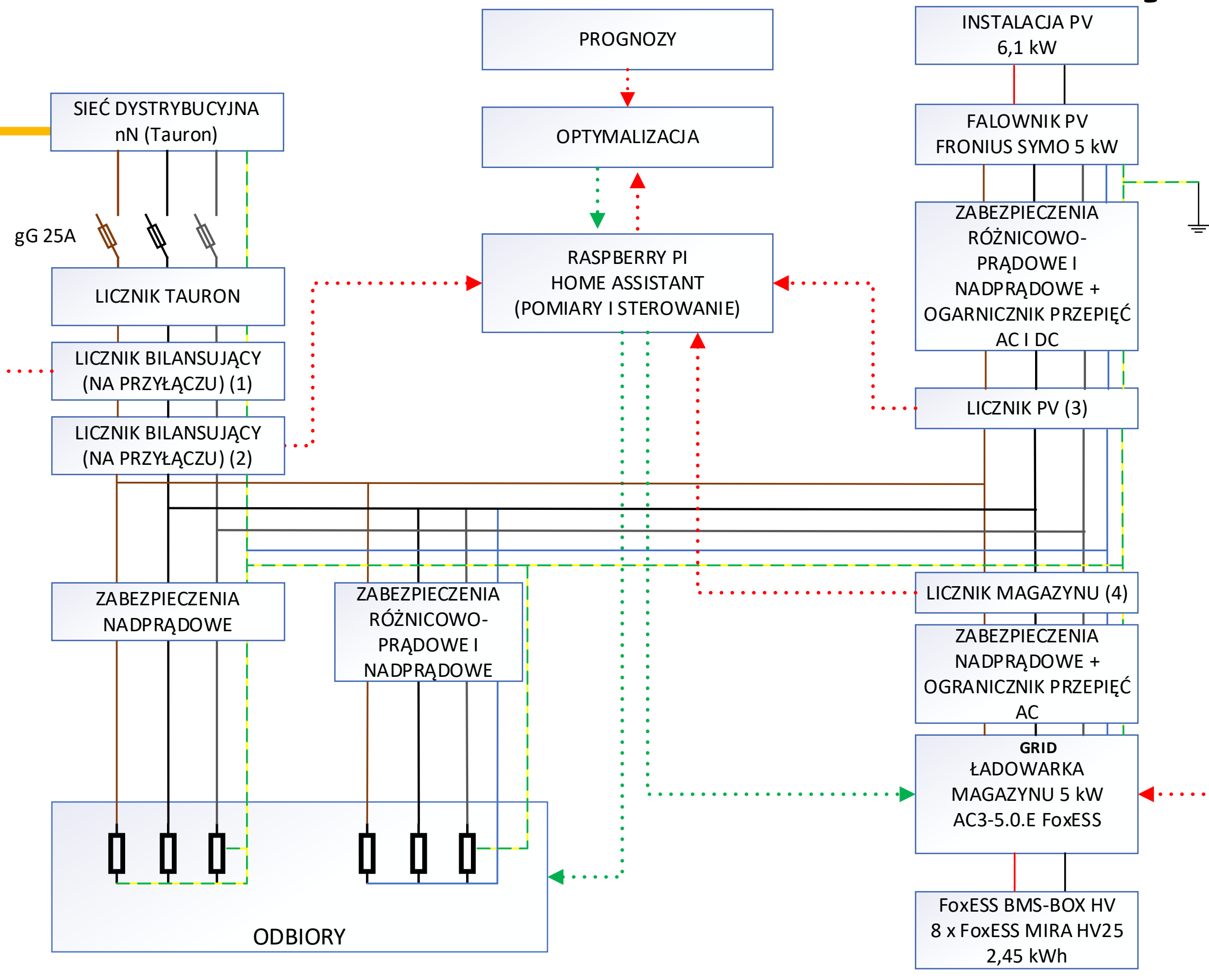
Zmierzona i wynikająca z zastosowania PSO dzienna wydajność analizowanego systemu zasilania budynku mieszkalnego w dniu 20 września 2023 r

Metoda badań	Generacja źródła PV	Obciążenie	Magazyn energii (RESS)		Wymiana z siecią		Autokonsumpcja	Funkcja celu
			Ładowanie	Rozładowanie	Pobór	Oddanie		
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	%	[PLN]
Pomiar	22,5	9,1	7,2	5,1	0,6	11,8	36,7	-5,12
Optymalizacja RESS	22,5	9,1	12,2	6,8	0	7,9	41,8	-3,84
Optymalizacja RESS i SL	22,5	9,1	14,5	9,0	0	7,8	48,5	-3,64

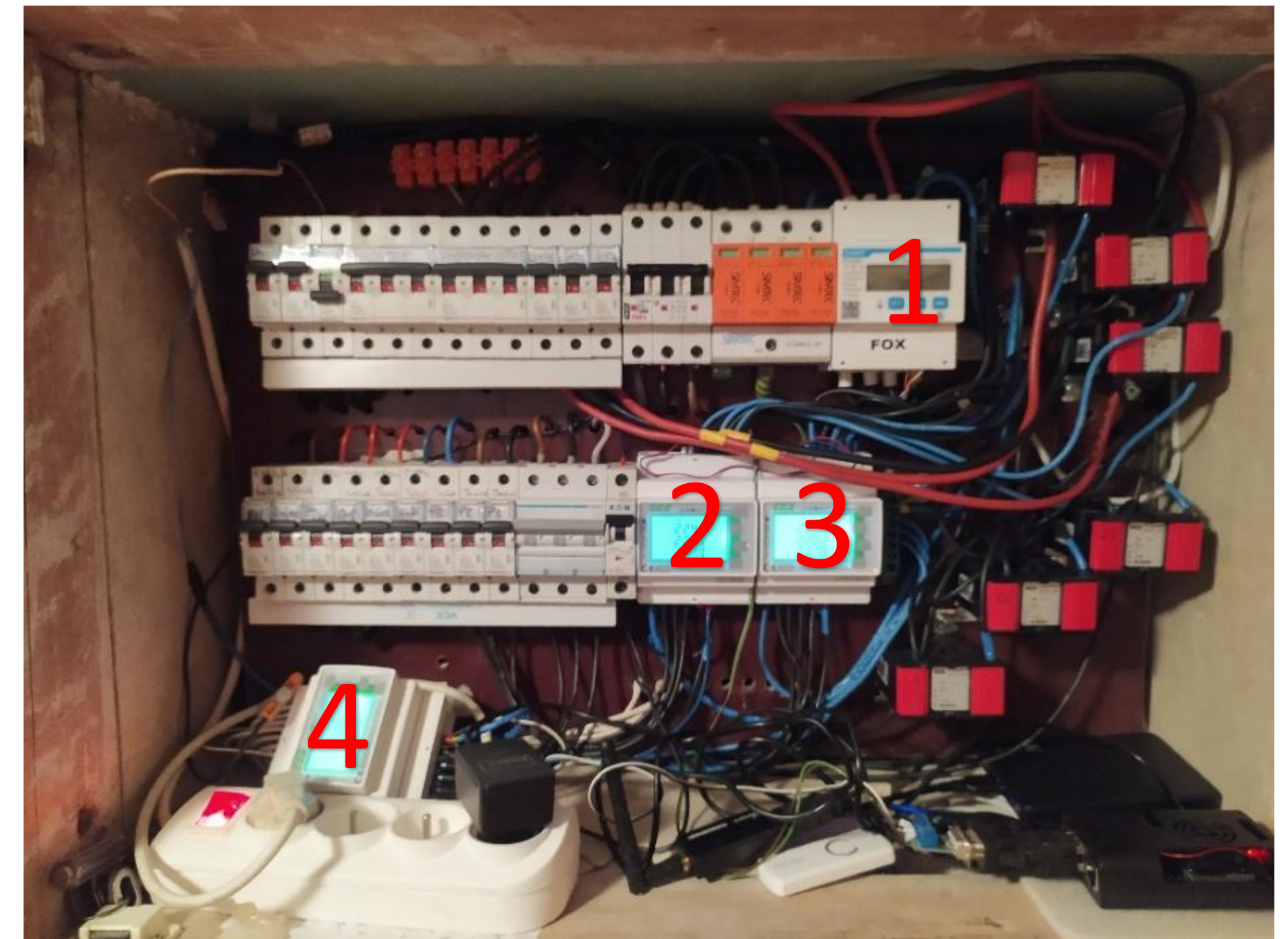
Zmierzona i wynikająca z zastosowania PSO dzienna wydajność analizowanego systemu zasilania budynku mieszkalnego w dniu 21 września 2023 r

Źródło: Korab R., Połomski M., Naczyński T.: Optimal scheduling of energy storage and shiftable loads in grid-connected residential building with photovoltaic micro-installation. <sup>17</sup>

# Stanowisko badawcze - praktyczna implementacja systemu HEMS w budynku jednorodzinnym (1)



Schemat opracowanego układu pomiarowo-sterującego zarządzającego pracą instalacji elektrycznej w budynku mieszkalnym wyposażonym w źródło PV, magazyn energii oraz sterowane odbiorniki o elastycznym czasie załączania



Układ pomiarowy w budynku mieszkalnym wyposażonym w instalację PV i magazyn energii

# Stanowisko badawcze - praktyczna implementacja systemu HEMS w budynku jednorodzinnym (2)



Ładowarka magazynu energii o mocy znamionowej 5 kW

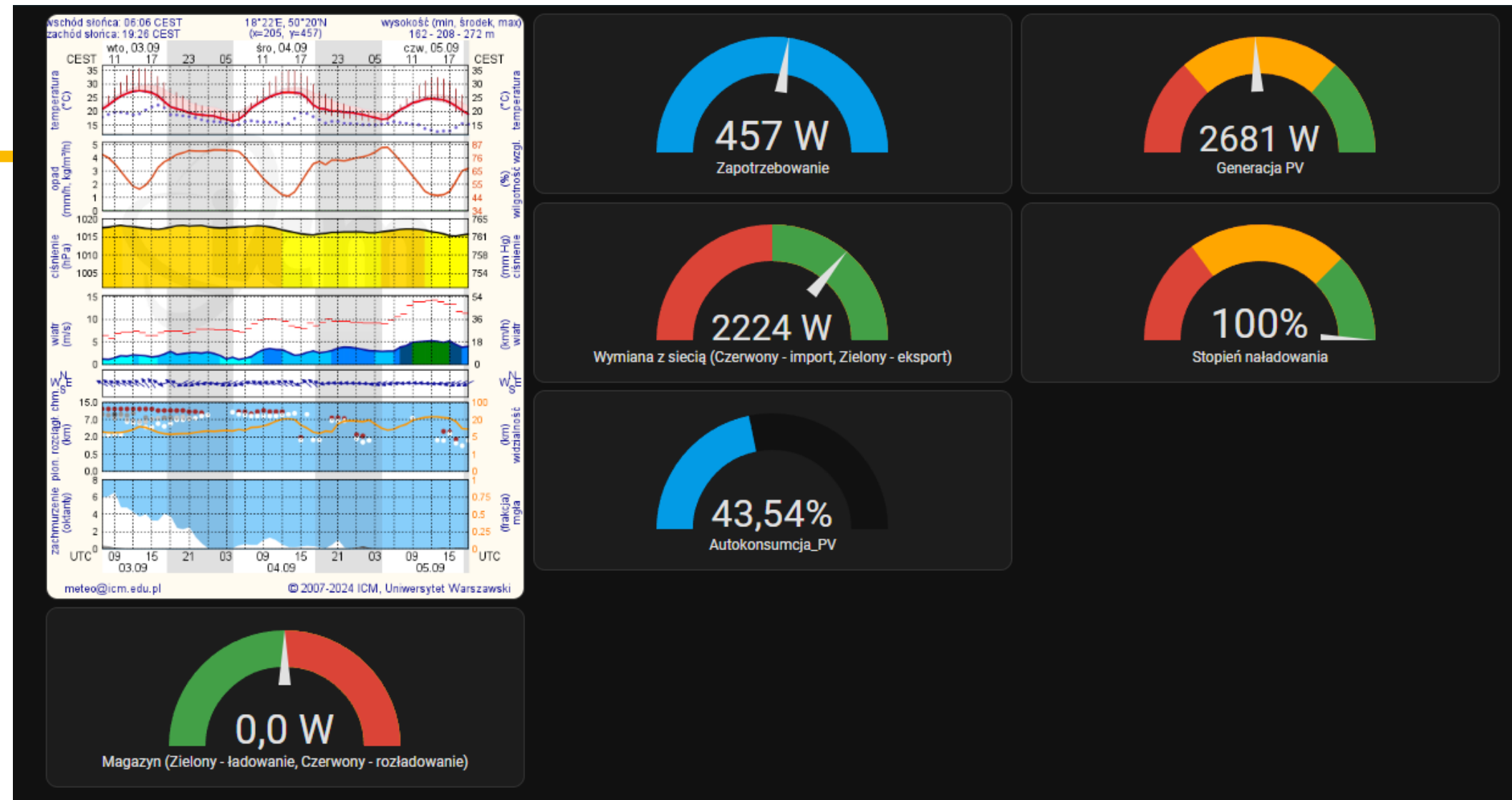


Magazyn energii o pojemności 19,66 kWh

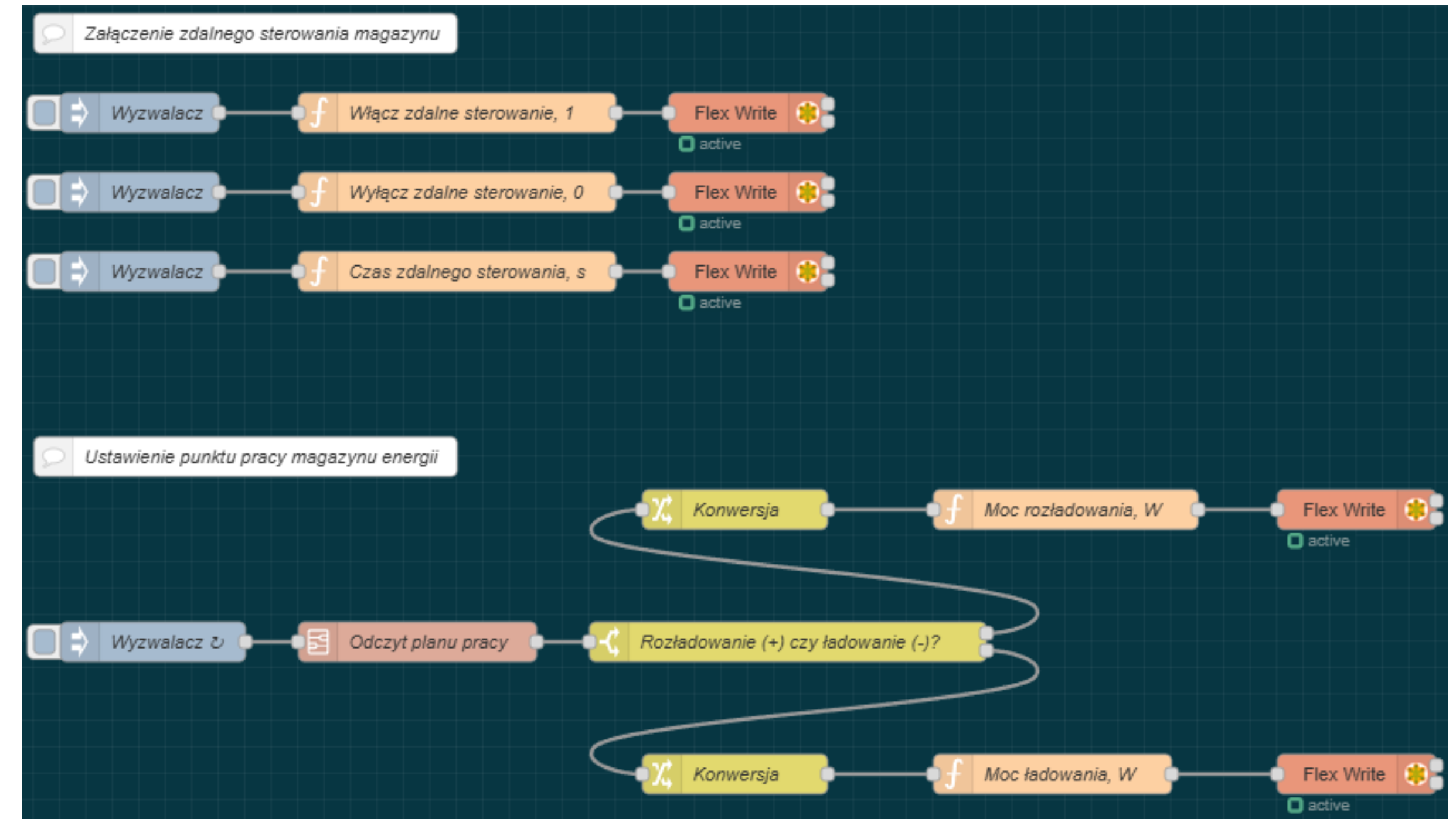
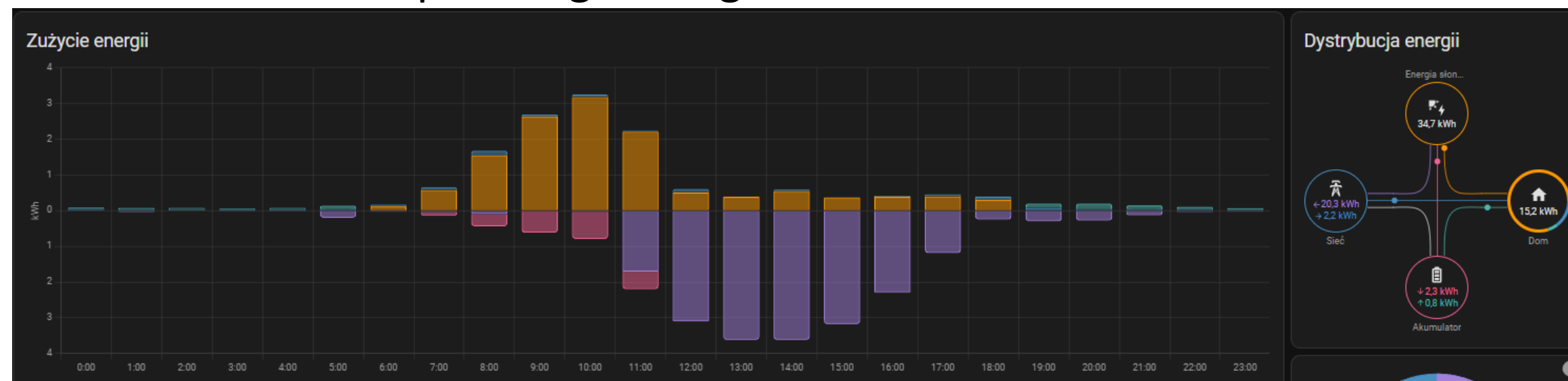


Gniazdko sterowane WiFi Shelly Plus S

# Stanowisko badawcze - praktyczna implementacja systemu HEMS w budynku jednorodzinnym (3)



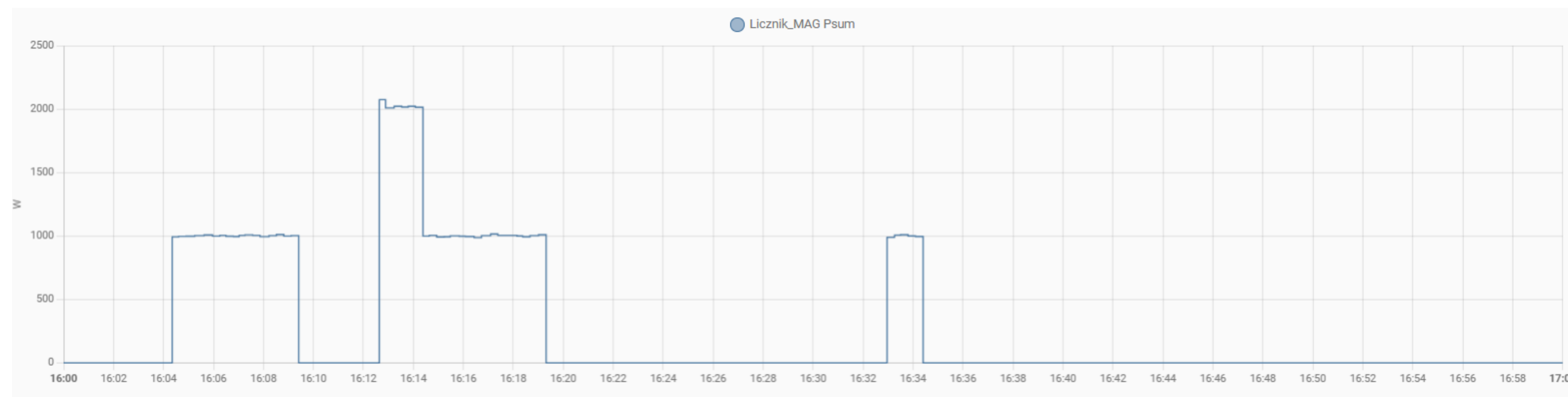
Widok panelu głównego Home Assistant



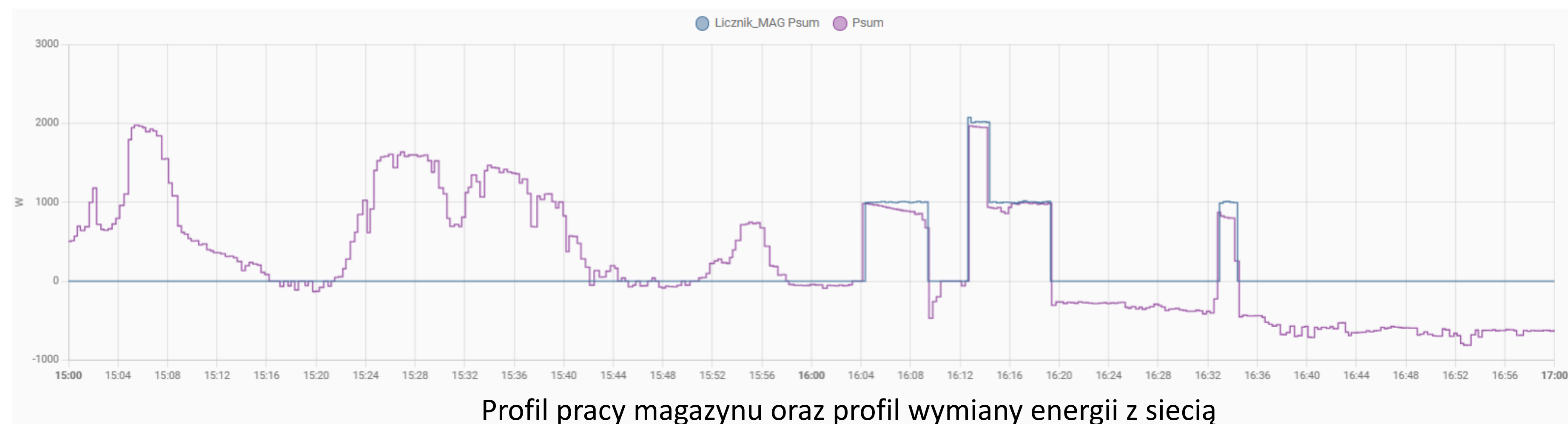
Algorytm sterowania ładowarką magazynu energii w Node-Red

Godzinowe przepływy energii w analizowanym budynku mieszkalnym (kolor pomarańczowy – generacja PV, kolor różowy – ładowanie magazynu, kolor zielony – rozładowanie magazynu, kolor niebieski – import z sieci, kolor fioletowy – eksport do sieci)

# Sterowanie magazynem za pomocą opracowanego układu pomiarowo-sterującego – wyniki pierwszych testów



Zadane punkty pracy magazynu energii



Profil pracy magazynu oraz profil wymiany energii z siecią

# Zakres prac do wykonania – testy opracowanych rozwiązań w rzeczywistym środowisku pracy (u indywidualnego odbiorcy komunalno-bytowego wyposażonego w źródło PV, magazyn energii i odbiorniki o sterowanym czasie załączenia)

1. Opracowanie prognoz dla wybranego dnia (wybranych dni),
2. Przeprowadzenie optymalizacji pracy magazynu i sterowanych urządzeń dla wybranych dni,
3. Implementacja opracowanych harmonogramów pracy w systemie pomiarowo-sterującym (testy działania opracowanych rozwiązań w rzeczywistym środowisku pracy),
4. Przeprowadzenie pomiarów, ocena efektywności zastosowanych rozwiązań poprzez porównanie autokonsumpcji i wymiany z siecią dla przeanalizowanych dni ze sterowaniem z dniami o podobnym przebiegu generacji PV i zapotrzebowania, ale bez pracy magazynu i sterowanych odbiorników

# Wnioski

1. Zwiększenie poziomu autokonsumpcji generowanej energii
2. Zmniejszenie strat ekonomicznych związanych z oddawaniem nadmiaru energii do sieci elektroenergetycznej
3. Korzyści finansowe w przypadku korzystania z taryf z cenami dynamicznymi energii elektrycznej
4. Poprawa jakości energii elektrycznej w miejscu jej wytwarzania

# Osiągnięcia naukowe

1. Naczyński T., Korab R.: Możliwości kształtowania bilansu energii elektrycznej odbiorcy indywidualnego wyposażonego w źródło fotowoltaiczne. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 97 NR 11/2021
2. Korab R., Połomski M., Naczyński T., Kandzia T.: A dynamic thermal model for a photovoltaic module under varying atmospheric conditions. Energy Conversion and Management, Volume 280, 15 March 2023, 116773
3. Korab R., Naczyński T., Kandzia T.: Short-term forecasting of photovoltaic power generation. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 99 NR 9/2023
4. Wystąpienie na I Konferencji Naukowej Energetyki Rozproszonej (KNER'2023) – AGH Kraków 26.09.2023
5. Korab R., Połomski M., Naczyński T.: Optimal scheduling of energy storage and shiftable loads in grid-connected residential building with photovoltaic micro-installation. Energies 2024, 17(21), 5264
6. Naczyński T., Korab R., Połomski M.: Krótkoterminowe prognozowanie bazowego obciążenia odbiorcy komunalno-bytowego z wykorzystaniem danych historycznych (zgłoszony do czasopisma Przegląd Elektrotechniczny)



Dziękuję  
za uwagę