

Optymalizacja instalacji PV i magazynu energii

Autor mgr inż. Wiesław Olasek

Olsztyn 2025 rok



Spis treści

1	Wprowadzenie	2
2	Optymalizacja instalacji PV	3
2.1	Instalacja PV o maksymalnej dopuszczalnej mocy	6
3	Magazyn energii	9
3.1	Optymalna pojemność magazynu energii	17
7.	Podsumowanie	19

© Copyright by Wiesław Olasek, Operator Doradztwo Techniczno-Finansowe

1 Wprowadzenie

W księgarniach oraz internecie znajdziemy wiele opracowań poświęconych zagadnieniom technicznym związanych z instalacjami fotowoltaicznymi (PV). Dotyczą one zwykle budowy oraz zasad projektowania instalacji. Pod względem mocy ograniczają się zwykle do zastosowania fotowoltaiki na potrzeby małych instalacji „domkowych” o mocach od kilku do kilkunastu kW_p. Omawiane są kwestie usytuowania paneli, montażu w różnych warunkach oraz doboru komponentów i ich parametrów elektrycznych.

Mnie interesuje dobór instalacji PV i magazynów energii o mocy około 1000 kW_p budowanych na potrzeby głównie zakładów produkcyjnych lub szpitali.

Instalacje domkowe są instalacjami powtarzalnymi a różnice w wielkości i montażu sprowadzają się do wielkości dachu oraz jego usytuowaniu względem stron świata. Na potrzeby tych instalacji powstało sporo różnych programów komputerowych oraz kalkulatorów internetowych on-line.

Poszerzona wersja tego artykułu dedykowana jest dla służb energetycznych w zakładach oraz audytorów, żeby lepiej zrozumieć metodologię doboru instalacji PV i magazynów energii.

Niniejsza wersja skrócona powstała po opinii kolegi audytora, który stwierdził, że artykuł jest zbyt szczegółowy i kto to będzie czytał. Dlatego postanowiłem przedstawić główne kryteria oceny instalacji PV i magazynów energii (ME).

Zacznijmy od określenia co rozumiem pod pojęciem optymalizacji.

Na podstawie założeń wstępnych np. przyjętej ilości paneli PV, możemy wyliczyć ilość energii elektrycznej jaką uzyskamy i jaką będziemy mogli wykorzystać na potrzeby własne. Na tej podstawie możemy określić uzyskane oszczędności. Otwarte pozostaje jednak pytanie: czy gdybyśmy zastosowali mniej lub więcej paneli to czy oszczędności byłyby większe czy mniejsze?

Jeśli mamy przyjęte kryteria to optymalizacją nazwiemy proces dążenia do znalezienia najlepszego rozwiązania. Naszym celem optymalizacji jest maksymalizacja korzyści lub minimalizacja kosztów. Inaczej mówiąc optymalizacja stanowi poszukiwanie, przy użyciu metod matematycznych, najlepszego, ze względu na wybrane kryterium, rozwiązania danego zagadnienia uwzględniając istniejące ograniczenia.

W naszym przypadku ograniczeniem w analizie instalacji PV jest maksymalna, możliwa do zastosowania moc instalacji (nie możemy przekroczyć mocy przyłączeniowej 300 kW).

Jako kryteria przyjęliśmy:

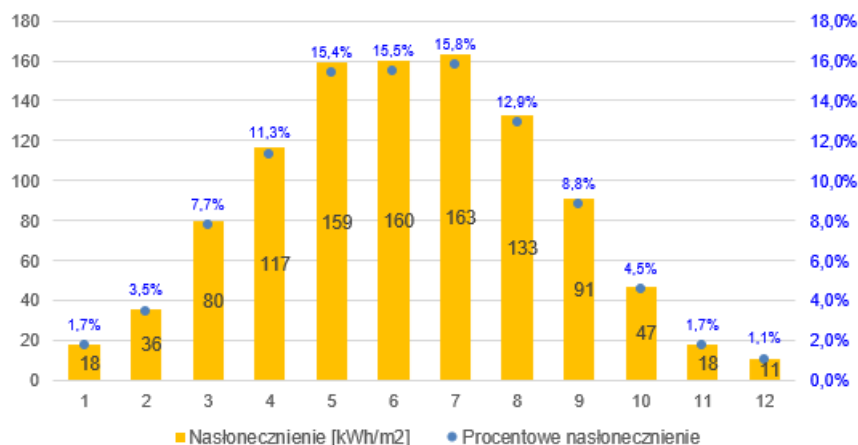
- współczynnik autokonsumpcji;
- współczynnik samowystarczalności.

Analizowane moce instalacji PV będą się różniły od mocy optymalnej o $\pm 30\%$.

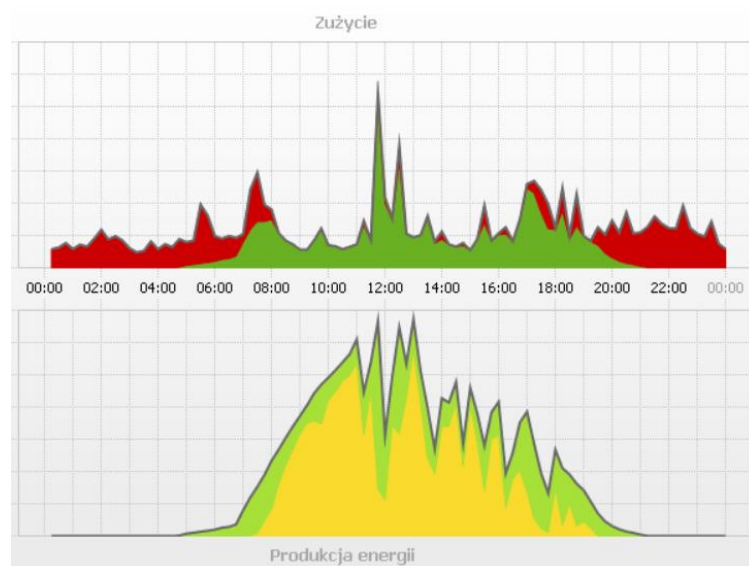
2 Optymalizacja instalacji PV

Planowana instalacja PV ma być posadowiona na gruncie, a panele będą skierowane w stronę południową. Uwzględniając położenie geograficzne instalacji określamy nasłonecznienie [kWh/m²] oraz udział procentowy w poszczególnych miesiącach roku.

Roczne globalne nasłonecznienie wynosi **1.033 kWh/m²**.



Rys. 1 Nasłonecznienie [kWh/m²] oraz udział procentowy



Rys. 2 Wykorzystanie energii z instalacji PV

Powyższy wykres składa się z dwóch części:

- na części wyższej wykresu pokazane jest zużycie prądu na potrzeby własne, z czego kolorem czerwonym oznaczony jest prąd pobierany z sieci, a kolorem zielonym prąd z PV;
- niższa część wykresu pokazuje dzienny uzysk energii z PV, z czego kolorem zielonym oznaczony jest prąd z PV wykorzystany na potrzeby własne, a kolorem żółtym prąd oddawany do sieci.

Jak już wcześniej wspomniano, że podstawowymi parametrami (kryteriami) charakteryzującymi instalację PV są:

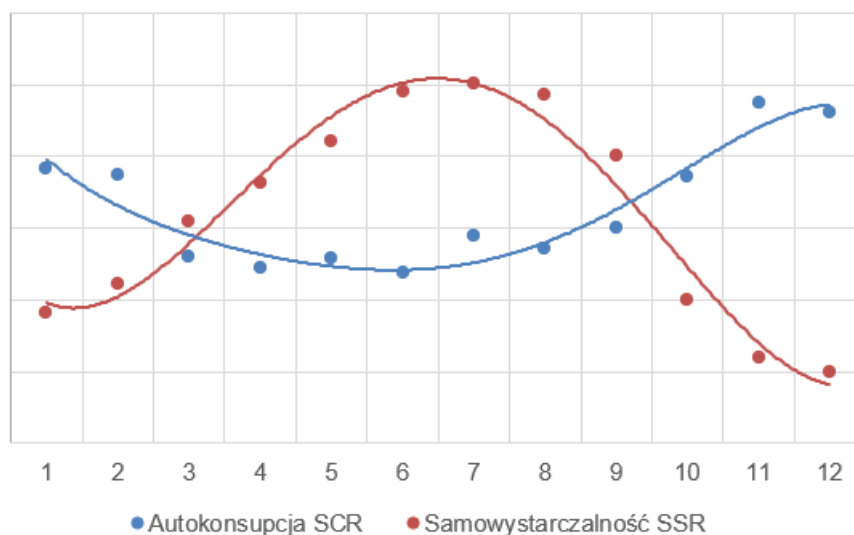
- współczynnik autokonsumpcji;
- współczynnik samowystarczalności.

Współczynnik autokonsumpcji stanowi procent energii wytworzonej przez panele fotowoltaiczne, która jest zużywana bezpośrednio na potrzeby własne obiektu. Wskaźnik ten określa poziom efektywnego wykorzystania energii z PV na potrzeby własne.

Im wyższy jest współczynnik autokonsumpcji, tym większe są oszczędności. Dlatego warto dążyć do jak najwyższego współczynnika autokonsumpcji, aby maksymalnie wykorzystać energię wyprodukowaną przez panele.

Z kolei współczynnik samowystarczalności określa procent energii z PV wytworzonej na potrzeby własne do całkowitego zużycia energii elektrycznej w obiekcie.

Oba współczynniki decydują o opłacalności instalacji PV. Nasuwa się jednak pytanie, czy można równocześnie zwiększać współczynnik autokonsumpcji i samowystarczalności. Na to pytanie odpowiada kolejny wykres.

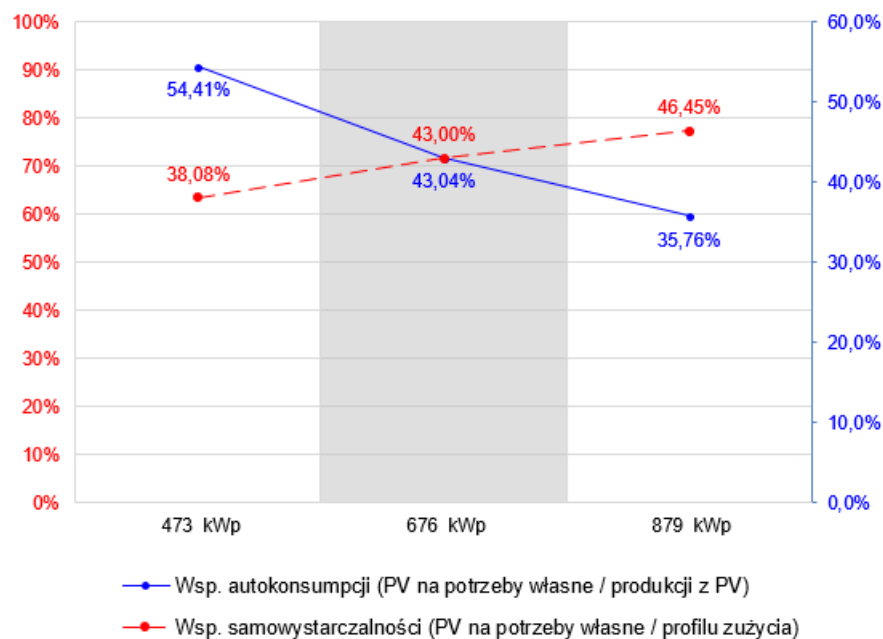


Rys. 3 Zależność współczynnika autokonsumpcji i samowystarczalności w ciągu roku

Zauważmy, że dla określonej mocy instalacji PV autokonsumpcja w okresach zimowych jest większa od samowystarczalności, bo prądu z PV mamy mało, więc to co zostanie wytworzone zostanie w całości lub znacznej części zużyte na potrzeby własne. W okresie letnim mamy duże uzyski prądu z PV i dzięki temu samowystarczalność znacznie wzrasta.

W mojej ocenie, moc instalacji PV można uznać za optymalną, jeśli współczynnik autokonsumpcji i samowystarczalności mają taką samą lub bardzo podobną wartość.

Po analizie profilu zużycia prądu oraz uzysku prądu z PV okazało się, że instalacja PV o mocy **675,7 kW_p** spełnia powyższe kryterium. Poprawność doboru optymalnej mocy instalacji PV najlepiej widać na wykresie, na którym pokazane zostały wartości wskaźników dla optymalnej mocy instalacji PV oraz dla dwóch innych mocy różniących się o $\pm 30\%$



Rys. 4 Współczynnik autokonsumpcji oraz samowystarczalności.

Dla optymalnej mocy instalacji PV współczynnik autokonsumpcji wynosi **43,04%**, a współczynnik samowystarczalności **43,00%**. Taki stan uzyskamy dla instalacji PV o mocy **675,70 kW_p**.

Załącznik 1 pokazuje bilans energii elektrycznej dla trzech mocy instalacji PV: 473,28 kW_p, **675,70 kW_p** oraz 878,70 kW_p.

We wszystkich trzech przypadkach uzysk energii z instalacji PV w miesiącach letnich znacznie przewyższa zapotrzebowanie na prąd. Jak widać z wykresów, nadwyżki prądu z PV nie oznaczają, że nie musimy dokupować prądu z sieci.

Uzyskane wartości energii elektrycznej [MWh/rok] są następujące:

	PV mniejsza	PV optymalna	PV większa
Uzysk prądu z PV po stronie AC	453,01	646,76	841,07
Prąd z PV na potrzeby własne	246,51	278,38	300,74
Nadwyżki prądu z PV	206,51	368,38	540,33
Zakup prądu z sieci	400,89	369,01	346,66

Wprawdzie udało nam się określić optymalną moc instalacji PV, jednak nie uwzględniliśmy ograniczenia jaki jest moc przyłączeniowa 300 kW, której nie możemy przekroczyć.

Dlatego kolejnym krokiem będzie przyjęcie instalacji PV, której moc będzie zbliżona do mocy przyłączeniowej.

2.1 Instalacja PV o maksymalnej dopuszczalnej mocy

W opisywanym przykładzie dokonaliśmy określenia mocy instalacji PV w dwóch wariantach:

- pierwszy - wynikający z mocy optymalnej (opisanej powyżej);
- drugi – wynikający z maksymalnej dopuszczalnej mocy ograniczonej wielkością mocy przyłączeniowej 300 kW.

W związku z powyższym musieliśmy przyjąć zastosowanie 504 szt. paneli, każdy o mocy 580 W_p, co daje moc instalacji **292,32 kW_p**.

Uwaga:

Zwykle posługujemy się określeniem mocy instalacji PV, ale czy wszyscy myślą o tym samym?

Wbrew pozorom sprawa nie jest taka jednoznaczna, gdyż możemy wyróżnić kilka mocy:

1. Nominalna moc instalacji PV określana w kilowatach pik [kW_p] określa maksymalną moc, jaką panele mogą wytworzyć w idealnych warunkach (Standard Test Conditions - STC), czyli przy nasłonecznieniu 1000 W/m², temperaturze ogniwa 25°C i współczynniku gęstości atmosfery 1,5 AM. Są to czysto teoretyczne warunki, jednak stosowane w warunkach "urzędowych" np. przy występowaniu do OSD lub przy ubieganiu się o dotację.

Ze względu na nasłonecznienie, przez około 98% czasu panele pracują max. na poziomie 80-90% swojej mocy nominalnej.

2. Moc po stronie DC (prądu stałego) to moc paneli w warunkach STC.

3. Moc po stronie AC (prądu zmiennego) jest zawsze niższa od mocy DC. Producenci falowników określają stosunek mocy AC do DC na poziomie od 0,8 do 1,2. Zwykle jest to jednak wartość mniejsza od jedności.

Straty energii w instalacji PV określa współczynnik wydajności (ww). Do start możemy zaliczyć straty:

- na przewodach ok. 1%
- falownika ok. 3%
- na modułach (starty termiczne) ok. 4% ÷ 8%
- podczas pracy przy niskim natężeniu promieniowania ok. 1% ÷ 3%
- z uwagi na zacienienie i zabrudzenie ok. 1% ÷ 5%
- z innych powodów ok. 1,5%

Instalacja zbudowana z bardzo dobrych komponentów ma współczynnik wydajności w granicach 80% ÷ 88%, a w słabszych instalacjach poniżej 75%.

W naszym przypadku przyjęty został współczynnik wydajności o wartości 82%.

Z punktu widzenia inwestora mniejsze znaczenie ma teoretyczna ilość uzyskanej energii z paneli niż rzeczywista ilość energii po stronie AC. Pamiętajmy, że i same panele podlegają starzeniu i już po pierwszym uruchomieniu następuje pewien spadek mocy.

Rzeczywista energia uzyskana w ciągu roku z analizowanej instalacji PV obliczana jest w następujący sposób:

$$\text{Energia rzeczywista [kWh/rok]} = \frac{\text{nasłonecznienie} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right] * \text{wsp. kor.} * \text{moc instalacji [kW]} * \text{ww}}{\text{natężenie prom. (STC)} 1 \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right]}$$

gdzie:

- Nasłonecznienie – nasłonecznienie na powierzchnię horyzontalną (poziomą) odczytane z map nasłonecznienia dla danej lokalizacji instalacji – **1.033 kWh/m²**
- Współczynnik korekcji (wsp.kor.) – współczynnik pozwalający przeliczyć dane o nasłonecznieniu na pochyloną powierzchnię generatora fotowoltaicznego (modułów fotowoltaicznych) z danych o nasłonecznieniu odczytanych z mapy, które są dla powierzchni horyzontalnej. Tabela współczynników korekcyjnych, gdzie w poziomie jest podany kąt odchylenia od południa, a w pionie kąt nachylenia gruntu – **1,12**
- Moc modułów – moc nominalna modułów (generatora PV) wyznaczona w warunkach STC znajdująca się w karcie katalogowej. – **292,32 kW_p**
- Nat. prom. (STC) – natężenie promieniowania słonecznego, przy których testowane są moduły fotowoltaiczne, czyli 1000 W/m² - **1 kW/m²**
- WW – współczynnik wydajności – **0,82**

Podstawiając do wzoru otrzymamy:

$$\text{Energia rzeczywista} = \frac{1033 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right] * 1,12 * 292,32 [\text{kW}] * 0,82}{1 \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right]} = \textbf{277 326 [kWh/rok]}$$

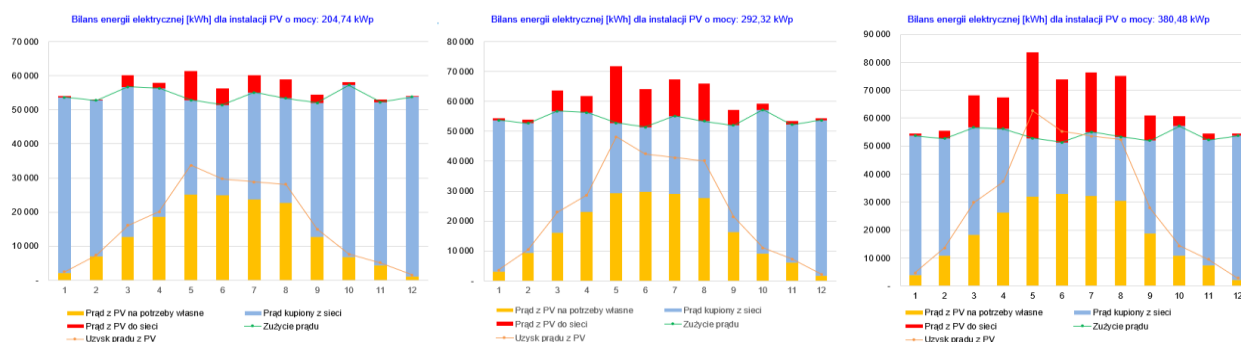
Możemy zatem przyjąć, że uzysk energii z instalacji PV o mocy 292,32 kW_p wyniesie **277,33 MWh/rok**, co daje **948,71 kWh/kW_p**.

I tu dochodzimy do kolejnego problemu, a mianowicie do różnic ilości energii po stronie paneli, czyli DC, oraz energii jaką mamy fizycznie do dyspozycji po stronie użytecznej, czyli AC.

Ponieważ maksymalne warunki nasłonecznienia dla danej lokalizacji występują bardzo krótko w ciągu całego roku, więc falownik należy dobierać o mniejszej mocy niż moc nominalna paneli PV.

W naszym przypadku przyjęty został współczynnik 0,88 jako stosunek mocy AC do DC, co daje **256,90 kW** mocy elektrycznej po stronie użytkowej AC.

Tak samo jak dla mocy optymalnej dokonamy analizy przyjętej mocy instalacji PV oraz dwóch innych instalacji o mocach różniących się o ± 30%, czyli 204,74 kW_p, **292,32 kW_p** oraz 380,48 kW_p.

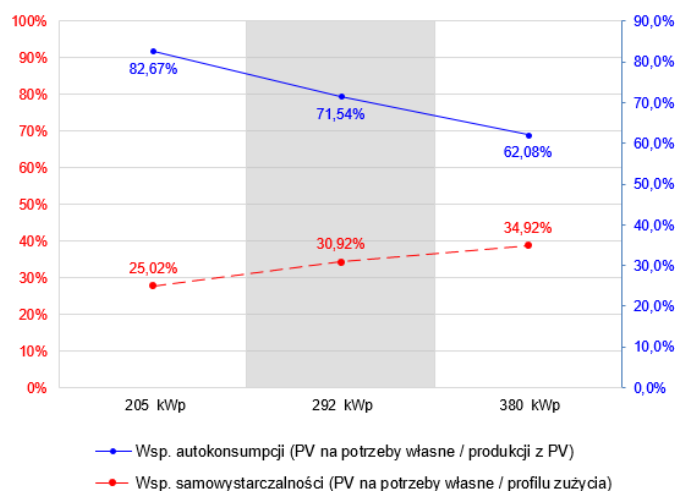


Rys. 5 Bilans prądu dla trzech mocy instalacji PV

Dla powyższych mocy instalacji PV uzyskane wartości energii elektrycznej [MWh/rok] są następujące:

	PV mniejsza	PV optymalna	PV większa
Uzysk prądu z PV po stronie AC	195,97	279,80	364,19
Prąd z PV na potrzeby własne	162,00	200,17	226,07
Nadwyżki prądu z PV	33,97	79,63	138,11
Zakup prądu z sieci	485,39	447,22	421,32

Dla maksymalnej akceptowalnej mocy instalacji PV (292,32 kW_p) zupełnie inaczej wyglądają współczynniki autokonsumpcji oraz samowystarczalności.



Rys. 6 Współczynnik autokonsumpcji oraz samowystarczalności

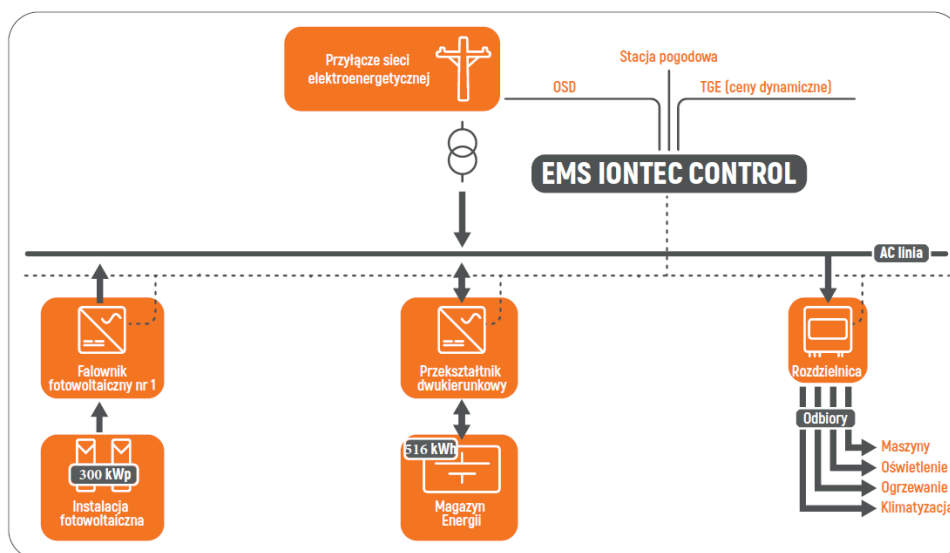
Powyższy przykład odpowiada wielu sytuacjom, w których duże zakłady (zużywające dużo prądu) instalują małe instalacje PV, np. do 50 kW_p, tylko po to, żeby wykazać się wykorzystywaniem energii OZE. Bezspornie, współczynnik autokonsumpcji będzie bardzo wysoki, ale współczynnik samowystarczalności będzie na poziomie symbolicznym.

3 Magazyn energii

Z bilansu energii elektrycznej instalacji PV przytoczonego wcześniej, szczególnie dla mocy 292,32 kW_p, widać, że dysponujemy sporymi nadwyżkami prądu, a równocześnie sporo prądu trzeba kupować z sieci.

Metodą na zagospodarowanie nadwyżek prądu z PV jest zastosowanie magazynu energii.

Poniższy rysunek pokazuje uproszczony schemat ideowy instalacji PV z magazynem energii¹



Rys. 7 Schemat ideowy instalacji PV z magazynem energii

iONTEC Control to zaawansowany system zarządzania energią (EMS), który został zaprojektowany, aby zoptymalizować wykorzystanie energii w przedsiębiorstwach i mikrosieciach energetycznych. Dzięki inteligentnemu zarządzaniu przepływem energii pomaga minimalizować koszty energii oraz zwiększać efektywność energetyczną.

System składa się z trzech kluczowych elementów funkcjonalnych:

1. iONTEC EMS Control (EMS - Energy Management System):

- Zarządzanie przepływem energii - iONTEC EMS Control umożliwia kontrolowanie przepływu energii w całej infrastrukturze, dostosowując się do dynamicznych potrzeb przedsiębiorstwa lub optymalizując prace mikrosieci energetycznej.
- Funkcja zero-export - ogranicza moc wprowadzana do sieci, co pomaga w minimalizowaniu kosztów i stabilizowaniu sieci energetycznej, co jest często wymagane przez Operatorów Sieci OSD.
- Kontrola ładowania/rozładowania baterii - dzięki różnym scenariuszom zarządzania, sterownik pozwala na:
 - autokonsumpcję - maksymalizację konsumpcji energii pochodzącej z własnych odnawialnych źródeł energii (OZE).

¹ Poniżej wykorzystane zostały materiały techniczne firmy SOLFINITY sp. z o.o. sp. k., ul. Staniewicka 5, 03-310 Warszawa

-
- Peak Shaving - przesunięcie zużycia energii w czasie, aby uniknąć opłat za przekroczenie mocy umownej (funkcja strażnika mocy umownej).
 - Time of Use - konfigurowanie kalendarza pracy baterii, aby dostosować się do taryf energetycznych lub innych wymagań.
 - Integracja z cenami dynamicznymi - Towarowej Giełdy Energii – rynku dnia następnego (RDN).
 - Zasilanie rezerwowe - zapewnienie awaryjnego zasilania dla kluczowych odbiorników.

2. SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition):

- Sterownik SCADA - umożliwia nadzór nad przebiegiem procesów technologicznych i produkcyjnych.
- Wizualizacja i analiza danych - pełna wizualizacja mikrosieci oraz gromadzenie danych w celu optymalizacji działania.
- Zdalna diagnostyka i serwis - ułatwia diagnozowanie i serwisowanie systemu z dowolnego miejsca.
- Intuicyjny interfejs - przyjazny dla użytkownika i instalatora, umożliwia łatwa konfiguracje i obsługę systemu.

3. Regulator NC RFG:

- Integracja z urządzeniami - działa jako integrator dla urządzeń PV, magazynów energii, EV, HVAC i innych.
- Telemechanika - zapewnia zdalne sterowanie oraz zbieranie danych o stanie sieci, co umożliwia szybkie reagowanie na zmiany.
- Regulator NC RFG - umożliwia kontrole jakości i stabilności sieci elektrycznej zgodne z NC RFG.
- Regulator mocy czynnej i biernej - poprawia bilans mocy czynnej oraz biernej, co prowadzi do znacznych oszczędności w zużyciu energii.
- Integracja falowników - spełnia wymagania OSD dla zarządzania systemami z urządzeniami różnych producentów.
- Sterowanie przez OSD - umożliwia regulacje mocy wyjściowej z generatorów OZE w przypadku nadprodukcji energii.

Dysponując tak zaawansowanym systemem sterowania jesteśmy w stanie zarządzać pracą systemu energetycznego w celu maksymalnego wykorzystania energii słonecznej oraz kupowania prądu z sieci w optymalnych okresach np. kiedy nie występuje opłata mocowa.

Z określeniem optymalnej pojemności ME są większe problemy niż z określeniem optymalnej mocy instalacji PV. Podobnie jak w przypadku instalacji PV magazyny energii omawiane są zwykle pod kątem technicznym, a nie funkcjonalnym (energetycznym). Oprócz tego wiele firm traktuje tą wiedzę jak tajne spec znaczenia.

Powszechnie przyjmuje się analizy wskaźnikowe, w których optymalna pojemność magazynu energii stanowi od 1 kWh do 1,5 kWh, a nawet 2 kWh na 1 kW_p mocy instalacji PV. Nie znalazłem sensownego wytłumaczenia z czego te współczynniki wynikają w konkretnej instalacji.

Inna metoda polega na wyznaczeniu minimalnej pojemności ME ze względu na moc szczytową ME oraz czas pracy jaki musi być zapewniony po wystąpieniu braku zasilania zewnętrznego.

Przyjmując moc szczytową **125 kW** oraz czas pracy **3,5 h** otrzymamy minimalną pojemność ME **500,57 kWh**. Kolejnym krokiem jest dobór ME z dostępnego typoszeregu. W naszym przypadku nominalna pojemność ME wynosi **516 kWh**.

Istotne, z naszego punktu widzenia, parametry wybranego ME są następujące:

Maksymalny poziom ładowania (SoC – State of Charge)	0,95
Głębokość rozładowania (DoD - Depth of Discharge)	0,95
Maksymalna pojemność użytkowa $C_{\max}$	490,2 kWh
Minimalna pojemność użytkowa $C_{\min}$	25,8 kWh

Oznacza to, że mamy do dyspozycji pojemność ME **od 490,2 kWh do 25,8 kWh**.

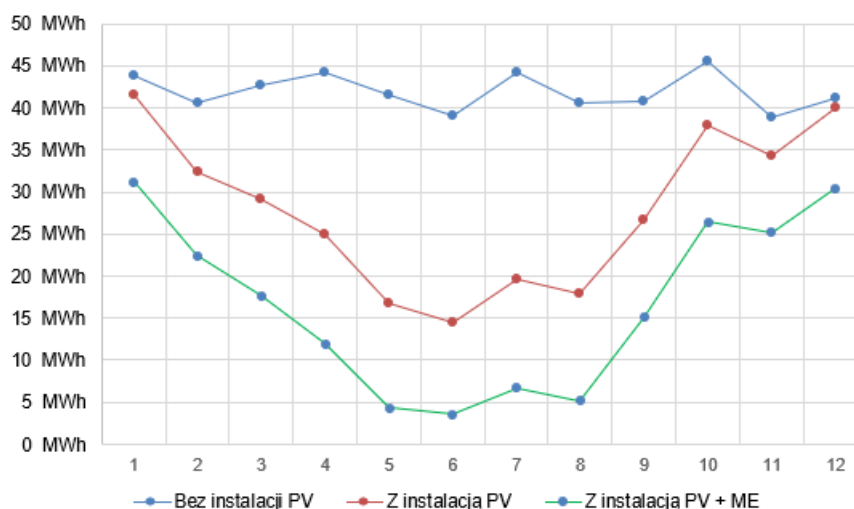
Producent określa maksymalną prędkość ładowania ME na 125 kWh/h.

Zgodnie z przyjętymi założeniami, ME ma być ładowany w dzień nadwyżkami prądu z PV, a w nocy prądem z sieci. Dostępne w internecie komputerowe arkusze kalkulacyjne typu on-line przedstawiają bardzo trywialne analizy. Nie jest możliwe wprowadzenie wszystkich istotnych informacji do takiego arkusza. Podstawowy cel jaki przyświeca autorom takich arkuszy jest pokazanie pozytywnego wyniku zachęającego do kupna ME.

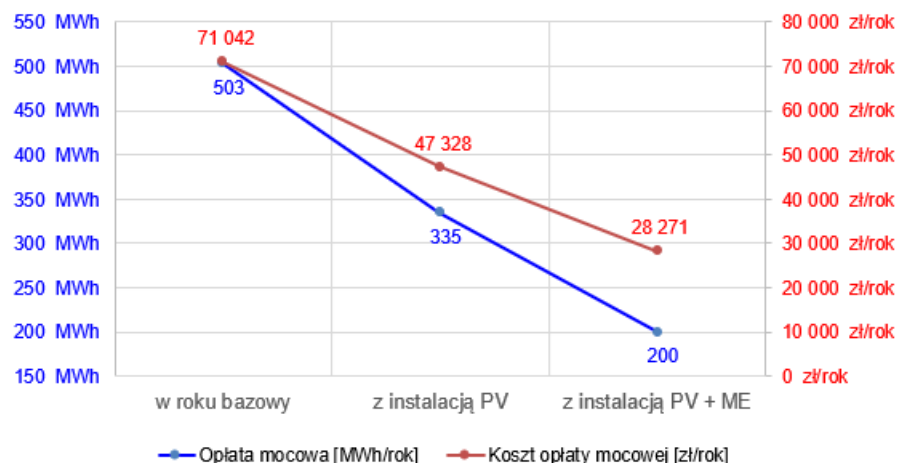
Jest dużo elementów, które trzeba uwzględnić przy analizie efektywności energetycznej i finansowej instalacji PV z magazynem energii:

- Podstawą analizy jest godzinowy profil zużycia prądu zawierający 8760 wartości godzinowych.
- Uwzględnienie godzinowego profilu zużycia prądu decyduje o wysokości opłaty mocowej. Ograniczanie kupowania prądu z sieci w czasie obowiązywania opłaty mocowej jest jednym z ważnych kryteriów decydujących o opłacalności stosowania PV + ME.

Porównajmy kupowania prądu w czasie opłaty mocowej dla trzech wariantów.



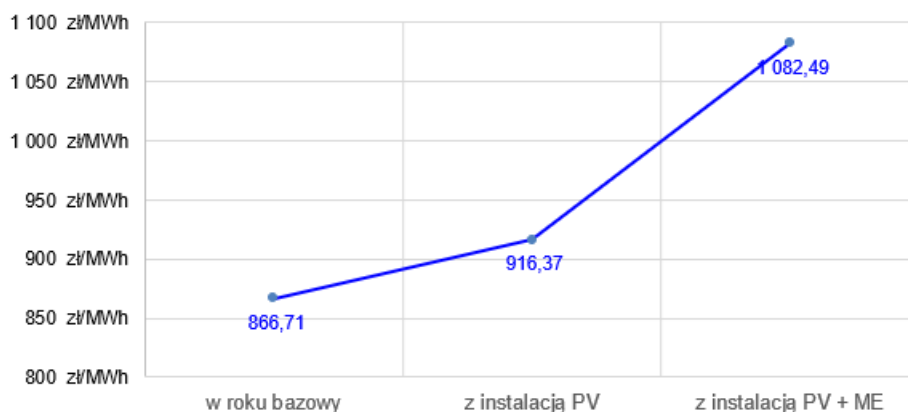
Rys. 8 Prąd kupowany w okresie obowiązywania opłaty mocowej [MWh/mc]
Różnica pomiędzy rokiem bazowym a PV + ME jest kolosalna.



Rys. 9 Ilość i koszt rocznej opłaty mocowej

Wykonując instalację PV uzyskamy oszczędności na opłacie mocowej o **33,38%** w stosunku do roku bazowego, a jeśli dodatkowo zainstalujemy ME to ta oszczędność wyniesie **60,20%** - pamiętajmy, że dotyczy to tego konkretnego przypadku!!!

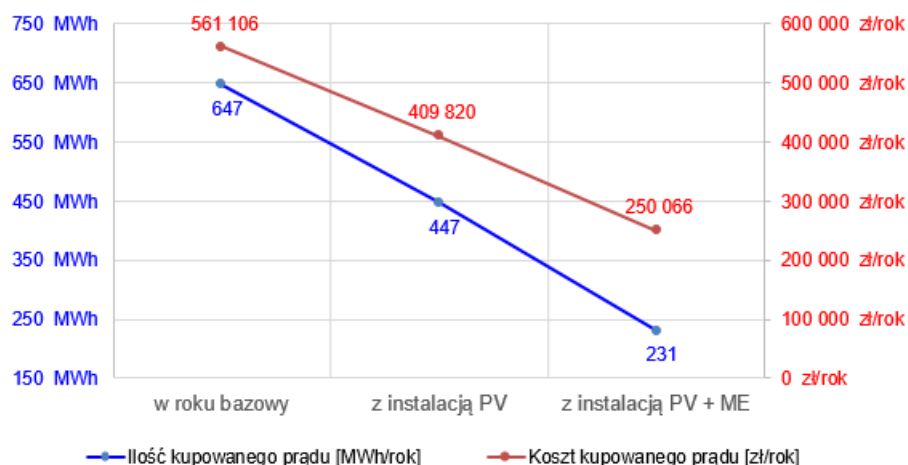
- Wielu inwestorów ma problem z zaakceptowaniem, że po zainstalowaniu fotowoltaiki oraz magazynu energii jednostkowa cena prądu znacznie wzrośnie.



Rys. 10 Cena jednostkowa kupowanego prądu [zł/MWh]

Tak wysoka cena jednostkowa kupowanego prądu wynika z małego wolumenu zakupu przy wysokich kosztach dystrybucyjnych wynikających z taryfy. Jeśli tak się zdarzy, że przez długi okres będzie zła pogoda i będziemy mieli mniejszy uzysk prądu z PV to równocześnie wzrośnie ilość prądu kupowanego z sieci (wzrośnie wolumen) i cena jednostkowa będzie niższa – ale koszt prądu wzrośnie.

Z punktu widzenia interesu inwestora, to nie cena jednostkowa jest najważniejsza, ale poniesiony koszt prądu za rok.



Rys. 11 Ilość i roczny koszt kupowanego z sieci prądu

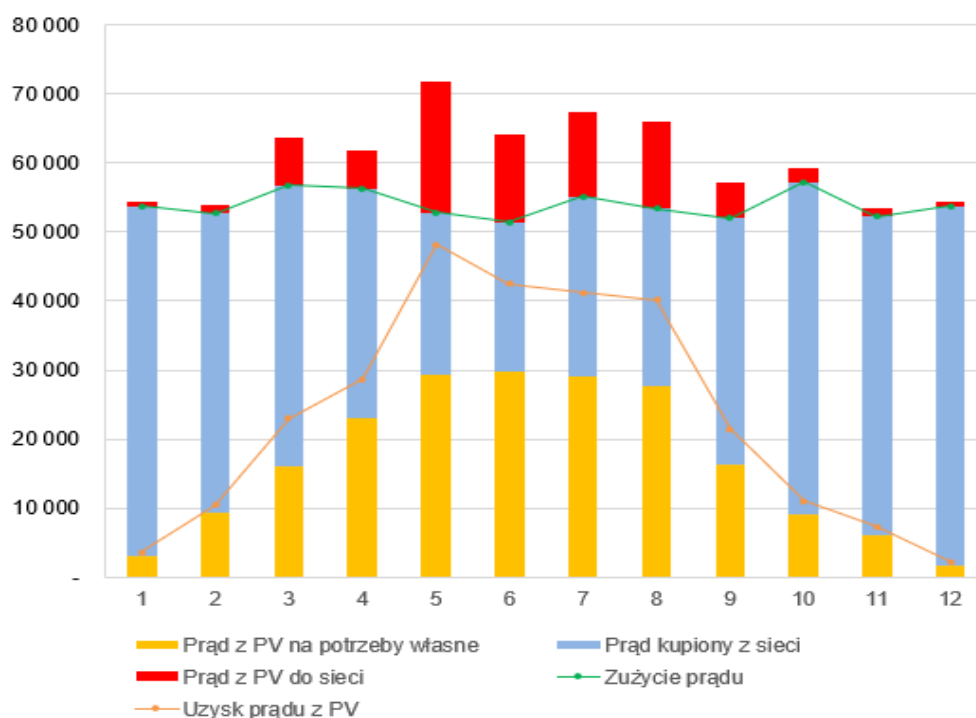
Wykonując instalację PV uzyskamy oszczędności na zakupie prądu o **26,96%** w stosunku do roku bazowego, a jeśli dodatkowo zainstalujemy ME to ta oszczędność wyniesie **55,54%**.

Pamiętajmy, że w roku bazowym oraz po zainstalowaniu PV nie mamy konieczności ładowania magazynu energii. Na relatywnie niski koszt ładowania magazynu energii wpływa fakt, że ładowanie odbywa się w nocy, gdy nie obowiązuje opłata mocowa.

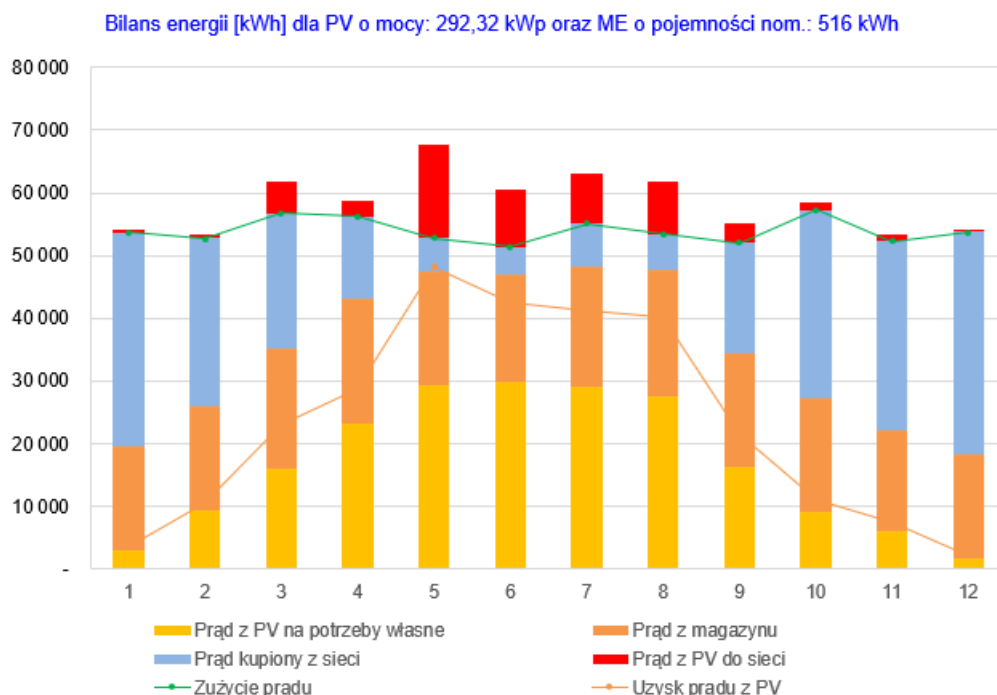
- Korzyści wynikające z wykonania instalacji PV oraz zastosowania ME bardzo dobrze widać na wykresach bilansu energii:

A) Zastosowanie tylko instalacji PV

Bilans energii elektrycznej [kWh] dla instalacji PV o mocy: 292,32 kWp



B) Zastosowanie instalacji PV + ME



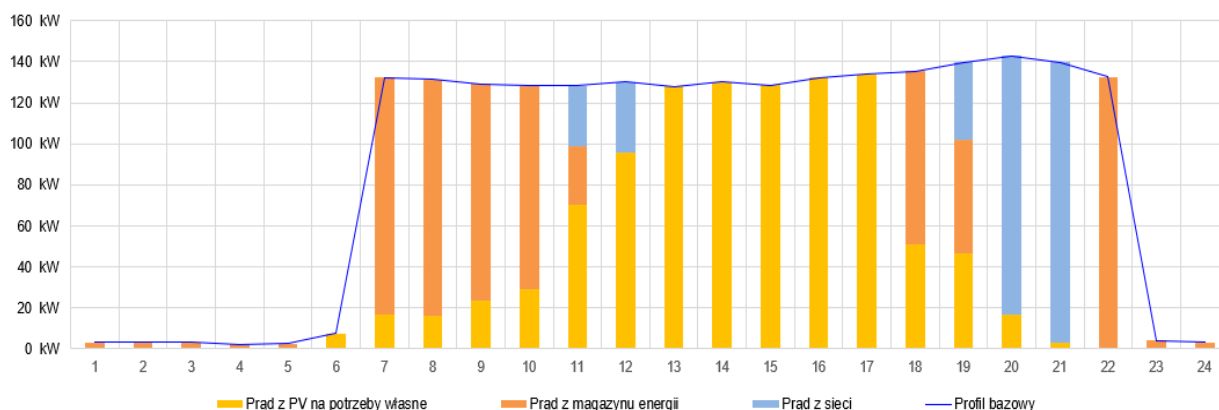
Rys. 12 Porównanie bilansów energii dla PV oraz PV + ME

Z obu wykresów widać, że przy PV + ME zmniejszyła się ilość prądu oddawanego do sieci i równocześnie znacznie zmniejszyła się ilość prądu kupowanego.

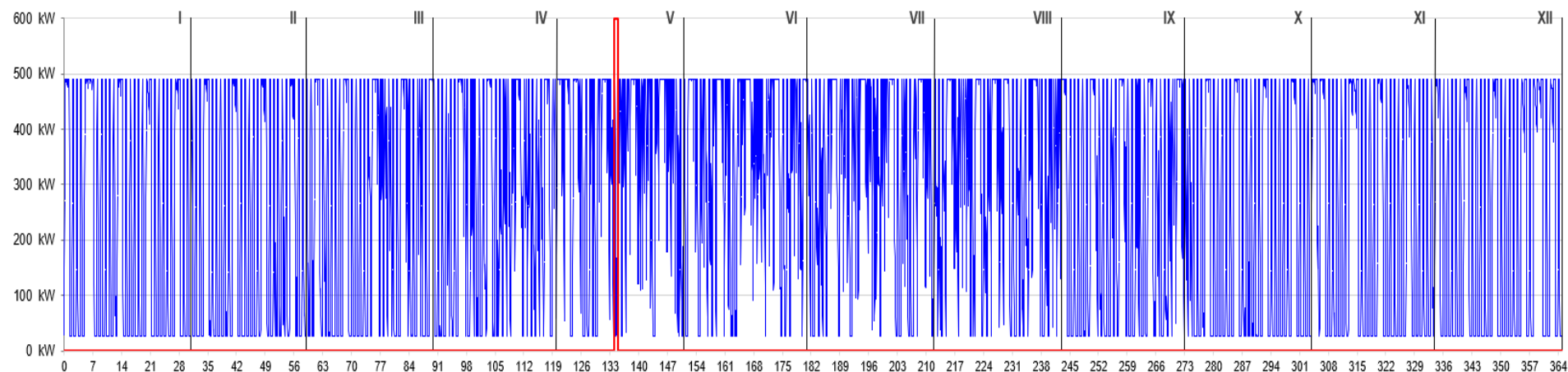
W ostatecznym rozrachunku, w konkretnym omawianym przypadku zastosowania instalacji PV + ME dla danego profilu zużycia prądu, przewidywana roczna oszczędność wyniesie około **330.186 zł/rok**.

Po zastosowaniu ME wzrósł także współczynnik autokonsumpcji PV, bo część nadwyżki prądu z PV jest kierowana do magazynu energii, a następnie do obiektu. Wzrost dotyczy również współczynnika samowystarczalności PV.

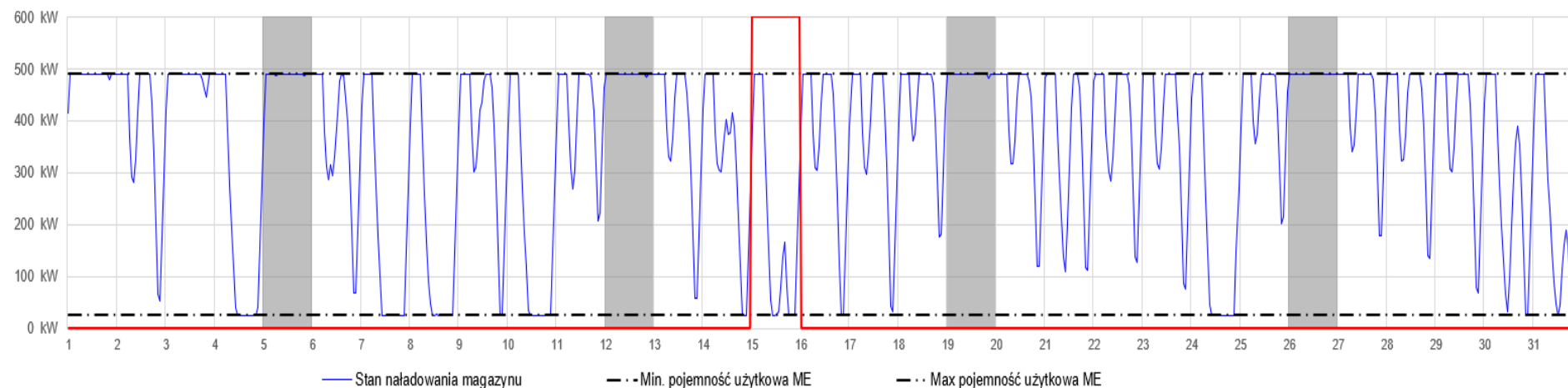
- Jednym z największych wyzwań w analizie systemu energetycznego z magazynem energii jest analityczne przedstawienie procesu pracy ME.



Rys. 13 Bilans prądu w wybranym dniu w maju



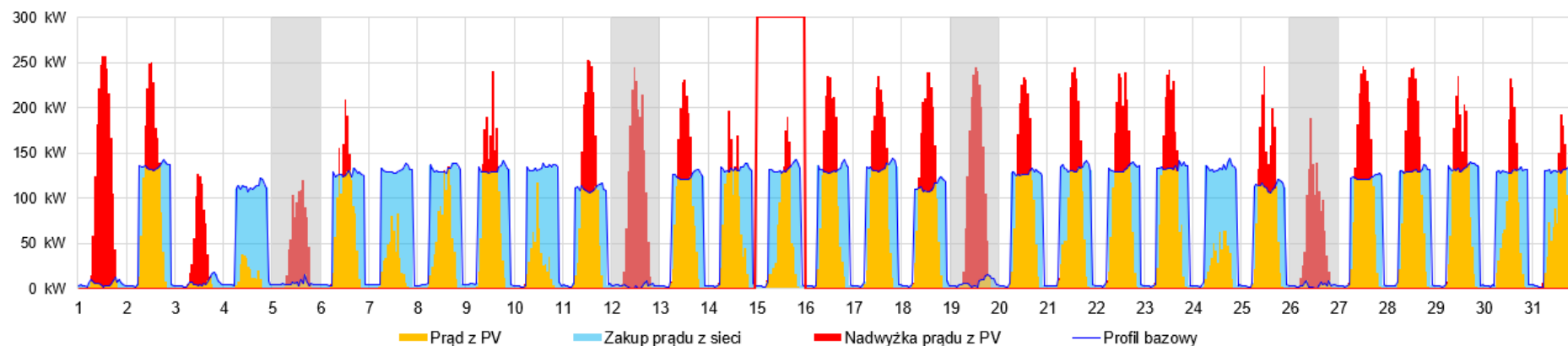
Rys. 14 Proces ładowania i rozładowania ME w ciągu roku



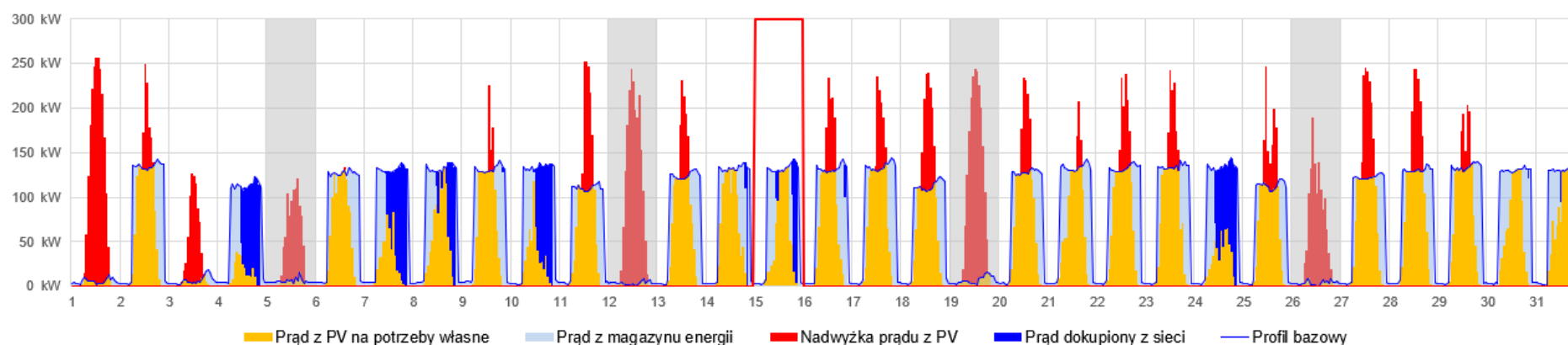
Rys. 15 Proces ładowania i rozładowania ME w maju

Na wykresie pokazany poziom maksymalnego ładowania ME (SoC) oraz minimalnego poziomu pojemności (DoD), do którego można ME rozładować.

Porównajmy zapotrzebowanie na prąd w roku bazowym w maju (profil bazowy) oraz zastosowanie jedynie instalacji PV. Brakujący prąd jest dokupowany z sieci.



Rys. 16 Pokrycie zapotrzebowania na prąd w maju – zastosowana instalacja PV 292,32 kW_p



Rys. 17 Pokrycie zapotrzebowania na prąd w maju – zastosowana instalacja PV 292,32 kW_p + ME 516 kWh

Wyraźnie widać, że ilość prądu kupowanego (kolor jasny niebieski) jest znacznie mniejsza.

Analiza efektywności energetycznej instalacji PV z ME jest dość złożona, gdyż wiele zjawisk zachodzi równocześnie:

- praca zakładu i ciągły pobór prądu;
- zasilanie zakładu prądem z ME i PV;
- praca instalacji PV z przekazywaniem części prądu na bieżące zapotrzebowanie zakładu, ładowanie nadwyżek prądu z PV do ME, przekazywanie nadwyżek prądu do sieci;
- przypadku rozładowania ME do dopuszczalnego minimalnego poziomu $C_{\min}$ zasilanie zakładu z sieci;
- ładowanie ME prądem z sieci w wyznaczonym przedziale czasowym w nocy do dopuszczalnego maksymalnego poziomu $C_{\max}$.

3.1 Optymalna pojemność magazynu energii

Dotychczasowe rozważania można potraktować jako wprowadzenie do zastosowania instalacji PV i magazynu energii. Pora przejść do kwestii zasadniczej, czyli optymalizacji pojemności magazynu energii.

Sądzę, że jest zgoda czytelników, żeby uznać, że optymalna moc instalacji PV jest taka, przy której współczynnik autokonsumpcji i samowystarczalności mają taką samą lub bardzo podobną wartość. Gdybyśmy obliczyli tylko dwie wartości współczynników to zapewne powstałyby wątpliwości jak wyglądają wartości tych współczynników dla większej i mniejszej mocy instalacji PV. Dlatego optymalizacja mocy instalacji PV przeprowadzana została dodatkowo dla dwóch innych mocy różniących się o np. $\pm 30\%$ od przyjętej mocy optymalnej.

Przeglądając różne opracowania dotyczące doboru (celowo nie używam tu określenia optymalizacji) pojemności magazynów energii mamy w zasadzie dwie metody:

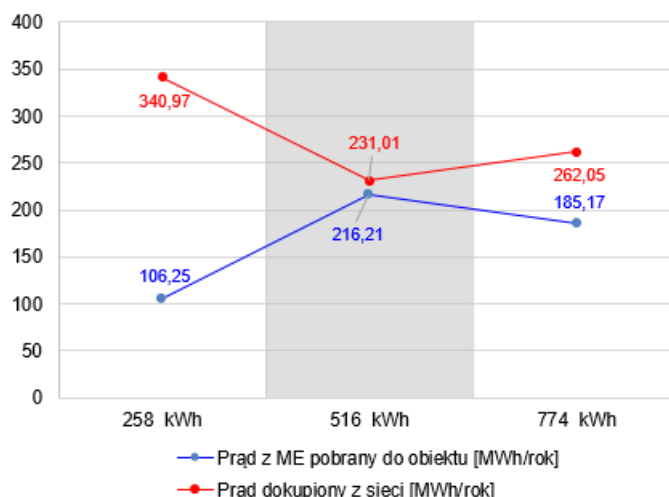
- wskaźnikowa – to są te współczynniki od 1 do 2 kWh na 1 kW_p instalacji PV;
- na wiarę – podaną przez doradcę należy przyjąć „na wiarę” bo on się na tym zna.

Żadna z tych metod do mnie nie przemawia. Dlatego starałem się przedstawić swój punkt widzenia, z którym oczywiście można dyskutować.

Jako kryterium optymalnej pojemności magazynu energii dla danego profilu zużycia prądu przez obiekt oraz przyjętej, z należytą starannością, mocą instalacji PV (wiemy już, że nie zawsze może to być moc optymalna), dwóch wartości:

- ilości prądu pobranego z ME przez obiekt [MWh/rok];
- ilości prądu dokupionego z sieci [MWh/rok].

Podobnie jak w przypadku mocy instalacji PV analiza przeprowadzana jest dodatkowo dla dwóch innych pojemności magazynów energii różniących się o np. $\pm 30\%$ od przyjętej pojemności optymalnej.



Rys. 18 Określenie optymalnej pojemności ME

Na podstawie powyższego wykresu możemy stwierdzić, że magazyn energii o pojemności 516 kWh zapewnia nam minimalną ilość prądu, którą musimy dokupić z sieci i równocześnie maksymalną ilość prądu pobranego z ME na potrzeby własne obiektu.

Gdybyśmy zastosowali ME o pojemności mniejszej lub większej od optymalnej to te wskaźniki ilości prądu byłyby zdecydowanie gorsze.

Na tej podstawie możemy stwierdzić, że pojemność magazynu energii została dobrana prawidłowo i jest ona optymalna dla danych warunków.

Zbliżając się do końca artykułu odpowiedzmy na bardzo ważne pytanie z punktu widzenia interesu inwestora: czy zlecenie wykonania studium przedinwestycyjnego wraz z określeniem optymalnej mocy umownej PV oraz optymalnej pojemności magazynu energii jest w interesie inwestora?

A może warto trochę pieniędzy zaoszczędzić i powierzyć swój biznes losowi lub doradcy handlowemu?

Wprawdzie każdy inwestor musi sam ten problem rozważyć, ale odpowiedź jest wbrew pozorom bardzo prosta.

W zakresie instalacji PV zakładamy koszt jednostkowy na poziomie 2.500 zł/kW_p.

Dla uproszczenia, przyjmujemy moc optymalną instalacji PV na 300 kW_p. To przyjęty poziom 30% pomiędzy mocą optymalną a mniejszą lub optymalną a większą, stanowi 90 kW_p, co przekłada się na koszt **225.000 zł**.

W przypadku magazynów energii sprawa jest bardziej złożona, bo nie mamy możliwości dokładania po jednym akumulatorze, żeby „wstrzelić” się w określoną pojemność. Możemy poruszać się z pojemność ME w ramach typoszeregu producenta.

Jeden z producentów podaje swój typoszereg pojemności co 100 kWh.

Przyjmijmy, zaokrągloną wartość naszej pojemności optymalnej na 500 kWh.

Różnica 30% pojemności odpowiada wartości 150 kWh. Jeśli koszt jednostkowy ME wynosi około **1.100 zł/kWh** to koszt tej różnicy pojemności ME wyniesie **165.000 zł**.

Sumując maksymalną różnicę mocy PV i pojemności ME otrzymujemy **390.000 zł**. Czy jest to kwota warta staranności przy planowaniu inwestycji???

Wprawdzie koszt studium przedinwestycyjnego w omawianym powyżej zakresie też swoje kosztuje, to mimo wszystko **oszczędności inwestora mogą być liczone w setkach tysięcy złotych**.

4. Podsumowanie

W artykule pokazane zostały dwa warianty instalacji PV: o mocy optymalnej **675,7 kW_p** oraz maksymalnej dopuszczalnej mocy **292,32 kW_p** (co wynika z obecnie obowiązującej mocy przyłączeniowej 300 kW) i dla tego wariantu określona została optymalna pojemność magazynu energii o mocy **125 kW** i pojemności **516 kWh**.

Instalacja PV 292,32 kW_p

Podstawowe koszty maksymalnej dopuszczalnej mocy instalacji PV oszacowane zostały na **730.800 zł**.

Współczynnik autokonsumpcji (PV na potrzeby własne / produkcji z PV) – SCR wynosi **71,54%**.

Współczynnik samowystarczalności (PV na potrzeby własne / profilu zużycia) – SSR wynosi **30,92%**.

Podstawowe wskaźniki efektywności finansowej instalacji PV:

Prosty okres zwrotu SPBT	4,08 lat
Bieżąca wartość netto NPV	786.247 zł
Wewnętrzna stopa zwrotu IRR	23,47%

Zaproponowana instalacja PV posiada wszelkie pozytywne wskaźniki efektywności finansowej i na ich podstawie można uznać inwestycję za opłacalną.

Instalacja PV 292,32 kW_p + ME 516 kWh

Podstawowe koszty maksymalnej dopuszczalnej mocy instalacji PV oszacowane zostały na **730.800 zł** plus **550.000 zł** szacunkowy koszt ME. Dodano także koszt niezbędnej infrastruktury technicznej szacowany na **200.000 zł** co daje łącznie **1.480.800 zł**.

Współczynnik autokonsumpcji (PV na potrzeby własne / produkcji z PV) – SCR wynosi **80,29%**, czyli więcej niż sama instalacja PV.

Współczynnik samowystarczalności (PV na potrzeby własne / profilu zużycia) – SSR wynosi **34,70%**, również więcej niż sama instalacja PV.

Podstawowe wskaźniki efektywności finansowej instalacji PV:

Prosty okres zwrotu SPBT	4,48 lat
Bieżąca wartość netto NPV	1.316.322 zł
Wewnętrzna stopa zwrotu IRR	21,02%

Zaproponowana instalacja PV wraz z magazynem energii posiada wszelkie pozytywne wskaźniki efektywności finansowej i na ich podstawie można uznać inwestycję za opłacalną.