

PROSUMENCKA MIKROINFRASTRUKTURA ENERGETYCZNA JAKO OBIEKT REGULACJI/STEROWANIA

Marcin Fice*

Wprowadzenie

Wdrożenie MIREE (Model Interaktywnego Rynku Energii Elektrycznej) [[Popczyk](#)] wymusi potraktowanie PME (prosumencka mikroinfrastruktura energetyczna) jako aktywny obiekt będący w interakcji z KSE (Krajowy System Elektroenergetyczny). W takiej instalacji postawiony będzie znacznie większy nacisk na kontrolę zużycia i gromadzenia energii oraz przepływu energii na styku KSE – PME (produkcja energii w OZE, zasobniki, taryfy dynamiczne, świadczenie usług systemowych). Instalacja taka będzie wyposażona w zestawy dedykowanych przekształtników energoelektronicznych [[Michalak](#), [Zygmanski](#)] kierujących przepływem energii pomiędzy dwoma źródłami – OZE i KSE, zasobnikami i odbiornikami. Konieczny będzie także licznik inteligentny [[Dębowski](#)] do komunikacji z rynkiem energii elektrycznej. W PME nastąpi z czasem rozwój/przekształcanie instalacji on-grid w konfigurację semi off-grid, zapewniającą autonomiczną pracę oraz jako aktywne ogniwo Wirtualnej Wyspy (WW).

Obecnie do integracji OZE, KSE, zasobników i odbiorników (ale tylko na poziomie szyny głównej AC elektrycznej instalacji budynku) stosowane są urządzenia (zawierające przekształtniki energoelektroniczne) dedykowane przez producentów OZE (m. in. SMA, Huawei, Steca). Urządzenia te nie posiadają pełnej funkcjonalności przewidzianej dla PME [[Popczyk](#), [Zygmanski](#), [Michalak](#), [Kielan](#), [Fice](#)]. Pozwalają natomiast realizować takie funkcje jak regulator ładowania akumulatorów, zabezpieczenie przed przepływem energii elektrycznej do sieci, stacje pogodowe, układy monitoringu OZE, pomiar produkowanej energii i systemy komunikacyjne. Aby jednak możliwa była realizacja MIREE konieczna jest budowa zintegrowanego interfejsu łączącego wszystkie elementy instalacji. Obecny stan techniki, w tym Internet Przedmiotów (IoT- ang. Internet of Things) [[Wójcicki](#)], dostarcza wszystkie komponenty do budowy inteligentnego interfejsu sieciowego PME (interfejs prosumencki).

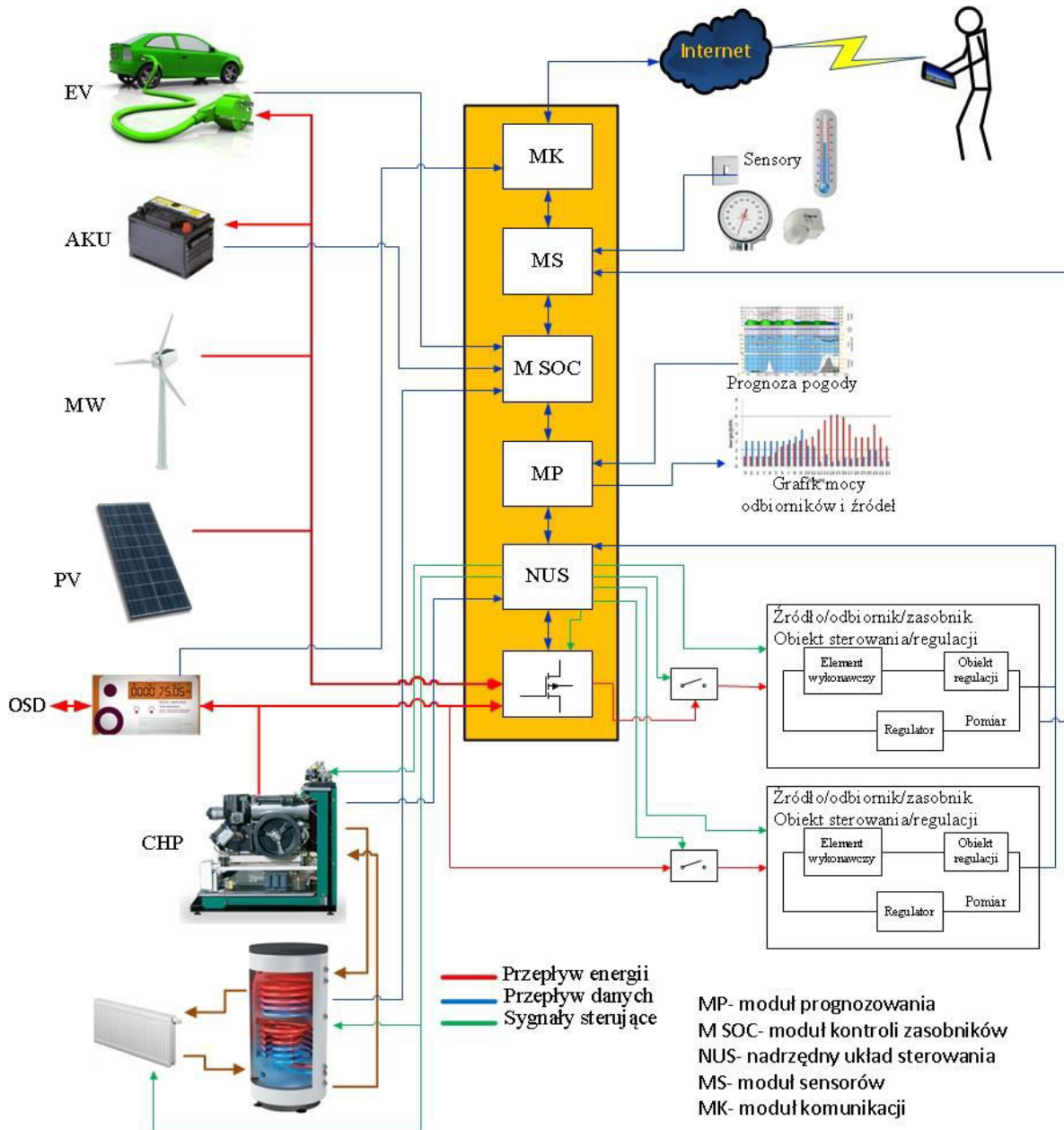
Głównym zadaniem interfejsu prosumenckiego jest zintegrowanie źródeł energii dla PME, regulacja, sterowanie i zarządzanie energią w celu ograniczenia zakupu i zużycia energii ze źródeł pierwotnych oraz utrzymaniem jakości energii na wymaganym poziomie. Interfejs prosumencki to urządzenie składające się z przekształtników energoelektronicznych wiążących źródła z odbiornikami i zasobnikami. Zawiera układy regulacji, sterowania i zarządzania energią przez kontrolę pracy zasobników (energii elektrycznej, ciepła i gazu) oraz pracy odbiorników. Takie systemowe podejście do instalacji budynkowych powoduje konieczność spojrzenia na PME jak na obiekt sterowania/regulacji. PME należy traktować globalnie jako obiekt regulacji/sterowania w którym występują podsystemy (warstwy) także posiadające własne charakterystyki pracy (możliwe do opisanie równaniami stanu w przypadku źródeł, lub transmitancją w przypadku odbiorników i linii przesyłowych). W raporcie rozróżniane są oba pojęcia: „obiekt regulacji” i „obiekt sterowania” (w dziedzinie automatyki „obiekt regulacji” jest równoznaczny z „obiektem sterowania”), klasyfikując odrębnie funkcjonalnie obiekty. Pojęcie „obiekt regulacji/sterowania” może być rozumiane na dwa sposoby:

* dr inż. Marcin Fice – Instytut Elektrotechniki i Informatyki, Wydział Elektryczny, Politechnika Śląska.

1. Proces, którego realizacja podlega regulacji/sterowaniu.
2. Aparatura/urządzenie, w której zachodzi technologiczny proces regulacji/sterowania.

1. Schemat funkcjonalności PME

W [Popczyk, Zygmantowski, Michalak, Kielan, Fice] zaprezentowano schemat technologiczny PME. Opierając się na przyjętych funkcjonalnościach opracowano schemat uzupełniający, pokazujący przepływ energii, sygnałów sterujących i danych w PME (rys. 1). Cechą charakterystyczną dla PME jest interfejs sieciowy (przekształtnik energoelektroniczny) łączący źródła energii elektrycznej (w tym zasobniki) z odbiornikami w instalacji.



Rys. 1. PME jako układ sterowania/regulacji (opracowanie własne)

Przekształtnik energoelektroniczny jest w PME elementem wykonawczym bilansowania mocy i energii. W systemie zarządczo-sterowniczym znajdują się moduły:

1. NUS- nadrzędny układ sterowania- na podstawie prognoz i grafików, odczytów chwilowych parametrów źródeł, zasobników i odbiorników kontroluje pracę przekształtników, zasobników i odbiorników sterowalnych.
2. MK – moduł komunikacji, odpowiedzialny za dopasowanie sygnałów: z licznika inteligentnego (informacja o mocy chwilowej w PME, cenie energii, sygnałach DSM/DSR) oraz komunikację przez sieć internetową i lokalną.
3. MS – moduł sensorów, koncentrator sygnałów analogowych i cyfrowych z urządzeń pomiarowych (samodzielnych jak i wbudowanych w urządzenia wytwórcze i odbiorniki).
4. M_SOC – moduł kontroli stanu naładowania zasobników (akumulatorów oraz zasobników ciepła i paliw).
5. MP – moduł prognozowania (pobierając dane prognoz pogody, prognozy cen energii i profili tworzy grafiki pracy odbiorników i zasobników).

Poszczególne moduły są funkcjonalnościami systemu zarządczo-sterowniczego PME i niekoniecznie muszą być realizowane jako urządzenia fizyczne. Na przykład moduł prognozowania będzie programem komputerowym (algorytmem) zaimplementowanym w nadrzędnym układzie sterowania, tak samo jak moduł kontroli stanu naładowania zasobników.

Układ sterowania/regulacji musi pracować w pętli sprzężenia zwrotnego i posiadać możliwość zadawania wartości oczekiwanych. Dla PME (traktowanego w całości) zdefiniowano sygnały wejściowe:

1. Profil KSE.
2. Aktualna moc OZE.
3. Prognoza produkcji OZE (np. dobowa).
4. Prognoza pogody.
5. Pogoda aktualna.
6. Chwilowa moc odbiorników w PME.
7. Prognoza (grafik) mocy odbiorników w PME.
8. Stan naładowania zasobnika.
9. Zmienne środowiskowe PME (np. temperatura, natężenie oświetlenia).
10. Cena energii od sprzedawcy.

Ponadto sygnały wyjściowe:

1. Chwilowa moc OZE.
2. Stan naładowania zasobnika SOC.
3. Chwilowa moc odbiorników.
4. Zmienne środowiskowe PME.

Można zauważyć, że sygnały wyjściowe są również sygnałami wejściowymi układu regulacji PME, czyli układ regulacji pracuje w pętli sprzężenia zwrotnego. Przedstawiony na rysunku 1 przekształtnik energoelektroniczny integruje źródła energii elektrycznej, odbiorniki i zasobniki. Dla ciepła również można zastosować rozwiązanie funkcjonalnie podobne, realizujące zarządzanie ciepłem na drodze np. regulacji przepływu i temperatury cieczy lub powietrza. W raporcie skoncentrowano się jednak na instalacji elektrycznej PME.

2. Funkcje celu dla układu sterowania/regulacji PME

Każdy układ regulacji/sterowania musi posiadać funkcję celu. Mikroinfrastruktura prosumencka pracująca w infrastrukturze Wirtualnej Wyspy powinna charakteryzować się jak największą autonomią- dążenie do struktury semi off-grid.

Jednym z założeń funkcjonowania rynku IREE jest ograniczenie wpływu Wirtualnej Wyspy na regulację pierwotną KSE, aż do całkowitej „niewidzialności” [[Popczyk](#)]. W początkowej fazie rozwoju rynek IREE oczywiście będzie miał wpływ na regulację

pierwotną w KSE, ale wprowadzenie mechanizmów regulacyjnych (bilansujących moc na poziomie regulacji pierwotnej i z czasem reakcji na poziomie milisekund) spowoduje brak reakcji regulacji pierwotnej KSE na profil mocy w Wirtualnej Wyspie. Również PME powinna podlegać podobnym procesom regulacji mocy czynnej i napięcia jak KSE, pozostając „niewidoczna” dla sieci zewnętrznej. Zastosowanie technologii przekształtnikowych współpracujących z lokalnymi zasobnikami oraz odbiornikami sterowanymi (IoT) w PME jest sposobem na transparentność mikroinfrastruktury w Wirtualnej Wyspie – zastosowanie to ułatwi procesy regulacyjne na poziomie wyspy WW. Oczywiście nie będzie możliwe zastąpienie wszystkich tradycyjnych instalacji budynkowych mikroinfrastrukturami prosumenckimi wyposażonymi w technologie zasobnikowe. Biorąc pod uwagę powyższe można wprowadzić trzy definicje PME w modelu IREE:

1. PME on-grid (nieautonomiczna) – nieposiadająca własnego zasobnika lub nie posiadająca wystarczających zdolności produkcyjnych, zarządczych i regulacyjnych aby mogła funkcjonować autonomicznie. W takiej mikroinfrastrukturze zasilaniem rezerwowym będzie KSE (wyspa WW).
2. PME (semi) off-grid (autonomiczna) – posiadająca własny zasobnik oraz zdolności sterownicze i regulacyjne potrzebne do autonomicznego funkcjonowania.
3. PME semi off-grid regulacyjna – posiadająca zasobnik oraz zasoby zarządcze i regulacyjne aby pełnić funkcję sterowania i regulacji w wyspie WW (m. in. usługi DSM/DSR). Ten typ PME zostanie włączony bezpośrednio w układ regulacji mocy czynnej wyspy WW.

Tak jak Wirtualna Wyspa nie powinna być widoczna dla systemu elektroenergetycznego, tak PME nie powinno być widoczne dla Wirtualnej Wyspy, lub widoczne w ograniczonym zakresie (np. jako źródło lub zasobnik, czyli pełnić określoną rolę bilansującą w strukturze wyspy WW). Na podstawie przyjętych założeń zdefiniowano główne funkcje celu dla PME:

Kryterium 1. Zminimalizowanie przepływu energii (E_{PME}) na granicy PME i zewnętrznej sieci energetycznej:

$$\min_{t=T_{WW}} E_{PME}(t) \quad (1)$$

$$E_{PME} = \sum_{i=1}^l E_{g_i} - \sum_{i=1}^m E_{o_i} \pm \sum_{i=1}^n E_{z_i} \quad (2)$$

gdzie:

E_g – energia źródeł,

E_o – energia odbiorników,

E_z – energia zasobników,

T_{WW} - okres bilansowania energii w PME, zależny od okresu bilansowania w KSE lub a wyspie WW.

Podane kryterium wydaje się dobrze odzwierciedlać rolę PME jako węzła bilansującego energii elektrycznej dla wyspy WW. Wartość dodatnia E_{PME} oznacza eksport energii do KSE, a wartość ujemna – import energii z KSE. Kryterium to będzie odpowiednie dla PME w pierwszym etapie rozwoju rynku IREE, w których nadmiar energii będzie sprzedawany (np. ze względu na brak zasobnika).

Szczególnym przypadkiem będzie dążenie do pełnego bilansowania energii w PME: [\[Popczyk\]](#)

$$E_{PME} = \sum_{i=1}^l E_{g_i} - \sum_{i=1}^m E_{o_i} \pm \sum_{i=1}^n E_{z_i} = 0 \quad (3)$$

Kryterium 1 nie pokazuje jeszcze transparentności PME dla regulacji pierwotnej w KSE (WW) ale pociąga za sobą kolejne, związane z bilansowaniem mocy.

Kryterium 2. Bilansowanie mocy chwilowej w PME (P_{PME}) w celu zminimalizowania przepływu energii na styku PME i zewnętrznej sieci energetycznej w dowolnie krótkim czasie:

$$\min_{t \rightarrow 0} P_{PME}(t) \quad (4)$$

$$P_{PME}(t) = \sum_{i=1}^l P_{g_i}(t) - \sum_{i=1}^m P_{o_i}(t) \pm \sum_{i=1}^n P_{z_i}(t) \quad (5)$$

gdzie:

$P_g(t)$ – moc chwilowa źródeł.

$P_o(t)$ – moc chwilowa odbiorników.

$P_z(t)$ – moc chwilowa zasobników.

Podane kryterium wydaje się dobrze odzwierciedlać rolę PME jako węzła bilansującego mocy dla WW. Wartość dodatnia P_{PME} oznacza eksport energii do KSE, a wartość ujemna – import energii z KSE. Kryterium to będzie odpowiednie dla PME w pierwszym etapie rozwoju IREE, w których nadmiar energii będzie sprzedawany (np. ze względu na brak zasobnika). Szczególnym przypadkiem będzie dążenie do autonomii PME i braku interakcji w regulację w KSE i WW:

$$P_{PME} = \sum_{i=1}^l P_{g_i} - \sum_{i=1}^m P_{o_i} \pm \sum_{i=1}^n P_{z_i} = 0 \quad (6)$$

Kryterium 3. Maksymalnie efektywne wykorzystanie energii z OZE i rekuperacji (co pociąga za sobą wymuszenie sterowania odbiornikami i zasobnikami):

$$\max_{t \rightarrow 0} \eta_{PME}(t) \quad (7)$$

Nie jest możliwa realizacja wymienionych kryteriów bez urządzeń sterujących przepływem energii (przekształtników energoelektronicznych) i zasobników. Te dwie grupy urządzeń również należy traktować jako obiekty regulacji/sterowania, przy czym dynamika pracy przekształtników jest nieporównywalnie większa w porównaniu do odbiorników i (części) zasobników. W przypadku zasobników zdefiniowano podstawowe funkcje celu:

1. Utrzymywanie SOC (z ang. state of charge, stan naładowania) zasobnika na odpowiednim poziomie – np. wynikającym z prognozy produkcji i planowanego zużycia energii oraz sprawności i trwałości.
2. Maksymalizacja trwałości zasobnika (np. kontrola mocy wyładowania i głębokości wyładowania w przypadku akumulatorów).

Głównymi funkcjami celu dla przekształtnika są:

1. Bilansowanie mocy w PME (na poziomie regulacji pierwotnej: milisekundowej i sekundowej).
2. Regulacja napięcia.
3. Utrzymanie na odpowiednim poziomie jakości energii w PME (również w węzle bilansującym PME-KSE).

3. Podstawowe strategie sterowania/regulacji w PME

Prosumencką mikroinfrastrukturę energetyczną (PME) można porównać, w skali mikro, do systemu elektroenergetycznego zasilanego ze źródeł energii opartych na paliwach

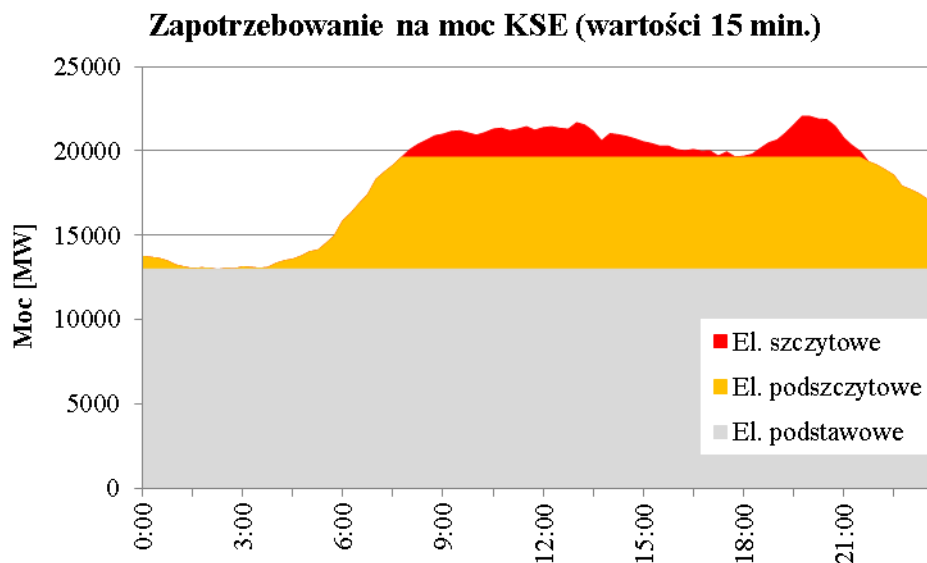
konwencjonalnych. W PME, podobnie jak w KSE, występują urządzenia (źródła, układy rozdzielcze, układy transformujące, zasobniki i odbiorniki) o różnorodnych charakterystykach statycznych i dynamicznych. W KSE nie występują obecnie, poza elektrowniami szczytowo pompowymi, bezpośrednie zasobniki energii elektrycznej (np. akumulatory). Wytwarzanie, przesył i przetwarzanie odbywają się jednocześnie. W stanach dynamicznych (nieustalonych) mogą pojawiać się zakłócenia i trudności w utrzymaniu określonej jakości energii elektrycznej (również ciepła). W KSE podstawowymi parametrami jakości energii są: częstotliwość (zależna od mocy czynnej) i napięcie (zależne od mocy biernej).

W celu zapewnienia pokrycia zapotrzebowania na moc w KSE pracują źródła (elektrownie): [Gładyś, Matla]

1. Podstawowe – ciepłe parowe, wodne przepływowe, wiatrowe (źródła najtańsze).
2. Podszczytowe – ciepłe parowe (najczęściej stare konstrukcje), wodne zbiornikowe.
3. Szczytowe – wodne szczytowo-pompowe, turbinowe gazowe.

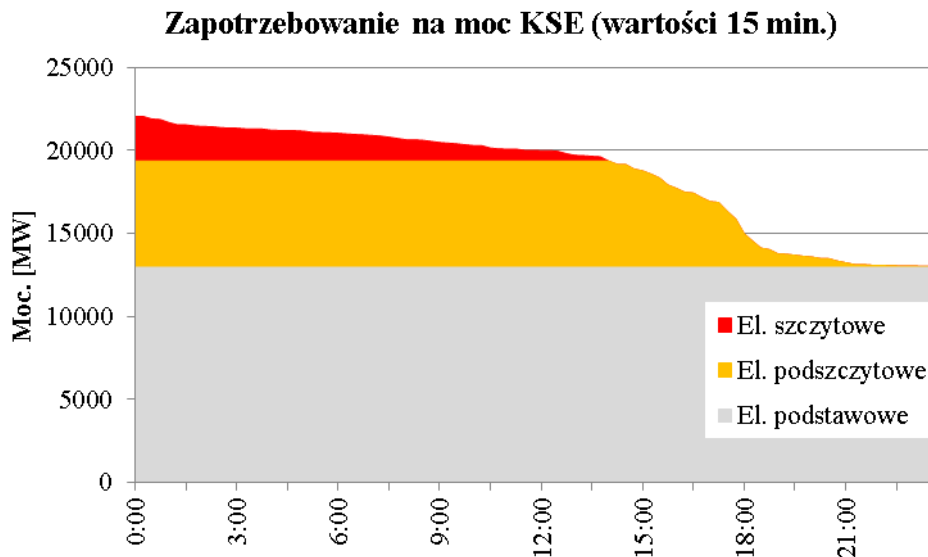
Różnice funkcjonalne pomiędzy wymienionymi kategoriami elektrowni dotyczą głównie czasu załączenia i dynamiki regulacji. Źródła szczytowe muszą zapewnić możliwie szybki rozruch oraz dużą dynamikę regulacji częstotliwości i napięcia. Dlatego elektrownie szczytowe to zazwyczaj jednostki o mniejszej mocy.

Na rys. 2 pokazano przykładowy przebieg zapotrzebowania na moc w KSE z zaznaczeniem obszarów pracy poszczególnych kategorii elektrowni. Wynika z tego, że w celu zapewnienia zapotrzebowania na moc w KSE włączane są odpowiedniej mocy źródła (najczęściej konwencjonalne). Na rys. 3 pokazano uporządkowany profil z rys. 2. Widać na nim proporcje mocy i energii pomiędzy poszczególnymi kategoriami elektrowni oraz ile czasu pracują elektrownie szczytowe w ciągu dnia.



Rys. 2. Dobowy profil mocy w KSE z naniesionymi przykładowymi mocami kategorii elektrowni (opracowanie własne na podstawie danych z www.pse.pl)

W wybranym dniu całkowita energia w KSE wyniosła 444 GWh. Energia dostarczona przez elektrownie podszczytowe wynosi ok. 130 GWh, a przez elektrownie szczytowe- ok. 20 GWh. Minimalna moc w dolinie nocnej (w przybliżeniu moc elektrowni podstawowych) wyniosła ok. 13 GW, Moc maksymalna w szczycie wieczornym to ok. 22 GW.



Rys. 3. Uporządkowany profil mocy w KSE (opracowanie własne na podstawie danych z www.pse.pl)

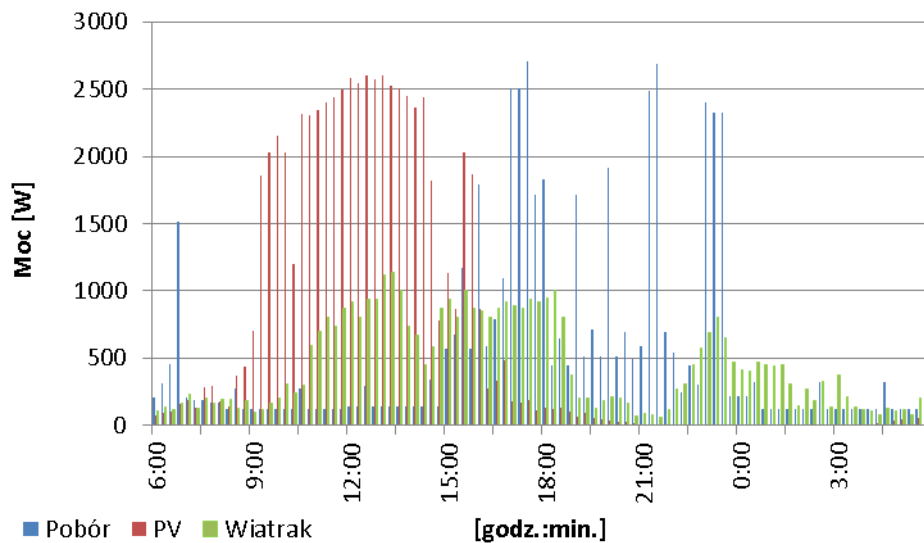
W systemie elektroenergetycznym stosowana jest wielopoziomowa (trójdzielna) regulacja częstotliwości (mocy czynnej) i napięcia (mocy biernej):

1. Regulacja pierwotna (inaczej sekundowa) – natychmiastowa reakcja na zmianę częstotliwości mająca na celu zrównanie mocy generowanej z zapotrzebowaniem na moc. Jako zasób regulacyjny w pierwszej kolejności wykorzystywana jest energia kinetyczna wirujących mas bloków wytwórczych. Następnie układ regulacji zwiększa dopływ (z turbiny) mocy mechanicznej do generatora w celu ustabilizowania prędkości obrotowej. Regulacja ta nie przywraca częstotliwości nominalnej.
2. Regulacja wtórna (inaczej minutowa) – ma na celu doprowadzenie prędkości obrotowej (częstotliwości napięcia generowanego) generatorów do wartości nominalnej przez modyfikację mocy zadanej generatora (regulacja mocy mechanicznej doprowadzanej do generatora).
3. Regulacja trójna (inaczej godzinowa) – odbudowa rezerwy mocy regulacyjnej wtórnej. Rezerwa trójna jest aktywowana przez zmianę planów pracy jednostek wytwórczych (reakcja na wyłączenie jednostki wytwórczej).

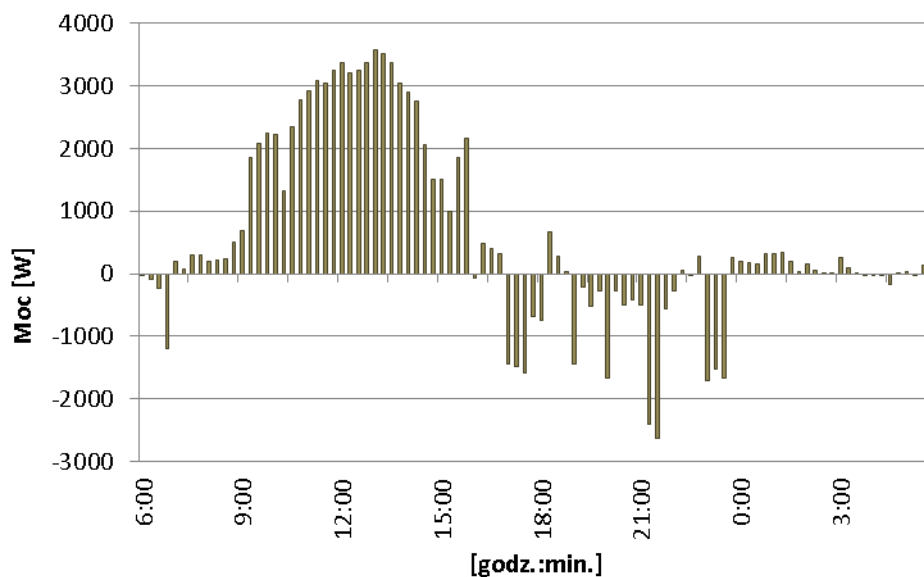
Oczywiście przedstawiony opis procesu regulacji mocy w KSE jest bardzo uproszczony (proces jest ten znacznie bardziej złożony i polega m.in. na planowaniu oraz wykorzystywaniu wielu parametrów regulacyjnych bloków wytwórczych).

Opisany uproszczony proces zapewniania pokrycia zapotrzebowania na moc w KSE można porównać z tym jaki należy zapewnić w PME semi off-grid. W PME również występuje zmienny profil zapotrzebowania na moc, zależny od użytkowania instalacji (rys. 4). W instalacji semi off-grid głównym kryterium sterowania/regulacji jest minimalizacja przepływu energii przez węzeł połączenia PME i KSE. W celu spełnienia tego kryterium należy zmaksymalizować efektywność wykorzystania energii ze źródeł wewnętrznych PME (OZE oraz zasobników). Na rys. 4 pokazano przykładowy profil zapotrzebowania na moc w PME (gospodarstwo domowe) z naniesionym przebiegiem produkcji energii elektrycznej w instalacji fotowoltaicznej o mocy 3 kW i mikrowiatraku o mocy 3 kW. Ten układ można uznać za modelowy, ponieważ moce urządzeń wytwórczych zostały dobrane w celu zaspokojenia rocznego zapotrzebowania na energię gospodarstwa domowego. Profil zużycia energii został przygotowany na podstawie monitoringu rzeczywistego domu, w którym największy pobór energii elektrycznej mają urządzenia takie jak kuchenka elektryczna, pralka i zmywarka. Na rys. 5 pokazano profil bilansu mocy elektrycznej w PME, wartości dodatnie

oznaczają eksport energii do KSE. Profile produkcji mocy przygotowano dla jednego dnia na podstawie danych o prędkości wiatru i natężeniu promieniowania słonecznego. Można zauważyć, że dla analizowanego budynku większość energii jest oddawana do sieci.

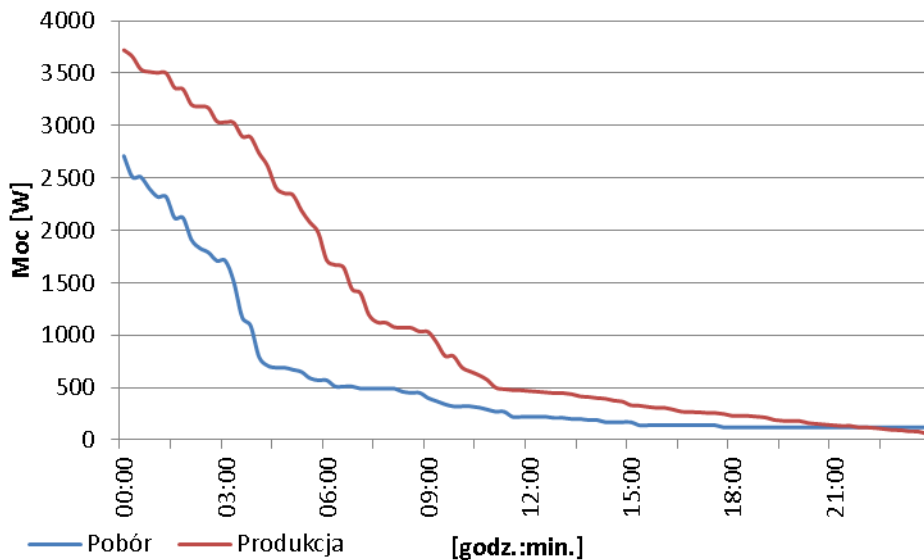


Rys. 4. Dobowy profil zapotrzebowania na moc PME – kolor niebieski oraz profile mocy produkcji: w instalacji fotowoltaicznej 3 kW – kolor czerwony i w źródle mikrowiatrowym 3 kW – kolor zielony (opracowanie własne)

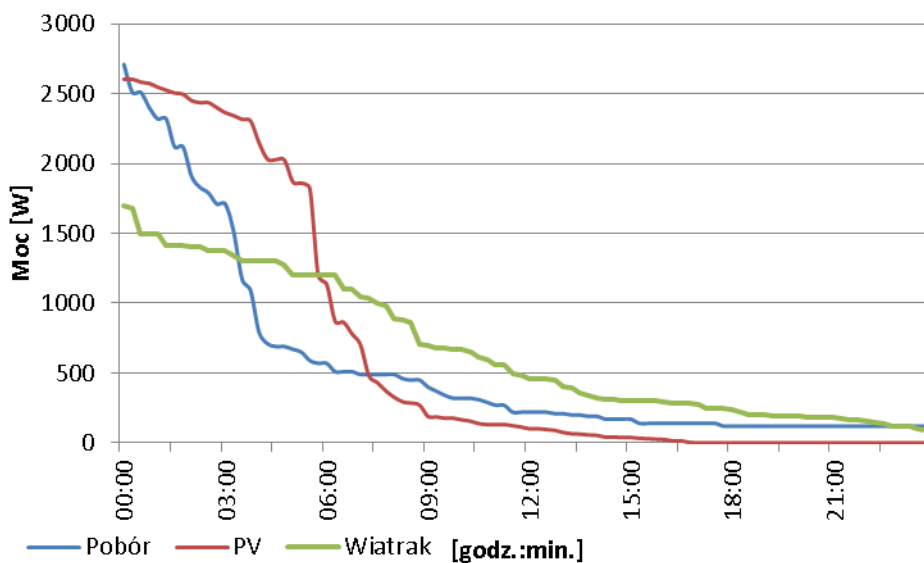


Rys. 5. Dobowy bilans mocy PME; wartość dodatnia oznacza eksport energii do KSE, ujemna – import energii do PME (opracowanie własne)

Na rysunkach 6 i 7 pokazano uporządkowane przebiegi zapotrzebowania na moc w PME oraz produkcji w OZE. Można zauważyć, że zaspokojenie energetyczne w PME nie jest problemem, jest to tylko kwestia dobrania źródeł o odpowiedniej mocy. Problemem natomiast jest chwilowy bilans mocy. Źródłami podstawowymi w PME (odnosząc się do podziału w KSE) są źródła odnawialne (np. słoneczne, wiatrowe). Porównując sytuację do KSE (oczywiście) widać, że nie jest możliwe zapewnienie pracy źródeł podstawowych OZE w podstawie zapotrzebowania na moc.



Rys. 6. Uporządkowany przebieg mocy zapotrzebowania (kolor niebieski) i produkcji w OZE (kolor czerwony) w PME (opracowanie własne)



Rys. 7. Uporządkowany przebieg mocy zapotrzebowania – kolor niebieski oraz produkcji w źródle PV 3 kW – kolor czerwony i mikroźródle wiatrowym 3 kW – kolor zielony (opracowanie własne)

Ze względu na wymuszony charakter generacji z OZE istnieje kilka mechanizmów umożliwiających dostarczenie energii elektrycznej w czasie, kiedy źródło podstawowe OZE, ze względu np. na warunki atmosferyczne, nie zbilansuje w pełni chwilowego zapotrzebowania na moc:

1. Magazynowanie energii w zasobnikach (np. akumulatorach).
2. Sterowanie odbiornikami w celu chwilowego ograniczenia zapotrzebowania na moc (zastosowanie praktyczne w połączeniu z zasobnikami).
3. Zastosowanie dodatkowego źródła z możliwością szybkiego uruchomienia i sterowania mocy wyjściowej, np. kogeneratora gazowego.
4. Potraktowanie KSE jako źródła dodatkowego (szczytowego, czyli zakup energii z KSE).

W zależności od konfiguracji PME konieczne jest opracowanie wielu strategii sterowania/regulacji mocy (napięcia). W przypadku kiedy zmiany mocy w PME charakteryzują się dużą dynamiką (krótkotrwałe duże skoki mocy) najlepszym rozwiązaniem jest zasobnik: akumulatorowy, superkondensatorowy lub kinetyczny. Kiedy istnieje możliwość sterowania odbiornikami (np. wyłączanie lub przesuwanie obciążeń) możliwe jest zastosowanie kogeneratora gazowego jako źródła sterowanego (mniejsza dynamika zmiany punktu pracy oraz ograniczony obszar efektywności bliskiej maksymalnej). Aby w PME nie brakło mocy należy zapewnić zbilansowaną gospodarkę energią w zasobnikach i sterowanie odbiorników (przesuwanie i wyłączanie obciążeń).

Możliwe jest przeniesienie do układu regulacji PME strategii trójdzielnej regulacji KSE. Ze względu na dynamikę układów przetwarzania i rozdziału energii elektrycznej (przekształtniki energoelektroniczne) praktycznie nie występuje problem regulacji częstotliwości, który wymuszony jest sygnałem synchronizacji z KSE (w przypadku systemu on-grid lub semi off-grid). W systemie off-grid częstotliwość jest regulowana przez własny generator wzorcowy przekształtnika. Głównymi parametrami jakościowymi energii elektrycznej w PME są:

1. Wartość napięcia w instalacji.
2. Odkształcenia napięcia i prądu.

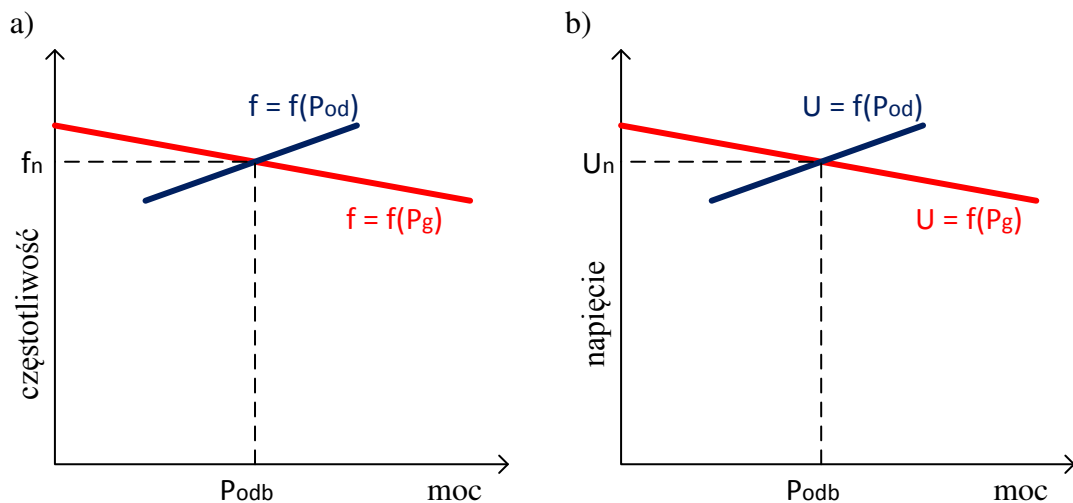
W PME napięcie w instalacji zależne jest od bilansu mocy źródeł i odbiorników:

$$U = f(P) \quad (8)$$

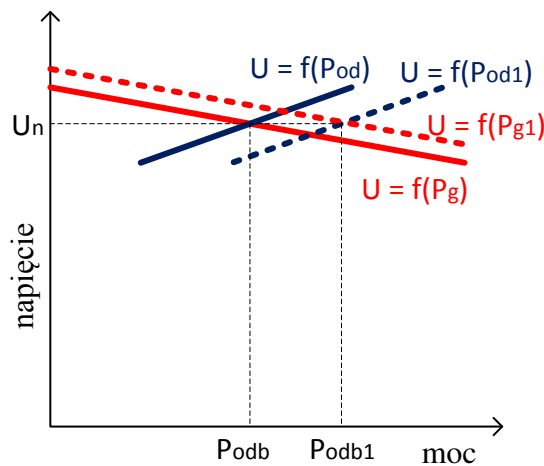
Kształt tej charakterystyki będzie zależny od wypadkowej charakterystyk źródeł i odbiorników w PME [[Michalak, Zygmantowski 2](#)].

Jeśli w wydzielonej (off-grid) mikroinfrastrukturze wystąpi zakłócenie bilansu mocy czynnej wówczas zmieni się wartość napięcia. Jeśli wartość odchylenia napięcia przekroczy określoną wartość wówczas zadziała układ regulacji napięcia. W PME semi off-grid wartość napięcia jest zadana przez KSE, a sterowanie energią w PME jest prądowe (przekształtnik jest źródłem prądowym). W przypadku niezbilansowania mocy w PME semi off-grid nadmiar lub deficyt mocy zostaną zbilansowane z KSE. Jednak aby zrealizować kryterium zapisane równaniem 6 przepływ prądu jest regulowany bilansem napięcia pomiędzy źródłem (zasobnikiem) i odbiorem w instalacji. Na rysunku 8 pokazano charakterystyki statyczne a) KSE i b) PME (przyjmując liniową zależność mocy odbiornika od napięcia zasilania). Na rysunku 9 pokazano realizację regulacji napięcia w PME. Przy zwiększeniu (lub obniżeniu) poboru mocy napięcie w instalacji podniesie się (lub obniży). Regulator musi zareagować podniesieniem (lub obniżeniem) napięcia. Regulacja napięcia w PME dzięki zastosowaniu przekształtników jest możliwa niezależnie od parametrów źródeł (które pracują w punkcie mocy maksymalnej uzyskując największą efektywność).

W trakcie zmiany napięcia w instalacji pojawi się również zmiana mocy pobieranej przez odbiorniki, a zmiana ta zależy od charakterystyki odbiornika. Przy czym zmniejszeniu napięcia zazwyczaj towarzyszyć będzie również zmniejszenie poboru mocy przez odbiornik (chyba, że odbiornik posiada własny układ regulacji, jak np. oświetlenie LED z wbudowanym źródłem prądu).

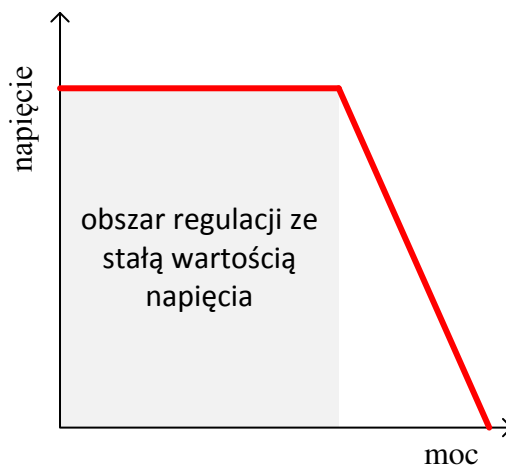


Rys. 8. Charakterystyki statyczne dla a) częstotliwości (KSE), b) napięcia (PME) w funkcji mocy czynnej; P_{od} – moc odbioru, P_g – moc źródła (opracowanie własne na podstawie [Gładyś, Matla])



Rys. 9. Realizacja regulacji napięcia w PME (opracowanie własne)

Oczywiście regulacja napięcia w PME jest możliwa tylko w ograniczonym zakresie mocy źródeł i zasobników (rys. 10).



Rys. 10. Obszar pracy układu regulacji ze stałą wartością napięcia w PME (opracowanie własne)

W przypadku zwiększenia zniekształceń w przebiegu napięcia moc odbiorów zazwyczaj rośnie. Odształcenia napięcia i prądu (pojawienie się wyższych harmonicznych w przebiegu napięcia i prądu) jest kontrolowane przez dedykowane filtry i rozbudowane układy przekształtnikowe. Odształcenia napięcia będą rosły przy wzroście mocy odbiorników. Zależność mocy pobieranej przez odbiorniki od odształcenia napięcia (wyższych harmonicznych):

$$P_O = P_{O_n} \cdot k_{THD} \cdot \left(\frac{THD}{THD_n} \right)^m \quad (9)$$

gdzie:

P_{O_n} – moc nominalna odbiornika.

k_{THD} – współczynnik reakcji zmiany mocy odbiornika pracującego przy zasilaniu napięciem odształconym.

THD – współczynnik zawartości harmonicznych, m- współczynnik potęgowy zależny od rodzaju odbioru (reakcji na zmianę THD).

Problem mocy biernej w PME w zasadzie nie istnieje z powodu stosowania urządzeń kompensacji mocy biernej i dedykowanych przekształtników. Utrzymanie w instalacji wartości napięcia na zadanym poziomie zależy od mocy czynnej źródeł. W przypadku niewystarczającej mocy źródła przekształtnik obniży napięcie w instalacji.

W regulacji napięcia i przepływu energii w PME główną rolę odgrywają zasobniki oraz sterowanie odbiornikami. Przekształtniki, ze względu na znacznie większą dynamikę pracy mogą być traktowane jako element czasowo bezinercyjny.

4. Regulacja napięcia (mocy czynnej) w PME

4.1. Regulacja milisekundowa i regulacja sekundowa – realizowana na poziomie przekształtnika, najważniejsza z punktu widzenia przekształtnika i spełnienia przez układ sterowania/regulacji kryteriów zapisanych równaniami 4 – 6 (bilans mocy chwilowej). W zależności od typu instalacji można określić strategię regulacji:

1. Dla instalacji off-grid:
 - a) bilansowanie mocy w instalacji w celu utrzymania stałej wartości napięcia,
 - b) w przypadku braku energii w zasobniku możliwość obniżenia mocy (napięcia zasilania) odbiorników.
2. Dla instalacji semi off-grid (on-grid):
 - a) bilansowanie mocy w celu realizacji kryteriów energetycznych,
 - b) w przypadku braku energii ze źródeł i zasobników możliwość bilansowania mocy z KSE lub obniżenie mocy odbiorników.

Regulacja milisekundowa polega na wykorzystaniu źródła o dużej gęstości mocy w celu bieżącego bilansowania mocy (napięcia) w instalacji. Źródło (zasobnik) uczestniczące w regulacji pierwotnej oprócz dużej gęstości mocy musi zapewnić dużą dynamikę zmian mocy (przepływu energii w dwie strony). Źródło/zasobnik będzie pracować w cyklach milisekundowych ładowania i rozładowania, z tego powodu taki zasobnik musi być odporny na pracę z dużymi mocami w płytkich cyklach ładowanie-rozładowanie.

Zasobnikiem spełniającym kryteria regulacji milisekundowej jest superkondensator i akumulator, a regulacji sekundowej akumulator oraz zasobnik kinetyczny (ewentualnie generator spalinowy z zasobnikiem kinetycznym – w postaci koła zamachowego). W sytuacji braku zasobnika tę funkcję może pełnić system elektroenergetyczny, ale w takim przypadku nie zostanie spełnione kryterium opisane równaniem 6. W tabeli 1 porównano parametry energetyczne zasobników stosowanych dla regulacji milisekundowej i sekundowej.

Tab. 1. Porównanie parametrów energetycznych zasobników energii.

Typ zasobnika	Gęstość energii [Wh/kg]	Gęstość mocy [W/kg]	Trwałość
Akumulator kwasowo-ołowiowy	40	60	do 1 500
Akumulator litowo-jonowy	100 - 200	200 - 300	do 5 000
Superkondensator	5 - 10	3000 - 10 000	500 000
Zasobnik kinetyczny	stalowe do 55 kompozytowe do 870	do 10 000	20 lat

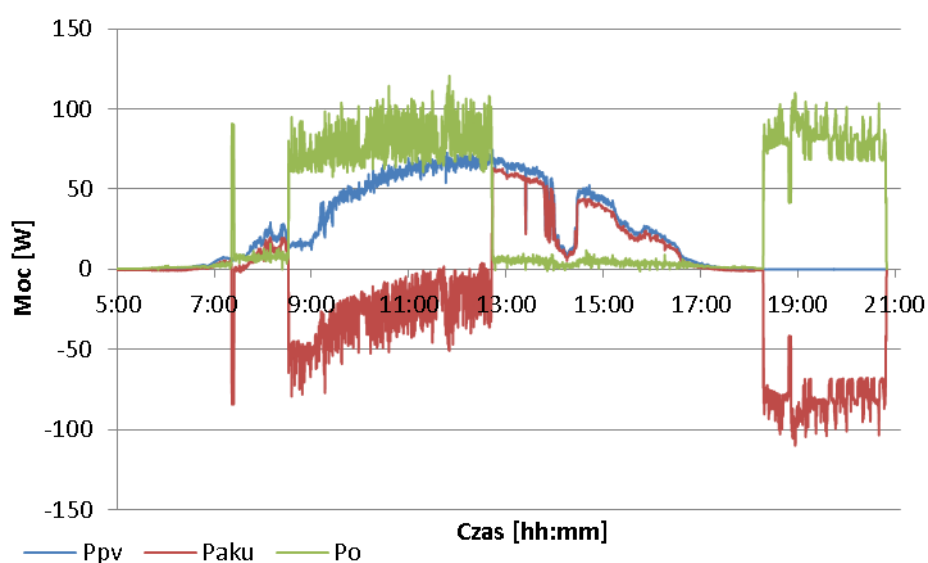
Regulacja milisekundowa i sekundowa zapewnia bilansowanie mocy w PME zasilanej źródłami OZE realizując kryteria:

1. Minimalnego przepływu energii na styku PME i KSE.
2. Maksymalnego wykorzystanie energii ze źródeł OZE.

Danymi wejściowymi dla układu regulacji są:

1. Chwilowa wartość napięcia w instalacji.
2. Moc chwilowa odbiorów i źródeł.
3. SOC zasobników.

Na rys. 11 pokazano dobowy profil mocy dla mikroinstalacji fotowoltaicznej off-grid o mocy 100 W.

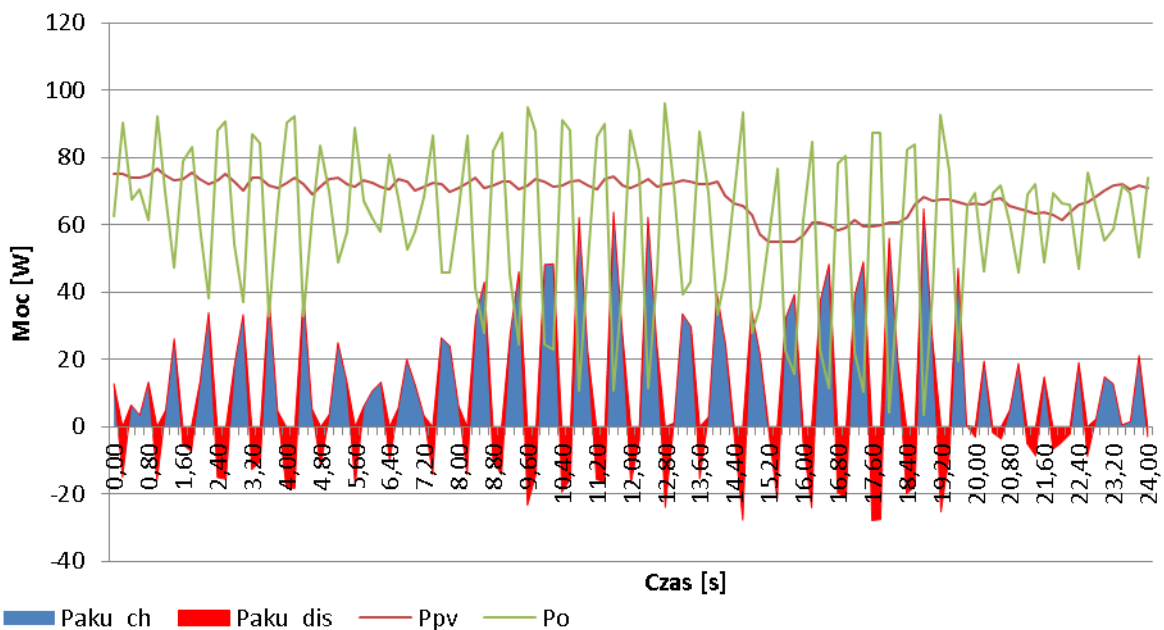


Rys. 11. Profil mocy dla instalacji fotowoltaicznej off-grid (P_o - moc odbiornika, P_{pv} - moc źródła PV, P_{aku} - moc akumulatora) ($T_f = 10$ s). (Opracowanie własne)

Odbiorniki w analizowanej mikroinstalacji zasilane są z przekształtnika z zaimplementowanym algorytmem MPPT (ang. maximum power point tracking – poszukiwanie punktu mocy maksymalnej) przez co spełnione jest kryterium maksymalnego wykorzystania energii ze źródła PV. Dodatkowo zastosowano zasobnik w postaci akumulatora kwasowo-ołowiowego o pojemności 100 Ah. Bilans mocy chwilowej źródła, zasobnika i odbiorników w tej mikroinstalacji wynosi zero (uwzględniając straty przetwarzania energii w przekształtniku jako moc odbiorników).

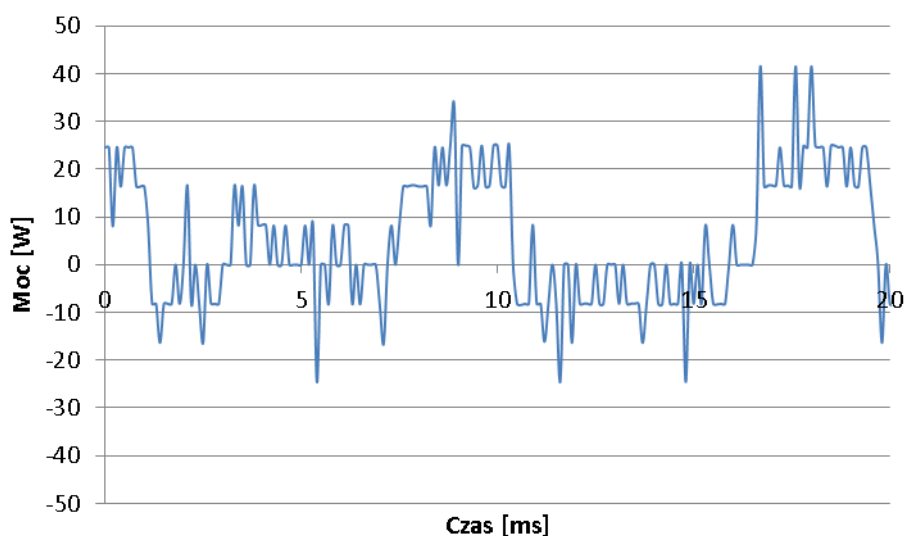
Na rys. 12 pokazano przebiegi mocy w tej samej mikroinstalacji off-grid próbkowane z czasem 200 ms. Obciążeniem był komputer zasilany poprzez dwie przetwornice energoelektroniczne: 24 V DC / 230 V AC oraz dedykowany zasilacz komputerowy. Można

zauważyć, że moc odbiornika zmienia się w zakresie od 10 do 90 W, a moc akumulatora w zakresie od 20 do 60 W. Moc źródła PV nieznacznie „faluje”, jest to spowodowane działaniem algorytmu MPPT (ciągłe poszukiwanie punktu mocy maksymalnej źródła PV). Wartości ujemne mocy akumulatora oznaczają pobór energii, a dodatnie – ładowanie akumulatora. Jeśli ta instalacja byłaby typu semi off-grid i jej układ regulacji realizowałby kryterium opisane równaniem 6, to nadwyżka lub deficyt energii ze źródła PV będzie bilansowany z akumulatorem. Jeśli w PME nie byłoby zasobnika wówczas bilansowane odbędzie się z KSE.



Rys. 12. Przebiegi mocy w układzie off-grid z przekształtnikiem MPPT, $T_f=200\text{ms}$ (opracowanie własne)

Na rysunku 13 pokazano przebieg mocy akumulatora zarejestrowany czasem próbkowania 0,1 ms.



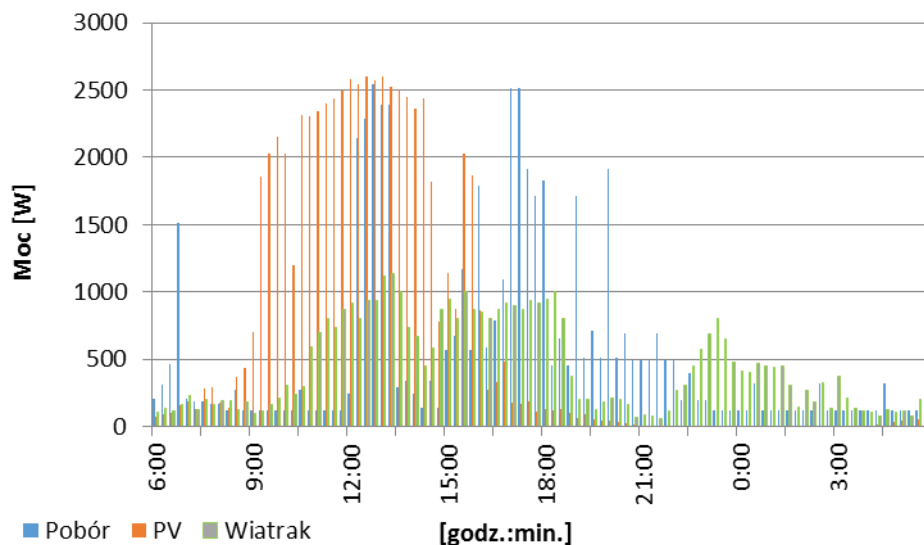
Rys. 13. Przebieg mocy akumulatora w instalacji off-grid, $T_f=0,1\text{ms}$ (opracowanie własne)

4.2. Regulacja minutowa (wykorzystanie akumulatorów, generatorów spalinowych, sterowanie odbiornikami) – realizowana na poziomie sterownika nadrzędnego, ma na celu zmniejszenie amplitudy nagłych zmian mocy w PME, czyli wpływa na wyrównywanie obciążeń obniżając szczytowe zapotrzebowanie na moc i zabezpiecza przed nadmiernym rozładowaniem zasobników. Regulacja ta polega na grafikowaniu pracy i sterowaniu odbiornikami w celu zmniejszenia mocy pobieranej ze źródeł i zasobników oraz załączaniu źródeł regulacyjnych (np. generatora spalinowego).

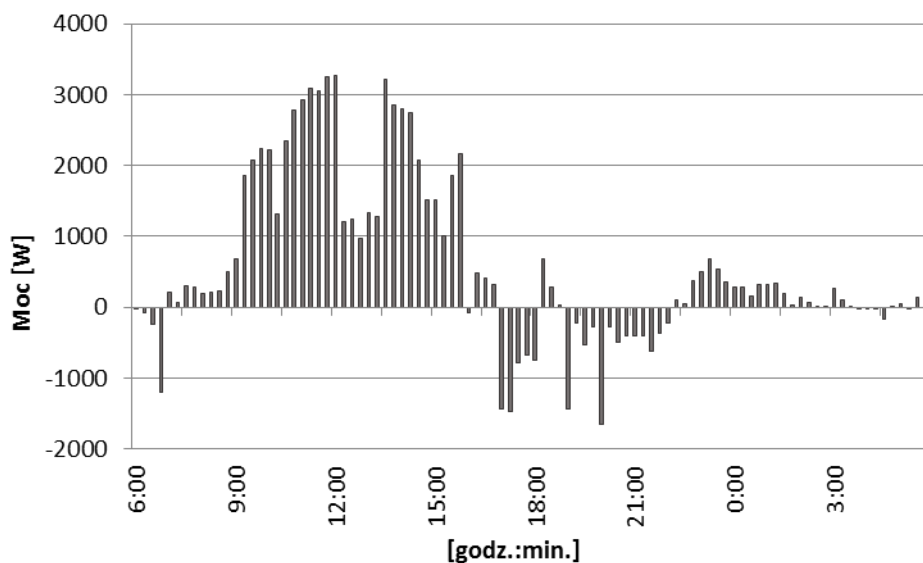
Danymi wejściowymi są: charakterystyki pracy odbiorników, SOC zasobników, krótkoterminowe prognozy pogody. Na podstawie danych wejściowych modułu prognozowania ustalane są bieżące i krótkoterminowe grafiki pracy odbiorników w PME. Minimalny czas reakcji układu regulacji: minuty – w zależności od charakterystyk zainstalowanych odbiorników i sterowanego źródła.

Pojemność zasobnika dobierana jest na energię cyklu obliczeniowego (np. 5 min, 1 godz., doba), inaczej jak w regulacji milisekundowej i sekundowej, gdzie pojemność dobierana jest na maksymalne spodziewane skoki mocy (prądu) w instalacji.

Przedstawiony na rysunkach 4, 5 i 6 dobowy profil (15 min) zapotrzebowania na moc pokazuje, że w instalacji jest nadmiar energii, którą należy zgromadzić w zasobniku (lub przesłać do KSE). Reakcją regulacji minutowej może być w tym przypadku (na podstawie krótkoterminowych prognoz pogody) przeniesienie niektórych obciążeń (wieczornych – praca pralki i zmywarki) w okres nadprodukcji ze źródła PV (rys. 14 i 15).



Rys. 14. Dobowy profil zapotrzebowania na moc PME (kolor niebieski) i zmiany mocy produkcji energii w instalacji fotowoltaicznej 3 kW (kolor czerwony) oraz mikrowitraka 3 kW (kolor zielony) z przeniesionym obciążeniem wieczornym (opracowanie własne)



Rys. 15. Dobowy bilans mocy PME (wartość dodatnia oznacza eksport energii do KSE, ujemnie- import energii do PME) z przeniesionym obciążeniem wieczornym (opracowanie własne)

4.3. Regulacja godzinowa (zarządzanie energią, sterowanie odbiornikami i SOC zasobników) – ma na celu odbudowę i kontrolę poziomu naładowania zasobników. Danymi wejściowymi dla regulacji godzinowej są: prognozy pogody, grafiki pracy odbiorników krytycznych i niesterowalnych, planowanie obciążenia instalacji, SOC zasobników, cena energii. Na podstawie danych wejściowych modułu prognozowania ustalane są długoterminowe (dobowe) grafiki pracy odbiorników w PME. Przy długoterminowym (dobowym) grafikowaniu uwzględniając prognozę pogody i cenę energii tworzone są dobowe grafiki obciążeń i produkcji energii z OZE. Źródłem regulacyjnym może być również KSE w przypadku korzystnej ceny energii.

Podsumowanie

Opisane metody regulacji w PME nie posiadają ścisłych wartości realizowanych stałych czasowych regulacji, a granice wykorzystanych metod i zasobów zacierają się. W przypadku regulacji milisekundowej i sekundowej proces odbywa się na poziomie przekształtnika z czasami zależnymi od taktowania przekształtnika. W regulacji milisekundowej i sekundowej mogą być wykorzystane zarówno superkondensatory, akumulatory jak i zasobniki kinetyczne. W przypadku regulacji sekundowej może brać jeszcze udział generator spalinowy, ale uruchomiony. Należy przyjąć, że czas załączenia silnika spalinowego, obojętnie jakim paliwem zasilanego, jest nie mniejszy niż 2 sekundy. Sam generator spalinowy lepiej nadaje się do regulacji minutowej, gdzie procesy regulacyjne są wolniejsze, co bezpośrednio wpłynie też na trwałość samego silnika. Poza tym w regulacji minutowej i godzinowej stosowane są głównie procesy planowania i prognozowania, a uruchomiony silnik spalinowy będzie pracował przez kilkadziesiąt minut z zakresie obciążeń bliskich nominalnemu (w obszarze niskiego jednostkowego zużycia paliwa).

Opisane kryteria regulacji energii i mocy w PME semi off-grid wydają się prostymi w realizacji symulacji komputerowej, w rzeczywistości staną się bardzo skomplikowane na poziomie MIREE. Proces doboru mocy urządzeń wytwórczych i zasobników dla PME będzie musiał odbywać się na poziomie IREE stosując techniki optymalizacyjne. Dużą rolę odegra tutaj szybkość transmisji danych, ponieważ procesy regulacyjne na poziomie przekształtnika energoelektronicznego mają stałe czasowe rzędu dziesiątych części milisekundy.

W załącznikach do raportu przedstawiono uproszczone modele (również matematyczne) urządzeń stosowanych w PME.

Literatura

- [Popczyk] Popczyk J.: [Model interaktywnego rynku energii elektrycznej](#). BŻEP, Dział 1.1.06, [www.klaster3x20.pl](#), podstrona CEP
- [Popczyk, Zygmanski, Michalak, Kielan, Fice] Popczyk J., Zygmanski M., Michalak J., Kielan P., Fice M.: [Koncepcja prosumenckiej mikroinstalacji energetycznej \(PME\) wg iLab EPRO](#). BŻEP, Dział 1.2.09, [www.klaster3x20.pl](#), podstrona CEP
- [Fice] Fice M.: [EV jako zasobnik dla EP – koszty magazynowania energii w rzeczywistych zasobnikach](#). BŻEP, Dział 1.3.14, [www.klaster3x20.pl](#), podstrona CEP
- [Fice, Setlak] Fice M., Setlak R.: Modelowanie zasobników energii elektrycznej dla pojazdów elektrycznych i hybrydowych. Zeszyty Problemowe- Maszyny Elektryczne, nr 90/2011
- [Dębowski] Dębowski K.: [Licznik inteligentny EP wg iLab EPRO](#). BŻEP, Dział 1.2.03, [www.klaster3x20.pl](#), podstrona CEP
- [Michalak, Zygmanski 1] J. Michalak, M. Zygmanski: [Przekształtniki energoelektroniczne w EP](#). BŻEP, Dział 1.2.07, [www.klaster3x20.pl](#), podstrona CEP
- [Michalak, Zygmanski 2] J. Michalak, M. Zygmanski: [Charakterystyki obciążenia typowych odbiorników energii w gospodarstwach domowych](#). BŻEP, Dział 1.3.03, [www.klaster3x20.pl](#), podstrona CEP
- [Wójcicki] Wójcicki R.: [Informatyka w EP](#). BŻEP, Dział 1.2.06, [www.klaster3x20.pl](#), podstrona CEP
- [Zygmanski] M. Zygmanski, B. Grzesik: Moduł superkondensatora MOD0350 jako element kondycjonera energii, Śląskie Wiadomości Elektryczne nr 6/2009(87)
- [Jidong, Zhiqing, Yue, Jiaqiang] Jidong W., Zhiqing S., Yue Z., Jiaqiang D.: Optimal Dispatching Model of Smart Home Energy Management System Innovative Smart Grid Technologies, IEEE 2012
- [Kulesz, Fice, Setlak] Kulesz B., Fice M., Setlak R.: Modułowy hybrydowy układ napędowy samochodu. Napędy i Sterowanie, nr 3, 2011
- [Gładyś, Matla] H. Gładyś, R. Matla: Praca elektrowni w systemie elektroenergetycznym, WNT 1999

Załącznik 1. Kategorie urządzeń w PME

Urządzenia wytwórcze dla instalacji PME:

1. Panele fotowoltaiczne (technologie krzemowe, CIGS, CdTe).
2. Kolektory słoneczne (płytkowe, rurowe).
3. Instalacje słoneczne hybrydowe (fotowoltaika + kolektory).
4. Mikrowiatraki (oś pozioma i pionowa).
5. Pompy ciepła (powietrzne, gruntowe z wymiennikiem poziomym lub pionowym, wodne).
6. Generatory i kogeneratory spalinowe (gazowe i biogazowe) (są to źródła uczestniczące w procesie regulacyjnym)

Zasobniki:

1. Zasobniki energii elektrycznej (magazynowanie bezpośrednie- akumulatory, superkondensatory magazynowanie pośrednie- zasobniki kinetyczne, sprężone powietrze, wodór)
2. Zasobniki ciepła (wodne, gruntowe, zmiennofazowe)
3. Zasobniki biogazu (zbiorniki nisko i wysokociśnieniowe)

Odbiorniki:

1. Urządzenia w pełni sterowalne (dla których pełne sterowanie jest bezpieczne), w grupie tych urządzeń znajdują się: zasobniki (również traktowane są jako odbiorniki) i urządzenia AGD/RTV.
2. Urządzenia sterowane warunkowo (przyjęcie warunków bezpiecznego sterowania), w tym: ogrzewanie i klimatyzacja, oświetlenie.
3. Urządzenia bez funkcji sterowania na żądanie (praca wg ustalonego harmonogramu).
4. Internet przedmiotów (IoT)

Infrastruktura smart-grid:

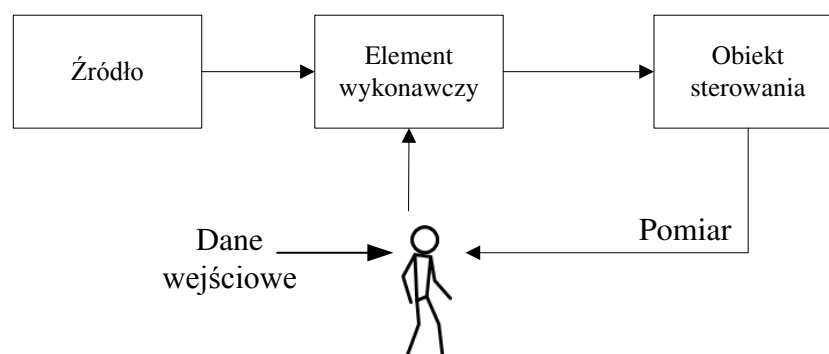
1. Układy licznikowe i pomiarowe (z komunikacją), w tym: liczniki elektroniczne dwukierunkowe, liczniki elektroniczne z funkcją sterowania urządzeniami.
2. Sterowanie urządzeniami (automatyka budynkowa sprzęgnięta bezpośrednio z urządzeniami)- warstwa sterowania (mikrokontrolery).
3. Zarządzanie energią (serwer/komputer PME) – warstwa zarządzania i grafikowania (sterowniki): urządzenia wykonawcze automatyki budynkowej, sterowniki automatyki budynkowej.
4. Systemy komunikacyjne: przewodowe (np. WiFi, Bluetooth, ZeegBee) i bezprzewodowe (np. Ethernet, komunikacja szeregową USB, RS485, CAN).

Urządzenia (źródła, odbiorniki, zasobniki) w PME należy również traktować jako obiekty sterowania/regulacji. Główny podział wynika ze sposobu reakcji na sygnał zewnętrzny (zadany):

1. Obiekt sterowania – definicja: obiekt reagujący na sygnał włącz/wyłącz z nadrzędnego układu sterowania lub manualnie przez użytkownika, może posiadać własny autonomiczny układ regulacji.
2. Obiekt regulacji – definicja: obiekt posiada element wykonawczy reagujący na sygnał zadany i wysyła sygnał sprzężenia zwrotnego, pracuje w pętli sprzężenia zwrotnego z nadrzędnym układem sterowania.

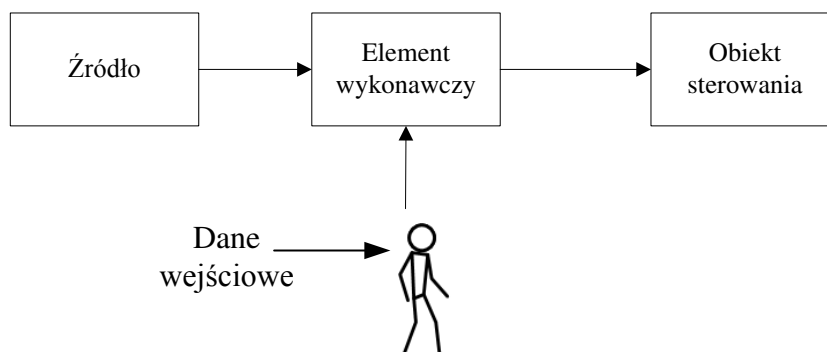
Złączenie 2. Podział urządzeń w PME ze względu na możliwości sterowania/regulacji

Podstawowym jest układ sterowania manualnego na podstawie obserwacji użytkownika (rys. 16). Danymi wejściowymi mogą być parametry fizyczne obiektu lub otoczenia (np. natężenie oświetlenia, ciepło) lub ekonomiczne (cena energii). Elementami wykonawczymi są najczęściej przełączniki (wyłączniki) i zawory (dla ciepła i wody). Obiektem sterowania może być każdy odbiornik/konwerter energii elektrycznej bądź ciepła, a także zasobnik. Taki układ sterowania jest stosowany dla urządzeń sterowanych warunkowo. Obiektem sterowania jest obiekt statyczny, a układ sterowania/regulacji jest w podstawowej konfiguracji ze sprzężeniem zwrotnym (odczyt parametru przez użytkownika, np. natężenie światła).



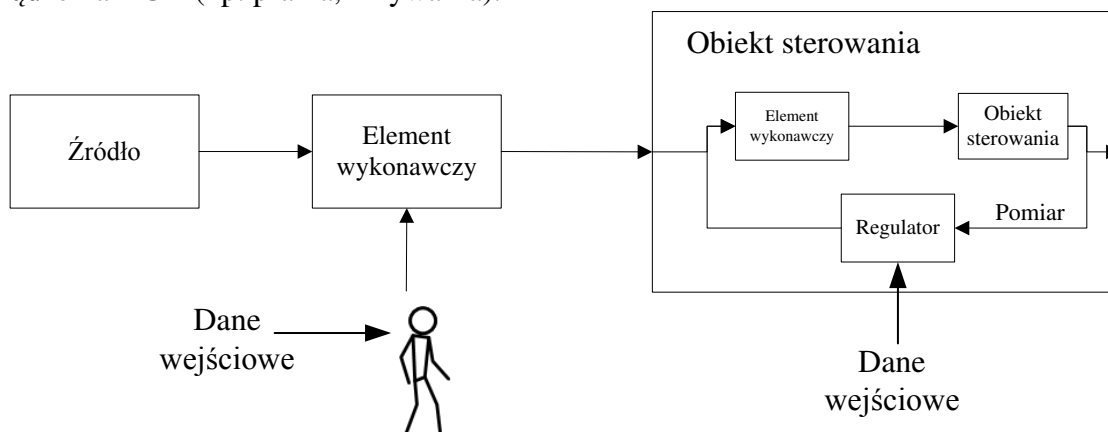
Rys. 16. Podstawowy manualny układ sterowania ze sprzężeniem zwrotnym (opracowanie własne)

Szczególnym przypadkiem jest układ bez sprzężenia zwrotnego (rys. 17), czyli element wykonawczy jest sterowany przez użytkownika manualnie, ale brak jest sprzężenia zwrotnego w postaci obserwacji (odczytu parametru, np. załączenie na określony czas zasobnika ciepła). Danymi wejściowymi może być np. określony czas załączenia i czas pracy urządzenia. W układzie takim użytkownik musi znać charakterystykę obiektu aby przewidzieć działanie i otrzymany efekt. Takie obiekty powinny posiadać zabezpieczenie w postaci bezpiecznika wykrywającego warunki graniczne pracy (np. zawór ciśnieniowy lub termostat).



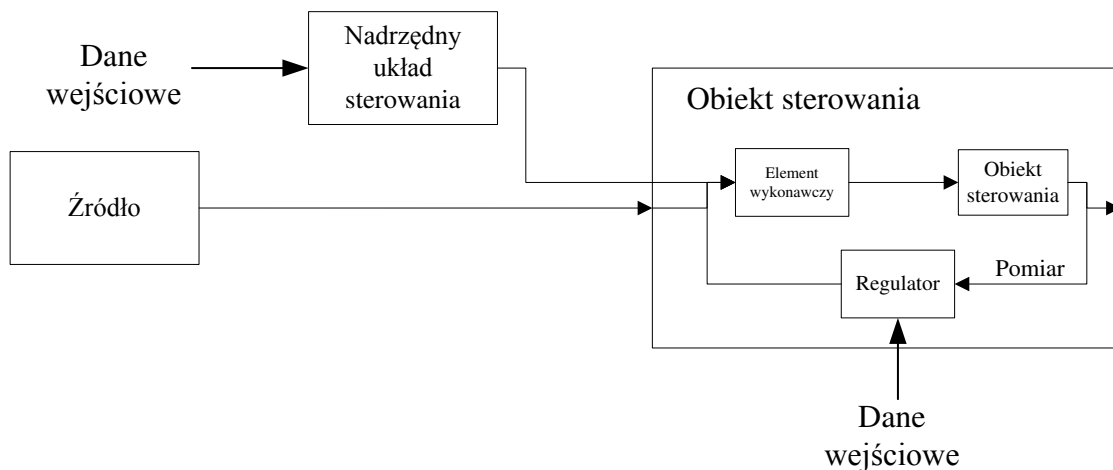
Rys. 17. Podstawowy manualny układ sterowania bez sprzężenia zwrotnego

Rozwinięciem układu manualnego bez sprzężenia zwrotnego dla użytkownika może być układ w którym obiekt sterowania posiada swój własny układ regulacji (dla układu autonomicznego może to być regulator adaptacyjny). Na rys. 18 pokazano taki układ sterowania z załączaniem manualnym. Tego typu układami sterowania charakteryzują się urządzenia AGD (np. pralka, zmywarka).



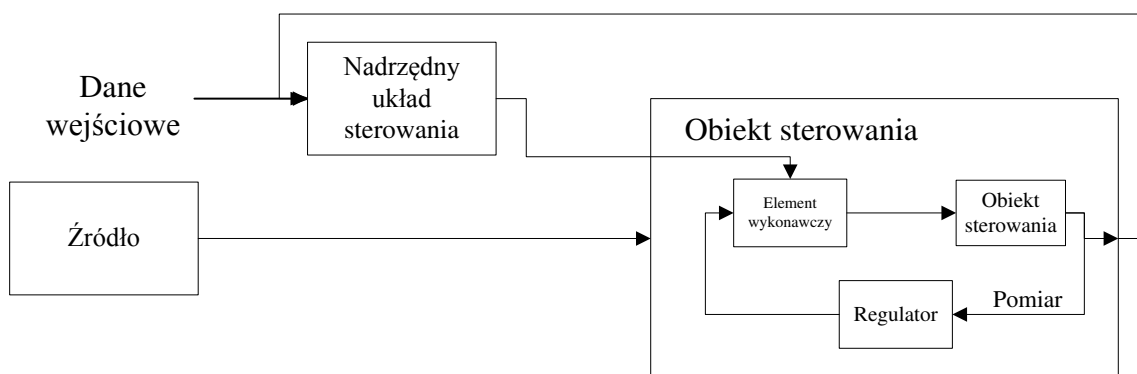
Rys. 18. Manualny układ sterowania bez sprzężenia zwrotnego dla użytkownika z obiektem posiadającym własny układ regulacji

Rozwinięciem układu sterowania jest układ regulacji (wg opisanej wcześniej definicji). W celu integracji obiektu sterowania/regulacji z nadrzędnym układem zarządzania PME sterownik manualny zostaje wyeliminowany i zastąpiony programowalnym sterownikiem nadrzędnym (rys. 19). Poniższy przykład pokazuje układ bez sprzężenia zwrotnego do nadrzędnego układu sterowania. Sterownik nadrzędny może sterować załączaniem urządzeń wg ustalonego harmonogramu.



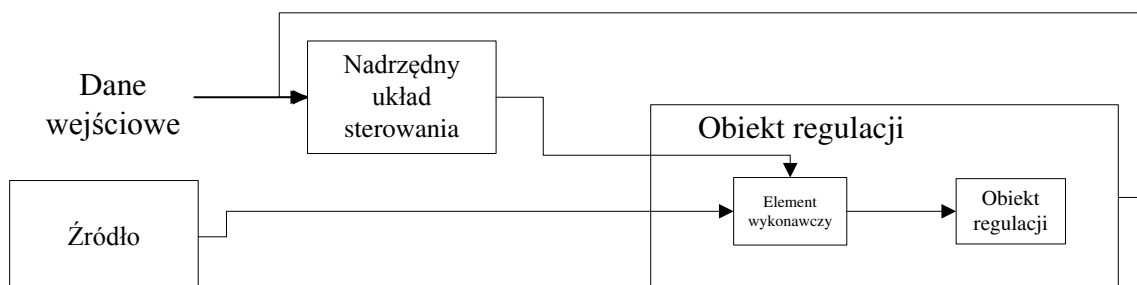
Rys. 19. Obiekt sterowania załączany przez nadrzędny układ sterowania

Jeśli w układzie z rys. 19 doprowadzony zostanie sygnał sprzężenia zwrotnego z obiektu sterowania do nadrzędnego układu sterowania wówczas powstanie pełny obiekt regulacji (rys. 20). W układzie tym nadrzędny układ sterowania realizuje funkcję nadrzędnej pętli regulacji.



Rys. 20. Pełny obiekt regulacji- obiekt sterowania włączony w pętlę sprzężenia zwrotnego z nadrzędnym układem sterowania

Obiekt regulacji może posiadać również w swej strukturze wyłącznie element wykonawczy w postaci wyłącznika (sterowanie włącz/włącz) lub przetwornicy energoelektronicznej. Przy czym sam obiekt regulacji nie posiada w swojej strukturze układu regulacji (rys. 21).



Rys. 21. Obiekt regulacji z jedną pętlą sprzężenia zwrotnego

Załącznik 3. Modele matematyczne kluczowych urządzeń w PME

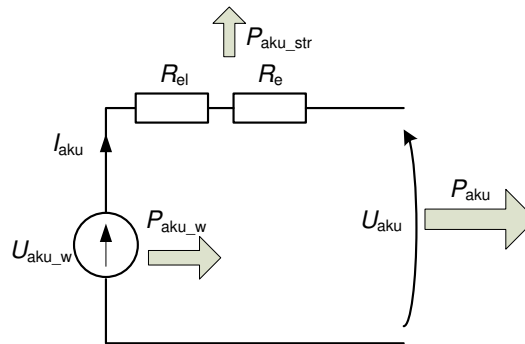
Akumulator. Głównym parametrem energetycznym akumulatora elektrochemicznego jest stan naładowania (SOC). [Fice, R. Setlak] Dla każdego akumulatora można wyprowadzić uogólniony statyczny opis matematyczny stanu naładowania:

$$SOC = \frac{C_w}{C_n} \cdot 100\% = \begin{cases} SOC_0 + \frac{\eta_{ch} \cdot I_{ch} \cdot \Delta t}{C_n} \\ SOC_0 - \frac{I_{dis} \cdot \Delta t}{C_n \cdot \eta_{dis}} \end{cases} \quad (10)$$

gdzie:

C_n – pojemność nominalna (podawana zazwyczaj dla prądu wyładowania 20-to godzinnego),

C_w - pojemność wyładowania (zwykle jako funkcja od prądu wyładowania/ładowania).



Rys. 22. Schemat zastępczy akumulatora do obliczeń energetycznych. (opracowanie własne)

Moc podczas wyładowania:

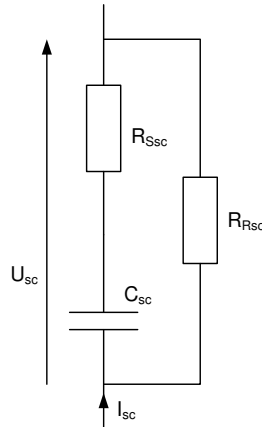
$$P_{aku}(t) = U_{aku_w}(SOC, t) \cdot I_{aku}(t) - I_{aku}(t)^2 \cdot (R_{el}(SOC, t) + R_e(SOC, t)) \quad (11)$$

Moc podczas ładowania:

$$P_{aku}(t) = U_{aku_w}(SOC, t) \cdot I_{aku}(t) + I_{aku}(t)^2 \cdot (R_{el}(SOC, t) + R_e(SOC, t)) \quad (12)$$

Charakterystyki trwałości, pojemności wyładowania i kosztów magazynowania przedstawiono w [Fice].

Superkondensator. Model baterii superkondensatorów oparto na elektrycznym schemacie zastępczym zbudowanym z podstawowych elementów elektrycznych, których wartości można wyznaczyć doświadczalnie. [Zygmanski, Grzesik] Elektryczny schemat zastępczy superkondensatora przedstawiono na rys. 23.



Rys. 23. Schemat zastępczy superkondensatora do obliczeń energetycznych. (opracowanie własne na podstawie [Zygmanowski, Grzesik])

W skład schematu zastępczego wchodzi:

R_{Ssc} – zastępcza rezystancja szeregową superkondensatora,

R_{Rsc} – zastępcza rezystancja równoległa superkondensatora,

C_{sc} – pojemność superkondensatora. Pojemność ta nie ma stałej wartości i można ją opisać jako zmienną w funkcji napięcia:

$$C_{sc}(u_{sc}(t)) = C_{sc0} + \kappa u_{sc}(t) \quad (13)$$

gdzie: C_{sc0} – pojemność superkondensatora przy napięciu równym 0 V, κ – współczynnik opisujący zależność pojemności superkondensatora od napięcia, u_{sc} – napięcie superkondensatora.

Prąd chwilowy superkondensatora:

$$i_{sc}(t) = (C_{sc0} + 2\kappa u_{sc}(t)) \frac{du_{sc}(t)}{dt} \quad (14)$$

Stopień naładowania superkondensatora:

$$k_{sc} = \frac{(C_{sc0} + \frac{4}{3}\kappa U_{sc}) U_{sc}^2}{(C_{sc0} + \frac{4}{3}\kappa U_{scmax}) U_{scmax}^2} \quad (15)$$

Ogniwo PV. Energię produkowaną z elektrowni fotowoltaicznej można wyznaczyć z równania:

$$E_{PV} = \left(t \cdot P_{PV} \cdot k_{pv}(G_{sr}) \cdot \frac{G_{sr}}{G_{STC}} \right) \cdot \frac{1}{P_o} \quad (16)$$

gdzie:

P_{PV} – moc nominalna elektrowni (lub maksymalna),

G_{sr} – średnie natężenie promieniowania słonecznego (pośredniego i bezpośredniego) w analizowanym czasie,

G_{STC} – natężenie promieniowania słonecznego w teście standardowym (zwykle 1000 W/m²),

P_o - moc odniesienia (1000 W),

$k_{pv}(G_{sr})$ – współczynnik efektywności ogniwa PV.

Moc chwilową elektrowni fotowoltaicznej można wyznaczyć z zależności:

$$P_{PV}(t) = P_{STC} \frac{G(t)}{G_{STC}} (1 + k(T(t) - T_{STC})) \quad (17)$$

gdzie:

T – temperatura ogniwa,

T_{STC} – temperatura ogniwa w warunkach testu standardowego (STC- ang.: standard test conditions),

P_{STC} – moc maksymalna ogniwa wg STC

k – współczynnik temperaturowy.

Źródło mikrowiatrowe. Moc generowaną przez generator wiatrowy można zapisać zestawem równań: [Jidong, Zhiqing, Yue, Jiaqiang]

$$P_{mw} = \begin{cases} 0, & v \leq v_{ci}, v \geq v_{co} \\ a \cdot v^2 + b \cdot v + c, & v_{ci} < v < v_r \\ P_r, & v_r < v < v_{co} \end{cases} \quad (18)$$

gdzie:

v_{ci} – prędkość wiatru startowa,

v_{co} – prędkość wiatru maksymalna,

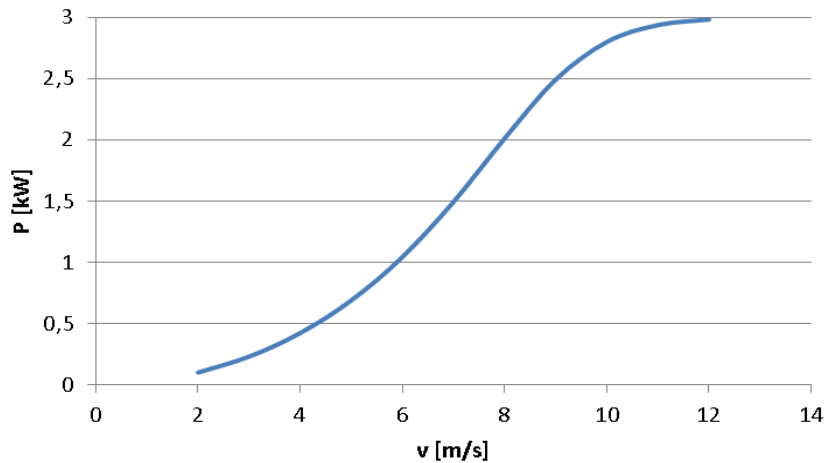
v_r – prędkość wiatru graniczna (stałej mocy),

P_r – moc maksymalna, a, b, c- współczynniki wielomianu

lub nie uwzględniając zakrzywienia charakterystyki przy mocy maksymalnej:

$$P = C_p \cdot \left(\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V_p^3 \right) \quad (19)$$

W obliczeniach przyjęto charakterystykę turbiny wiatrowej o mocy 3 kW pokazaną na rys. 24.



Rys. 24. Charakterystyka generatora wiatrowego o mocy 3 kW (opracowanie własne na podstawie [GLOBEnergia 4/2010])

Przekształtnik energoelektroniczny. Przekształtnik energoelektroniczny zarówno w obwodzie prądu stałego jak i przemiennego jest urządzeniem dostosowującym parametry energii elektrycznej źródła zasilania do odbiornika (proces ten może odbywać się dwukierunkowo). Ogólnie moc wyjściową przekształtnika można zapisać:

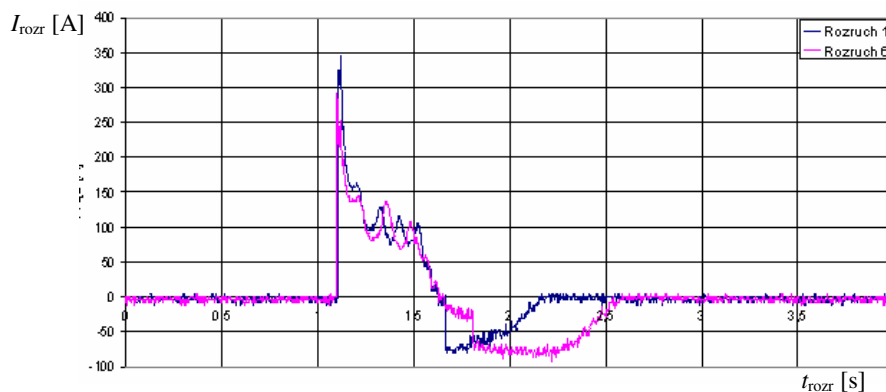
$$P_{wy} = P_{wb} \cdot \eta_{inv}(P_{wb}) \quad (20)$$

gdzie:

P_{we} – moc wejściowa,

$\eta_{inv}(P_{we})$ – sprawność inwertera zależna od mocy wejściowej.

Kogenerator silnikowy. Jest to silnik spalinowy napędzający generator elektryczny, dodatkowo odzyskiwane jest ciepło silnika spalinowego (to zwiększa całkowitą sprawność pozyskiwania energii). Zaletą stosowania takich kogeneratorów jest stosunkowo duża gęstość energii paliwa. Przyjmując sprawność silnika o zapłonie elektrycznym 25% gęstość energii elektrycznej wynosi ok. 3 kWh/kg, a w kogeneracji (sprawność 80%) gęstość energii wynosi ok. 10 kWh/kg.

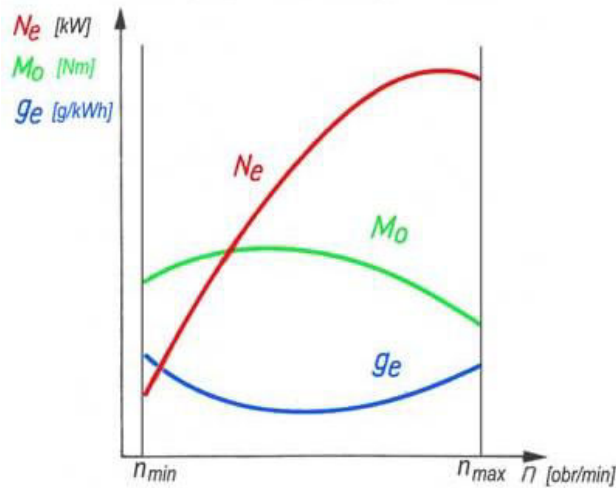


Rys. 25. Przebiegi prądu akumulatora podczas rozruchu silnika spalinowego o zapłonie iskrowym, poj. 1,7 dm³ (na podstawie [Kulesz, Fice, Setlak])

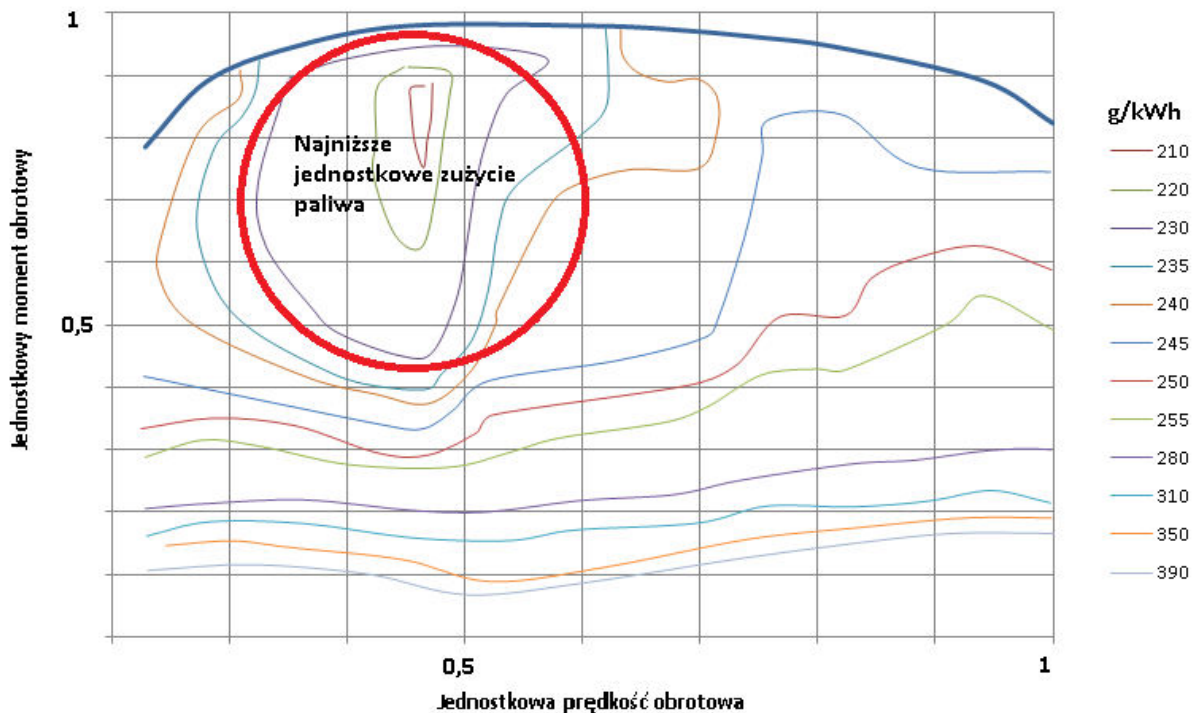
Wadą silnika spalinowego jest brak możliwości wytworzenia samoistnie momentu obrotowego (tak jak silnik elektryczny po włączeniu zasilania). Aby silnik spalinowy rozpoczął pracę trzeba nadać ruch obrotowy wału korbowego (do prędkości ok. 150 obr/min), czyli konieczny jest układ rozruchu. Z tego powodu współczesne silniki spalinowe o zapłonie

iskrowym (tzw. benzynowe) potrzebują na osiągnięcie prędkości biegu jałowego minimum 2 s, natomiast silniki o zapłonie samoczynnym (tzw. diesle) ok. 4 s. (nie uwzględniając czasu potrzebnego na wstępne podgrzanie komory spalania). Czas ten oczywiście będzie różnił się w zależności od typu silnika oraz temperatury silnika. Na rys. 25 pokazano przebieg prądu akumulatora podczas próby rozruchu silnika o zapłonie iskrowym (pojemność silnika 1,7 dm³). Czas pracy rozrusznika wynosi ok. 1,5 s.

Na rys. 26 pokazano charakterystykę zewnętrzną silnika spalinowego (maksymalnie otwarta przepustnica). Moc silnika (oraz prędkość) można regulować w praktycznie pełnym zakresie, ale maksymalną sprawność (jednostkowe zużycie paliwa) silnik uzyska tylko w wąskim obszarze obciążeń i prędkości obrotowych.



Rys. 26. Charakterystyka zewnętrzna silnika spalinowego (maksymalnie otwarta przepustnica), N_e - moc użyteczna, M_o - moment obrotowy, q_c - jednostkowe zużycie paliwa. [www.auto-wiedza.pl]



Rys. 27. Mapa jednostkowego zużycia paliwa silnika spalinowego z zaznaczonym obszarem najwyższej sprawności. (opracowanie własne)

Na rys. 27 pokazano przykładową mapę jednostkowego zużycia paliwa silnika spalinowego, na mapie zaznaczono (czerwonym okręgiem) obszar najwyższej efektywności (najniższego jednostkowego zużycia paliwa).

Zasobnik kinetyczny. Kinetyczny zasobnik energii to wirująca masa bezwładności (walec) wykonany z metalu (pracuje do prędkości 10 000 obr/min) lub kompozytu (pracuje do prędkości 100 000 obr/min). Zasobnik taki aby mógł pracować w PME do bilansowania mocy chwilowej musi być wstępnie rozpędzony do określonej prędkości obrotowej, czyli musi zostać w nim zgromadzona energia kinetyczna. Najczęściej zasobniki współpracują z maszynami elektrycznymi, które są integralną częścią zasobnika. Dzięki zastosowaniu łożyskowania magnetycznego sprawność takiego zasobnika przewyższa 90%.

Energia kinetyczna zasobnika o kształcie jednolitego walca wynosi:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \cdot \omega^2 \quad (21)$$

gdzie:

- m – masa zasobnika,
- r – promień walca,
- ω – prędkość kątowna.

Księga Szkocka

Teza. Przedstawiony w Raporcie dojrzały opis wszechstronnie traktowanych zagadnień regulacji/sterowania w odniesieniu do prosumenckiej mikrionfrastruktury energetycznej jest kolejnym potwierdzeniem tezy, że energetyka prosumencka (EP) jest innowacją przełomową. W tym wypadku szczególne znaczenie ma fakt, że chodzi o zagadnienie fundamentalne z teoretycznego punktu widzenia i o kluczowym znaczeniu praktycznym. Mianowicie, Raport pokazuje dobitnie, po raz pierwszy, jakościową różnicę między systemami regulacji w KSE (ogólnie w SEE) oraz w PME, a podkreśla się tu, że jakościowa różnica stanowi – zawsze – kryterium rozróżnienia innowacji przyrostowych (charakterystycznych dla systemów regulacji w KSE) i innowacji przełomowej. (Właśnie ze względu na wskazaną powyżej różnicę jakościową stanowiącą kryterium innowacji przełomowej Raport został zakwalifikowany w bibliotece BŻEP do systemowego Działu 1.1.06 *Synteza EP*, a nie do węższego Działu 1.1.15 *Technologie dedykowane prosumentom*).

Zadanie do rozwiązania. Raport jest w pewnym zakresie realizacją zadania sformułowanego w Księdze Szkockiej do Raportu [[Michalak, Zygmantowski 1](#)] opisującego układy energoelektroniczne w energetyce EP. Z drugiej strony Raport otwiera drogę do opracowania modelu regulacji/sterowania wyspy wirtualnej (WW) i, jeszcze szerzej, do opracowania takiego modelu dla interaktywnego rynku energii elektrycznej, czyli modeli dla WW i IREE opisanych wstępnie w Raporcie [[Popczyk](#)]. Opis wyspy WW oraz rynku IREE jako obiektów regulacji/sterowania staje się obecnie zadaniem o jednym z najwyższych priorytetów z punktu widzenia przebudowy energetyki.

Jan Popczyk

Datowanie RAPORTU (wersja oryginalna) – 22.04.2015 r.