

Porównanie efektywności energetycznej trakcyjnych napędów z silnikami asynchronicznymi i synchronicznymi

Andrzej Dębowski

Przy poruszaniu tematu efektywności energetycznej należy się chwilę zastanowić nad tym, o czym tu w ogóle będzie mowa. Z fizyki wiadomo, że energia to wielkość fizyczna skalarna (a więc pozbawiona kierunku i zwrotu) charakteryzująca stan pewnego ciała materialnego. Energia może zmieniać swoją postać, ale nie może powstać z niczego ani bez śladu zniknąć. W otaczającym nas świecie materialnym oznacza to przyjęcie postulatu nazywanego zasadą zachowania energii. Energia występuje w tym świecie pod różnymi postaciami w zależności od rodzaju zjawisk fizycznych pojawiających się w zetknięciu ze sobą różnych ciał materialnych, z którymi jest związana – na przykład energia kinetyczna, potencjalna, sprężystości, pola elektrycznego, pola magnetycznego, cieplna, jądrowa itp. Podczas zachodzenia zjawisk fizycznych, a więc takich zmian stanów materii, które podlegają obserwacji i pomiarom, następuje także przechodzenie energii z jednej formy w inną.

W przypadku elektrycznych napędów trakcyjnych podstawową przemianą energetyczną stanowiącą fundament ich działania jest przechodzenie energii elektrycznej w mechaniczną, która umożliwia przemieszczanie się napędzanego pojazdu po powierzchni ziemi. W przypadku zastosowania silników elektrycznych o odpowiedniej budowie i sposobie sterowania ich współpracą z zasilającymi je źródłami energii elektrycznej możliwe jest odwracanie tego procesu i odzyskiwanie od urządzeń mechanicznych połączonych z wałem silnika elektrycznego tej części energii elektrycznej, która nie została bezpowrotnie „rozproszona” na inne formy energii, przede wszystkim na ciepło: czyli podgrzewanie uzwojeń silnika przez płynące przez nie prądy, przemagnesowywanie domen magnetycznych w jego ferromagnetycznym korpusie, rozgrzewanie trących się o siebie części układu przeniesienia napędu, ogrzewanie się powierzchni jezdni i opon w wyniku toczenia się po niej kół pojazdu, sprężanie powietrza przez karoserię poruszającego się pojazdu itd.

Z pojęciem „energii” w fizyce elementarnej (szkolnej) chętnie jest wiązane pojęcie wykonanej „pracy”. Najwięcej sprawę ujmując, można powiedzieć, że „wykonanie jakiejś pracy” zawsze jest wynikiem „ubytku jakiejś energii”. I w takim stwierdzeniu nie ma błędu. W tej elementarnej fizyce pojęcie „pracy” najchętniej jest wiązane ze zjawiskami mechanicznymi, na przykład „praca wykonana przy przesunięciu jakiegoś ciała”. Przy takim opisywaniu procesu przemiany energii oczywiste jest,

że wprowadzane zwykle wtedy pojęcie „sprawności” takiego procesu rozumiane jest jako stosunek tej użytecznej pracy do ubytku energii poniesionego po to, by taki proces mógł zajść. Ponieważ tak wyznaczany stosunek jest liczbą bezwymiarową (gdyż wymiar pracy jest z definicji taki sam jak wymiar towarzyszącego jej ubytku energii), bywa także często wyrażany w procentach. Czyli z takiego punktu widzenia „efektywność energetyczna” danego procesu mogłaby być charakteryzowana jednoznacznie jako „sprawność”, z jaką w tym procesie zachodzi przemiana energii z jednej postaci w inną. Ale inną, to znaczy jaką? A co robić, jeśli tych wynikowych form energii uzyskiwanych na wyjściu procesu jest kilka? Która z nich jest „użyteczna”, a która nie jest? Jeśli popatrzeć na otrzymane w rozdziale piątym wyniki towarzyszące badaniom symulacyjnym dotyczącym przejazdu pomiędzy dwoma przystankami pewnego pojazdu przykładowego, to sprawa określenia tego, co było tą wyżej wspomnianą „użyteczną pracą”, wykonaną przez napęd tego pojazdu, nie jest już tak bardzo oczywista! Czy jest to ta część energii pobranej ze źródła zasilania, która do momentu osiągnięcia celu do tego źródła nie wróciła, czy może tylko ta część z tej części, która w trakcie dążenia do tego samego celu została bezpowrotnie rozproszona, czyli w praktyce zamieniona na ciepło? W każdym z tych dwóch przypadków sprawność wyznaczona zgodnie z wyżej podaną „szkolną” definicją będzie się wyrażała inną liczbą!

To jaki właściwie sens należałoby ostatecznie nadawać pojęciu „efektywności energetycznej” w transporcie?

Ponieważ najczęstszą przyczyną nieporozumień w toczonych współcześnie dyskusjach polityczno-gospodarczych dotyczących racjonalnego użytkowania energii są błędy popełniane przy przyjmowaniu założeń wyjściowych do takich dyskusji, przede wszystkim należy unikać używania pojęcia „pracy użytecznej” do określenia, która forma energii jest korzystna, a która nie. Bez dokładnego wyodrębnienia i opisanie wszystkich okoliczności towarzyszących jej przetwarzaniu posługiwanie się takim pojęciem jako dla wszystkich oczywistym jest mało precyzyjne.

By lepiej zrozumieć, czym jest „efektywność energetyczna” można by spróbować głębiej zastanowić się nad jej definicją podaną na przykład w Ustawie o efektywności energetycznej z 20 maja 2016 roku (Dz.U. z 2016 r., poz. 831, tekst ujednolicony z 25.04.2018 [C17]): Art. 2. pkt 3) „efektywność

energetyczna – stosunek uzyskanej wielkości efektu użytkowego danego obiektu, urządzenia technicznego lub instalacji, w typowych warunkach ich użytkowania lub eksploatacji, do ilości zużycia energii przez ten obiekt, urządzenie techniczne lub instalację, albo w wyniku wykonanej usługi niezbędnej do uzyskania tego efektu” (*podkreślenie autora*). Niestety taka definicja także nie rozwiewa pojawiających się wątpliwości. Bo co dokładnie znaczy sformułowanie: „uzyskana wielkość efektu użytkowego danego obiektu, urządzenia technicznego lub instalacji, w typowych warunkach ich użytkowania lub eksploatacji”? W jakich jednostkach mierzona? Aby móc o „efektywności energetycznej” mówić jako o „stosunku” (czyli wielkości powszechnie rozumianej jako bezwymiarowej), należałoby bowiem tę „uzyskaną wielkość efektu użytkowego” umieć zawsze wyrazić w fizykalnych jednostkach energii – jakiegokolwiek, ale jednak zdecydowanie energii. A nie w jakichś innych formach uzyskiwanych korzyści, ponieważ z prawa zachowania energii wynika, że jej różne formy zawsze są wzajemnie precyzyjnie przeliczalne, a inne korzyści, to już niekoniecznie.

Nieco inaczej pojęcie „efektywności energetycznej” jest definiowane w polskiej normie PN-EN 164247 z 2014 roku poświęconej sprawie audytów energetycznych w przemyśle i gospodarce: „efektywność energetyczna – to ilość zaoszczędzonej energii ustalona poprzez pomiar i/lub oszacowanie zużycia przed wdrożeniem i po wdrożeniu jednego lub więcej środków poprawy efektywności energetycznej, przy jednoczesnym zapewnieniu warunków normalnych dla czynników wpływających na zużycie energii” [C18]. Czyli nie wystarczy tu jedna obserwacja rozważanego procesu opartego na przemianie energii. Do określenia efektywności energetycznej w myśl takiej jej definicji potrzebne jest bowiem wyznaczenie różnicy (bezwzględnej albo jeszcze lepiej względnej, tj. odniesionej do jakiejś wartości bazowej) pomiędzy ilością energii pomierzonej w określony sposób w tym samym miejscu procesu przed i po jego modernizacji. Z taką definicją „efektywności energetycznej” także pojawia się problem w jej zastosowaniu do oceny pod tym kątem przydatności nowego napędu trakcyjnego, gdy nie tylko jego poszczególne komponenty, ale i sam sposób sterowania, a przy okazji także konstrukcja całego pojazdu ulega zasadniczej zmianie. Z jaką bowiem wcześniejszą postacią takiego napędu i pojazdu należałoby to nowe rozwiązanie porównywać?

Poruszony tu problem oceny jakości nowych rozwiązań technicznych w dziedzinie transportu ludzi i towarów pod względem zużycia energii wydaje się być łatwiejszym, jeśli różne warianty takich rozwiązań zostaną przeliczone na pieniądze. Wtedy wydaje się, że to z tych nowych rozwiązań jest lepsze, które pozwala zaspokoić potrzeby przy niższym koszcie. Ale jak wtedy przeliczyć na pieniądze zmiany klimatyczne i ochronę środowiska? Dlatego, pozostawiając politykom i decydom gospodarczym sprawę pamiętania o potrzebie rozwijania „zrównoważonego transportu” (z ang. *sustainable transport*), inżynierowie powinni się raczej skupić na wyborze takich technicznych rozwiązań istniejących problemów, które cechuje jak największa sprawność w sensie fizykalnym. Oznacza to, że zajmując się przetwarzaniem jakiejś energii wyjściowej na inny jej rodzaj, powinni dbać o minimalizację łącznych strat tej

energii ponoszonych przy takim przetwarzaniu. Chwilowa moc tych strat (czyli chwilowa sprawność takiego przetwarzania) nie powinna być najważniejsza, liczyć się powinien ostateczny efekt podsumowany dopiero po osiągnięciu celu.

Jednym z ważnych celów podjętych w tej książce była chęć porównania ze sobą dwóch napędów trakcyjnych – asynchronicznego i synchronicznego. Wiadomo, bo potwierdzono to także licznymi testami praktycznymi, że silnik prądu przemiennego z magnesami trwałymi AC-PMSM przy ciągłej pracy w warunkach zbliżonych do znamionowych ma wyraźnie większą sprawność niż pracujący w tych samych warunkach klatkowy silnik indukcyjny AC-SCIM o takiej samej mocy. Ale czy to oznacza, że taki silnik prądu przemiennego nowej generacji zastosowany w napędzie trakcyjnym i poddany eksploatacji w szerokich granicach zmian prędkości obrotowej i obciążenia także będzie mógł być uważany za „sprawniejszy”, to znaczy pozwoli na takie zaoszczędzenie energii elektrycznej, które bez jego użycia nie byłoby możliwe?

Dalsza treść tego rozdziału stanowi próbę odpowiedzi na to pytanie.

6.1. Porównanie przebiegów strat mocy w uzwojeniach silników elektrycznych przy przejeździe zadanego odcinka trasy

Poniżej, w tabeli 6.1 oraz tabeli 6.2 zostały zebrane na wspólnych wykresach przebiegi strat mocy $dP(t)$ [kW] w uzwojeniach obu porównywanych ze sobą silników: asynchronicznego AC-SCIM i synchronicznego AC-PMSM, obliczone w Excelu po zakończeniu badań symulacyjnych na podstawie przebiegów wybranych wielkości zapamiętanych w osobnych plikach z odstępem czasowym wynoszącym $\Delta t = 0,02$ s według wzoru

$$dP(t) = P_{el}(t) - P_{wew}(t) \quad (6.1)$$

gdzie:

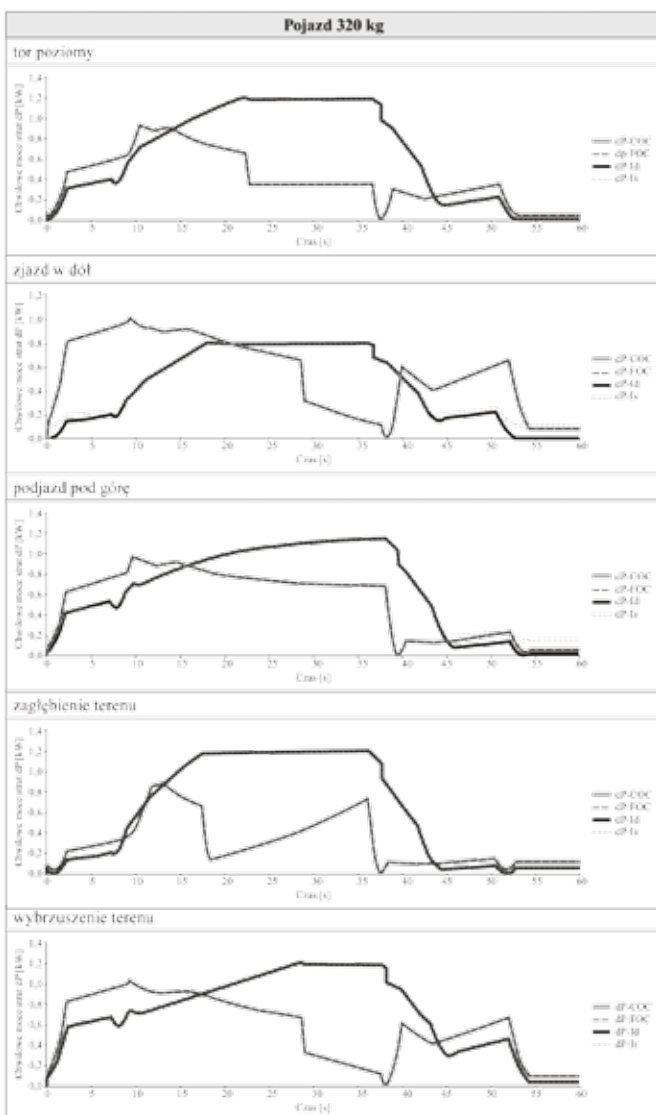
- $P_{el}(t) = 0,001 \cdot (3/2) U_s(t) I_s(t)$ [kW] – chwilowa moc elektryczna obserwowana na zaciskach uzwojeń fazowych stojana, wyrażona w nieruchomym układzie współrzędnych za pomocą iloczynu modułów wirujących wektorów napięcia i prądu stojana,
- $P_{wew}(t) = 0,001 \cdot M_{wew}(t) \Omega_{mech}(t)$ [kW] – chwilowa mechaniczna moc uzyskana wewnątrz silnika (na wyjściu układu elektromagnetycznego jego modelu) w wyniku przetworzenia mocy elektrycznej, wyznaczona jako iloczyn chwilowej wartości momentu wewnętrznego i chwilowej kątowej prędkości obrotowej wału silnika.

Uwaga: W powyższym akapicie, w tabelach 6.1 i 6.2, oraz w dalszych rozważaniach prowadzonych w tym rozdziale, na oznaczenie strat mocy dla uproszczenia przyjęto zapis w postaci „dP” zamiast „deltaP”, używanego wcześniej do oznaczania tej zmiennej na schematach blokowych programów symulacyjnych oraz na wykresach przebiegów prezentowanych w tabelach 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, zamiast zwykle powszechnie stosowanej dużej greckiej litery „delta”. Powodem była niedostępność innych symboli (poza zestawem liter alfabetu łacińskiego) we wszelkich skryptych Scilaba, czyli m.in. w napisach tworzonych w obrębie jego

schematów blokowych czy wykresów. Ponadto dla podkreślenia, że wykresy przebiegów mocy strat w wyżej wymienionych tabelach są wyrażone w kilowatach, a napięcie i prąd są wyrażane w jednostkach podstawowych układu SI, czyli – w woltach i amperach, składniki wzoru (6.1) zawierają mnożnik skalujący 0,001 oddzielony znakiem mnożenia używanym w zapisach wzorów algorytmicznych, czyli „*”.

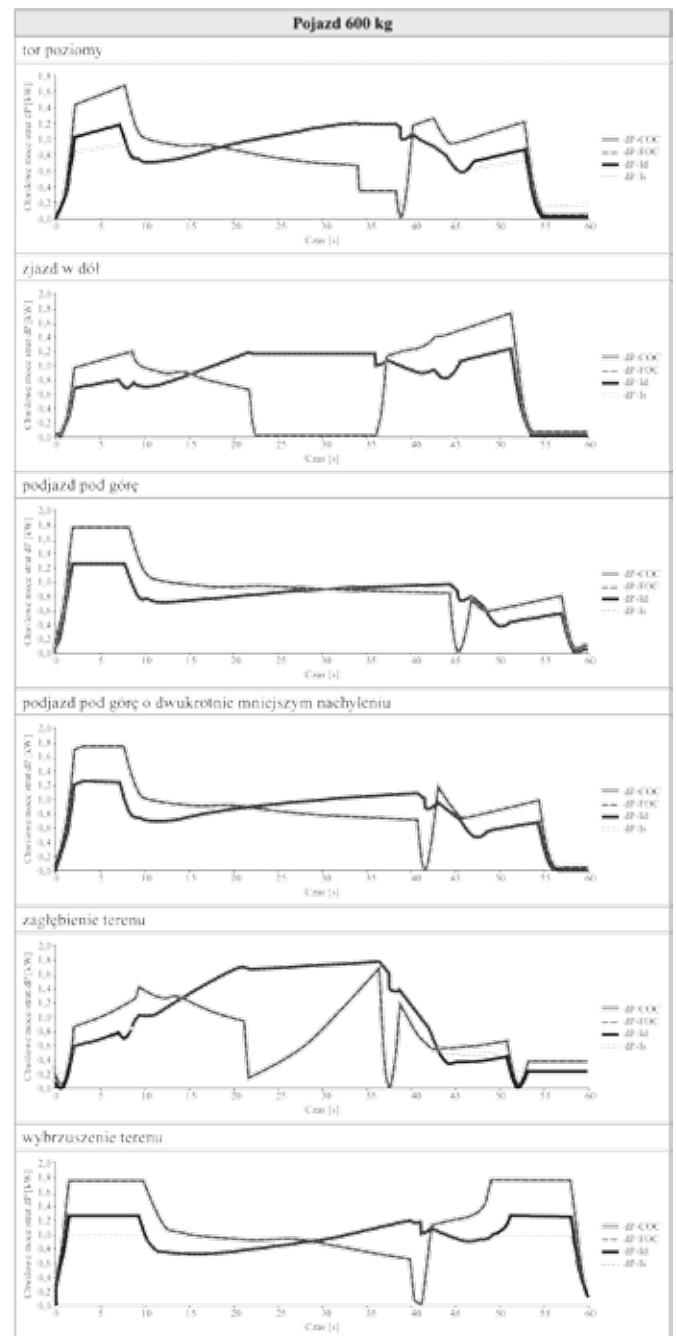
Jak można zauważyć, w każdym z przypadków pokazanych w tych tabelach, wpływ na przebieg wielkości przedstawianych strat ma niemal wyłącznie pionowy profil trasy, po której odbywał się przejazd pojazdu przykładowego. Wybór wariantu wektorowego algorytmu sterowania momentem wewnętrznym (elektromagnetycznym) zaznacza swój niewielki wpływ (w niektórych przypadkach korzystny, a w niektórych niekorzystny)

Tabela 6.1. Porównanie strat mocy w uzwojeniach silników asynchronicznego AC-SCIM i synchronicznego AC-PMSM, napędzających przykładowy pojazd bez obciążenia (tj. o masie 320 kg) przy różnych metodach sterowania i dla różnych profili trasy przejazdu zadanego odcinka drogi



w początkowej oraz końcowej fazie przejazdu, jedynie w przypadku silnika synchronicznego AC-PMSM. Dotyczy to wariantu, gdy jest używany algorytm minimalizacji modułu wektora (amplitudy) prądu stojana charakteryzujący się wymuszeniem w tym silniku przy niewielkich prędkościach pojazdu obecności ujemnej (odmagnesowującej) składowej tego prądu.

Tabela 6.2. Porównanie strat mocy w uzwojeniach silników asynchronicznego AC-SCIM i synchronicznego AC-PMSM, napędzających przykładowy pojazd z obciążeniem (tj. o masie 600 kg) przy różnych metodach sterowania i dla różnych profili trasy przejazdu zadanego odcinka drogi



6.2. Porównanie ogólnej sprawności energetycznej przy przejeździe zadanego odcinka trasy

Poniżej zestawiono wyniki obliczeń również dokonanych w Excelu po zakończeniu badań symulacyjnych polegających na scałkowaniu obliczonych poprzednio według wzoru (6.1) mocy strat energii $dP(t)$ [kW] rozpraszanej w rezystancji uzwojeń stojana w czasie trwania danego przejazdu. Całkowania dokonano metodą Eulera z krokiem równym odstępowi czasowemu $\Delta t = 0,02$ s, z jakim zapamiętywane były w plikach wybrane wielkości badanego modelu

$$\Delta E = \int_0^{t_k} dP(t) dt \quad (6.2)$$

Łączne straty energii elektrycznej w uzwojeniach maszyn przy przejeździe pojazdu bez obciążenia (masa 320 kg):

• tor poziomy

$t_k = 53,1$ s	(chwila zakończenia przejazdu)	
$E_{\text{opor}} = 113,89$ kW	(energia zużyta na pokonanie oporów ruchu pojazdu)	
$\Delta E_{\text{IM-COC}}$	23,51 kW	20,6%
$\Delta E_{\text{IM-FOC}}$	23,51 kW	20,6% (silnik AC-SCIM jest lepszy)
$\Delta E_{\text{PMSM-Id}}$	38,78 kW	34,1%
$\Delta E_{\text{PMSM-Is}}$	38,78 kW	34,1%

• zjazd w dół

$t_k = 52,7$ s	(chwila zakończenia przejazdu)	
$E_{\text{opor}} = 113,88$ kW	(energia zużyta na pokonanie oporów ruchu pojazdu)	
$\Delta E_{\text{IM-COC}}$	32,34 kW	28,4%
$\Delta E_{\text{IM-FOC}}$	32,35 kW	28,4%
$\Delta E_{\text{PMSM-Id}}$	26,43 kW	23,2% (silnik AC-PMSM jest lepszy)
$\Delta E_{\text{PMSM-Is}}$	27,40 kW	24,1%

• podjazd pod górę

$t_k = 54,1$ s	(chwila zakończenia przejazdu)	
$E_{\text{opor}} = 113,90$ kW	(energia zużyta na pokonanie oporów ruchu pojazdu)	
$\Delta E_{\text{IM-COC}}$	30,98 kW	27,2%
$\Delta E_{\text{IM-FOC}}$	30,98 kW	27,2% (silnik AC-SCIM jest lepszy)
$\Delta E_{\text{PMSM-Id}}$	38,58 kW	33,9%
$\Delta E_{\text{PMSM-Is}}$	39,86 kW	35,0%

• zagłębienie terenu

$t_k = 52,6$ s	(chwila zakończenia przejazdu)	
$E_{\text{opor}} = 113,88$ kW	(energia zużyta na pokonanie oporów ruchu pojazdu)	
$\Delta E_{\text{IM-COC}}$	17,28 kW	15,2%
$\Delta E_{\text{IM-FOC}}$	17,29 kW	15,2% (silnik AC-SCIM jest lepszy)
$\Delta E_{\text{PMSM-Id}}$	36,36 kW	31,9%
$\Delta E_{\text{PMSM-Is}}$	36,36 kW	31,9%

• wyrzucenie terenu

$t_k = 54,2$ s	(chwila zakończenia przejazdu)	
$E_{\text{opor}} = 113,90$ kW	(energia zużyta na pokonanie oporów ruchu pojazdu)	
$\Delta E_{\text{IM-COC}}$	32,69 kW	28,7%
$\Delta E_{\text{IM-FOC}}$	32,70 kW	28,7% (silnik AC-SCIM jest lepszy)
$\Delta E_{\text{PMSM-Id}}$	42,38 kW	37,2%
$\Delta E_{\text{PMSM-Is}}$	42,38 kW	37,2%

Łączne straty energii elektrycznej w uzwojeniach maszyn przy przejeździe pojazdu bez obciążenia (masa 600 kg):

• tor poziomy

$t_k = 54,7$ s	(chwila zakończenia przejazdu)	
$E_{\text{opor}} = 113,91$ kW	(energia zużyta na pokonanie oporów ruchu pojazdu)	
$\Delta E_{\text{IM-COC}}$	49,04 kW	43,1%
$\Delta E_{\text{IM-FOC}}$	49,04 kW	43,1%
$\Delta E_{\text{PMSM-Id}}$	49,37 kW	43,3%
$\Delta E_{\text{PMSM-Is}}$	47,70 kW	41,9% (silnik AC-PMSM jest nieco lepszy)

• zjazd w dół

$t_k = 53,4$ s	(chwila zakończenia przejazdu)	
$E_{\text{opor}} = 113,90$ kW	(energia zużyta na pokonanie oporów ruchu pojazdu)	
$\Delta E_{\text{IM-COC}}$	41,44 kW	36,4%
$\Delta E_{\text{IM-FOC}}$	41,44 kW	36,4% (silnik AC-SCIM jest lepszy)
$\Delta E_{\text{PMSM-Id}}$	50,36 kW	44,2%
$\Delta E_{\text{PMSM-Is}}$	50,36 kW	44,2%

• podjazd pod górę

$t_k = 58,9$ s	(chwila zakończenia przejazdu)	
$E_{\text{opor}} = 113,91$ kW	(energia zużyta na pokonanie oporów ruchu pojazdu)	
$\Delta E_{\text{IM-COC}}$	54,48 kW	47,8%
$\Delta E_{\text{IM-FOC}}$	54,48 kW	47,8%
$\Delta E_{\text{PMSM-Id}}$	46,97 kW	41,2%
$\Delta E_{\text{PMSM-Is}}$	46,97 kW	41,2% (silnik AC-PMSM jest lepszy)

• podjazd pod górę o dwukrotnie mniejszym nachyleniu

$t_k = 56,5$ s	(chwila zakończenia przejazdu)	
$E_{\text{opor}} = 113,91$ kW	(energia zużyta na pokonanie oporów ruchu pojazdu)	
$\Delta E_{\text{IM-COC}}$	51,85 kW	45,5%
$\Delta E_{\text{IM-FOC}}$	51,84 kW	45,5%
$\Delta E_{\text{PMSM-Id}}$	48,17 kW	42,3%
$\Delta E_{\text{PMSM-Is}}$	48,17 kW	42,3% (silnik AC-PMSM jest nieco lepszy)

• zagłębienie terenu

$t_k = 53,0$ s	(chwila zakończenia przejazdu)	
$E_{\text{opor}} = 113,89$ kW	(energia zużyta na pokonanie oporów ruchu pojazdu)	
$\Delta E_{\text{IM-COC}}$	30,31 kW	26,6%
$\Delta E_{\text{IM-FOC}}$	30,32 kW	26,6% (silnik AC-SCIM jest lepszy)
$\Delta E_{\text{PMSM-Id}}$	40,94 kW	35,9%
$\Delta E_{\text{PMSM-Is}}$	41,92 kW	36,8%

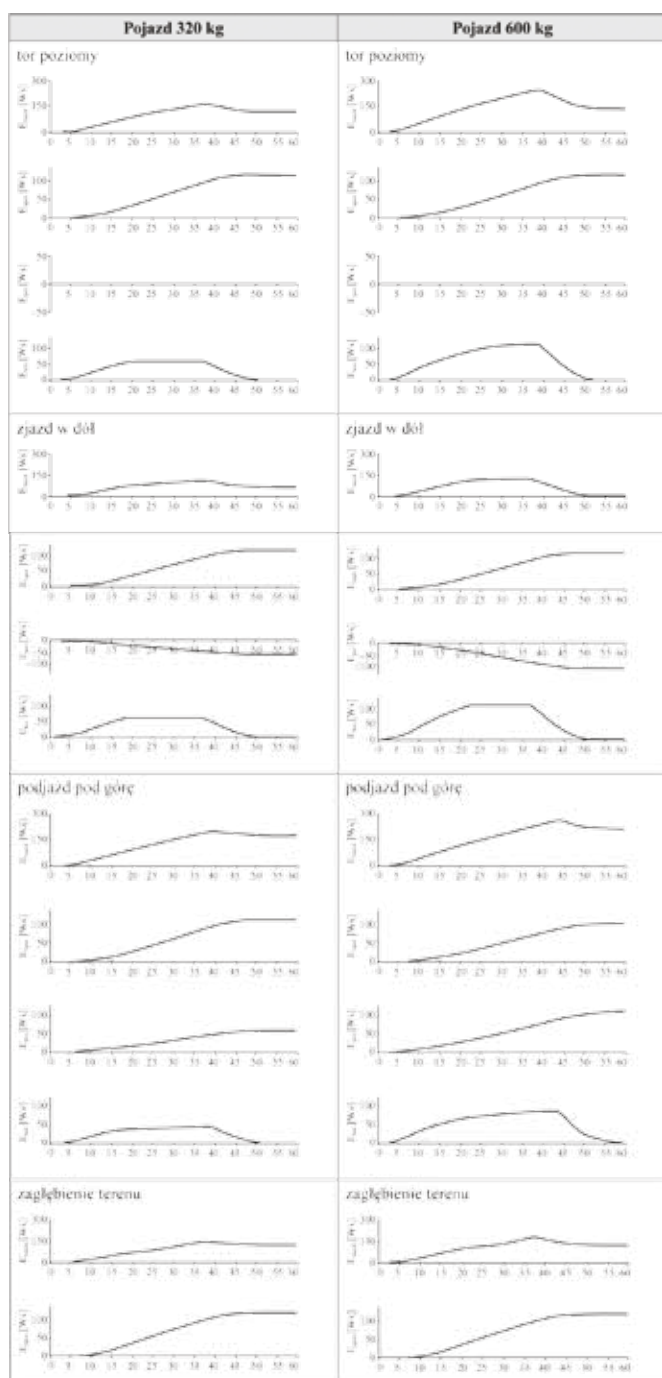
• wyrzucenie terenu

$t_k = 59,7$ s	(chwila zakończenia przejazdu)	
$E_{\text{opor}} = 113,92$ kW	(energia zużyta na pokonanie oporów ruchu pojazdu)	
$\Delta E_{\text{IM-COC}}$	70,34 kW	61,7%
$\Delta E_{\text{IM-FOC}}$	70,35 kW	61,8%
$\Delta E_{\text{PMSM-Id}}$	58,51 kW	51,4%
$\Delta E_{\text{PMSM-Is}}$	54,04 kW	47,4% (silnik AC-PMSM jest lepszy)

6.3. Wpływ różnych możliwości magazynowania energii na ogólną sprawność energetyczną elektrycznego napędu pojazdu przykładowego

Z przeprowadzonych badań wynika, że ocena napędu elektrycznego zainstalowanego na pojeździe przykładowym pod względem zużycia energii lub jej wymiany ze źródłem zasilającym praktycznie zależy wyłącznie od granicznych charakterystyk mechanicznych przyjmowanych osobno dla rozpędzania

Tabela 6.3. Przebiegi zużywania energii w czasie pokonywania przez pojazd przykładowy z rzeczywistym napędem odniesienia trasy o tej samej długości, ale o różnych profilach: bez obciążenia (320 kg) – lewa kolumna, z obciążeniem (600 kg) – prawa kolumna



pojazdu i dla jego hamowania (rys. 5.4). Nie zależy natomiast od właściwości dynamicznych takiego napędu – a więc od rodzaju użytego silnika, czy też od wyboru algorytmu sterowania jego stanem elektromagnetycznym (co decyduje wyłącznie o szybkości i dokładności odtwarzania w silniku zadawanego momentu wewnętrznego). Dlatego przy omawianiu współpracy napędu przykładowego pojazdu ze źródłem zasilającym go w energię elektryczną wystarczy ograniczyć się wyłącznie do analizy przebiegów wyznaczonych na drodze badań symulacyjnych modelu pojazdu przykładowego z rzeczywistym napędem odniesienia omówionym w punkcie 5.2.1 – rysunek 5.3 i 5.4 (opis tego modelu) oraz w podrozdziale 5.3 – prawe kolumny tabel 5.1, 5.2 (przebiegi otrzymane dla różnych profili pionowych trasy przejazdu o tej samej długości).

W tabeli 6.3 dla ułatwienia porównania ponownie zestawiono obok siebie przebiegi czterech rodzajów energii związanych z danym przejazdem – w lewej kolumnie pojazdu nieobciążonego, a w prawej pojazdu przejeżdżającego tę samą trasę z obciążeniem. Wykresy czasowe dotyczące bieżącej wartości danego rodzaju energii obserwowanej w trakcie przejazdu pojazdu z rzeczywistym napędem odniesienia oznaczono w tej tabeli jako: E_{mech} – energia mechaniczna mierzona na wale silnika, E_{opor} – energia zużywana na pokonanie oporów ruchu przyjętych dla badanego pojazdu jako znana funkcja jego prędkości, E_{pot} – energia potencjalna pojazdu o danej masie, związana z ciążeniem ziemskim, wyznaczana w funkcji aktualnej wysokości położenia pojazdu względem poziomu położenia początkowego punktu trasy, E_{kin} – energia kinetyczna aktualnie magazynowana w pojeździe o danej masie poruszającym się z daną prędkością chwilową.

W tabeli 6.4 przedstawiono ostateczny bilans zużycia energii mechanicznej $E_{mech}(t)$ przetwarzanej na bieżąco w „czystej” formie przez układ elektromagnetyczny silnika z energii elektrycznej dostarczonej do napędu pojazdu z idealnego źródła. Prędkość obrotowa wału silnika pozostaje cały czas dodatnia, gdyż pojazd rozpędza się monotonicznie do prędkości bliskiej 70 km/h, a potem monotonicznie hamuje do prędkości bliskiej zeru. Jeśli znak chwilowej wartości momentu wewnętrznego (napędowego w zastępczym napędzie odniesienia) w jakiegokolwiek chwili pozostaje dodatni, to związana z nim moc mechaniczna jest dodatnia, co oznacza wytwarzanie energii mechanicznej z energii elektrycznej pochodzącej z idealnego źródła i monotoniczny wzrost jej wartości. Jeśli zaś znak tego momentu zmienia się na ujemny, to związana z nim moc mechaniczna jest ujemna, co oznacza odbieranie energii mechanicznej z wału silnika od otoczenia pojazdu i przetwarzanie jej na energię elektryczną przekazywaną do idealnego źródła, czyli wartość energii mechanicznej maleje. W badanym modelu pojazdu przykładowego różnica między wartością maksymalną tak określonej energii mechanicznej osiągniętą w jakiejś chwili pośredniej w czasie każdego przejazdu a jej wartością końcową oznacza korzyść energetyczną, polegającą na odzyskaniu przez idealne źródło energii elektrycznej zasilającej napęd rozważanego modelu pojazdu określonej części energii „zainwestowanej” przez to źródło w przemieszczenie się tego pojazdu po trasie o danym profilu.

Jak wynika z tabeli 6.4, ilości „odzyskanej” energii są dosyć mocno zróżnicowane i zależą nie tylko od samej masy pojazdu, ale i od profilu trasy przejazdu. Żeby dokonać oceny efektywności energetycznej rozważanego zastępczego napędu elektrycznego o granicznych charakterystykach mechanicznych zdefiniowanych w postaci wykresów podanych na rysunku 5.4, przyjęto maksymalną wartość energii kinetycznej związanej z pojazdem rozpędzającym się za każdym razem do prędkości bliskiej 70 km/h jako bazową wartość energii. W tabeli 6.4, obok wartości absolutnych „odzyskanej” energii (wyrażonej w [kW]) podano wartość względną (w procentach) takiej uzyskanej „oszczędności”. Fakt, że w przypadku obciążonego pojazdu te „oszczędności” przekroczyły liczbę 100%, nie jest żadnym błędem. Te dwa przypadki, w których ten efekt wystąpił, dotyczyły po prostu sytuacji, gdy ciężki pojazd zjeżdżał po pochyłości w dół (albo od początku trasy, albo ze wzniesienia, na które uprzednio wjechał) i wówczas napęd elektryczny zdołał nie tylko odzyskać całość energii kinetycznej ukrytej w poruszającej się masie pojazdu, ale i niewielką nadwyżkę energii potencjalnej, której podstawowa część została zużyta na pokonanie oporów ruchu.

Najmniej energii elektrycznej „zainwestowanej” w docelowe przemieszczenie się pojazdu odzyskuje się wówczas, gdy ten pojazd przejeżdża przez zagłębienie terenu. Można to łatwo zrozumieć przyglądając się przebiegom wartości poszczególnych rodzajów energii związanych z ruchem pojazdu podanym w tabeli 6.3. Energia potencjalna przejściowo obniżającego swój środek ciężkości pojazdu (ujemna) kompensuje dodatnią energię kinetyczną i w wyniku tego napęd elektryczny w czasie hamowania nie ma już czego odzyskiwać. Z tego samego powodu przy pokonywaniu wzniesienia przez pojazd procentowy „odzysk” energii jest z kolei największy, gdyż energia potencjalna podnoszącego przejściowo swój środek ciężkości pojazdu (dodatnia) sumuje się z energią kinetyczną, a więc pojawia się nadwyżka energii do odzyskania.

Na zakończenie tych rozważań warto uświadomić sobie, jakiej pojemności akumulator energii mógłby być użyty w przypadku rozważanego tu pojazdu przykładowego napędzanego silnikiem elektrycznym o mocy 5 kW, by umożliwić korzystanie z takiego pojazdu, gdyby zawiodło zasilanie jego napędu z zewnętrznego źródła energii elektrycznej. Taki akumulator byłby wtedy umieszczony na pojeździe i okresowo doładowywany. Korzystanie z możliwości odzyskiwania choćby niewielkiej części energii elektrycznej w czasie hamowania elektrodynamicznego przyczyniłoby się wtedy do zwiększenia liczby przejeżdżanych „przystanków” pomiędzy kolejnymi doładowaniami.

Znany powszechnie wszystkim użytkownikom tradycyjnych samochodów akumulator kwasowo-ołowiowy o pojemności 64 Ah (czyli amperogodzin) teoretycznie może przyjąć ilość energii równą $12 \text{ V} \cdot 64 \text{ Ah} = 12 \cdot 64 \text{ VA} \cdot 3600 \text{ s} = 2\,765 \text{ kW}$. A więc przyjęcie z tabeli 6.4 maksymalnej ilości energii, która była potrzebna w najgorszym przypadku do zapewnienia przejazdu pojazdu przykładowego (600 kg masy całkowitej oraz przejazd trasy pod górę), czyli 266 kW, pozwala na oszacowanie, że taki akumulator umieszczony na rozważanym, w pełni obciążonym pojeździe, powinien wystarczyć na przejechanie

Tabela 6.4. Zestawienie wartości odzyskanej energii przy hamowaniu elektrodynamicznym pojazdu przykładowego bez obciążenia (320 kg) lub z obciążeniem (600 kg), z rzeczywistym napędem odniesienia (elektrycznym) po rozpędzeniu go do prędkości 70 km/h i przejechaniu aż do zatrzymania się trasy o długości 700 m o różnych profilach

Pojazd 320 kg: $(E_{\text{kin}})_{\text{max}} = 60,47 \text{ kW}$			Pojazd 600 kg: $(E_{\text{kin}})_{\text{max}} = 113,37 \text{ kW}$		
$(E_{\text{mech}})_{\text{max}}$	$(E_{\text{mech}})_{\text{tk}}$	$(\Delta E)_{\text{odzysk}}$	$(E_{\text{mech}})_{\text{max}}$	$(E_{\text{mech}})_{\text{tk}}$	$(\Delta E)_{\text{odzysk}}$
[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]
tor poziomy			tor poziomy		
156,82	117,77	39,05 (64,6%)	204,06	113,59	90,47 (79,8%)
zjazd w dół			zjazd w dół		
112,21	60,96	51,25 (84,8%)	122,92	7,98	114,94 (101,4%)
podjazd pod górę			podjazd pod górę		
198,48	171,93	26,55 (43,9%)	265,24	212,40	52,84 (46,6%)
zagłębienie terenu			zagłębienie terenu		
139,89	119,14	20,75 (34,3%)	172,89	117,81	55,08 (48,6%)
wybrzuszenie terenu			wybrzuszenie terenu		
173,49	115,11	58,38 (96,5%)	234,47	105,36	129,11 (113,9%)

bez ładowania $2765/266 \approx 10$ przystanków o najgorszym profilu łączącej je trasy (czyli składającej się z samych podjazdów pod górę). Ponieważ z kolei zjazd w dół jest najkorzystniejszy energetycznie, więc można dokonać połączenia takich tras w pary (najłatwiejsza z najtrudniejszą – nie muszą wprawdzie występować kolejno po sobie, ale trudno sobie wyobrazić, że jakikolwiek tramwaj, czy inny pojazd komunikacji miejskiej jeździ po ulicach miasta wyłącznie w dół lub wyłącznie pod górę!). Wtedy liczba możliwych przystanków do przejechania bez ładowania akumulatora zwiększy się do: $2765 \cdot 2 / (266 + 123) \approx 14$. A jeśli możliwe będzie odzyskiwanie energii, to liczba przystanków możliwych do przejechania znowu wzrośnie i wyniesie: $2765 \cdot 2 / \{(266 + 123) - (212 + 8)\} \approx 32$, czyli ponad trzykrotnie więcej w stosunku do najgorszego początkowego oszacowania!

Widać tu wyraźnie, że tego rodzaju modernizacja napędów elektrycznych w środkach transportu eksploatowanych na regularnych trasach bardzo się opłaca. Oczywiście tak duży efekt wprowadzenia odzyskiwania (czyli rekuperacji) energii w rzeczywistości byłby trudny do uzyskania, gdyż w powyższych, bardzo uproszczonych, wstępnych oszacowaniach pominięto wiele istotnych ograniczeń związanych z warunkami, które muszą być spełnione, by zwrotny przepływ energii elektrycznej przez zastosowanie w danym konkretnym napędzie elektrycznym był w ogóle możliwy. Tak więc realne wartości możliwej do odzyskania energii $(\Delta E)_{\text{odzysk}}$ podane w tabeli 6.4 powinny zostać obniżone. Ale i tak efekt wykorzystania rekuperacji energii w pojazdach z napędami elektrycznymi jest tak znaczący, że warto je upowszechniać, choćby na początek w postaci napędów hybrydowych.