

ELECTRIC DRIVE IN AGRICULTURAL MACHINES – PROSPECTS OF THE APPLICATION

Summary

The attempts to construct electrically driven vehicles and mobile machines have been recorded from the 19th century. Electric tractors and electrically driven agricultural machinery, have not, however, wider application in practice. The emergence of the new opportunities offered by electronics, which include electronic processing of alternating current, as well increased requirements for environmental protection, calls for a wider introduction of electric drives in agricultural machinery. This article describes new directions of development of these drives, and gives examples of some work to achieve this goal.

Key words: *agricultural machines; tractors; electric propulsions; electrical energy; development aid*

NAPĘDY ELEKTRYCZNE W MASZYNACH ROLNICZYCH – PERSPEKTYWY ZASTOSOWANIA

Streszczenie

Próby konstruowania pojazdów i maszyn mobilnych o napędzie elektrycznym notuje się od XIX wieku. Elektryczne ciągniki i napędzane elektrycznie maszyny polowe nie znalazły jednak, jak dotąd, szerszego zastosowania w praktyce. W związku z pojawieniem się nowych możliwości, jakie daje elektronika, do których należy elektroniczne przetwarzanie prądu przemiennego oraz wzrostem wymagań związanych z ochroną środowiska naturalnego, postuluje się szersze wprowadzenie napędów elektrycznych w maszynach rolniczych. W artykule opisano nowe kierunki rozwoju tych napędów i podano przykłady prac zmierzających do osiągnięcia tego celu.

Słowa kluczowe: *maszyny rolnicze; ciągniki; napędy elektryczne; energia elektryczna; tendencje rozwojowe*

1. Wprowadzenie

Elektryczny napęd maszyn stosowany jest od bardzo dawna. Pierwsze samochody elektryczne skonstruowano jeszcze w XIX wieku i mogły już one przekraczać prędkość nawet 100 km/h (1899 r.). W XX wieku elektryczny napęd maszyn wyparł całkowicie stosowany dawniej w fabrykach mechaniczny układ przeniesienia napędu od maszyny parowej. Zdecydowało o tym wiele czynników, z których chyba najważniejsze było łatwe przeniesienie energii na znaczne odległości stosunkowo niewielkim kosztem, co pozwoliło niejako oddzielić maszyny od źródła energii i ułatwiło sterowanie takim napędem. W starym systemie maszyny fabryczne były napędzane od długiego wału pędnego biegnącego przez hale fabryczne, i były z nim związane. Elastyczne kable elektryczne, które zastąpiły wały pędne, pozwalały na elastyczne zagospodarowanie przestrzeni i łatwy rozdział mocy na wiele dowolnie w przestrzeni skonfigurowanych odbiorników. W mobilnych agregatach maszynowych, stosowanych w rolnictwie, transmisja mocy pomiędzy różne odbiorniki przypomina nieco ten stary fabryczny system z jednym silnikiem ciepłym centralnym. Centralny silnik spalinowy napędza często długi i rozgałęziony mechaniczny układ transmisji energii, od którego jest ona pobierana przez poszczególne odbiorniki mocy użytkowej na agregacie maszynowym. W drugiej połowie XX wieku szeroko wprowadzono do mobilnych maszyn roboczych (rolniczych, budowlanych, górniczych) napęd hydrostatyczny, który stanowi pewną analogię do napędu elektrycznego i ma podobną elastyczność przy konfiguracji złożonych układów napędowych. Główną zaletą napędu hydrostatycznego jest stosunkowo łatwy sposób napędzania

elementów o ruchu liniowym. Hydrauliczne silniki liniowe, zwane siłownikami lub cylindrami hydraulicznymi, są w tym względzie bezkonkurencyjne, zwłaszcza przy znacznych siłach rzędu setek tysięcy N. Wyparły one stosowane dawniej w tych miejscach napędy linowe z wielokrążkami, czy mało sprawne napędy śrubowe. Napędy hydrostatyczne pozwalają ponadto na stosunkowo łatwe uzyskiwanie bezstopniowych przełożeń, są też łatwe do kontroli i sterowania za pomocą różnego rodzaju zaworów i rozdzielaczy. Ponadto, ze względu na hermetyczną budowę i zastosowanie oleju smarowego jako czynnika roboczego, napędy hydrostatyczne są trwałe i niezawodne. Jedną z częstszych przyczyn awarii tego rodzaju napędów jest utrata szczelności, co prowadzi często do zanieczyszczenia środowiska naturalnego olejami. Są one też znacznie kosztowniejsze od napędów elektrycznych i mechanicznych. Wadą napędów hydrostatycznych jest też ich niewysoka sprawność oraz trudność napędzania wielu silników z jednego źródła, co zmusza konstruktorów do stosowania w złożonych układach napędowych wielu pomp.

Napędy elektryczne w maszynach roboczych pełniły dotychczas rolę drugorzędną i ograniczały się do odbiorników małej mocy zasilanych z akumulatora, takich jak rozrusznik, wycieraczki czy wentylatory. Coraz częściej wykorzystuje się też silniki elektryczne w serwomechanizmach do wspomaganie układów kierowniczych czy hamulcowych. Z reguły nie wykorzystywano dotąd silników elektrycznych do trakcji czy napędzania zespołów roboczych o znacznym zapotrzebowaniu mocy.

Każda maszyna mobilna jest pojazdem, stąd też, elektryczny napęd mobilnych maszyn rolniczych można rozważać w kontekście elektrycznego napędu pojazdów. Trakcja

elektryczna jest od dawna stosowana w takich pojazdach jak tramwaje, koleje czy trolejbusy. We wszystkich tych przypadkach pojazdy te czerpią energię elektryczną z sieci trakcyjnej zasilanej ze stacjonarnych elektrowni. W maszynach rolniczych takiej możliwości nie ma, stąd napęd elektryczny układu jezdnego nie był tu jak dotąd praktycznie stosowany, głównie z braku wydajnego źródła energii elektrycznej. Po II wojnie światowej w USA i ZSRR podjęto próby konstruowania ciągników elektrycznych zasilanych z rozwijanego kabla, jednak z powodu trudności z tym zasilaniem koncepcję tę zarzucono [14]. Jednakże, w ostatnich latach mówi się coraz częściej o szerszym wprowadzeniu napędu elektrycznego do maszyn rolniczych. Zdecydowały o tym dwa czynniki: nacisk społeczny na wprowadzanie „czystych” technologii, do których należy napęd elektryczny i pojawienie się nowych możliwości zastosowania tych napędów – w związku z nowymi możliwościami elektroniki wysokich energii.

2. Silniki do napędu elektrycznego maszyn mobilnych

Podstawowym rodzajem silnika elektrycznego, stosowanym do napędu maszyn stacjonarnych jest trójfazowy, asynchroniczny silnik indukcyjny prądu przemiennego. Silnik ten nie posiada komutatora, stąd jest prosty, trwały i niezawodny. Jego zasadniczą wadą jest stała w przybliżeniu prędkość obrotowa, uzależniona od częstotliwości prądu zasilającego, dlatego nie nadawał się on wcześniej do napędu układów jezdnych oraz innych elementów maszyn, których prędkość obrotową należało płynnie zmieniać. W tych zastosowaniach sprawdzały się komutatorowe silniki prądu stałego, których istotnym słabym ogniwem jest mechaniczny komutator szczotkowy. Ze względu na korzystny stosunek masy do mocy oraz możliwość łatwej regulacji prędkości obrotowej, w małych maszynach, a szczególnie narzędziach ręcznych stosuje się powszechnie komutatorowe silniki szeregowo, zasilane prądem przemiennym. Komutator szczotkowy ma jednak niską trwałość, co jest przyczyną licznych awarii i obniża sprawność tego rodzaju silnika. Upowszechnienie układów elektronicznych, pozwalających wytwarzać z prądu stałego prąd przemienny o dowolnej częstotliwości i napięciu, zrewolucjonizowało napędy elektryczne. Skonstruowano tzw. „bezsztotkowe” silniki prądu stałego (BLDC), w których komutator mechaniczny zastąpiono specjalnym układem elektronicznym, zaś uzwojenia komutowane znajdują się na stojanie. Tzw. przetwornice częstotliwości umożliwiły zastosowanie niezawodnych silników asynchronicznych w układach trakcyjnych i innych układach napędowych, wymagających bezstopniowej regulacji prędkości obrotowej w szerokich granicach. Tutaj prędkość obrotową silnika, która wynika z częstotliwości prądu zasilającego, zmienia się poprzez zmianę tejże częstotliwości. Jeszcze większe korzyści daje nowoczesna elektronika w przypadku maszyn synchronicznych z magnesami trwałymi (PMSM). Jak wiadomo, zwykły silnik synchroniczny zasilany ze źródła o stałej częstotliwości nie wytwarza momentu rozruchowego, co komplikuje jego rozruch.

W przypadku, gdy zaawansowana elektronika pozwala już w pełni panować nad częstotliwością i fazą wielofazowego prądu przemiennego dużej mocy, zasilającego silniki, pojawiła się możliwość dostosowania tej częstotliwości a także fazy prądu zasilającego do aktualnych obrotów wirnika, dzięki czemu silnik zasilany z takiego źródła dyspo-

nuje wysokim momentem rozruchowym i nigdy nie wypada z synchronizmu. Synchronizacją fazy prądu zasilającego z fazą obrotu wirnika zajmują się tu bardzo zaawansowane układy automatyki. Zwykle na wirniku montuje się w tym celu enkodery absolutne czy czujniki kąтового położenia wirnika, dostarczające układowi sterowania informację o aktualnym położeniu wirnika. Są też znane „bezcujnikowe” sposoby określania pozycji kątowej wirnika maszyny na podstawie obliczeniowej [11, 12].

To wszystko zmieniło podejście do napędu elektrycznego maszyn mobilnych. Nowe możliwości napędu elektrycznego generują nowe jego zastosowania. Obecnie, w układach napędowych pojazdów elektrycznych powszechnie już stosuje się silniki BLDC oraz PMSM. Tego rodzaju silniki znajdują też zastosowanie w serwonapędach, wypierając stosowane tam wcześniej silniki krokowe.

3. Źródła energii elektrycznej na maszynach rolniczych

W przypadku maszyn mobilnych, do których należą maszyny rolnicze rozważane są dwa warianty napędu elektrycznego:

- W pierwszym, źródłem energii elektrycznej jest agregat prądotwórczy zamontowany na maszynie, składający się z tradycyjnego silnika Diesla i prądnicy, z której energia elektryczna byłaby dystrybuowana do poszczególnych odbiorników energii na maszynie.
- W drugim wariantcie rozważa się całkowite wyeliminowanie silnika spalinowego i zastąpienie go akumulatorami lub innymi źródłami energii elektrycznej, takimi jak superkondensatory lub ogniwa paliwowe.

Oczywiście, najbardziej radykalne rozwiązanie drugie, eliminuje wszystkie uciążliwości środowiskowe w miejscu eksploatacji maszyny, związane z silnikiem spalinowym, takie jak zanieczyszczenie powietrza i hałas. W aspekcie propagandowym, w związku z silną presją społeczną środowisk „ekologów” rozwiązanie takie jest bardzo atrakcyjne, stąd producenci ciągników i maszyn rolniczych często opracowują eksperymentalne konstrukcje takich maszyn [9, 15]. Szanse ich wprowadzenia na rynek w obecnej sytuacji ekonomicznej, bez instrumentów prawnych, wymuszających na użytkownikach ich zakup, są małe. Zasadniczą przyczyną niestosowania tego rodzaju napędu w maszynach roboczych jest bowiem natury ekonomicznej. Akumulator ołowiuowy najczęściej stosowany w pojazdach, ma masę jednostkową (na przykładzie akumulatora Centra 45 Ah) ok. 24 kg/kWh. Kilogram paliwa płynnego zawiera zaś ok. 46 MJ energii cieplnej, co przy sprawności ogólnej silnika 50% daje ok. 23 MJ/kg energii mechanicznej. Daje to masę jednostkową na poziomie 0,15 kg/kWh. Akumulator gromadzący energię równoważną 50 kg ciekłego paliwa węglowodorowego ważyłby zatem ok. 8000 kg. Nie zmienia tej dysproporcji w sposób zasadniczy fakt istnienia akumulatorów zasadowych o większej wydajności energetycznej, które jednak są znacznie droższe i bardziej kłopotliwe w użytkowaniu. Ładowanie akumulatorów trwa też znacznie dłużej niż napełnianie zbiorników paliwem.

Stosunkowo nową technologią są ogniwa paliwowe. Ciągnik zasilany energią z ogniw paliwowych, oznaczony jako NH2, rozwija od kilku lat firma New Holland [15]. Wadą ogniw paliwowych jest konieczność stosowania do ich zasilania czystego wodoru bądź bardzo czystego paliwa będącego jego źródłem. Czysty wodór sprawia zaś ogromne kłopoty w magazynowaniu, ze względu na jego niszczący

wpływ na materiały zbiorników, konieczność przechowywania pod wysokim ciśnieniem lub w niskiej temperaturze, bliskiej absolutnego zera. Pojemność zbiorników tego ciągnika wystarcza zaledwie na trzy godziny pracy. Produkcja ogniw paliwowych znacznej wydajności wymaga stosowania skomplikowanych technologii oraz surowców występujących w skorupie ziemskiej w minimalnych ilościach, co czyni ten sposób jeszcze bardziej nieekonomicznym. Dodatkowo, wodoru nie można kupić w stacji paliw, rolnik musi go sam wytwarzać, co wymaga dodatkowych instalacji. Pewną nadzieję dają tu superkondensatory, czyli kondensatory o znacznej pojemności. Nie mogą one jednak zmagazynować dostatecznej ilości energii na wielogodzinną pracę silnika znacznej mocy, zaś korzystanie z tej energii jest utrudnione ze względu na zależność napięcia od stopnia rozładowania kondensatora. Obecnie są one stosowane w tzw. napędach hybrydowych, jako źródło energii do pokonania incydentalnych zwiększonych oporów pracy, np. podczas rozpędzania maszyny. Można stąd wysnuć wniosek, że najbardziej ekonomicznym sposobem magazynowania energii w maszynie mobilnej jest jej magazynowanie w ciekłym paliwie węglowodorowym.

W tej sytuacji najbardziej realne w najbliższej przyszłości wydaje się zastosowanie w maszynach rolniczych napędu, w którym zasadniczym źródłem energii mechanicznej nadal będzie silnik spalinowy Diesla, jednak tę energię w całości lub większej części zamieni się na energię elektryczną wykorzystywaną do napędu zespołów roboczych maszyn [9]. Tego rodzaju napęd zwykle się nazywa napędem hybrydowym, jakkolwiek nazwa ta jest niejednoznaczna i można pod nią podciągnąć także napędy hydrostatyczne. W napędzie hybrydowym, elementy akumulujące energię elektryczną pełnią rolę pomocniczą, głównym źródłem energii jest paliwo chemiczne, z którego pozyskuje się energię mechaniczną w tradycyjnym, tłokowym silniku spalinowym. Spośród wszystkich silników cieplnych, możliwych do zastosowania w pojeździe, ten typ silnika najlepiej nadaje się do napędu maszyn mobilnych. W takim układzie system elektryczny pełni właściwie rolę systemu przeniesienia napędu, którą w układach mechanicznych pełnią wały i pasy transmisyjne oraz przekładnie.

Kluczowym elementem takiego systemu jest prądnica. Prawie każdy pojazd jest obecnie wyposażony w prądnicę do ładowania akumulatorów, zasilania oświetlenia itp. Obecnie jest to zwykle prądnica prądu przemiennego (alternator). Prąd przemienny wytwarzany przez alternator jest następnie za pomocą prostowników elektronicznych zamieniany na standardowy prąd stały o napięciu 12 lub 24 V. Moc obecnie stosowanych na ciągnikach prądnic jest niewielka, rzędu 1-5 kW. Napięcie 12 V też nie jest odpowiednie do transmisji znacznych mocy. W praktyce stosuje się regułę, że im wyższa moc transmitowana i dalsze odległości transmisji, tym wyższe napięcie jest stosowane do transmisji energii elektrycznej. Dla mocy na poziomie 20-100 kW napięcie 12 V jest zbyt niskie. Niskie napięcie powoduje bowiem większe straty energii w kablach transmisyjnych oraz większe zużycie materiałów na kable (miedź). Przy prądzie przemiennym najodpowiedniejsze wydaje się być napięcie 400 V, stosowane w dystrybucji energii z sieci energetycznej, do której przystosowane są powszechnie produkowane podzespoły. W przypadku stosowania prądu stałego preferowane napięcie wynosi 600 V. Takie napięcie stosuje się w trakcji tramwajowej.

Zamiana produkowanego przez prądnicę prądu prze-

miennego na prąd stały ma tę zaletę, że prąd stały można z kolei zamienić z powrotem na prąd przemienny, ale o dowolnej częstotliwości i amplitudzie, a także uzupełniać szczytowe zapotrzebowanie mocy z akumulatorów. Powszechnie spotykane w praktyce przetwornice częstotliwości, stosowane do regulacji prędkości obrotowej silników prądu przemiennego, zawierają w jednej obudowie układy prostownicze i falowniki, zmieniające ponownie prąd stały w sinusoidalny prąd przemienny. Należy w tym miejscu zauważyć, że prądnice wysokiej mocy mogą być umieszczone na ciągniku rolniczym w różnych miejscach. Jednym z najlepszych rozwiązań jest umieszczenie prądnicy w miejscu, w którym znajduje się koło zamachowe silnika. Skądinąd rozwiązanie to jest od dawna znane z silników motocyklowych, w kołach zamachowych, w których umieszczono cewki do układu zapłonowego i do zasilania instalacji elektrycznej. To miejsce dlatego jest najlepsze, że ciężki wirnik prądnicy z magnesami trwałymi może pełnić jednocześnie funkcje koła zamachowego, zaś odwracalność funkcji maszyn elektrycznych daje tu możliwość wykorzystania prądnicy jako rozrusznika silnika spalinowego. Rozwiązanie takie jest jednak możliwe tylko w ciągnikach nowej konstrukcji [2, 6]. Istnieje też możliwość wykorzystania tradycyjnego ciągnika do napędu maszyn elektrycznych po zamontowaniu na ciągniku oddzielnej prądnicy napędzanej z WOM. Możliwe są tu dwa warianty lokalizacji zespołu prądowłórczego:

- na tylnym TUZ pomiędzy ciągnikiem a zawieszoną na nim maszyną [10],
- na przednim TUZ [13].

Każde z tych rozwiązań ma swoje zalety i wady.

Wykorzystanie przedniego TUZ nie utrudnia agregowania maszyn z ciągnikiem, zwykle przystosowanych do pracy na tylnym TUZ. Nie każdy ciągnik jest jednak w taki układ zawieszenia wyposażony. Montaż zespołu prądowłórczego na tylnym TUZ pozwala na wykorzystanie praktycznie każdego ciągnika rolniczego do napędu maszyn elektrycznych, jednak poważnie utrudnia agregowanie maszyn z tym ciągnikiem. Zespół prądowłórczy przeznaczony do współpracy z WOM ciągnika rolniczego, oprócz prądnicy i jej osprzętu, zawiera zwykle przekładnię mechaniczną, tzw. multiplikator, poprzez który napędzany jest rotor prądnicy. Wynika to z faktu, że siła elektromotoryczna indukowana przez magnesy trwałe jest proporcjonalna do prędkości obwodowej wirnika, zaś natężenie prądu, jaki może przepływać przez uzwojenie jest ograniczone przekrojem tegoż uzwojenia, a to z kolei jest ograniczone wymiarami maszyny.

Ponieważ, jak powszechnie wiadomo, moc prądu elektrycznego jest z definicji iloczynem napięcia i natężenia prądu, moc tę – przy zadanych wymiarach maszyny elektrycznej – można podwyższyć jedynie kosztem podwyższenia jej prędkości obrotowej lub zwiększenia siły pola magnetycznego. Duży postęp w maszynach elektrycznych z magnesami trwałymi (PMSM) osiągnięto w ostatnich dekadach dzięki wprowadzeniu nowych (neodym) materiałów na silne magnesy trwałe. Są one jednak jeszcze bardzo kosztowne. Podwyższanie gęstości prądu w uzwojeniu stojana prowadzi do zwiększonych strat energii i wymaga intensywnego chłodzenia prądnicy. Przegrzanie maszyny elektrycznej może prowadzić do uszkodzenia izolacji, a w przypadku maszyn PMSM także do rozmagnesowania wirnika. Najczęściej przyjmowana nominalna prędkość obrotowa prądnicy wynosi 3000 obr/ min, co przy jednej parze biegunów daje możliwość produkowania prądu o częstotliwości 50 Hz. Przy prędkości obrotowej WOM 540 obr/min wy-

maga to zastosowania przekładni zębatej o przełożeniu ok. 5:1 lub 3:1 w przy przypadku WOM o prędkości 1000 obr/min.

Wyższe przełożenia, jakkolwiek korzystne z punktu widzenia zmniejszenia gabarytów samej prądnicy, prowadzą do wzrostu stopnia złożoności samego multiplikatora a także zmniejsza się w ten sposób trwałość łożysk prądnicy i zwiększa obciążenie jej wirnika siłami odśrodkowymi. Prawidłowy dobór obrotów wirnika prądnicy wymaga matematycznej optymalizacji. W tym kontekście widać jeszcze jedną zaletę ułożenia prądnicy w kole zamachowym szybkoobrotowego silnika spalinowego.

Duże ciężarowe wskaźniki mocy prądnic dla zastosowań mobilnych, wymagają wydajnego układu chłodzenia. Stosowane w małych maszynach chłodzenie powietrzne, przy mocy powyżej 20 kW nie jest już wystarczające dla pracy ciągłej i zachodzi konieczność chłodzenia prądnicy czynnikiem ciekłym, np. wodą, co komplikuje dodatkowo konstrukcję zespołu prądotwórczego. Zmieszczenie tego zespołu na tylnym TUZ pomiędzy ciągnikiem a maszyną zawieszoną jest szczególnie trudne.

Dodatковым problemem, z jakim muszą sobie poradzić konstruktorzy napędów elektrycznych w maszynach mobilnych jest niestałość napięcia produkowanego przez maszynę elektryczną, wynikająca ze zmian prędkości obrotowej silnika ciągnika. Z problemem tym można sobie poradzić na dwa sposoby:

- Przy pełnym przekazywaniu mocy na drodze elektrycznej (hybryda szeregową) można napędzać prądnicę ze stałą prędkością obrotową, optymalną z punktu widzenia sprawności silnika spalinowego.
- Przy napędzie mieszanym, gdzie zachodzi konieczność zmiany prędkości obrotowej silnika ciągnika, stałość napięcia wytwarzanego przez prądnicę gwarantują układy elektroniczne przetworników napięciowych.

4. Przykłady zastosowań

Poniżej przedstawiono kilka przykładów elektrycznego napędu maszyn rolniczych zaprezentowanych na konferen-

cji LANDTECHNIK 2011 w Hanowerze.

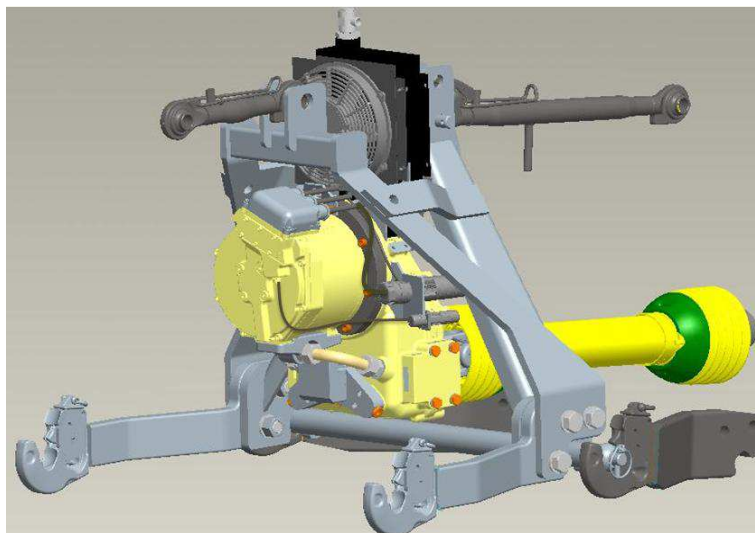
Zespoły prądotwórcze.

Na rys. 1 przedstawiono rozwiązanie opracowane na Wiedeńskim Uniwersytecie Technologicznym [10]. Jest to zespół prądotwórczy, zamontowany na przednim TUZ ciągnika i napędzany bezpośrednio z WOM o prędkości obrotowej 1000 obr/min. Dzięki temu konstruktorzy uniknęli stosowania mechanicznej przekładni zwiększającej obroty. Prądnica PMSM jest chłodzona powietrzem i ma moc ok. 15 kW, przy nominalnych obrotach, z możliwością czterokrotnego przeciążenia. Układ elektroniczny, składający się z prostownika i falownika, pozwala na wytwarzanie napięcia przemiennego o zadanej wysokości i częstotliwości, niezależnie od prędkości obrotowej wirnika prądnicy. Prądnica może służyć zarówno do napędu silników asynchronicznych, jak i silników PMSM, a także jako awaryjne źródło standardowego prądu trójfazowego 400 V.

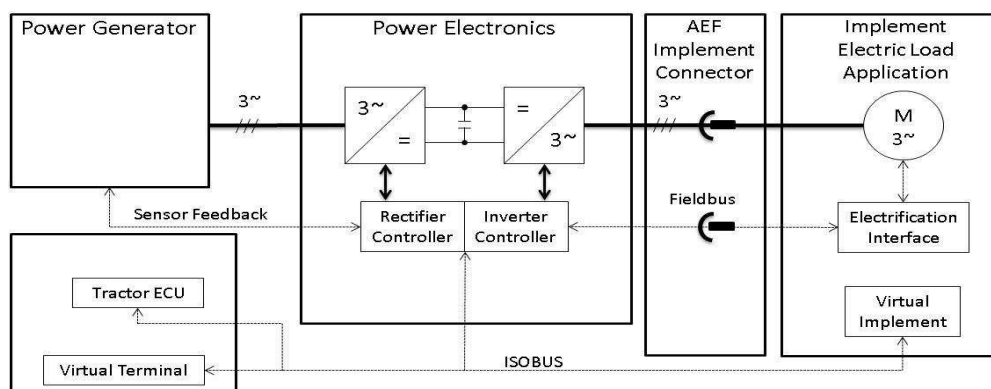
Inne rozwiązanie prądnicy na TUZ rozwijane jest przez firmę Walterscheid, znanego producenta wałów przegubowo-teleskopowych [13]. Tutaj prądnica napędzana przez przekładnię zębatą jest chłodzona olejem stosowanym jako smar w przekładni i jest zamontowana pomiędzy maszyną a ciągnikiem, na tylnym TUZ. W tym celu konstruktorzy tego zespołu opracowali specjalną ramę pośrednią, w której zamontowany jest zespół prądotwórczy. Widok tego zespołu przedstawiono na rys. 2. Uproszczony schemat instalacji elektronicznej występującej w tym typie napędu elektrycznego przedstawiono na rys. 3. Przemienne trójfazowe prąd elektryczny wytwarzany przez prądnicę jest prostowany i wygładzany kondensatorem. Uzyskany w ten sposób prąd stały o napięciu 600V zasila tranzystorowy falownik, wytwarzający prąd przemienny trójfazowy o regulowanej za pomocą mikrosterownika częstotliwości i amplitudzie. Stąd, przez złącza i kable, jest on dostarczany do silników. Cały system jest kontrolowany przez lokalną sieć komputerową, opartą na magistrali szeregowej ISO BUS, stosowanej w technice rolniczej.



Rys. 1. Zespół prądotwórczy na przedni TUZ skonstruowany przez zespół konstruktorów TU w Wiedniu [10]
Fig. 1. Generating set for front three-point linkage constructed by a team of machinists at TU in Vienna [10]



Rys. 2. Zespół prądotwórczy na tylny TUZ skonstruowany przez firmę Walterscheid [13]
 Fig. 2. Generating set for rear three-point linkage constructed by company Walterscheid [13]



Rys. 3. Schemat elektrycznego układu napędu maszyn rolniczych według [13]
 Fig. 3. Scheme of the electrical drive system of agricultural machines by [13]

Napędzane osie maszyn zaczepianych i samobieżnych.

Obecnie do współpracy z ciężkimi maszynami zaczepianymi trzeba stosować bardzo ciężkie ciągniki, co powoduje, że w polu zwiększa się ugniatanie gleby, a na drodze taki agregat jest mało ekonomiczny. Zdolności trakcyjne agregatu można znacznie podnieść stosując osie napędzane przyczep. Do tej pory stosowano tu napęd hydrauliczny lub mechaniczny z WOM. Te rozwiązania nie są jednak optymalne, ponieważ trudno kontrolować takie napędy i mogą one być mało bezpieczne. Napęd elektryczny ma tu wiele zalet, spośród których należy wymienić:

- łatwy rozdział mocy na wiele osi, a także poszczególne koła,
- dużą przeciążalność silników elektrycznych,
- łatwość kontrolowania i sterowania napędem za pomocą systemów elektronicznych,
- wysoką sprawność.

Możliwość znacznego, krótkotrwałego przeciążenia silników elektrycznych jest szczególnie cenna w napędzie układów jezdnych, które charakteryzują się dużym zapotrzebowaniem mocy w krótkich okresach rozpędzania maszyny i pokonywania lokalnych przeszkód.

Podobnie jak w napędzie hydrostatycznym, istnieją dwie odmiany rozwiązania napędu osi:

- oddzielny silnik dla każdego koła,
- wspólny silnik dla całej osi i mechanizm różnicowy.

Zastosowanie oddzielnych silników dla każdego koła ma wiele zalet. Kontrolowane różnicowanie prędkości obrotowej kół, możliwe w tym rodzaju napędu, dzięki indywidualnemu hamowaniu kół i zróżnicowaniu prędkości obrotowej silników napędowych, podwyższa zdolności trakcyjne i manewrowe maszyny. Eliminuje się w ten sposób mechanizmy różnicowe z powiększonym momentem tarcia i blokadą, a także potrzebę stosowania indywidualnych hamulców kół.

Dodatkową zaletą napędu elektrycznego jest możliwość eliminacji dodatkowego balastowania ciągnika w przypadku przystosowania go do współpracy z maszynami wymagającymi zwiększonej siły uciążu. Napęd osi maszyny przyczepianej eliminuje konieczność podwyższania siły uciążu ciągnika i tym samym zmniejsza masę agregatu, a przez to i ugniatanie gleby oraz zużycie paliwa.

Istnieją dwie strategie wykorzystania dodatkowych, napędzanych osi agregatu maszynowego:

- napęd osi jest trwale wyłączony i włączany jedynie w razie zaistnienia takiej potrzeby,
- napęd osi jest trwale włączony.

W tym drugim przypadku zachodzi konieczność dokładnego kontrolowania mocy przekazywanej na oś napę-

dzaną w zależności od warunków pracy agregatu. W tym celu konieczny jest pomiar prędkości absolutnej maszyny, aby przez pomiar prędkości obrotowej poszczególnych kół można było ustalić wartości ich poślizgu. Komputer sterujący oblicza wartość mocy przekazywanej na poszczególne koła biorąc pod uwagę zadaną prędkość jazdy, poślizgi kół oraz zadany promień skrętu agregatu. Dla demonstracji możliwości elektrycznego napędu osi przyczepy inżynierowie z firmy J. DEERE zbudowali eksperymentalny agregat, składający się z ciągnika wyposażonego w agregat prądowczy na przedni TUZ o mocy 70 kW i naczepy dwuosiowej z jedną osią napędzaną elektrycznie silnikiem o mocy 50 kW [3]. Teoretyczne możliwości zwiększenia siły trakcyjnej agregatu ciągnika z przyczepą o dużej ładowności ukazano na rys. 4.

Testy polowe wykazały, że napęd osi przyczepy przy prędkości 5 km/h pozwala zredukować do zera poślizgi kół ciągnika, przy mocy przekazywanej na oś przyczepy na poziomie 45kW. W przypadku mocy 20 kW przekazywanej na tę oś, poślizgi kół ciągnika można zredukować o 60%. Badania przeprowadzono w trudnych warunkach przy niskiej wartości współczynnika przyczepności kół, na poziomie 0,3.

Napędy zespołów roboczych.

Szersze wprowadzenie napędu elektrycznego do maszyn rolniczych wymaga równoległego rozwijania wydajnych źródeł energii elektrycznej na ciągnikach oraz maszyn towarzyszących, które tę energię mogą wykorzystywać.

Istnieje już wiele przykładów konstruowania maszyn rolniczych z elektrycznym napędem mechanizmów roboczych. Można tu wymienić:

- elektryczny napęd bębna młocarni [5],
- elektryczny napęd hedera silosokombajnu [10],
- elektryczny napęd rozsiewacza tarczowego do nawozu [10],
- samobieżny opryskiwacz z napędem elektrycznym E-roGator [1].

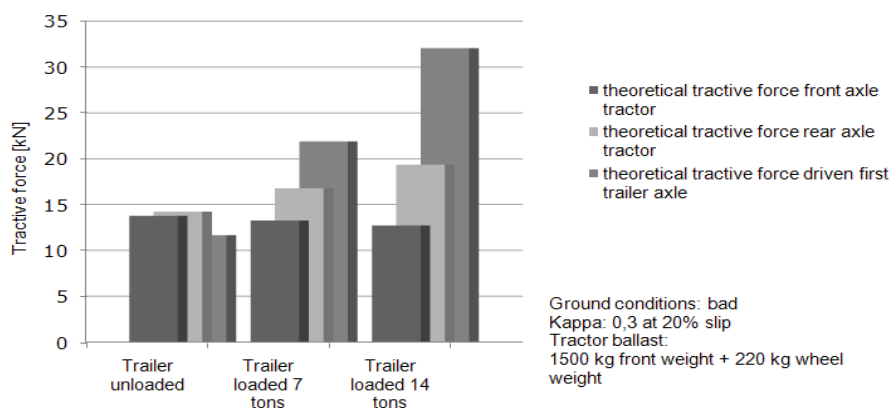
Także w Politechnice Poznańskiej, w ramach projektu rozwojowego N R03 0021 06, podjęto pod kierunkiem autora prace zmierzające do skonstruowania siewnika rządowego o szerokości roboczej 4 m, mechaniczno-pneumatycznego z elektrycznym napędem zespołów roboczych. Źródłem energii elektrycznej jest tu seryjnie produkowany agregat prądowczy o mocy 8 kW napędzany z przedniego WOM ciągnika. Zespołami napędzanymi w siewniku są wentylator główny zasilający układ transportu ziarna do redlic oraz wałki wysiewające. Wentylator jest napędzany silnikiem asynchronicznym indukcyjnym o mocy 4 kW. Wałki wy-

siewające, w liczbie dwóch, są napędzane specjalnym serwowotorem z bezszczotkowym silnikiem prądu stałego ze zintegrowanym układem sterowania i przekładnią planetarną o przełożeniu 1:50. Regulacja prędkości obrotowej silnika w funkcji prędkości jazdy i zadanej normy wysiewu odbywa się sygnałem napięciowym 0-10V dostarczonym przez mikroprocesorowy sterownik siewnika. Silnik wentylatora jest zasilany poprzez seryjnie produkowaną przetwornicę częstotliwości. Obecnie trwają testy laboratoryjne tego systemu.

Skomplikowany system maszynowy, stosowany w rolnictwie ma dużą inercję i jego ewolucja nie może być zbyt szybka. Wydaje się jednak, że poszukiwania dróg postępu w technice rolniczej poprzez „elektryfikację” maszyn mobilnych jest uzasadnione i może przynieść istotne korzyści w praktyce rolniczej. Jest to związane z ogólnym, obserwowanym trendem w budowie maszyn, który można by nazwać umownie „mechatronizacją”. Elektryfikacja napędów maszyn rolniczych ułatwia ten proces.

5. Podsumowanie i wnioski

1. Elektryczny napęd mechanizmów jezdnych i zespołów roboczych maszyn rolniczych daje wiele istotnych korzyści. Wprowadzenie napędu elektrycznego może skutkować podwyższeniem ich funkcjonalności, zdolności trakcyjnych, bezpieczeństwa, ergonomii i niezawodności. W szczególności może doprowadzić do eliminacji „nieekologicznego” silnika spalinowego jako głównego źródła energii na maszynie mobilnej.
2. Nowe możliwości, które daje konstruktorom maszyn współczesna elektronika, pozwalają pokonać wiele dotychczas istniejących barier ograniczających zastosowanie napędu elektrycznego w maszynach rolniczych. Stąd, należy się spodziewać intensywnego jego rozwoju w najbliższych latach.
3. Rozwój napędów elektrycznych wymaga wprowadzenia na rynek ciągników wyposażonych w prądnice o dużych mocach lub alternatywne źródła energii elektrycznej. Prądnice napędzane z WOM są tu jedynie półśrodkiem.
4. Zapotrzebowanie rynku na takie ciągniki może się rozwinąć po wprowadzeniu większego asortymentu maszyn współpracujących, napędzanych elektrycznie.
5. Niezbędne będzie w przyszłości podwyższenie standardowych napięć stosowanych w instalacjach elektrycznych ciągników i maszyn rolniczych oraz normalizacja złącz osprzętu elektrycznego.



Rys. 4. Zwiększenie siły trakcyjnej agregatu z naczepą w zależności od stopnia jego załadowania według [3]
Fig. 4. Increase of the traction force of aggregate with semi-trailer according to the level of loading by [3]

6. Bibliografia

- [1] Exklusiver Fahrbericht Konzept E-RoGator von Agco. Profi 2011, nr. 3.
- [2] Götz M., Müller A. M., Abele M.: Electrification of a tractor and implement – The ZF project ElecTra. VDI-Bericht, 2124, Agricultural Engineering, 69. Int. Tagung LAND.TECHNIK, 11.11.2011.
- [3] Reinmuth F., Tarasinski N.: Electric Driven Implement Axles. Potentials, systematic and control strategies. VDI-Bericht 2124, Agricultural Engineering, 69. Int. Tagung LAND.TECHNIK, 11.11.2011.
- [4] Gallmeier, M., Auernhammer, H.: Hydraulic and electric drive-lines for mobile working machines. 65th International Conference on Agricultural Engineering VDI AgEng Hannover, 2007, Hannover, VDI report no. 2001.
- [5] Herlitzius, T., et al.: Integration of an Electrical drive into a Tangential Threshing Cylinder. 67th International Conference on Agricultural Engineering VDI AgEng Hannover, 2009, Hannover, VDI report no. 2060.
- [6] Herlitzius, Th., et al.: Powerpack-Systeme und ihre Einsatzmöglichkeiten in mobilen Landmaschinen. 68. Internationale Tagung LAND.TECHNIK, 2010, Braunschweig.
- [7] Kolloquium “Elektrische Antriebe in der Landtechnik”. 5-6 July 2011, Wieselburg, Austria, organized by TU Dresden and BLT Wieselburg.
- [8] Mariutti, H.: Caterpillar D7E – Der erste dieselelektrisch angetriebene Kettendozer. Conference Agricultural Engineering for Professionals 2010, Marktoberdorf, Germany. VDI report no. 2087.
- [9] Mohr, M., et.al.: Vergleich zwischen Elektrifizierung und Hybridisierung bei Traktoren. Kolloquium Elektrische Antriebe in der Landtechnik, Juli 2011, Wieselburg, Austria.
- [10] Prankl H. & all.: Multi-Functional PTO Generator for Mobile Electric Power Supply of Agricultural Machinery. VDI-Bericht 2124, Agricultural Engineering, 69. Int. Tagung LAND.TECHNIK, 11.11.2011.
- [11] Schrödl, M., Eilenberger, A., Demmelmayr, F. (Vienna University of Technology): Efficient outer-rotor permanent magnet motor direct drive with limited short-circuit current for sensorless operation including standstill and overload. ETG-Kongress 2009, 27-28.10.2009, Düsseldorf: VDE-Verlag GmbH, 2009.
- [12] Schroedl, M.: Sensorless Control of AC machines. Habilitation thesis, VDI Fortschrittsberichte, 1992, Nr. 117 (VDI-Verlag Dueseldorf, Germany), Reihe 21.
- [13] Thiel M. & all: Development of a PTO driven generator for electrical drives in agricultural machinery. Concept and realization of an Add-on Power Generator. VDI-Bericht 2124, Agricultural Engineering, 69. Int. Tagung LAND.TECHNIK, 11.11.2011.
- [14] www.retrotraktor.pl
- [15] www.technikarolnicza.pl