Krzysztof Kolano, Jan Kolano
Politechnika Lubelska, Lublin

PROBLEMY ROZRUCHU UKŁADÓW NAPĘDOWYCH PRĄDU PRZEMIENNEGO ZASILANYCH Z BATERII OGNIW FOTOWOLTAICZNYCH

SELECTED PROBLEMS OF STARTING UP SYSTEM WITH 3-PHASE AC MOTOR DRIVE SUPPLIED BY PHOTOVOLTAIC SYSTEM

Abstract: Whithin last few years the possibility of constructing autonomic PV low power generators used for electric driving systems feeding emerged. These systems usually 1-phase AC driving systems, may be used in certain household devices (eg. refrigerators, air condition). The amount of energy produced by these uncoventional energy sources depends on current weather conditions. On the basis of mathematical models of AC motors fed by PV systems with buffer energy source computer simulations of transient states during starting were performed. The parameter optimisation of newly elaborated structures of electrical drive systems operating in PV systems was carried about.

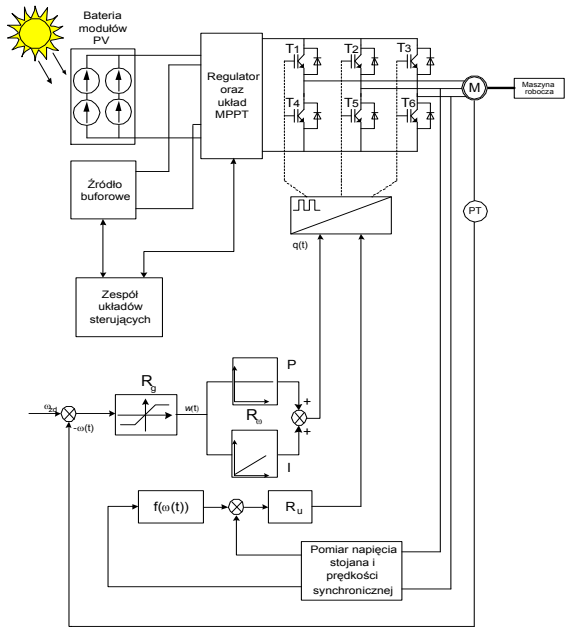
1. Wprowadzenie

Dynamiczny rozwój energoelektroniki i mikroelektroniki jaki dokonał się w ciągu ostatnich lat pozwolił na zasilanie napędów prądu przemiennego poprzez pośredniczące przekształtniki ze źródeł napięcia stałego. Umożliwiło to budowę układów napędowych prądu przemiennego zasilanych z baterii ogniw fotowoltaicznych.

Zastosowanie generatorów fotowoltaicznych, jako podstawowych źródeł energii dla silników elektrycznych stosowanych w urządzeniach chłodniczych i klimatyzacyjnych wiąże się z koniecznością rozwiązania kilku problemów natury technicznej związanych ze stosunkowo trudnym ich rozruchem. Urządzenia te charakteryzują się stosunkowo dużym momentem spoczynkowym co wiąże się z poborem bardzo dużego prądu rozruchowego. W przypadku zastosowania silników jednofazowych jest bardzo utrudnione przeprowadzenie rozruchu częstotliwościowego. Dlatego też gdzie tylko jest możliwe w urządzeniach tych należy dążyć do stosowania silników trójfazowych. Jak powszechnie wiadomo silniki te mają o wiele większą sprawność niż silniki jednofazowe i można w ich przypadku zastosować rozruch częstotliwościowy. Dla tego typu systemów PV konieczne jest określenie wymiarów i mocy szczytowej baterii w zależności od wymagań stawianych przez odbiornik energii. Zbyt mała bateria PV nie będzie w stanie w pewnych warunkach (zachmurzenie, deszczowe dni) dostarczyć wymaganej ilości energii. Znaczne przewymiarowanie baterii podniesie koszt całego systemu, a nie zwiększy korzyści (nadmiar energii wyprodukowanej w okresie słonecznych dni nie będzie mógł być wykorzystany). Zapewnienie niezawodności zasilania dla odbiorników dla których utrata zasilania może pociągnąć za sobą poważne konsekwencje i duże straty ekonomiczne (np.: dozowniki pokarmów i urządzenia wentylacyjno-klimatyzacyjne na fermach hodowlanych) jest sprawą bardzo ważną. W takich przypadkach system PV powinien oprócz akumulatora posiadać jeszcze generator rezerwowy np. spalinowy. Ze względu na dość wysoki koszt takiej inwestycji (bateria PV, akumulator, generator rezerwowy, przekształtnik) konieczna jest precyzyjna analiza różnych wariantów doboru elementów w celu wyboru możliwie najlepszego rozwiązania. W niniejszym artykule dokonano analizy pracy przykładowych takich układów. Przeanalizowano różne sposoby ich rozruchu , maksymalizacji mocy wyjściowej baterii PV oraz podano propozycje konkretnych układów realizujących to zadanie. Przedstawiono przykłady badań stanów przejściowych takich układów podczas rozruchu. Wykonane zostały badania symulacyjne. W napędowych systemach fotowoltaicznych w celu maksymalnego wykorzystania energii słonecznej stosuje się źródła buforowe gromadzące energię elektryczną. Najpowszechniejszymi źródłami buforowymi są akumulatory, których żywotność zazwyczaj w tych systemach jest krótka. W artykule tym zaproponowano

wano strukturę sterowania napędowego systemu fotowoltaicznego, z akumulatorem w roli źródła buforowego, przedstawioną na rysunku 1 oszczędzającą akumulator dzięki zoptymalizowanemu układowi sterowania systemu.

2. Struktura napędowego systemu PV z akumulatorem w roli buforowego źródła energii



Rys. 1. Schemat blokowo - ideowy falownikowego układu napędowego zasilanego z systemu PV

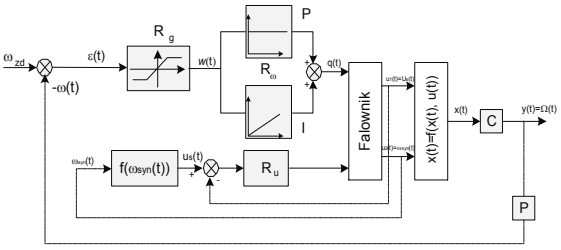
Na rys. 1 przedstawiono schemat układu napędowego pracującego w systemie fotowoltaicznym sterowanego w strukturze oszczędzającej akumulator występujący w roli buforowego źródła energii. W tym układzie napędowym, przy wyborze sterowania kierowano się ograniczeniem strat regulacji i dlatego wybrano strukturę sterowania z ograniczeniem poślizgu. Wyposażono go w regulator wraz z układem MPPT, którego zadaniem jest zapewnienie odpowiedniej współpracy baterii fotowoltaicznej ze źródłem buforowym i układem napędowym w taki sposób, aby moc odbierana z baterii PV była maksymalna w każdych warunkach nasłonecznienia.

Przy zasilaniu silników indukcyjnych z przekształtników napięcia i częstotliwości popularną metodą sterowania, która znacznie poprawia własności dynamiczne takiego układu napędowego jest sterowanie ze stałą przeciążalnością momentem silnika napędowego (stałą wartością strumienia). Aby zachować stałą przeciążalność podczas regulacji prędkości musi być zachowany odpowiedni związek między napięciem zasilającym a prędkością synchroniczną. Zastosowano tutaj regulację częstotliwości napięcia zasilającego, wynikającą ze zmiany natężenia oświetlenia [1]

Przy stałym momencie oporowym maszyny roboczej (np.: sprężarki) dla utrzymania stałej przeciążalności momentem należy zachować stały strumień magnetyczny w silniku.

Ponieważ przy zasilaniu silnika z generatora PV dąży się zazwyczaj do uzyskania maksymalnej sprawności układu, nie stosuje się regulacji przez zadanie pożądanej prędkości obrotowej, jest ona zwykle zależna od warunków nasłonecznienia. Ze względu jednak na ograniczoną dynamikę układu, zasilanego z generatora PV podczas stanów przejściowych, korzystne jest uzależnienie częstotliwości napięcia zasilającego od jego wartości (sprzężenie napięciowe) [3,7]. Uzyskuje się wtedy dostosowanie prędkości obrotowej podczas stanów przejściowych do zmieniających się w szerokim zakresie warunków zasilania (ograniczona moc generatora PV oraz źródła buforowego – akumulatora). Aby zoptymalizować moment napędowy dla danych warunków zasilania wprowadzono sprzężenie napięciowo-prędkościowe.

W symulacji komputerowej, analizującej stany przejściowe powyższego układu wykorzystano schemat blokowy przedstawiony na rys.2.



Rys.2. Schemat blokowy analizowanego napędowego systemu fotowoltaicznego

gdzie:

- R_u - regulator napięcia,
- R_g – ogranicznik poślizgu,
- R_ω – regulator częstotliwości,
- C – człon całkujący
- P – człon proporcjonalny.

Na wejście bloku regulatora częstotliwości R_ω, podawany jest sygnał $w(t)$.

Regulator częstotliwości jest regulatorem liniowym typu PI na wyjściu, którego pojawia się sygnał q(t):

Sygnał q(t) steruje zmianami częstotliwości napięcia zasilającego uzwojenie stojana silnika. Amplitudę tego napięcia reguluje się zgodnie z odpowiednim jej stosunkiem do częstotliwości. W celu utrzymania wymaganej wartości stosunku U_s / ω_{syn} zastosowano człon nieliniowy o charakterystyce dopasowanej do momentu oporowego maszyny roboczej [1,3].
Sygnałem wejściowym jest aktualna prędkość synchroniczna. Sygnał wyjściowy członu nieliniowego jest podawany na wejście regulatora napięcia, który jest regulatorem proporcjonalnym i dlatego amplituda napięcia zasilającego uzwojenie stojana jest regulowana odpowiednio w funkcji jego częstotliwości .

3. Symulacja komputerowa stanów przejściowych podczas rozruchu układu napędowego

Do analizy stanów przejściowych napędowego układu falownikowego zasilanego z generatora fotowoltaicznego wykorzystano program symulacyjny opracowany w Katedrze Napędów i Maszyn Elektrycznych Politechniki Lubelskiej. Program ten wykorzystuje metodę całkowania numerycznego Rungego-Kutty czwartego rzędu.
Program symulacji stanów nieustalonych silnika asynchronicznego pracującego w układzie sterowania przedstawionym na rys.2 rozwiązuje metodami numerycznymi podany układ równań różniczkowych nieliniowych. Na podstawie równań stanu wyznaczane są przebiegi chwilowe składowych wektora stanu X(t), czyli obliczane są wartości chwilowe wielkości elektrycznych i mechanicznych dla danego silnika asynchronicznego pracującego w systemie fotowoltaicznym. Do symulacji zastosowano trójfazowy silnik klatkowy napędzający sprężarkę klimatyzatora. Silnik zasilany jest z generatora PV poprzez falownik. W przypadku zaniku lub niewystarczającej mocy z generatora PV, energia pobierana będzie ze źródła buforowego, którym jest akumulator. Moc jaką generuje bateria PV zależy nie tylko od nasłonecznienia, lecz także od temperatury otoczenia. Temperatura z kolei ma wpływ na wartość rezystancji wewnętrznej akumulatora, której wielkość uwzględniona jest w rezystancji całkowitej układu. W programie symulacyjnym wielkość rezystancji wewnętrznej w pełni naładowanego akumulatora przy temperaturze +20^{o}C obliczono tak, jak w pracy [1].

Parametry badanego silnika napędowego są następujące:

P_N	U_N	I_N	J	f_N	p
kW	V	A	kgm^2	Hz	-
1,1	220	1,8	0,62	50	3

R_s	R_r	L_s	L_r	L_M
Ω	Ω	H	H	H
3,57	3,68	0,284	0,298	0,262

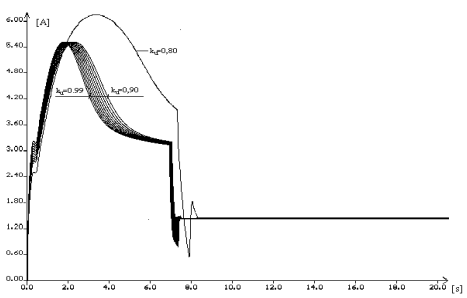
Sprężarka pracująca w układzie napędowym nie wymaga szybkich zmian prędkości kątowej. Przy tego typu obciążeniu nie występują udarowe zmiany obciążenia na wale maszyny. Moment oporowy sprężarki klimatyzatora jest stały M_z = const. Wydajność oraz moc urządzenia klimatyzacyjnego zależą od jego prędkości obrotowej.
Analiza stanów przejściowych podczas rozruchu badanego układu, polegała na badaniu wpływu wielkości nastaw regulatorów występujących w układzie na przebieg rozruchu. Jak już wcześniej wspomniano przy zbyt niskim nasłonecznieniu silnik pobiera energię z akumulatora, a więc analizę stanów przejściowych można przeprowadzić pod kątem optymalizacji nastaw regulatorów, dla których możliwe jest np.: takie sterowanie układem aby oszczędzać akumulator (zminimalizowanie prądu rozruchowego).

3.1. Badanie rozruchu silnika przy zmiennym współczynniku wzmocnienia regulatora napięcia – k_u

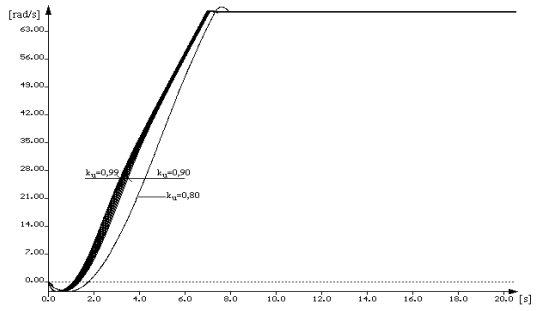
Symulacje przeprowadzono przy nastawach członów regulacji wynoszących:

k_u	T_I	k_ω	g
Var(0,99÷0,90)	0,08	10	0,25

Wybrane wyniki symulacji przedstawiono poniżej:



Rys. 3. Przebiegi modułu wektora przestrzennego prądu stojana silnika podczas rozruchu



Rys. 4. Przebiegi prędkości kątowej wału silnika podczas rozruchu układu napędowego

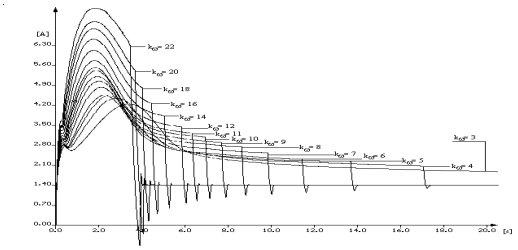
Zmiana współczynnika k_u w przedziale od 0,99 do 0,90 nie ma znaczącego wpływu na czas rozruchu oraz maksymalną wartość prądu rozruchowego. Jednak zmniejszenie współczynnika poniżej wartości k_u=0,9 powoduje zdecydowany wzrost prądu rozruchowego oraz znaczne wydłużenie czasu rozruchu. Zatem wartość nastawy k_u powinna być dobierana drogą optymalizacji z przedziału (0,9÷0,99).

3.2. Rozruch układu przy zmiennym współczynniku wzmocnienia regulatora częstotliwości – k_ω

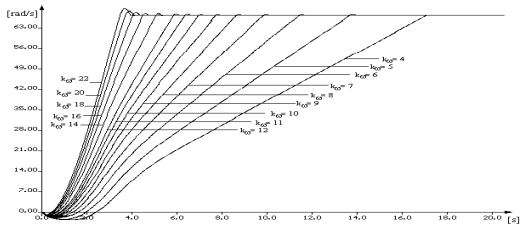
Symulacje przeprowadzono przy nastawach członów regulacji wynoszących:

k_ω	T_I	k_u	g
Var(3÷22)	0,08	0,97	0,25

Wybrane wyniki symulacji dla tego przypadku przedstawiono poniżej:



Rys. 5. Przebiegi modułu wektora przestrzennego prądu stojana silnika podczas rozruchu



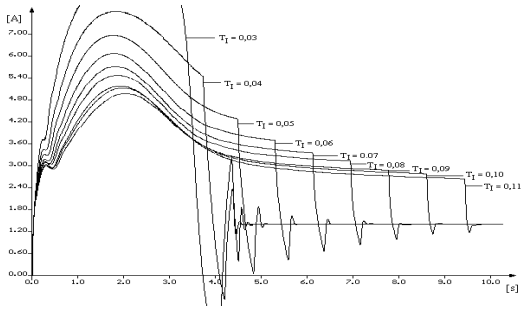
Rys. 6. Przebiegi prędkości kątowej wału silnika podczas rozruchu

Zmiany wartości nastaw współczynnika wzmocnienia regulatora prędkości k_ω podczas rozruchu wykazują, że optymalnym przedziałem wartości tego współczynnika jest przedział (4÷7). Prąd rozruchowy osiąga w tym przedziale najniższe wartości, jest to jednak osiągnięte kosztem zwiększenia czasu trwania procesu rozruchu.

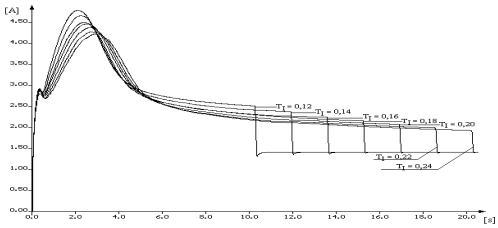
3.3. Badanie rozruchu silnika przy zmiennej wartości stałej czasu regulatora częstotliwości T_I

Symulacje przeprowadzono przy nastawach członów regulacji wynoszących:

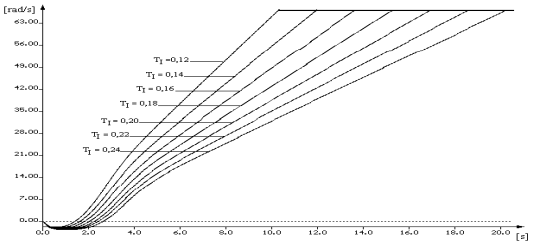
T_I	k_ω	k_u	g
Var (0,03÷0,24)	10	0,97	0,25



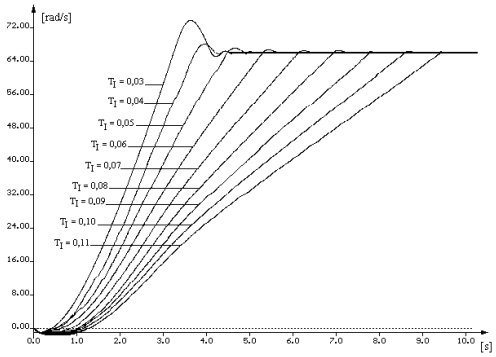
Rys. 7. Przebiegi modułu wektora przestrzennego prądu stojana silnika podczas rozruchu



Rys. 8. Przebiegi modułu wektora przestrzennego prądu stojana silnika podczas rozruchu



Rys. 9. Przebiegi prędkości kątowej wału silnika podczas rozruchu



Rys. 10. Przebiegi prędkości kątowej wału silnika podczas rozruchu

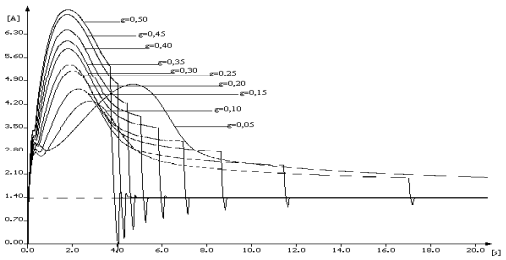
Wartość stałej czasowej regulatora częstotliwości T_I ma wyraźny wpływ na wielkość prądu rozruchowego. W analizowanym zakresie zmian czasu T_I wartości maksymalne prądu rozruchowego osiągają kilkakrotną wartość prądu ustalonego. Zdecydowane zmniejszenie wartości prądu podczas rozruchu odbywa się kosztem zwiększenia czasu rozruchu.

3.4. Badanie rozruchu silnika przy zmiennej wartości współczynnika ograniczenia poślizgu – g

Symulacje przeprowadzono przy nastawach członów regulacji wynoszących:

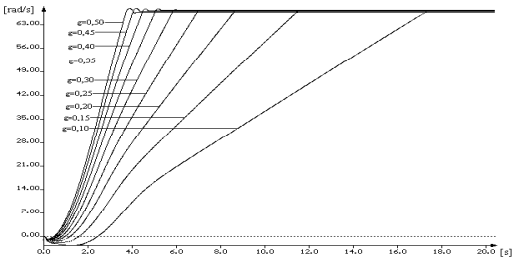
g	T_I	k_u	k_ω
Var(0,10÷0,50)	0,08	0,97	10

Wybrane wyniki symulacji przedstawiono poniżej:



Rys. 11. Przebiegi modułu wektora przestrzennego prądu stojana silnika podczas rozruchu

Zwiększając wielkość czasu rozruchu osiągnąć można dość znaczne zmniejszenie wartości maksymalnej prądu rozruchowego. W przedziale wartości ograniczenia poślizgu g=0,05÷0,15 osiągnąć można ograniczenie prądu rozruchowego do dwu i półkrotnej wartości prądu ustalonego, przy wielkości czasu rozruchu około 17 sekund.



Rys. 12. Przebiegi prędkości kątowej wału silnika podczas rozruchu

4. Podsumowanie

Analizując powyższe wyniki badań zaobserwować można jak wielkie zmiany zachodzą w wartościach chwilowych prądu rozruchowego, oraz czasu trwania rozruchu układu napędowego. Prąd rozruchowy silnika, który zmienia się od 2 do prawie 10 krotnej wartości prądu ustalonego oraz czas trwania rozruchu zależą w dużym stopniu od nastaw poszczególnych bloków układu regulacji.

Budując układ, który zasilany jest z generatora PV i źródła buforowego należy kierować się zapotrzebowaniem układu napędowego na moc w stanie ustalonym. Optymalizacja, która ma na celu taki dobór wielkości generatora PV stosownie do mocy silnika napędowego, jak również dobór wielkości akumulatora jako źródła buforowego oraz odpowiedni wybór sterowania układem, przyczyniają się do obniżenia kosztów budowy i eksploatacji takiego systemu fotowoltaicznego.

Na podstawie analizy teoretycznej i otrzymanych wyników symulacji można stwierdzić, że zaproponowana struktura układu napędowego może mieć praktyczne zastosowanie. Z uwagi na to, że koszt budowy takiego systemu napędowego jest wysoki, symulacja komputerowa wydaje się być odpowiednim sposobem na jego zmniejszenie, gdyż pozwala nam poznać czynniki mające wpływ na przebieg rozruchu badanego układu. Można więc wybrać taką metodę sterowania, która poprawia własności dynamiczne badanego fotowoltaicznego układu napędowego, przy jednoczesnej minimalizacji strat i niedogodności układu.

Podsumowując można stwierdzić, że optymalizacja nastaw regulatorów w zaproponowanej strukturze napędowej, może w znacznym stopniu przyczynić się do lepszego wykorzystania generatora fotowoltaicznego oszczędzając akumulator. Wiąże się to z ograniczeniem wielkości akumulatora dobranego do systemu, co z

kolei wpływa na obniżenie kosztów instalacyjnych całego układu napędowego w projektowanym systemie fotowoltaicznym.

Literatura

[1]. Kolano J.: rozdział *Układy napędowe zasilane z baterii ogniw fotowoltaicznych* w książce: "Electric driving systems supplied from unconventional power sources. Selected problems" Seria Wydawnicza Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki PAN. Zeszyt 41/2000.

[2]. Kolano J *Sterowanie mikroprocesorowe układu napędowego prądu przemiennego zasilanego z baterii ogniw fotowoltaicznych*. Mat. IV Sympozjum „Sterowanie i monitorowanie układów przemysłowych" Lublin maj 2001.

[3]. Kolano J., Moradewicz A. *Symulacja komputerowa stanów przejściowych falownikowego układu napędowego zasilanego z baterii PV*. Mat. IV Sympozjum „Sterowanie i monitorowanie układów przemysłowych" Lublin maj 2001.

[4]. Kolano J., Filipek P., Niechaj M.. *Maximum power point tracking for PV generator feeding different DC motor drive systems*. Mat.European Conference on Photovoltaics 25-27 October Cracow 1999.

[5]. Kolano J., Horodecki A., Niechaj M.: referat *Idea of assessment of an electric driving system supplied from ecological energy sources*. Mat. Konf. ELMECO'97, Nałęczów 12-15 czerwiec 1997.

[6]. Kolano J., Horodecki A., Niechaj M.: referat *Computer simulation of selected photovoltaic systems assuring their best co-operation with converters*. Mat. Konf. ELMECO'97, Nałęczów 12-15 czerwiec 1997.

[7]. Kolano J.:*Sposób i układ sterowania silnika indukcyjnego zasilanego z generatora fotowoltaicznego*. Patent NR 196130 z dnia 05.11.2007.