

doi:10.15199/48.2017.02.07

Ocena wpływu zastosowania wysokosprawnych silników elektrycznych na oszczędność energii

Streszczenie. Przedstawiono oszacowanie zużycia energii przez silniki elektryczne, uwarunkowania normalizacyjne dotyczące poziomów sprawności silników elektrycznych, metodykę i wyniki obliczeń efektów ekonomicznych uzyskiwanych przy zastosowaniu silników wysokosprawnych.

Abstract. Evaluation of energy use by electrical motors, standard conditions of efficiency levels of electrical motors, methodology and calculation results of economical effects of using high efficiency motors are presented in the paper. (Evaluation of the influence of applying high efficiency electrical motors for the energy saving).

Słowa kluczowe: silniki elektryczne wysokosprawne, oszczędność energii, efekty ekonomiczne, zużycie energii przez silniki elektryczne.

Keywords: high efficiency electrical motors, energy saving, economic effects, energy consumption by electrical motors.

Wstęp

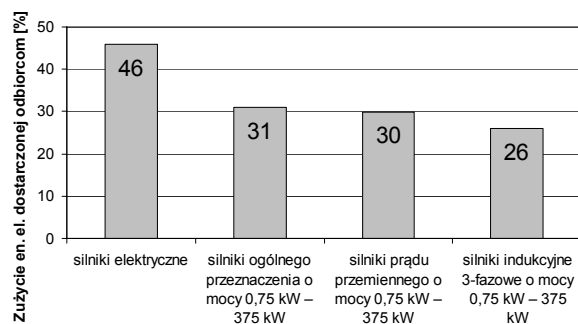
Jednym ze sposobów oszczędzania energii jest stosowanie elektrycznych układów napędowych o większej sprawności. Istotnym elementem takich układów jest silnik elektryczny o wysokiej sprawności. W tabeli 1 przedstawiono udział poszczególnych rodzajów odbiorów

energii elektrycznej dostarczonej do klienta oraz zużycie tej energii w poszczególnych sektorach gospodarki światowej. Na jej podstawie można stwierdzić, że największą grupą odbiorów są silniki elektryczne (46 %) a największy ich udział ma przemysł i wynosi on 28 %.

Tabela 1. Szacunkowe zużycie energii elektrycznej na świecie (TWh) wg sektorów i końcowych odbiorów (2006 r.), przy całkowitej produkcji energii 19000 TWh, w tym 15700 TWh energii dla użytkowników i 3300 TWh strat transformatorowych i przesyłowych [1].

Sektor/odbior	Silniki elektryczne	Ogrzewanie	Oświetlenie	Urządzenia elektroniczne	Stan czuwania	Elektroliza	Razem	Udział silników [%]
Przemysł	4400	800	500	200	100	500	6500	28
Mieszkalnictwo	900	1600	900	700	200	0	4300	6
Usługi	1500	200	1300	500	200	0	3700	9
Rolnictwo	100	200	0	100	0	0	400	1
Transport	200	0	100	0	0	0	300	1
Inne	200	150	100	50	0	0	500	1
Ogółem	7300	2950	2900	1550	500	500	15700	46
Udział [%]	46	19	19	10	3	3	100	

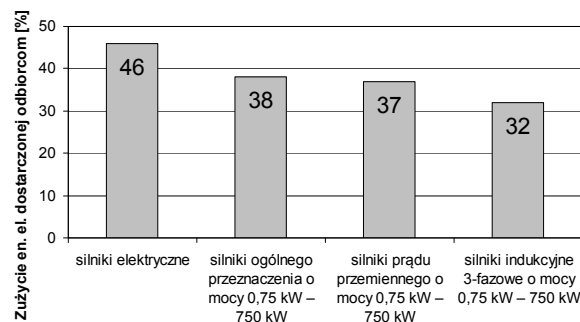
Analiza przeprowadzona w pracy [2] prowadzi do wniosku, że wśród tych 46 % silników elektrycznych największą grupę stanowią trójfazowe silniki indukcyjne.



Rys. 1. Zużycie energii elektrycznej dostarczonej odbiorcom na świecie przez silniki elektryczne (w % energii dostarczonej odbiorcom) z uwzględnieniem silników o mocy znamionowej 0,75 kW – 375 kW

Na rysunkach 1-2 przedstawiono zużycie energii przez poszczególne grupy silników odpowiednio z zakresu mocy 0,75 – 375 kW i 0,75 – 750 kW. Silniki ogólnego przeznaczenia (silniki indukcyjne klatkowe, prądu stałego, synchroniczne i z magnesami trwałymi) zużywają odpowiednio 31 % i 38 %, silniki prądu przemiennego (bez silników prądu stałego) 30 % i 37 %, oraz silniki indukcyjne

trójfazowe 26 % i 32 %. Widać z tego, że ta ostatnia grupa silników zużywa prawie 1/3 energii elektrycznej dostarczonej odbiorcom i zawiera największy potencjał oszczędności energii. Dlatego też prowadzono zarówno prace badawcze jak i normalizacyjne dotyczące poziomów sprawności i sposobów jej wyznaczania tej właśnie grupy tj. silników indukcyjnych trójfazowych.



Rys. 2. Zużycie energii elektrycznej dostarczonej odbiorcom na świecie przez silniki elektryczne (w % energii dostarczonej odbiorcom) z uwzględnieniem silników o mocy znamionowej 0,75 kW – 750 kW

W tabeli 2 przedstawiono udział silników niskonapięciowych prądu przemiennego 3-fazowych w zależności od liczby biegunów. Najwięcej jest silników 4-biegunowych (ok. 60 %) a następnie 2-biegunowych (ok. 25 %).

Tabela 2. Udział w rynku silników niskonapięciowych prądu przemiennego 3-fazowych według liczby biegunów

Typ silnika	Udział [%]	Udział śr. [%]
2-biegunowy	15-35	25
4-biegunowy	50-70	60
6-biegunowy	7-15	11
8-biegunowy	1-7	4

Tabela 3. Średnia trwałość silników indukcyjnych (łącznie z naprawami) [1].

Zakres mocy	Trwałość [lata]
1,0 – 7,5 kW	12
7,5 – 75 kW	15
75 – 250 kW	20

Należy przy tym wziąć pod uwagę trwałość (żywność) silników elektrycznych (tab. 3), która wynosi średnio kilkanaście lat. To powoduje, że wymiana starych silników na silniki o wysokiej sprawności jest rozciągnięta na stosunkowo długi okres.

Ze względu na znaczny udział silników indukcyjnych trójfazowych w zużyciu energii dostarczonej odbiorcom, przez zastosowanie silników o wyższych klasach sprawności można uzyskać znaczne oszczędności energii. Przykładem są silniki o starym oznaczeniu EF (CEMEP). W samym tylko 2005 roku, dzięki zastosowaniu silników o większej sprawności zaoszczędzono ponad 5 TWh energii [1].

Uwarunkowania normalizacyjne

Na świecie jest w użyciu kilkanaście różniących się systemów klasyfikowania poziomu sprawności silników indukcyjnych, co stwarza zamieszanie, tworzy bariery rynkowe i jest dużym problemem dla producentów silników dostarczających wyrób na rynek globalny.

To było powodem opracowania i ustanowienia międzynarodowej normy IEC 60034-30:2008 „Klasy sprawności jednobiegowych, trójfazowych, klatkowych silników indukcyjnych (kod IE)” [3] dotyczącej klas sprawności silników indukcyjnych klatkowych o mocy z zakresu 0,75 – 375 kW, a następnie jej modyfikacji – normy IEC 60034-30-1:2014 „Klasy sprawności silników prądu przemiennego zasilanych bezpośrednio z sieci (kod IE)” [4], a więc dotyczącej szerszej grupy silników niż norma [3] np. rozszerzonej o silniki z magnesami trwałymi.

Norma ta zawiera klasyfikację i oznakowanie IE (International Efficiency), (Polska Norma PN-EN 60034-30-1:2014 [5]).

Nowy sposób klasyfikacji obowiązuje dla silników 2, 4, 6 i 8 - biegunowych o mocach od 0,12 do 1000 kW i napięciu znamionowym od 50 V do 1000 V, o częstotliwości 50 lub 60 Hz, przeznaczonych do prac ciągłej. W normie określono wartości sprawności dla czterech klas:

- IE1 – silniki standardowe (standard),
- IE2 – silniki o wysokiej sprawności (high efficiency),
- IE3 – silniki o bardzo wysokiej sprawności (premium),
- IE4 – silniki o super wysokiej sprawności (super premium).

W normie tej wymienia się też nową klasę sprawności – IE5, ale nie podaje się dla niej wymaganych poziomów sprawności. Zamieszczono jedynie informację, że silniki klasy IE5 charakteryzować się będą stratami o ok. 20% mniejszymi w stosunku do strat silników klasy IE4. Obecnie technologie dla osiągnięcia tej klasy sprawności nie są dostatecznie opracowane i powszechnie dostępne.

Wychodząc naprzeciw zapotrzebowaniu klientów, którzy są zainteresowani wymianą silników starych na silniki o wyższej klasie sprawności w publikacji przedstawiono analizę ekonomiczną takiego przedsięwzięcia.

Metodyka wyznaczania efektów ekonomicznych stosowania silników wysokosprawnych

Efekt ekonomiczny E (oszczędność w kWh) wynosi [6]

$$(1) \quad E = P_N \cdot k \cdot T \cdot \left(\frac{1}{\eta_S} - \frac{1}{\eta_E} \right)$$

gdzie: P_N – moc znamionowa silnika w kW, k – średnie (w czasie T) względne obciążenie silnika w stosunku do jego mocy znamionowej, T – średni czas pracy w roku w godzinach (h), η_S – sprawność silnika standardowego, η_E – sprawność silnika wysokosprawnego.

Okres zwrotu kosztu dodatkowego n (w miesiącach) wynikającego z różnicy ceny silnika wysokosprawnego i standardowego wynosi [6]

$$(2) \quad n = 12 \cdot \frac{C_E - C_S}{c_{en.cz.} \cdot P_N \cdot k \cdot T \cdot \left(\frac{1}{\eta_S} - \frac{1}{\eta_E} \right)}$$

gdzie: C_E – cena silnika wysokosprawnego, C_S – cena silnika standardowego (IE1), $c_{en.cz.}$ – cena 1 kWh energii czynnej.

Zysk (w zł) z oszczędności energii w ciągu m lat (resurs silnika) wynosi

$$(3) \quad z = \left(m - \frac{n}{12} \right) \cdot E \cdot c_{en.cz.}$$

Wielowariantowe obliczenia ekonomiczne

Po wzięciu pod uwagę danych z tabeli 2 i 3 obliczenia wykonano dla sześciu typów 4-biegunowych silników o mocy znamionowej od 4 kW do 18,5 kW, trzech czasów pracy silnika: ciągłej, pół-dobowej i ośmiogodzinnej oraz dla sprawności z uwzględnieniem tolerancji tj. najbardziej niekorzystnego wariantu (tolerancja dla klas sprawności dla tego przedziału mocy znamionowych zgodnie z PN EN-60034-1 [7] wynosi –15 % strat silnika, czyli $-0,15 \cdot (1 - \eta)$), przy czym analizie poddano różnicę między sprawnością dla danej klasy (z uwzględnieniem tolerancji) a sprawnością znamionową silnika standardowego (bez uwzględniania tolerancji – wariant najbardziej skrajny – najmniejsza oszczędność energii). Do obliczeń przyjęto następujące wartości:

$T =$	8600, 4300, 2900 h
$k =$	0,75
$C_{en.cz.} =$	0,56 zł/kWh
$C_{EIE2} =$	1,3 C_S
$C_{EIE3} =$	1,8 C_S
$C_{EIE4} =$	2,5 C_S
$m =$	15 lat.

W tabeli 4 przedstawiono poziomy sprawności dla klas od IE1 do IE4 według normy [4] i ceny (2006 rok) wybranych wielkości i typów silników oraz w tabeli 5 te same dane, ale z uwzględnieniem tolerancji dla klas od IE2 do IE4.

W tabelach 6 – 8 przedstawiono wyniki obliczeń przy założeniu zmniejszonej sprawności z uwzględnieniem ujemnej tolerancji określonej w normie [7], odpowiednio dla silników z tabeli 4, dla trzech czasów pracy: całorocznej, pół-dobowej i ośmiogodzinnej. We wszystkich tabelach obliczono: oszczędności energii wynikające z różnicy sprawności, okres zwrotu kosztu dodatkowego tj. różnicy między ceną silnika wysokosprawnego a ceną silnika

standardowego (IE1) oraz zysk w ciągu 15 lat tj. w ciągu średniego resursu (tab. 3) dla rozpatrywanego przedziału silników (4 kW – 18,5 kW).

Tabela 4. Poziomy sprawności IE1-IE4 według [4] i ceny (2006 rok) wybranych wielkości i typów silników

Typ silnika	P_N [kW]	C_s [zł]	IE1 %	IE2 %	IE3 %	IE4 %
Sg 112 M-4	4	500	83,09	86,57	88,63	91,11
Sg 132 S-4	5,5	610	84,66	87,66	89,58	91,89
Sg 132 M-4	7,5	720	86,04	88,66	90,44	92,58
Sg 160 M-4	11	1220	87,57	89,79	91,42	93,34
Sg 160 L-4	15	1400	88,67	90,64	92,14	93,89
Sg 180 M-4	18,5	2100	89,34	91,17	92,60	94,23

Tabela 5. Poziomy sprawności IE1-IE4 z uwzględnieniem tolerancji (IE1 nominalna, IE2-IE4 z tolerancją) i ceny (2006 rok) wybranych wielkości i typów silników

Typ silnika	P_N [kW]	C_s [zł]	IE1 %	IE2 %	IE3 %	IE4 %
Sg 112 M-4	4	500	83,09	84,56	86,93	89,78
Sg 132 S-4	5,5	610	84,66	85,81	88,02	90,67
Sg 132 M-4	7,5	720	86,04	86,95	89,01	91,46
Sg 160 M-4	11	1220	87,57	88,26	90,13	92,34
Sg 160 L-4	15	1400	88,67	89,23	90,96	92,98
Sg 180 M-4	18,5	2100	89,34	89,85	91,49	93,37

Tabela 6.. Oszczędność energii, okres zwrotu kosztu dodatkowego oraz zysk w ciągu 15 lat dla poszczególnych poziomów sprawności i wybranych wielkości i typów silników, przy założeniu wartości sprawności z uwzględnieniem tolerancji i czasu pracy $T = 8600$ h/rok.

Lp.	Oszczędność energii [kWh/rok]			Okres zwrotu kosztu dodatkowego [miesiąc]			Zysk w ciągu lat 15 [zł]		
	E IE2	E IE3	E IE4	n IE2	n IE3	n IE4	Z IE2	Z IE3	Z IE4
1.	539	1 371	2 315	6,0	6,3	6,9	4 377	11 116	18 696
2.	563	1 599	2 780	7,0	6,5	7,1	4 549	12 946	22 437
3.	590	1 872	3 332	7,9	6,6	6,9	4 736	15 146	26 908
4.	633	2 301	4 185	12,4	9,1	9,4	4 954	18 354	33 327
5.	689	2 753	5 055	13,1	8,7	8,9	5 370	22 009	40 363
6.	745	3 130	5 757	18,1	11,5	11,7	5 631	24 616	45 210

TABELA 7. Oszczędność energii, okres zwrotu kosztu dodatkowego oraz zysk w ciągu 15 lat dla poszczególnych poziomów sprawności i wybranych wielkości i typów silników, przy założeniu wartości sprawności z uwzględnieniem tolerancji i czasu pracy $T = 4300$ h/rok.

Lp.	Oszczędność energii [kWh/rok]			Okres zwrotu kosztu dodatkowego [miesiąc]			Zysk w ciągu lat 15 [zł]		
	E IE2	E IE3	E IE4	n IE2	n IE3	n IE4	Z IE2	Z IE3	Z IE4
1.	269	685	1 158	11,9	12,5	13,9	2 114	5 358	8 973
2.	282	800	1 390	13,9	13,1	14,1	2 183	6 229	10 761
3.	295	936	1 666	15,7	13,2	13,9	2 260	7 285	12 914
4.	317	1 151	2 093	24,8	18,2	18,7	2 294	8 689	15 749
5.	345	1 377	2 528	26,1	17,4	17,8	2 475	10 444	19 131
6.	373	1 565	2 879	36,2	23,0	23,4	2 501	11 468	21 030

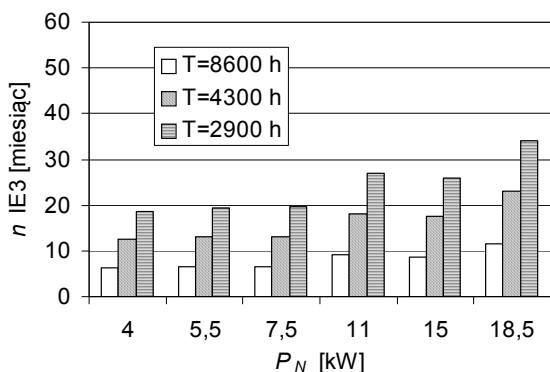
TABELA 8. Oszczędność energii, okres zwrotu kosztu dodatkowego oraz zysk w ciągu 15 lat dla poszczególnych poziomów sprawności i wybranych wielkości i typów silników, przy założeniu wartości sprawności z uwzględnieniem tolerancji i czasu pracy $T = 2900$ h/rok.

Lp.	Oszczędność energii [kWh/rok]			Okres zwrotu kosztu dodatkowego [miesiąc]			Zysk w ciągu lat 15 [zł]		
	E IE2	E IE3	E IE4	n IE2	n IE3	n IE4	Z IE2 zł	Z IE3 zł	Z IE4 zł
1.	182	462	781	17,7	18,5	20,6	1 377	3 483	5 807
2.	190	539	937	20,6	19,4	20,9	1 413	4 042	6 959
3.	199	631	1 124	23,3	19,6	20,6	1 454	4 726	8 358
4.	214	776	1 411	36,7	27,0	27,8	1 428	5 542	10 025
5.	232	928	1 705	38,7	25,8	26,4	1 532	6 679	12 219
6.	251	1 056	1 941	53,7	34,1	34,8	1 481	7 187	13 157

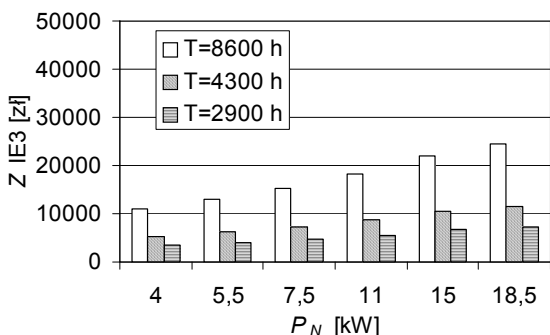
Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe wykresy okresu zwrotu kosztu dodatkowego tj. różnicy między ceną silnika klasy IE3 a silnika klasy IE1, przy zastąpieniu silnika

klasy IE1 silnikiem o klasie IE3. Przyjęto najbardziej pesymistyczny wariant tj. z uwzględnieniem tolerancji obniżającej sprawność silnika IE3. Najszybciej zwracają się

koszty, gdy silnik pracuje przez cały rok. Przy pracy silnika przez 8 godzin dziennie okres zwrotu kosztu dodatkowego wydłuża się 3 – krotnie (odwrotnie proporcjonalnie do czasu pracy) i w zależności od mocy silnika waha się od ok. 20 do 35 miesięcy.



Rys. 3. Okres zwrotu kosztu dodatkowego n (w miesiącach) przy zastąpieniu silnika klasy IE1 silnikiem klasy IE3 (z uwzględnieniem tolerancji) w zależności od wielkości i typu silnika oraz czasu pracy w ciągu roku



Rys. 4. Zysk Z w ciągu 15 lat (w zł) osiągnięty na skutek zastosowania silnika o klasie IE3 (z uwzględnieniem tolerancji) w zależności od wielkości i typu silnika oraz czasu pracy w ciągu roku

Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe wykresy zysku w ciągu 15 lat przy zastąpieniu silnika klasy IE1 silnikiem o klasie IE3. Przyjęto najbardziej pesymistyczny wariant tj. z uwzględnieniem tolerancji obniżającej sprawność silnika IE3. Zysk ten w zależności od ilości godzin pracy silnika i jego mocy waha się od 3000 zł do 25000 zł.

Podsumowanie

Z przeprowadzonej analizy wynika, że silniki indukcyjne trójfazowe o mocach z przedziału (0,75 – 750) kW zużywają ok. 32 % światowej energii elektrycznej dostarczonej odbiorcom, co stanowi ok. 70 % zużycia energii przez wszystkie silniki elektryczne na świecie. Nowa norma zawierająca klasy sprawności (IEC 60034-30-1) [4] dotyczy jeszcze większego zakresu mocy silników ((0,12; 1000 > kW) i rodzaju maszyn. Należy więc spodziewać się, że udział w zużyciu energii przez silniki elektryczne jeszcze wzrośnie, ponieważ obecnie brak danych nie pozwala na oszacowanie zużycia energii przez silniki o mocy z zakresu (0,12 – 0,75) kW i (750 – 1000) kW.

Przedstawione w artykule obliczenia były prowadzone dla różnicy między IE2, IE3, IE4 a IE1 dla najbardziej niekorzystnego przypadku tj. dla najmniejszych różnic między IE2, IE3, IE4 a IE1. Przyjęto bowiem sprawności IE2, IE3, IE4 z tolerancją dopuszczaną przez normę [7] (sprawność mniejsza o 15 % strat w silniku), natomiast sprawność silnika bazowego IE1 – znamionową.

Przyjęcie pesymistycznego wariantu pozwala na oszacowanie najmniejszych uzyskanych korzyści z zastosowania silnika wysokosprawnego. W rzeczywistości producenci silników starają się, aby sprawność silnika była bliska znamionowej, a więc te korzyści mogą być tylko większe.

Otrzymane ilościowe wyniki dla silników z przedziału 4 – 18,5 kW pozwalają na zorientowanie się:

- w ewentualnych oszczędnościach energii,
- okresie zwrotu różnicy między ceną silnika wysokosprawnego a silnika standardowego,
- zysku wynikającego z zaoszczędzonej energii przy pracy silnika w czasie jego resursu.

Przeprowadzona na tej podstawie analiza dowiodła, że najważniejszym parametrem maksymalizacji oszczędności energii jest czas pracy silnika w ciągu roku i poziom sprawności silnika.

Należy jeszcze dodać, że tematyka dotycząca sprawności silników elektrycznych jest także usankcjonowana przez ogłaszanie aktów prawnych wprowadzających obligatoryjnie obowiązek dostarczania na rynek silników o coraz wyższej sprawności (dokument Unii Europejskiej [8]).

Autorzy: dr inż. Konrad Dąbala, dr inż. Renata Sulima, Instytut Elektrotechniki, Zakład Napędów Elektrycznych, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa, E-mail: k.dabala@iel.waw.pl, r.sulima@iel.waw.pl.

LITERATURA

- [1] Waide P., Brunner C. U., Energy efficiency policy opportunities for electric motor driven systems. International Energy Agency, http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EE_for_ElectricSystems.pdf, Paris, 2011
- [2] Dąbala K., Hybrydowa metoda wyznaczania sprawności silników indukcyjnych. *Prace Instytutu Elektrotechniki*, Nr 271, Warszawa, 2015, str. 1-145
- [3] Norma Rotating electrical machines – Part 30: Rotating electrical machines – Part 30: „Efficiency classes of single speed, three-phase, cage-induction motors (IE-code), IEC 60034-30:2008
- [4] Norma Rotating electrical machines – Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE-code), IEC 60034-30-1:2014
- [5] Norma Maszyny elektryczne wirujące – Część 30-1: Klasy sprawności silników prądu przemiennego bezpośredniego zasilanych z sieci (Kod IE), PN-EN 60034-30-1:2014-11
- [6] Jażdżyński W.: Silniki indukcyjne wysokosprawne i energooszczędne, www.euee.agh.edu.pl/materialy/silniki_2.pdf, Kraków, 2013
- [7] Norma Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance. IEC 60034-1:2010
- [8] DYREKTYWA 2005/32/WE PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY z dnia 6 lipca 2005 r. ustanawiająca ogólne zasady ustalania wymogów dotyczących ekoprojektu dla produktów wykorzystujących energię oraz zmieniająca dyrektywę Rady 92/42/EWG, oraz dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 96/57/WE i 2000/55/WE. *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej*, L 191, str. 29-58, 2005