

Starzenie się magnesów trwałych stosowanych w maszynach elektrycznych

Streszczenie. W ostatnich latach wzrosło znaczenie maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi będące kompozytem neodymu, żelaza i boru. Magnesy te są jednak dość kruche, podatne na korozję oraz mogą pogarszać swoje parametry pod wpływem zewnętrznych pól magnetycznych. W artykule zawarto porównanie podstawowych parametrów prądnic synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi zmierzonych w roku ich wyprodukowania i po upływie kilku lat. Ponadto zamieszczone są obserwacje wpływu warunków środowiskowych na korozję magnesów w maszynach elektrycznych i ocena skuteczności stosowanych powłok ochronnych

Abstract. Recently enlarged meaning of electrical machines excited by permanent magnets based of neodymium. However these magnets are quite brittle, susceptible to corrosion as well as can worsen their parameters under the influence of magnetic external fields. Comparing basic parameters of synchronous generators was included in the article aroused measured with permanent magnets in the year of producing them and after several years have passed. Moreover observation of the influence of environmental conditions on the corrosion of magnets is placed in the electrical machinery and assessment of effectiveness of applied protective coatings. (**Aging of permanent magnets used in electric machines**).

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, magnesy trwałe, korozja, wpływ czasu

Keywords: electrical machines, permanent magnets, corrosion, time effect

Wstęp

Rozwój technologii produkcji magnesów trwałych opartych o metale z grupy ziem rzadkich umożliwia konstruowanie maszyn elektrycznych wzbudzanych tymi magnesami o parametrach eksploatacyjnych konkurencyjnych w stosunku do maszyn tradycyjnych.

Maszyny te mają prostszą budowę w porównaniu z maszynami ze wzbudzeniem elektromagnetycznym (bez uzwojenia w wirniku, bez wzbudnicy i regulatora wzbudzenia), są zatem bardziej niezawodne i mają większą sprawność. Mogą pracować praktycznie bezobsługowo. Do podstawowych wad należy zaliczyć: brak bezpośredniej możliwości regulacji napięcia wyjściowego, występowanie momentu zaczepowego, możliwość rozmagnesowania się wskutek zwarcia uzwojenia twornika lub zbyt wysokiej temperatury oraz podatność magnesów na uszkodzenia mechaniczne i ich wrażliwość na warunki środowiskowe.

Z punktu widzenia zastosowania magnesów trwałych w maszynach elektrycznych na szczególną uwagę zasługują materiały z domieszkami pierwiastków z grupy lantanowców (np. samaru lub neodymu). Magnesy samarowe mają wysoką odporność temperaturową (do 300 °C) i są mało podatne na korozję, jednak cena ich jest wysoka.

Magnesy neodymowe mają gorsze parametry użytkowe, ale są tańsze i to głównie spowodowało, że w maszynach elektrycznych są one najczęściej stosowane. Ponadto w maszynach maksymalną temperaturę pracy określają własności izolacji i nie ma potrzeby stosować magnesów o bardzo wysokiej odporności temperaturowej. Na rynku dostępne są magnesy neodymowe o dopuszczalnej temperaturze pracy do 200 °C. Jednak własności magnetyczne tych magnesów są zależne od temperatury i ulegają znacznemu pogorszeniu w temperaturze przekraczającej 130 °C. Przyrost temperatury uzwojenia twornika maszyny elektrycznej wzbudzanej magnesami neodymowymi powinien być więc niższy od 110 K (przy temperaturze otoczenia 20 °C).

Proces produkcyjny tych magnesów polega na prasowaniu sproszkowanych metali w polu magnetycznym, a następnie wyżarzaniu ich w piecach próżniowych (magnesy spiekane). Możliwe jest też stosowanie żywic wiążących (magnesy wiązane). Magnesy dostarczane przez wytwórnie zgodnie z wymaganiami wymiarowymi zamawiających ułatwiają wytwarzanie i umożliwiają konstruowanie maszyn

elektrycznych charakteryzujących się korzystnymi cechami eksploatacyjnymi.

W tabeli 1 przedstawiono podstawowe parametry magnesów neodymowych dostępnych na rynku. Wszystkie te magnesy są produkcji chińskiej

Tabela.1. Własności magnesów neodymowych spiekanych

Typ	Koercja	Remanencja	(BH) _{max}	Maks. temperatura pracy
	[kA/m]	[T]	[kJ/m ³]	°C
N35	≥868	1,17+1,21	263+287	90
N38	≥868	1,21+1,25	287+310	90
N40	≥835	1,26+12,9	318+324	90
N42	≥835	1,29+1,32	324+342	80
N45	≥835	1,33+1,37	342+366	80
N50	≥842	1,40+1,44	324+342	70
N52	≥842	1,44+1,47	394+414	70
N30H	≥810	1,08+1,12	232+239	120
N33H	≥842	1,14+1,17	247+263	120
N35H	≥868	1,17+1,21	263+279	120
N38H	≥915	1,22+1,26	287+303	120
N40H	≥915	1,26+1,29	303+318	120
N42H	≥899	1,29+1,32	318+334	120
N44H	≥923	1,33+1,36	334+350	110
N30SH	≥804	1,08+1,12	223+239	150
N33SH	≥844	1,14+1,17	247+263	150
N35SH	≥860	1,17+1,21	263+279	150
N38SH	≥860	1,21+1,25	287+302	150
N40SH	≥860	1,26+1,29	303+318	150
N42SH	≥907	1,30+1,33	318+334	140
N30UH	≥804	1,08+1,12	223+239	180
N35UH	≥836	1,17+1,21	263+278	180
N38UH	≥907	1,22+1,26	287+303	180
N30EH	≥804	1,08+1,12	223+239	200
N33EH	≥820	1,14+1,17	247+263	200
N35EH	≥860	1,17+1,21	263+279	200

Koercja magnetyczna to wartość zewnętrznego pola, jaką trzeba przyłożyć do magnesu aby go rozmagnesować, czyli jest to odporność magnesu na rozmagnesowanie.

Remanencja to wartość indukcji magnetycznej jaką posiada magnes po usunięciu pola magnesującego.

Gęstość energii (BH)_{max} jest maksymalną wartością iloczynu BH na krzywej odmagnesowania magnesu. Potocznie parametr ten określa jak „mocny” jest dany magnes. Temperatura Curie powyższych magnesów wynosi 310 ÷ 340 °C.

Wpływ czasu na własności prądnic wzbudanych magnesami neodymowymi

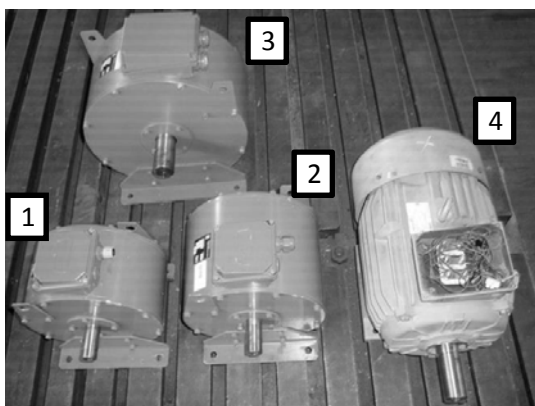
Oddziaływanie pól zewnętrznych, twornika maszyn elektrycznych czy też ewentualne zmiany w strukturze krystalicznej spieku tworzącego magnesy powodują pogorszenie się ich własności.

Producenci podają, że zmiany te w czasie są niewielkie, a okres życia magnesów neodymowych jest długi: po 30 latach tracą połowę swoich własności magnetycznych, [5]. W latach ubiegłych w Instytucie Elektrotechniki wykonano modele użytkowe prądnic synchronicznych wzbudanych magnesami trwałymi przeznaczone do współpracy z odnawialnymi źródłami energii. Maszyny te były wszechstronnie przebadane w latach ich wykonania. W celu sprawdzenia jak upływ czasu działa na parametry takich maszyn w roku 2011 wybrane próby powtórzono na prądnicy nr 4, a w roku 2016 na wszystkich prądnicach. Próby przeprowadzono na następujących prądnicach.

Tabela 2. Prądnice poddane badaniom porównawczym

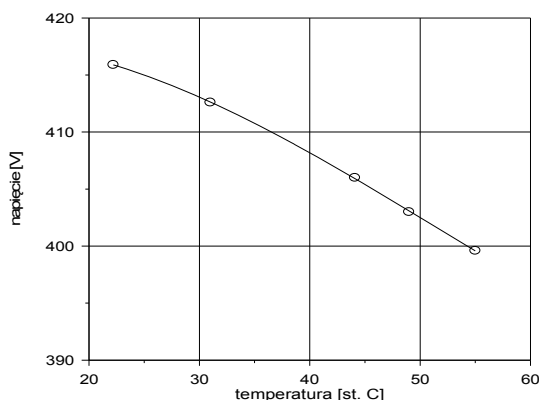
prądnica numer	rok wykonania	moc kW	prędkość obrotowa obr/min	typ magnesów
1	2009	0,2	100	N38 SH
2	2009	0,5	100	N38 SH
3	2008	1	100	N38 SH
4	2004	5	1000	N35 SH

Na rysunku 1 zamieszczono fotografię badanych prądnic.



Rys. 1. Fotografia badanych prądnic

Wartość indukcji (napięcia) jest zależna od temperatury. Na rysunku 2 przedstawiono otrzymaną doświadczalnie zależność napięcia biegu jałowego prądnicy nr 4 od temperatury pakietu twornika (temperatura magnesów była zbliżona), próby wykonano w roku wytworzenia maszyny. Próby porównawcze należy więc wykonywać tak, aby warunki temperaturowe (temperatura otoczenia i temperatura pakietu) były możliwie zbliżone do tych z przed lat.



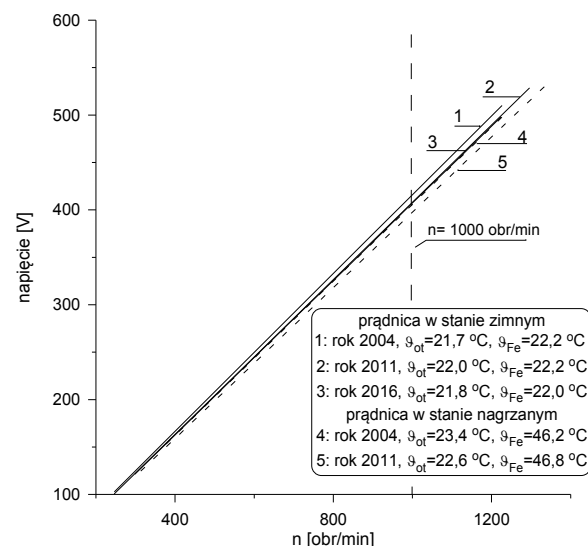
Rys. 2. Zależność napięcia biegu jałowego prądnicy nr 4 od temperatury pakietu

W tabeli 3 przedstawiono zestawienie wyników wykonanych porównawczych pomiarów napięcia biegu jałowego przy znamionowej prędkości obrotowej maszyn.

Tabela 3. Porównanie wartości napięć biegu jałowego prądnic zmierzonych w roku ich wykonania i w latach późniejszych

prądnica numer	rok próby	temp. otoczenia °C	napięcie biegu jałowego V	różnica	
				V	%
1	2009	14,8	73,7	2,1	2,85
	2016	14,9	71,6		
2	2009	13,5	72,1	1,7	2,36
	2016	14,0	70,4		
3	2008	24,8	61,3	1,4	2,28
	2016	24,5	59,9		
4	2004	21,7	415,8	7,7	8,9
	2011	22,0	408,1		
	2016	21,8	406,9		

Na rysunku 3 przedstawiono charakterystyki $U=f(n)$ prądnicy nr 4 wyznaczone w latach 2004, 2011 i 2016 dla stanu zimnego maszyny oraz bezpośrednio po próbie nagrzewania.



Rys. 3. Porównanie charakterystyk $U = f(n)$ prądnicy nr 4 wykonanych w latach 2004, 2011 i 2016

Przy znamionowej prędkości obrotowej prądnicy różnica napięć pomiędzy latami 2004 i 2011, dla stanu zimnego wynosiła 7,7 V, dla stanu nagrzanego 8,3 V, zaś pomiędzy latami 2004 i 2016 dla stanu zimnego 8,9 V.

W roku 2011 wykonano również porównawcze próby nagrzewania i obciążeniowe prądnicy nr 4. Badanie wykonano przy znamionowym obciążeniu 5 kW i prędkości obrotowej 1000 obr/min. Wyniki porównano z wynikami uzyskanymi z roku wytworzenia prądnicy.

Ustalone temperatury pakietu stojana i uzwojenia były następujące:

rok 2004

$$\vartheta_{ot} = 23,4\text{ }^{\circ}\text{C}, \quad \vartheta_{Fe} = 46,2\text{ }^{\circ}\text{C}, \quad \vartheta_{Cu} = 64,2\text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\Delta\vartheta_{Cu} = 39,5\text{ }^{\circ}\text{C};$$

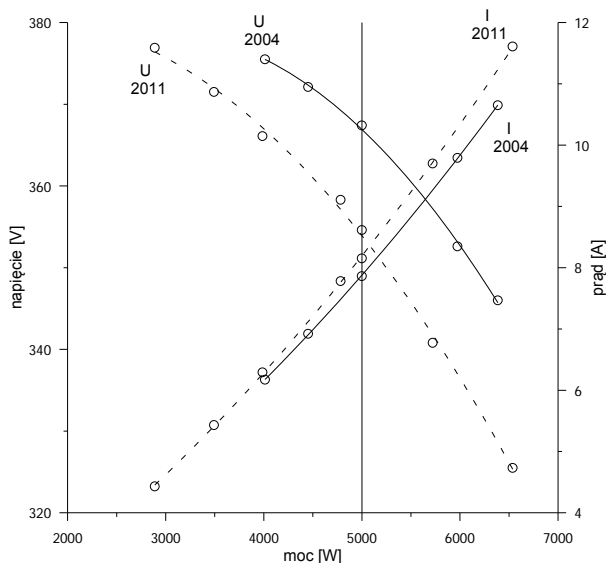
rok 2011

$$\vartheta_{ot} = 22,6\text{ }^{\circ}\text{C}, \quad \vartheta_{Fe} = 46,8\text{ }^{\circ}\text{C}, \quad \vartheta_{Cu} = 65,5\text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\Delta\vartheta_{Cu} = 42,9\text{ }^{\circ}\text{C};$$

Różnica przyrostów temperatury uzwojenia w próbach nagrzewania wykonanych w latach 2004 i 2011 jest niewielka i wynosi 3,4 stopnia. Prądnica jest nadal niewykorzystana termicznie istnieje znaczny zapas w stosunku do dopuszczalnej temperatury zastosowanych magnesów.

Próbie obciążenia przeprowadzono bezpośrednio po próbach nagrzewania – w stanie nagrzanej prądnicy. Na rysunku 4 zamieszczono porównanie charakterystyk obciążeniowych prądnicy przeprowadzone w latach 2004 i 2011.



Rys. 4. Porównanie charakterystyk obciążeniowych prądnicy wykonanych w latach 2004 i 2011

Prądy i napięcia zmierzone po ustaleniu się temperatury przy obciążeniu 5 kW przestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Porównanie wartości napięć i prądów przy znamionowym obciążeniu 5 kW zmierzonych w roku 2004 i 2011

	U V	I A
2004	367,4	7,86
2011	354,6	8,15
różnica	18,8	0,29

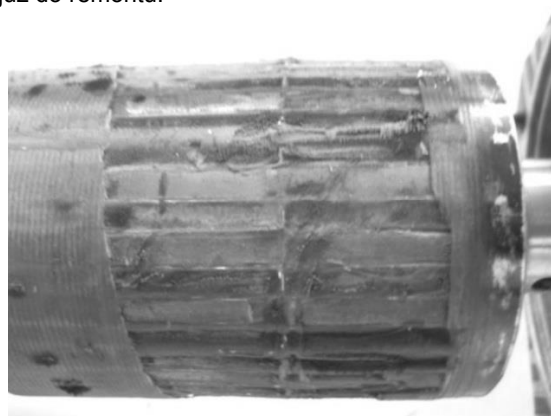
Po upływie siedmiu lat napięcie prądnicy przy obciążeniu 5 kW zmniejszyło się 18.8 V co stanowi 3.5%, natomiast prąd wzrósł o 0.29 A (3.7%). Zmiany te w niewielkim stopniu wpływają na parametry maszyny.

Wpływ warunków środowiskowych na korozję magnesów neodymowych

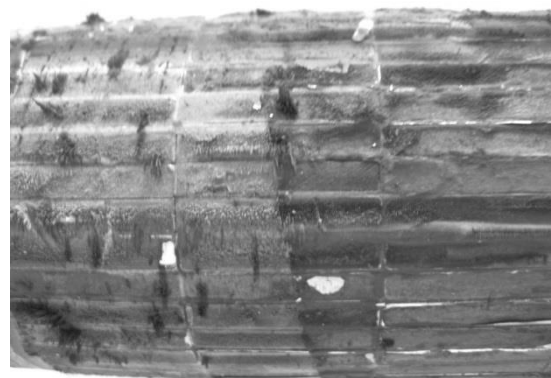
Magnesy zawierające neodym są podatne na korozję bowiem metal ten wykazuje dużą tendencję do utleniania się. Wyniki oddziaływania różnych środowisk na magnesy neodymowe opisano w [2]. Nie należy stosować ich w środowiskach kwaśnych, zasadowych i wilgotnych. Dlatego zachodzi konieczność zabezpieczania ich przed wpływem środowiska. W tym celu powleka się powierzchnie magnesów warstwą ochronną. Najczęściej stosowane pokrycia to: nikiel, nikiel – miedź, cynk, złoto, srebro, cyna, tytan, żywica, fosforyzowanie, [3], [4], [5].

Niestety mimo stosownych zabezpieczeń w środowiskach wilgotnych lub aktywnych magnesy często ulegają korozji. Powstałe na skutek naprężeń cieplnych lub uszkodzeń mechanicznych mikropęknięcia powłoki ochronnej powodują, że wilgoć przenika do wnętrza struktury magnesu powodując jego degradację. Powłoki metalowe mają stosunkowo słabą przyczepność do spieku tworzącego magnes co może powodować łuszczenie się pokrycia. Na rysunkach 4 i 6 przedstawiono fotografie wirnika silnika prądu stałego o mocy 4kW, wyprodukowanego w roku 1999, wzbudzanego magnesami neodymowymi typu N33SH galwanicznie pokrytymi nikiem.

Silnik ten w pracował w środowisku wilgotnym i w roku 2013 uległ awarii. Po demontażu silnika i wyjęciu wirnika okazało się, że niklowe pokrycie ochronne złuszczyło się, znaczna część objętości magnesów zamieniła się w proszek. Celem zabezpieczenia magnesów przed odklejaniem się wirnik był pokryty bandażem. Złuszczenie się powłoki niklowej i sproszkowanie zewnętrznej powierzchni magnesów spowodowało, że bandaż oddzielił się od magnesów powodując zatarcie się wirnika. Proszek magnetyczny dostał się do wnętrza silnika co sprawiło, że nie nadawał się on już do remontu.



Rys. 5. Fotografia wirnika z częściowo usuniętym bandażem



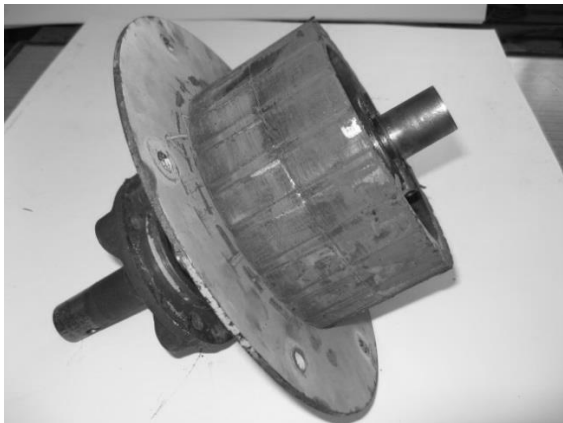
Rys. 6. Fotografia wirnika bez bandażu, widoczne są kawałki pokrycia niklowego oraz „sople” z proszku magnetycznego

Podobne uszkodzenia uzyskano w warunkach laboratoryjnych [4] poddając magnesy neodymowe pokryte warstwą niklu działaniu temperatury i wilgotności. Już po dwudziestu godzinach próby stwierdzono, że pokrycie niklowe zaczęło się złuszczać a magnes zamieniać się w proszek.

Według własnych obserwacji autora magnesy są lepiej chronione, jeśli jako zabezpieczenie stosuje się fosforyzowanie. Fosforyzacja (fosforyzacja) polega na pokryciu powierzchni magnesów warstwą ochronną fosforanów metali (np. żelaza). Warstwa ta jest odporna na działanie wysokich temperatur oraz jest dobrym podkładem dla lakierów.

Na rysunku 7 przedstawiono fotografię wirnika prądnicy o mocy 2 kW zainstalowanej w elektrowni wiatrowej, (typu Savoniusu). Prądnica ta pracowała na wolnym powietrzu w ustawieniu pionowym przez okres siedmiu lat.

Z powodu uszkodzenia łożyska została zdemonstrowana i poddana oględzinom. Magnesy neodymowe pokryte były rdzą, ale ich struktura była nienaruszona. W znacznie gorszym stanie był klasyczny blachowany pakiet twornika – korozja była tam bardziej widoczna (rys. 8). Prądnica ta jednak mogłaby jeszcze długo poprawnie pracować.



Rys. 7. Wirnik prądnicy z widocznymi śladami korozji



Rys. 8. Skorodowany twornik prądnicy

Wnioski z wykonanych badań

Wyniki wykonanych badań i obserwacji pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków.

Upływ dość długiego czasu (7 - 12 lat) nie spowodował znaczącego pogorszenia się parametrów magnesów neodymowych zastosowanych w prądnicach synchronicznych: napięcie biegu jałowego w stanie zimnym i przy znamionowych prędkościach obrotowych badanych czterech prądnic zmniejszyło się o ok. 2 – 3 %. Wyniki badań potwierdzają informacje producentów dotyczących niewielkiego wpływu czasu na parametry magnesów

neodymowych nie poddanych rozmagnesującemu działaniu czynników zewnętrznych. Badane prądnice od czasu ich wytworzenia pracowały jedynie sporadycznie, należy przypuszczać, że gdyby maszyny te pracowały dłużej, parametry magnesów uległyby większemu pogorszeniu.

Wykonane po 7 latach od wyprodukowania próby nagrzewania i obciążenia prądnicy nr 4 wykazały, że ustalony przyrost temperatury uzwojenia stojana przy obciążeniu znamionowym 5 kW zwiększył się o 3,4 stopnia lecz jest on nadal stosunkowo niski i istnieje znaczny zapas cieplny w stosunku do temperatury dopuszczalnej dla magnesów. Napięcie i prąd przy obciążeniu znamionowym prądnicy w porównaniu z rokiem 2004 zmieniły się o ok. 3,5%. Mimo upływu 7 lat parametry badanej prądnicy były nadal zadawalające.

Maszyny elektryczne o wzbudzeniu magneto-elektrycznym nie powinny pracować w środowiskach wilgotnych. Poczynione obserwacje wskazują, że mimo stosowania powłok ochronnych magnesy ulegają degradacji. Dotyczy to zwłaszcza magnesów pokrytych niklem, magnesy fosforyzowane i lakierowane wykazują się większą odpornością na korozję.

Autor: dr inż. Zdzisław Krzemień, Instytut Elektrotechniki, Zakład Napędów Elektrycznych, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa, E-mail: z.krzemien@iel.waw.pl

LITERATURA

- [1] Drak M., Dobrzanski L. A.: Wpływ warunków środowiskowych na starzenie magnesów trwałych Nd-Fe-B. *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, nr 74/2006
- [2] Ertugrul B.T., Sincar E., Demir Y., Aydin M.: Influence of Sintered Nd-Fe-B Magnet Corrosion on Permanent Magnet Synchronous Motor Performance, Industrial Electronics Society, *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE*
- [3] Trout S. R.: Optimum Corrosion Protection of Nd-Fe-B Magnets, www.spontaneousmaterials.com
- [4] Yogal N., Lehmann C.: Study of Magnetic Properties on the Corrosion Behavior and Influence of Temperature in Permanent Magnet (Nd-Fe-B) Used in PMSM, *International Journal of Electrical, Computer, Electronics and Communication Engineering*, Vol:8 No:11, 2014
- [5] www.Allianceorg.com