



Europejski
Instytut Miedzi
Copper Alliance



Efektywność energetyczna

Zarządzanie silnikami elektrycznymi jako aktywami

Bruno De Wachter

Luty 2015

Nr ref EIM: EIM02102

Wstęp

Silniki elektryczne są powszechnie stosowane i dostępne w szerokim zakresie mocy wyjściowych. Silniki elektryczne są doskonałym źródłem napędu w przeważającej większości procesów w przemyśle i sektorze usług. Niektóre silniki są widoczne jako oddzielne elementy, inne są wbudowane w bardziej złożonych produktach takich, jak sprężarki powietrza, pompy ciepła, pompy wodne i wentylatory. Energia zużywana przez silniki elektryczne stanowi w przybliżeniu 65% zużycia energii elektrycznej w przemyśle Unii Europejskiej.

Pomimo swojej istotnej roli, silniki elektryczne, same w sobie są rzadko postrzegane, jako aktywa produkcyjne. Powinny być jednak tak traktowane, ponieważ sposób ich zakupu, obsługi i konserwacji oraz wymiany może decydować o dużej różnicy w całkowitej efektywności sprzętu (OEE), a zatem rentowności. Nieoptymalne zarządzanie silnikami prowadzi do wyższych strat energii i, co może mieć jeszcze większe znaczenie, do obniżenia ich niezawodności i dyspozycyjności (gotowości eksploatacyjnej) w zakładzie produkcyjnym.

Wczesna wymiana silników elektrycznych jest rzadko spotykana, gdyż większość przedsiębiorstw eksploatuje silniki aż do wystąpienia uszkodzenia. Z chwilą uszkodzenia silniki są jak najszybciej naprawiane lub wymieniane, a wymiana odbywa się zwykle z uwzględnieniem tylko podstawowych wymagań technicznych. Bardziej szczegółowe spojrzenie na wszystkie czynniki kosztowe ujawnia jednak, że wczesna wymiana silnika elektrycznego często zwraca się w krótkim czasie.

Szybszy zwrot nakładu jest powodowany poprawą efektywności, obniżeniem kosztów konserwacji i uniknięciem nieplanowanych przestojów i związanych z nimi strat.

Silniki elektryczne są niedostrzeganymi aktywami. Przez objęcie ich programem zarządzania aktywami, przedsiębiorstwa mogą poprawić swoją wydajność i zyskać przewagę konkurencyjną.

Dlaczego zarządzanie aktywami jest potrzebne w przypadku silników elektrycznych?

W warunkach ustawicznego stresu środowiska produkcyjnego, możliwości zatrzymania się i ponownego rozważenia procedur zakupu, metod obsługi i konserwacji oraz wymiany silników elektrycznych, są niewielkie. Dopóki nikt nie będzie ponosił odpowiedzialności za zarządzanie silnikami elektrycznymi w skali całego przedsiębiorstwa, pracownicy w środowisku produkcyjnym będą nadal działać doraźnie i obsługiwać, naprawiać i wymieniać je w taki sam sposób jak robili to dotychczas, bez zrozumienia sensu całkowitego kosztu posiadania (TCO).

Oczywisty czynnik napędzający zmiany często umyka uwadze, ponieważ straty generowane przez suboptymalny silnik rozdzielają się pomiędzy różne miejsca powstawania kosztów: zużycie energii, straty materiałowe, utracone przychody, dodatkowe godziny pracy, zmniejszenie produktywności, obniżenie jakości produkcji itd. Wyznaczenie osoby – spośród pracowników przedsiębiorstwa lub pozyskanej w drodze outsourcingu – upoważnionej do zarządzania silnikami elektrycznymi spowoduje, że silniki będą traktowane z uwagą, na jaką zasługują

Jakie aspekty uwzględnia zarządzanie silnikami elektrycznymi jako aktywami?

Zaangażowanie się w zarządzanie: Przede wszystkim, strategiczne decyzje dotyczące zarządzania aktywami powinny być podejmowane poza łańcuchem codziennej działalności. Umożliwi to konieczne skoncentrowanie się na całkowitych kosztach i działaniu w dłuższej perspektywie. Podobnie, pełne zaangażowanie jest niezbędne dla zapewnienia wymaganej współpracy wszystkich, biorących w tym udział pracowników.

Baza danych silników: Baza danych silników pozwala na śledzenie wszystkich silników w budynku, zakładzie lub w przedsiębiorstwie. Może obejmować charakterystyki zakupu, dane operacyjne, czynności obsługowe i konserwacyjne, oraz dane pomiarowe (jeżeli takowe są dostępne).

Konserwacja prognozowana: Silniki powinny być konserwowane i wymieniane na podstawie ich faktycznego stanu. Powstaje pytanie, w jaki sposób ma być oceniany faktyczny stan silnika? Dla silników dużej mocy, albo krytycznych dla łańcucha produkcji, przeprowadza się pomiary takie, jak analiza drgań, pomiar rezystancji uziemienia lub termografia. Na podstawie wyników tych pomiarów można zaplanować odpowiednie działania konserwacyjne albo określić optymalny czas wymiany. W przypadku małych silników tego rodzaju testy są na ogół zbyt daleko idące, ale oszacowanie stanu silnika można wykonać w oparciu o przybliżone dane eksploatacyjne.

Staranna obsługa i konserwacja: Wszystkie czynności obsługowe i konserwacyjne silników elektrycznych winny być prowadzone starannie i z zachowaniem dokładności. Instalowanie nowych silników powinno być wykonywane ściśle według systematycznej procedury w celu zapewnienia bezpiecznej i niezawodnej eksploatacji.

Proces decyzyjny naprawy/wymiany: Jaka jest strategia minimalnego całkowitego kosztu posiadania silników elektrycznych? Czy jest to naprawa silnika w razie jego uszkodzenia, czy też wymiana, gdy stanie się nieunikniona? To rzadko jest najlepszą opcją. W wielu przypadkach wymiana silnika przed wystąpieniem uszkodzenia jest finansowo korzystana, ponieważ pozwala skrócić przestoje i obniżyć straty energii. Powinien zostać opracowany proces podejmowania decyzji o naprawie lub wymianie silnika uwzględniający charakterystyki silnika, warunki pracy, bieżące pomiary i szacunkowy czas pracy.

Obniżenie stanu rezerw magazynowych silników: Jedną z korzyści wczesnej wymiany silnika i związanego z tym zmniejszenia możliwości nieprzewidzianych uszkodzeń silnika, jest to, że utrzymywanie dużego zapasu części zamiennych i silników przestaje być konieczne. Niewielki zapas, własny lub utrzymywany przez dostawcę, będzie wystarczający do prowadzenia planowanej wymiany silników oraz do tego, aby mieć pod ręką zapasowy silnik w razie przypadkowego, przedwczesnego uszkodzenia. Niewielkie koszty związane z krótkim czasem dostawy przez zewnętrznego dostawcę powinny zostać zrównoważone przez oszczędności zamrożonego kapitału, nakładu pracy związanego z utrzymaniem zmagazynowanych silników w dobrym stanie oraz przez możliwość zastosowania najnowszych modeli.

Zarządzanie wewnątrzzakładowe czy zlecone w drodze outsourcingu? Zarządzanie silnikami, jako aktywami nie musi być koniecznie wykonywane własnymi siłami. Często najlepszym rozwiązaniem może być wewnątrzzakładowy koordynator współpracujący ze specjalistami zaangażowanymi w ramach outsourcingu.

Korzyści zarządzania silnikami

- 1) **Poprawa sprawności energetycznej:** Nowe silniki muszą spełniać "Minimalne normy sprawności energetycznej silników" (MEPS) Unii Europejskiej. Można, zatem oczekiwać, że nowe silniki będą miały wyższą sprawność od dotychczas eksploatowanych. W wielu przypadkach, zastosowanie napędów z regulowaną prędkością (VSD) może dodatkowo zwiększyć sprawność eksploatacyjną układu napędowego. Całkowite zwiększenie efektywności energetycznej może przynieść znaczną różnicę w rocznym zużyciu energii zakładu.
- 2) **Obniżenie kosztów konserwacji:** Stosowanie ciągłego monitorowania stanu silników umożliwia przewidywanie następnych okresów międzyobsługowych. Usprawnione planowanie i skrócenie czasu przestojów spowoduje obniżenie kosztów konserwacji.
- 3) **Zmniejszenie ryzyka nieplanowanych wyłączeń:** Zarządzanie aktywami obejmujące wymianę silników przed uszkodzeniem w znacznym stopniu zmniejsza ryzyko nieplanowanych wyłączeń. Skutki nieplanowanych wyłączeń mogą być różnorakie: może to być, np. spowolnienie produkcji, zniszczenie towarów, uszkodzenie urządzeń, konieczność dodatkowych prac konserwacyjnych oraz bezczynność załogi do czasu ponownego uruchomienia linii produkcyjnej. W chłodniach, awaria systemu chłodzenia może spowodować podniesienie się temperatury do poziomu, przy którym nastąpi zniszczenie wszystkich przechowywanych towarów. W biurach, wyłączenie systemu HVAC z powodu uszkodzenia silnika będzie wpływać na produktywność pracowników jak również na jakość ich pracy. Zarządzanie silnikami elektrycznymi zmniejsza do minimum ryzyko tego rodzaju strat związanych z nieprzewidywanym uszkodzeniem silnika.

- 4) **Minimalizacja TCO:** Celem zarządzania aktywami jest minimum całkowitego kosztu posiadania (TCO) silników. Obejmuje on nie tylko koszty zakupu i instalacji; w kalkulacji TCO należy również uwzględnić zużycie energii, wydajność produkcji i koszty obsługi.

Oszacowanie intensywności wykorzystania silnika elektrycznego

Intensywność wykorzystania silnika powinna być znana w celu opracowania dokładnego planu konserwacji prognozowanej, obliczenia optymalnego terminu wymiany oraz sformułowania specyfikacji zakupu. W szczególności musi być znana liczba godzin pracy silnika jak również profil jego obciążenia. Ustalenie tych wartości z zadawalającą precyzją może często być skomplikowanym zadaniem. Na szczęście, dobre oszacowania mogą być wystarczającą podstawą do podejmowania racjonalnych decyzji w zarządzaniu silnikami.

1) Oszacowanie obciążenia silnika

- a) **Pomiary mocy** są czasochłonne, wymagają udziału wykwalifikowanych techników i dostępu do układu sterowania silnika. Może to być opłacalne tylko dla silników o większych mocach.
- b) Jeżeli silnik pracuje w zakresie między 50% a 100% obciążenia znamionowego, pobierany prąd jest w przybliżeniu proporcjonalny do obciążenia. W tym zakresie pracy można wykorzystać wyniki **pomiarów prądu**, wykonanych dokładnym miernikiem.
- c) Poślizg silnika indukcyjnego jest ściśle określony. Oznacza to, że prędkość silnika jest proporcjonalna do jego momentu, a zatem do obciążenia. **Prędkość silnika** można mierzyć za pomocą stroboskopu.
- d) Silniki wbudowane w takich urządzeniach, jak sprężarki powietrza, pompy ciepła i sprężarki urządzeń chłodniczych, pracują przy obciążeniu 100%. Dla silników zintegrowanych w systemach, jak HVAC i w procesach przemysłowych, można domyślnie **przyjąć obciążenie 75%**, co będzie wystarczająco dobrym oszacowaniem.

- 2) **Oszacowanie czasu pracy:** Czas ten zmienia się znacznie w zależności od rodzaju zastosowania silnika. Dokładne oszacowanie czasu pracy wymaga użycia rejestratora danych w reprezentatywnym okresie czasu, co jest kosztowne i czasochłonne. W większości przypadków, znający swój zakład kierownik może wykonać dość dobre oszacowania w oparciu tygodniowy czas pracy (jednozmianowa/dwuzmianowa, praca ciągła lub nie, itp.).

Model decyzji o naprawie/wymianie silnika

W zarządzaniu silnikami potrzebny jest odpowiedni model umożliwiający porównywanie całkowitego kosztu posiadania (TCO) dla różnych scenariuszy wymiany lub naprawy.

Użyty tutaj model przedstawia graficzną reprezentację analizy TCO opartą na względnej różnicy kosztów między dwoma scenariuszami. Może on być użyty do ilościowego określenia korzyści z wczesnej naprawy silnika lub wymiany. Może być również wykorzystany do porównania TCO w przypadku naprawy i wymiany uszkodzonych silników.

Model uwzględnia następujące czynniki:

- 1) Koszt zakupu/przezwolenia
- 2) Początkową sprawność nowego silnika i roczny spadek sprawności w czasie eksploatacji
- 3) Taryfę za energię elektryczną i jej roczny wzrost
- 4) Dobowy czas pracy silnika w godzinach
- 5) Średnie obciążenie silnika
- 6) Estymowany (pozostały) czas przydatności technicznej
- 7) Koszt przestoju silnika
- 8) Wartość rezydualna silnika.

Należy zauważyć, że sprawność silnika i taryfa za energię elektryczną przyjęte w tym modelu są zmienne w czasie. Wiele modeli zakłada, że zmienne te mają stałą wartość, ale nie odpowiada to rzeczywistości.

- Taryfy za energię elektryczną ewoluują w czasie za przyczyną wielu czynników natury rynkowej.

- W idealnych warunkach pracy sprawność silnika elektrycznego powinna pozostawać prawie na tym samym poziomie, ale przypadkowe uszkodzenie, dodatkowe nagrzewanie spowodowane nagromadzeniem się zanieczyszczeń i zużycie mechaniczne, mogą prowadzić do ciągłego obniżania się sprawności.

Naprawa silnika obniża jego sprawność, z wyjątkiem przypadków, gdy jest wykonana niezwykle starannie przez wysoko wykwalifikowanych techników. Drogą drobnych ulepszeń w konstrukcji silnika, można podczas naprawy nawet poprawić jego sprawność, ale w praktyce jest to rzadko spotykane.

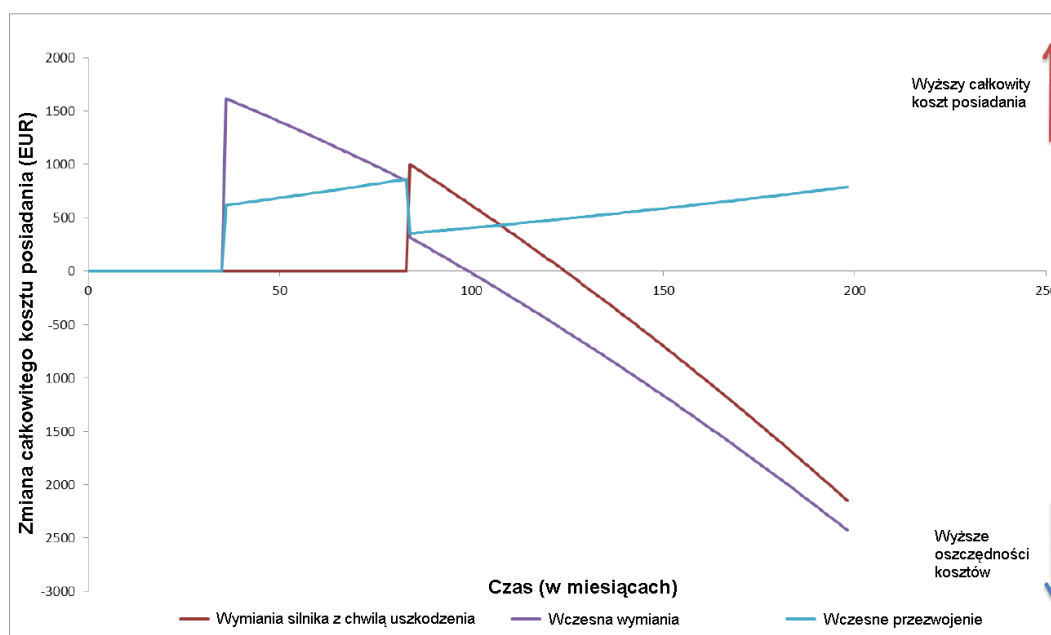
Porównanie różnych scenariuszy

Opisany wyżej model posłużył tutaj do porównania krzywych kosztów dla czterech różnych scenariuszy. Scenariuszem bazowym jest "przezwrojenie w chwili uszkodzenia" przywracające silnikowi poziom sprawności sprzed uszkodzenia. Drugi scenariusz to wczesne przewrojenie silnika, ale z niewielką utratą sprawności. Trzecim scenariuszem jest zastąpienie silnika w chwili wystąpienia uszkodzenia silnikiem wysokosprawnym. Czwartym scenariuszem jest zastąpienie istniejącego silnika silnikiem wysokosprawnym przed wystąpieniem uszkodzenia.

W obliczeniach wstępnych nie uwzględniono kosztu przestoju ani wartości rezydualnej silnika.

Scenariusz	Moc znamionowa silnika	Koszt początkowy silnika	Sprawność silnika przy obciążeniu	Koszt energii	Dobowy czas pracy	Średni czas życia	Roczny przyrost kosztu energii	Roczny spadek sprawności
Nr	kW	EUR	%	EUR/kWh	Godz.	Lata	EUR	
1	12	2000	87,0%	0,1	12	7	0,005	0,1%

Scenariusz	Okres umorzenia	Wartość rezydualna	Koszt przestoju	Koszt przewrojenia silnika	Sprawność silnika po przewrojeniu	Koszt wymiany silnika	Sprawność nowego silnika
Nr	Mies.	EUR	EUR	EUR	%	EUR	%
1	48	0	0	1200	86%	2200	89%



Rysunek 1. Zmiana całkowitego kosztu posiadania (TCO) dla różnych scenariuszy względem przypadku bazowego przewrojenia silnika z chwilą uszkodzenia.

- Linia "Zero zmiany TCO" oznacza scenariusz przewożenia w chwili uszkodzenia.
- Linia scenariusza wczesnego przewożenia wznosi się z powodu wyższych strat po przewożeniu.
- Linie obydwóch scenariuszy wymiany opadają z powodu zmniejszenia strat energii.
- W punkcie uszkodzenia, "koszt przewożenia" zostaje odjęty od wszystkich trzech krzywych. Ponieważ w scenariuszu bazowym w tym punkcie następuje przewożenie, we wszystkich trzech pozostałych scenariuszach występuje w tym miejscu "uniknięty koszt przewożenia".

Widzimy stąd, że:

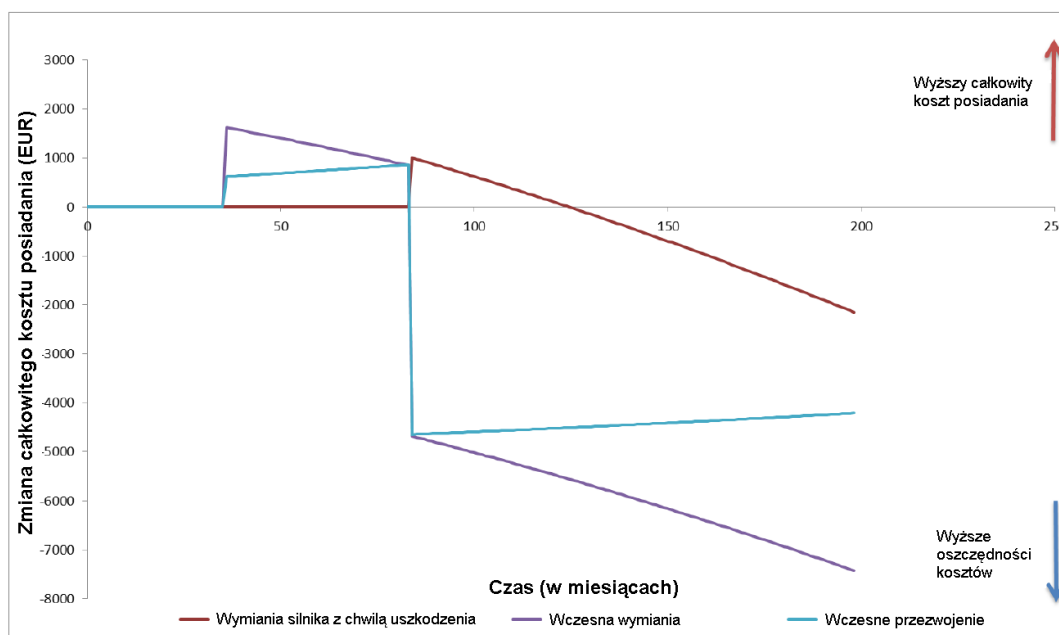
- 1) W scenariuszu wczesnego przewożenia całkowity koszt posiadania (TCO) jest wyższy niż scenariuszu bazowym z powodu pogorszenia sprawności silnika.
- 2) "Wymiana w punkcie uszkodzenia" jest bardziej korzystna niż "przewożenie w punkcie uszkodzenia".
- 3) Najniższy całkowity koszt posiadania uzyskuje się w scenariuszu "wczesnej wymiany".

W drugim obliczeniu założono koszt przestoju w wysokości 5 000 EUR w przypadku nieprzewidzianego uszkodzenia silnika. Wszystkie pozostałe warunki pozostają takie same jak dla obliczenia wstępnego.

Założony koszt przestoju wydaje się być duży, ale w rzeczywistości jest on umiarkowany. Studium przypadku kanadyjskiej celulozowni wykazało wartość godzinnej produkcji 25 000 USD. W takim środowisku produkcyjnym 5 000 EUR odpowiada zaledwie 12 minutom przestoju.

Scenariusz	Moc znamionowa silnika	Koszt początkowy silnika	Sprawność silnika przy obciążeniu	Koszt energii	Dobowy czas pracy	Średni czas życia	Roczny przyrost kosztu energii	Roczny spadek sprawności
Nr	kW	EUR	%	EUR/kWh	Godz.	Lata	EUR	
1	12	2000	87,0%	0,1	12	7	0,005	0,1%

Scenariusz	Okres umorzenia	Wartość rezydualna	Koszt przestoju	Koszt przewożenia silnika	Sprawność silnika po przewożeniu	Koszt wymiany silnika	Sprawność nowego silnika
Nr	Mies.	EUR	EUR	EUR	%	EUR	%
1	48	0	5000	1200	86%	2200	89%



Rysunek 2. Zmiana całkowitego kosztu posiadania (TCO) dla różnych scenariuszy względem przypadku bazowego przewożenia silnika z chwilą uszkodzenia.

Widzimy teraz, że:

- 1) Udział kosztu przestoju w całkowitym koszcie posiadania (TCO) jest dominujący.
- 2) Zgodnie z oczekiwaniami, wczesne działanie (przed wystąpieniem uszkodzenia) daje w wyniku najniższą wartość TCO, następną najbliższą opcją jest wczesne przezwojenie.
- 3) Wymiana w punkcie uszkodzenia jest nieco bardziej korzystna od przezwojenia w punkcie uszkodzenia, ale przy dominującym koszcie przestoju względna różnica między tymi dwoma scenariuszami zmalała.

Trzy przykłady wzięte z życia

Oczyszczalnia ścieków w stanie Nowy Jork

Oczyszczalnia ścieków w Albany, NY, została wykorzystana, jako przypadek testowy dla porównania nowych silników ze starymi, ale w pełni sprawnymi silnikami. Silniki o mocach 7,5 kW i 15 kW zostały zastąpione wysokosprawnymi odpowiednikami. Obliczony w tym studium czas zwrotu nakładu wyniósł w przybliżeniu dwa lata. Czas ten mógłby być jeszcze krótszy gdyby zastosowano także napędy o regulowanej prędkości (VSD). Przedsiębiorstwo dysponuje informacją, która wyraźnie wskazuje, że w wyniku niższej temperatury pracy nowych silników ich okres użytkowania będzie dłuższy, powiększając tym samym oszczędności.

Uniwersytet Bryant

W celu zapewnienia chłodzenia komputerów i komfortu studentów, Uniwersytet Bryant w Rhode Island, USA, wykorzystuje duży system HVAC zawierający znaczną liczbę silników elektrycznych. Uniwersytet posiada wdrożony program efektywności energetycznej działający od kilku lat. W jego wyniku większość silników elektrycznych spełnia wymagania poziomu sprawności NEMA¹ Premium. Jedynym wyjątkiem jest kilka egzemplarzy silników o specjalnym przeznaczeniu. Mając świadomość, że małe oszczędności sumując się mogą w miarę upływu czasu przynieść duże zwroty, podjęto następujące działania:

- Wymieniono cztery pompy obiegowe ciepłej i zimnej wody o mocy 18.75 kW. Stare silniki były instalowane w 1988 r. i w tamtych latach ich sprawność była uważana za wysoką. Jednak od tego czasu rynek silników elektrycznych szybko ewoluował. Zastąpienie tych silników najnowszymi, wysokosprawnymi modelami przyniosło roczną oszczędność 679 USD na każdy silnik, z czasem zwrotu zaledwie 1,5 roku.
- Silnik o mocy 30 kW i standardowej sprawności, napędzający pompę skraplacza, został zastąpiony nowym modelem o wyższej sprawności. Uzyskano dzięki temu oszczędności 10,3 MWh energii i 1059 USD rocznie. Czas zwrotu wynosi 1,5 roku.

Producent Kręgli QuibicaAMF

Producent kręgli QuibicaAMF w Wirginii, USA eksploatuje 232 silniki, w tym wiele do napędu dmuchaw i wentylatorów w dużych urządzeniach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych. Przedsiębiorstwo zdecydowało się wymienić kilka starych silników o niskiej sprawności, jakkolwiek nadal nadających się do użytku. Przykładowo, silnik o mocy 750 kW i sprawności 91,2% został zastąpiony silnikiem wysokosprawnym NEMA Premium o sprawności 95,4%. Poprawa sprawności przyniosła roczne oszczędności 14 464 kWh i 1 880 USD. Czas zwrotu dodatkowego kosztu zakupu silnika NEMA Premium (w porównaniu do silnika o sprawności 95,4%) wynosi 2,5 roku. Przeciążenie sieci danych

¹ Nacional Electrical Manufacturers Association (USA) – Narodowe Stowarzyszenie Producentów Aparatury Elektrycznej.

Podsumowanie

Silniki elektryczne są rzadko postrzegane, jako aktywa produkcyjne. Pomimo że silniki elektryczne są źródłem napędu w większości przedsiębiorstw w przemyśle i sektorze usługowym, zarządzanie nimi rzadko jest optymalne. Poprawa ich sprawności energetycznej, niezawodności i dostępności przynosi zwykle duże korzyści w ich całkowitym koszcie posiadania. Osiągnięcie tego celu wymaga rzetelnego programu zarządzania silnikami, zawierającego model wczesnej wymiany silników.

Wyczekiwanie do chwili uszkodzenia silnika nie jest najlepszym wyborem, ponieważ czas przestoju silnika może bardzo szybko wzrosnąć i w większości przypadków zdominować całkowity koszt posiadania. Naprawa silnika zamiast zakupu nowego jest korzystna tylko wtedy, gdy koszt nowego silnika jest niewspółmiernie wysoki, lub gdy silnik pracuje tylko w krótkich okresach czasu. W większości przypadków najlepszą opcją jest wczesna wymiana silnika.

Model obliczeniowy może dostarczyć informacje potrzebne do podjęcia racjonalnej decyzji o wymianie/naprawie silnika.

Opisane modele wymagają danych wejściowych w postaci średniego obciążenia i czasu pracy silnika. Pomiar tych wartości są czasochłonne, ale można je oszacować z wystarczającą dokładnością.

Dodatkową korzyścią praktyki wczesnej wymiany jest to, że nie jest potrzebne utrzymywanie dużego zapasu silników w zakładzie.

Interesujące linki i artykuły

- [Association of Electrical and Mechanical Trades](#)
- Artykuł Plant Maintenance Resource Centre (Industrial Maintenance Portal): '[Motor Predictive Maintenance \(PDM\)](#)'
- Biała Księga Stowarzyszenia Zakładów Remontujących Urządzenia Elektryczne (EASA): '[The results are in: motor repair's impact on efficiency](#)'
- Decyzje w sprawie silników mają znaczenie: narzędzia i zasoby dostępne na <http://www.motorsmatter.org/index.asp>
- Opracowanie EASA/AEMT: '[The Effect of Repair/Rewinding on Motor Efficiency](#)'
- John A. "Skip" Laitner, Michael Ruth, and Ernst Worrell, 'Incorporating the Productivity Benefits into the Assessment of Cost-Effective Energy Savings Potential Using Conservation Supply Curves', Proc ACEEE 2001 Vol.1, Summer Study