

# Eksploatacja maszyn i transformatorów

Tadeusz Glinka, Sławomir Szymaniec

**M**aszyna elektryczna jest elektromechanicznym przetwornikiem energii. Proces przemiany energii może zachodzić w dwóch kierunkach: maszyna elektryczna może pracować jako prądnica (generator) i przetwarzać energię mechaniczną na elektryczną lub jako silnik (motor) i przetwarzać energię elektryczną na mechaniczną. Energia elektryczna jest także przetwarzana w transformatorach na energię elektryczną o innych parametrach (napięcie, prąd) oraz w przetwornicach energoelektronicznych bądź elektromaszynowych na inną częstotliwość [1.2].

Podstawą działania maszyn elektrycznych i transformatorów są dwa ważne odkrycia naukowe. Hans Oersted odkrył 21 kwietnia 1820 r. zjawisko wzbudzania pola magnetycznego przez prąd, a Michał Faraday odkrył 29 sierpnia 1831 r. zjawisko indukcji elektromagnetycznej [1.1, 1.2].

Eksploatacja maszyn i urządzeń wg [1.3, 1.4] to: „ciąg działań, procesów i zjawisk związanych z wykorzystywaniem obiektów technicznych przez człowieka” i obejmuje przedział czasu od chwili wyprodukowania maszyny i urządzenia do chwili ich likwidacji.

Pod pojęciem eksploatacja maszyn i urządzeń rozumie się [1.3, 1.4]:

- prowadzenie ruchu tych maszyn i urządzeń oraz
- utrzymanie maszyn i urządzeń w dobrym stanie technicznym.

Do czynności związanych z prowadzeniem ruchu maszyn i urządzeń zalicza się [1.3, 1.4]:

- zainstalowanie i uruchamianie maszyn i urządzeń,
- cykle pracy (rozruch, praca, wyłączenie) i postoje,
- bieżącą obsługę techniczną i diagnostyczną,
- stany awaryjne (jeśli się zdarzają),
- prowadzenie zapisów ruchowych.

Do prac związanych z utrzymaniem maszyn i urządzeń w należyтым stanie technicznym zalicza się: oględziny, przeglądy, konserwacje i naprawy oraz prace kontrolno-pomiarowe umożliwiające ocenę ich stanu technicznego [1.3, 1.4]. W eksploatacji można wyróżnić [1.3, 1.4]:

- użytkowanie,
- obsługiwanie.

Użytkowanie to „wykorzystywanie obiektu technicznego zgodnie z jego przeznaczeniem i właściwościami funkcjonalnymi w celu zaspokojenia potrzeb ludzkich” [1.3, 1.4].

Obsługiwanie to „utrzymywanie obiektu w stanie zdatności oraz przywracanie obiektowi technicznemu wymaganych właściwości funkcjonalnych przez przeglądy, regulacje konserwacje, naprawy i remonty” [1.3, 1.4].

Każda maszyna elektryczna i urządzenie, podczas eksploatacji, powinny realizować cel technologiczny maszyny roboczej, z którą współpracują. Ich przydatność na potrzeby człowieka nazywa się jakością eksploatacyjną, która jest zbiorem istotnych cech określających stopień spełnienia wymagań odbiorcy [1.3, 1.4].

Efektywne działanie maszyn i urządzeń zależy od ich niezawodności oraz od jakości działań ludzi, którzy je eksploatują. Ocenę jakości maszyn i urządzeń określa się przez sprawdzenie ich cech techniczno-użytkowych. W 1987 r. ustanowiono międzynarodowe normy ISO 9000 zawierające modele zapewniające jakość w projektowaniu, produkowaniu, instalowaniu i serwisie oraz badaniu maszyn i urządzeń. Najważniejsze cechy techniczno-użytkowe to: przeznaczenie, wielkości charakterystyczne, wyposażenie, wydajność, dokładność, niezawodność, ergonomiczność oraz bezpieczeństwo i higiena pracy.

Na obsługę maszyn i urządzeń składają się [1.3, 1.4]: przegląd techniczny, naprawa bieżąca, naprawa średnia, naprawa główna.

**Przeгляд techniczny** obejmuje czynności związane z regulacją zespołów i mechanizmów, usunięciem usterek i uszkodzeń, myciem i czyszczeniem, ustaleniem stopnia zużycia poszczególnych części i zespołów w celu określenia szczegółowego zakresu naprawy [1.3, 1.4].

**Naprawa bieżąca** obejmuje naprawę lub wymianę szybko zużywających się części. W zakres naprawy bieżącej wchodzi również wszystkie czynności przeglądu technicznego [1.3, 1.4].

**Naprawa średnia** obejmuje naprawę lub wymianę szybciej zużywających się części zespołów w celu zapewnienia prawidłowej eksploatacji maszyny lub urządzenia do następnej naprawy średniej i głównej. Naprawa średnia obejmuje również wszystkie czynności naprawy bieżącej [1.3, 1.4].

**Naprawa główna** obejmuje naprawę lub wymianę wszystkich części, a nawet całych zespołów ulegających zużyciu w celu przywrócenia pierwotnej lub zbliżonej do pierwotnej wartości użytkowej maszyny lub urządzenia [1.3, 1.4].

Ogólne zasady prawidłowej eksploatacji maszyn i transformatorów, w szczególności silników wysokiego napięcia (WN) oraz maszyn, które one napędzają, można znaleźć w literaturze przedmiotu, na przykład [1.5–1.17]. Pozycje praktycznie najbardziej przydatne to wskazania producentów maszyn i transformatorów zawarte w tzw. Dokumentacji Techniczno-Ruchowej i Instrukcji Eksploatacji [1.18, 1.19]. Obserwując od wielu lat eksploatację maszyn i transformatorów

w licznych krajowych zakładach przemysłowych, autorzy widzą ogromną przydatność tych zasad oraz konieczność ciągłego ich uzupełniania i wzbogacania. Współcześnie, w okresie stale rosnących wymagań dotyczących wydajności oraz redukcji kosztów produkcji w przemyśle i energetyce, koniecznością staje się właściwa diagnostyka maszyn i urządzeń. Ogólnie uważa się, że prowadzenie diagnostyki jest korzystne, bo:

- zapewnia niezawodność maszyn i urządzeń,
- daje oszczędności dzięki zmniejszeniu kosztów ewentualnych napraw diagnozowanych maszyn i urządzeń,
- minimalizuje straty produkcyjne związane z realizowanym procesem technologicznym, w którym uczestniczą maszyny i urządzenia.

Często uszkodzenia niewielkich elementów maszyn i urządzeń skutkują znacznymi stratami wynikającymi ze zniszczenia całej maszyny i nieprzewidzianego zatrzymania procesu produkcyjnego oraz nieplanowych i nieprzygotowanych prac remontowych. Diagnostyka maszyn i urządzeń oraz monitorowanie parametrów ich pracy pozwala uniknąć skutków awarii, właściwie zaplanować okresy przeglądów i remontów oraz znacznie wydłużyć czas eksploatacji maszyn i urządzeń.

## 1. Rodzaje eksploatacji

Bezpieczeństwo eksploatacji, dyspozycyjność oraz trwałość i niezawodność maszyn i urządzeń wykorzystywanych w procesie produkcyjnym ma decydujący wpływ na kondycję ekonomiczną przedsiębiorstwa [1.14, 1.15, 1.16]. Znaczne straty produkcyjne mogą być skutkiem nieprzewidzianych awarii maszyn i urządzeń, prowadzących w konsekwencji do wyłączenia maszyn i transformatorów. Do tego dochodzą koszty naprawy. Konieczne jest dysponowanie informacjami na bieżąco o zmianach stanu dynamicznego maszyn i urządzeń, o stopniu zaawansowania ich zużycia, rodzaju i poziomie uszkodzeń, po to aby zapobiec nieprzewidzianym awariom i w miarę możliwości wcześniej podjąć odpowiednie działania zapobiegawcze. Prowadzenie eksploatacji maszyn i urządzeń tylko na podstawie obserwacji przez obsługę nie jest wystarczające. Diagnostyka maszyn i urządzeń oraz monitorowanie parametrów ich pracy pozwala uniknąć awarii, właściwie zaplanować okresy przeglądów i remontów oraz znacznie wydłużyć czas ich eksploatacji. Organizacyjna i finansowa atrakcyjność diagnostyki oraz ciągły postęp w elektronice i dostępność do niej zachęcają do regularnego stosowania diagnostyki maszyn i transformatorów.

W ujęciu ogólnym zespoły maszynowe i urządzenia można eksploatować na różne sposoby [1.14, 1.15, 1.20–1.25]:

- eksploatacja do wystąpienia awarii,
- eksploatacja planowo-zapobiegawcza,
- eksploatacja zależna od stanu maszyn i urządzeń,
- eksploatacja będąca połączeniem planowo-zapobiegawczej i zależnej od stanu maszyn i urządzeń.

Takie ujęcie zagadnienia eksploatacji maszyn i urządzeń określa jednocześnie metody ich remontów. Wyróżnia się w związku z tym [1.14, 1.15, 1.20–1.25]:

- remont poawaryjny,

- remont zapobiegawczy uwarunkowany okresem eksploatacji,
- remont uwarunkowany stanem technicznym,
- remont uwarunkowany okresem eksploatacji i stanem technicznym.

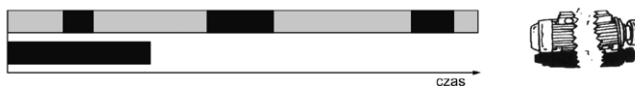
W metodzie eksploatacji zależnej od stanu technicznego każdy zespół maszynowy i urządzenie są traktowane w sposób indywidualny. Czas remontów nie jest z góry sztywno zaplanowany, tylko uwarunkowany stanem technicznym zespołu maszynowego i urządzenia. Remont jest przeprowadzamy tylko wtedy, gdy jest on konieczny. Wcześniej systematycznie wykonuje się pomiary diagnostyczne, określa się stan techniczny zespołu maszynowego i urządzenia, indywidualnie. Spośród nowoczesnych metod badań diagnostycznych należy wyróżnić bardzo efektywne badania opierające się na wykorzystaniu informacji zawartych w sygnałach towarzyszących normalnej pracy maszyn i urządzeń. Sygnałami tymi są między innymi sygnały wibroakustyczne, które towarzyszą każdemu procesowi wytwórczemu i eksploatacyjnemu. Informują one o procesach dynamicznych zachodzących w maszynach i urządzeniach w zakresie drgań strukturalnych i zjawisk akustycznych, których zakres częstotliwości leży w granicach od ułamka Hz do kilkudziesięciu MHz. Dzięki pomiarom diagnostycznym można stwierdzić początek pojawienia się uszkodzenia, a następnie obserwować jego rozwój i określać trend zmian. Ocenę aktywności drganiowej zespołu maszynowego i urządzeń można wykonać opierając się na stosownych obowiązujących normach lub sprawdzonych i zalecanych kryteriach [1.14]. Wyniki pomiarów drgań można ekstrapolować w celu przewidzenia terminu koniecznego zatrzymania zespołu maszynowego i urządzenia. Analizując wyniki pomiarów, obok określenia terminu koniecznego zatrzymania ze względu na stan techniczny, można określić zakres remontu, przewidzieć i zaplanować z wyprzedzeniem czasowym stronę techniczną oraz ekonomiczną remontu. Eksploatacja zespołów maszynowych i urządzeń zależna od ich stanu technicznego jest strategią prowadzenia eksploatacji technicznie i ekonomicznie najkorzystniejszą, coraz częściej stosowaną w krajowych zakładach przemysłowych i w energetyce. W gospodarce krajów zachodnich jest strategią dominującą. Strategia ta obok korzyści ekonomicznych wymusza stały postęp techniczny zwłaszcza w obszarze podnoszenia poziomu wiedzy przez kadrę techniczną. Nieuchronne są przy tym koszty na organizację i utrzymanie na dobrym poziomie służb diagnostycznych [1.26, 1.27, 1.28]. Korzyści ekonomiczne z prowadzenia diagnostyki technicznej w danym zakładzie, jak dowodzi praktyka przemysłowa [1.14, 1.15, 1.26, 1.27, 1.28], wyraźnie przewyższają koszty jej stosowania. Autorzy stwierdzają, że w krajowych zakładach przemysłowych przed przejściem z eksploatacji planowo-zapobiegawczej do eksploatacji zależnej od stanu maszyn i urządzeń bardzo często stosuje się formę pośrednią, będącą połączeniem elementów wymienionych wyżej rodzajów eksploatacji. Jest to eksploatacja będąca połączeniem planowo-zapobiegawczej i zależnej od stanu maszyn i urządzeń.

Przeanalizujemy poszczególne rodzaje eksploatacji maszyn i urządzeń na przykładzie eksploatacji silników elektrycznych. Eksploatację maszyn typu „do wystąpienia awarii” prowadzi się najczęściej w zakładach, w których procesy technologiczne obsługują napędy z dużą liczbą silników małej i średniej mocy (stosunkowo niedrogich maszyn), a każdy ważny proces technologiczny jest dodatkowo zabezpieczony silnikami zapasowymi. Silniki przy takim rodzaju eksploatacji pracują najczęściej do awarii. Straty w produkcji są wtedy stosunkowo niewielkie, bo silniki zapasowe zastępują te uszkodzone. Jeżeli duże silniki, niemające rezerwy, pracują aż do awarii, to straty mogą być bardzo znaczne, wielokrotnie przewyższające koszt nowego silnika i zakładowi może grozić długotrwały postój. W tej sytuacji bardzo ważne jest, aby wiedzieć, co ulega uszkodzeniu w maszynie i kiedy awaria może nastąpić. Mając takie informacje, można lepiej przygotować remont. W ujęciu ogólnym relację między czasem eksploatacji (produkcji) a czasem awarii (postoju) dla metody eksploatacji do wystąpienia awarii przedstawiono na rys. 1 i rys. 2 [1.29, 1.30].

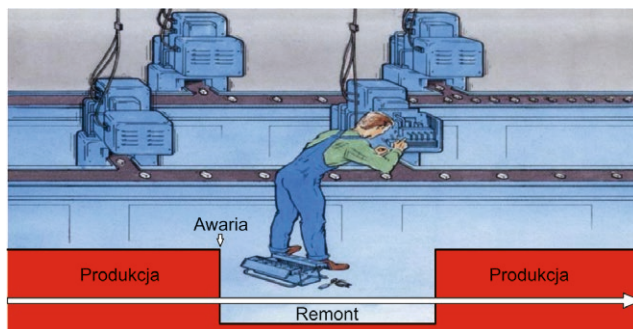
Eksploatację maszyn metodą planowo-zapobiegawczą prowadzi się najczęściej w zakładach, w których nie wszystkie ważne napędy mają swoich dublerów lub tam, gdzie nieplanowane zatrzymanie produkcji może powodować bardzo duże straty ekonomiczne i społeczne. Produkcję w takich zakładach zatrzymuje się w ściśle określonych terminach i prowadzi następnie remont zapobiegawczy. Jest to na przykład raz w roku. W ujęciu ogólnym relację między czasem eksploatacji (produkcji) a czasem awarii (postoju) dla metody eksploatacji planowo-zapobiegawczej przedstawiono na rys. 3 i rys. 4 [1.29, 1.30].

Wskaźnik awaryjności wielu maszyn i urządzeń nie zmniejsza się w wyniku wymiany określonych części, na przykład łożysk, uszczelnień, pasków, łańcuchów itd. Bardzo często po takim remoncie, jak pokazuje praktyka przemysłowa, przynajmniej przez jakiś czas awaryjność maszyn i urządzeń wzrasta (dzięki niefortunnej ingerencji remontowca w maszyny i urządzenia). Pogorszenie się stanu technicznego danej maszyny i urządzenia jest sprawą bardzo indywidualną i nie da się ściśle na sztywno określić dla wszystkich maszyn i urządzeń (jednakowo) okresu bezawaryjnej ich eksploatacji. Okresy międzyremontowe są często określane statystycznie jako takie, podczas których oczekuje się, że nie więcej jak na przykład 2% maszyn i urządzeń nowych lub w pełni wyremontowanych ulegnie awarii. W eksploatacji planowo-zapobiegawczej bardzo często oddaje się do remontu maszyny i urządzenia, które tego remontu nie wymagają. Remont zapobiegawczy maszyn i urządzeń przy eksploatacji planowo-zapobiegawczej jest bardzo często technicznie i ekonomicznie nieuzasadniony.

W metodzie eksploatacji maszyn i urządzeń zależnej od ich stanu technicznego każda maszyna i urządzenie jest traktowane w sposób indywidualny. W ujęciu ogólnym relację między czasem eksploatacji (produkcji) a czasem awarii (postoju) dla metody eksploatacji zależnej od stanu maszyny i urządzenia przedstawiono na rys. 5 i rys. 6. Czas remontów nie



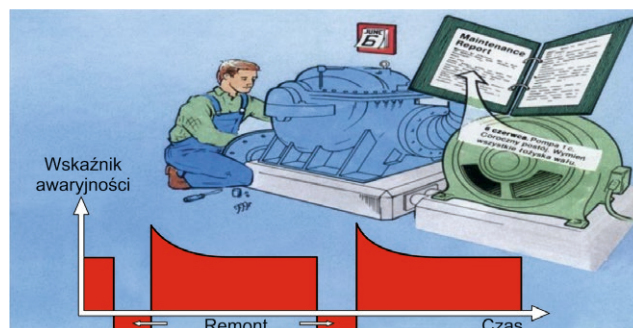
↑ Rys. 1. Eksploatacja do wystąpienia awarii, relacja między czasem eksploatacji (produkcji) – kolor szary, a czasem awarii (postoju) – kolor czarny [1.29]



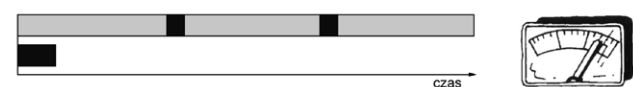
↑ Rys. 2. Tradycyjny remont maszyn, remont poawaryjny [1.30]



↑ Rys. 3. Eksploatacja planowo-zapobiegawcza, relacja między czasem eksploatacji (produkcji) – kolor szary, a czasem awarii (postoju) – kolor czarny [1.29]



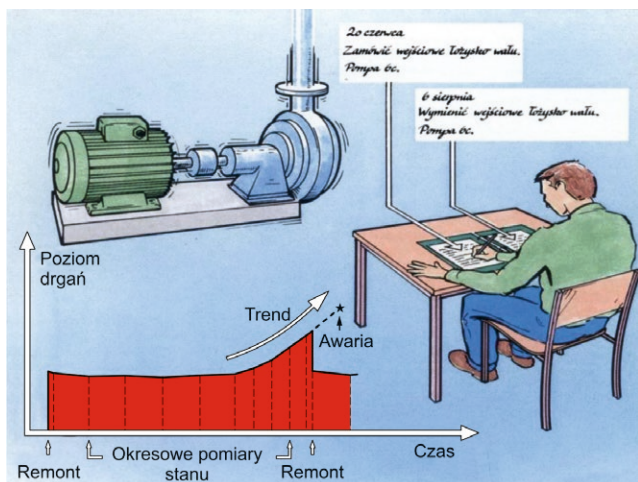
↑ Rys. 4. Tradycyjny remont maszyn, remont zapobiegawczy uwarunkowany okresem eksploatacji [1.30]



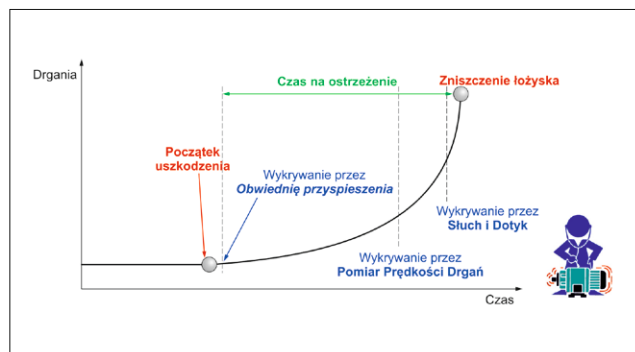
↑ Rys. 5. Eksploatacja zależna od stanu maszyny, relacja między czasem eksploatacji (produkcji) – kolor szary, a czasem awarii (postoju) – kolor czarny [1.29]

jest z góry sztywno zaplanowany, tylko uwarunkowany stanem technicznym danej maszyny i urządzenia. Remont jest przeprowadzany tylko wtedy, gdy jest konieczny. Wcześniej systematycznie wykonuje się pomiary diagnostyczne maszyn i urządzeń, określa się ich stan techniczny, indywidualnie dla

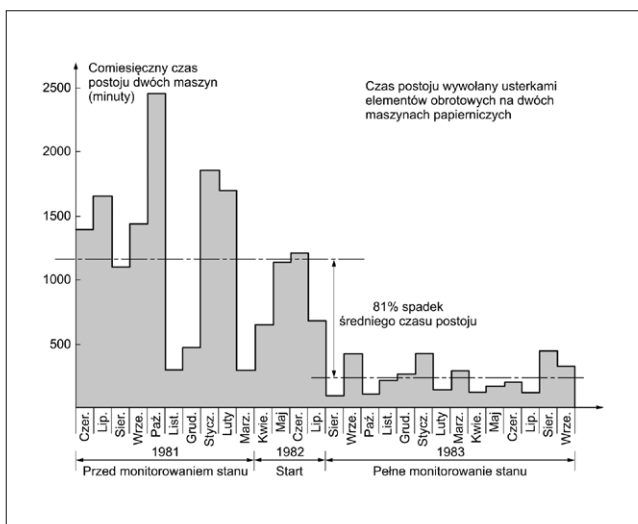




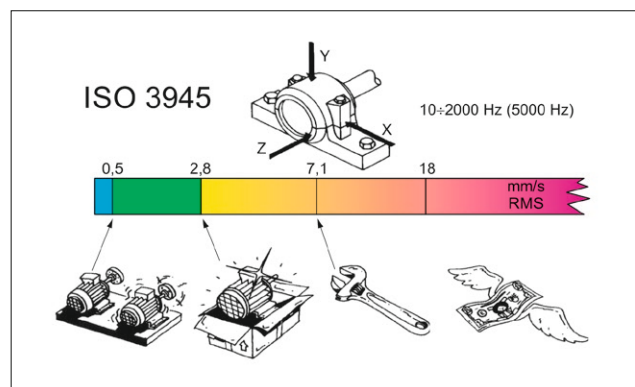
↑ Rys. 6. Nowoczesny remont maszyny, remont uwarunkowany stanem technicznym [1.30]



↑ Rys. 8. Wynik pomiaru drgań węzła łożyskowego przykładowego silnika w napędzie przemysłowym, idea diagnostyki drganiowej stanu technicznego łożyska tocznego w silniku [1.28]



↑ Rys. 7. Nowoczesny remont maszyn, remont uwarunkowany stanem technicznym, rezultaty remontu w przykładowej papierni [1.30]



↑ Rys. 9. Norma ISO 3945, wytyczne eksploatacyjne odniesione do wartości skutecznej prędkości drgań VRMS w zakresie częstotliwości 10–2000 Hz (5000Hz) [1.28]

każdej maszyny i urządzenia. Efektywność takiego remontu dla przykładowego zakładu przemysłowego pokazano na rys. 7.

Dzięki pomiarom diagnostycznym można stwierdzić początek pojawienia się uszkodzenia, a następnie obserwować jego rozwój, określać trend zmian. Przykładowo mogą to być łożyska maszyny – rys. 8. Ocenę aktywności drganiowej maszyny można wykonać na podstawie obowiązującej normy, na przykład w Europie na podstawie ISO 3945 – rys. 9, lub opierając się na sprawdzonych i zalecanych kryteriach [1.14]. Wyniki pomiarów drgań można ekstrapolować w celu przewidzenia terminu koniecznego zatrzymania maszyny, w tym przypadku ze względu na uszkodzenie łożyska. Analizując wyniki pomiarów, obok określenia terminu koniecznego zatrzymania ze względu na stan techniczny, można określić czas i zakres remontu i zaplanować z wyprzedzeniem czasowym stronę techniczną oraz ekonomiczną remontu.

Eksploatacja maszyn i urządzeń zależna od ich stanu technicznego jest strategią prowadzenia eksploatacji technicznie i ekonomicznie najkorzystniejszą, coraz częściej stosowaną w krajowych zakładach przemysłowych. W gospodarce krajów o dużej kulturze technicznej jest strategią dominującą. Strategia ta obok korzyści ekonomicznych typu: wydłużenie okresów międzyremontowych, zwiększenie niezawodności maszyn i urządzeń, zwiększenie wydajności, eliminacja niepotrzebnych wymian podzespołów, skrócenie czasu napraw, zmniejszenie kosztów magazynowych, wymusza stały postęp techniczny zwłaszcza w obszarze podnoszenia poziomu wiedzy przez kadrę techniczną. Nieuchronne są przy tym koszty na organizację i utrzymanie na dobrym poziomie służb diagnostycznych. Korzyści ekonomiczne z prowadzenia diagnostyki technicznej w danym zakładzie, jak dowodzi praktyka przemysłowa [1.14, 1.20–1.24, 1.25–1.27, 1.28], wyraźnie przewyższają koszty jej stosowania.

Wartość skuteczna prędkości drgań  $V_{RMS}$  w określonym przedziale częstotliwości wyraża się wzorem

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V(t)^2 dt} \quad (1)$$

gdzie:  $T$  – przedział czasu, dla którego określa się  $V_{RMS}$ , czas całkowania,  $V(t)$  – przebieg prędkości drgań, sygnał prędkości drgań.

## 2. Czas życia maszyn i transformatorów oraz ich podział

Maszyny elektryczne występują praktycznie wszędzie wokół nas od początku elektrotechniki, od 1834 r., kiedy wynaleziono pierwszy silnik elektryczny [1.1], i one w dużym stopniu kształtowały rozwój elektrotechniki. Mimo długiej, ponad 180-letniej, historii maszyny elektryczne są w stałym intensywnym rozwoju dzięki dużym osiągnięciom inżynierii materiałowej, doskonałym metodom modelowania, algorytmom obliczania i projektowania, energoelektronicznym układom zasilania i miniaturyzacji sterowania. Współcześnie buduje się maszyny elektryczne o mocach obejmujących zakres od miliwatów do ok. 2 tysięcy MW, jest to zakres mocy od  $10^{-3}$ – $10^6$  rzadko spotykany dla tego samego rodzaju urządzenia. Prędkości obrotowe maszyn elektrycznych obejmują zakres od ułamka obrotów na minutę do 300 000 obr./min [1.1].

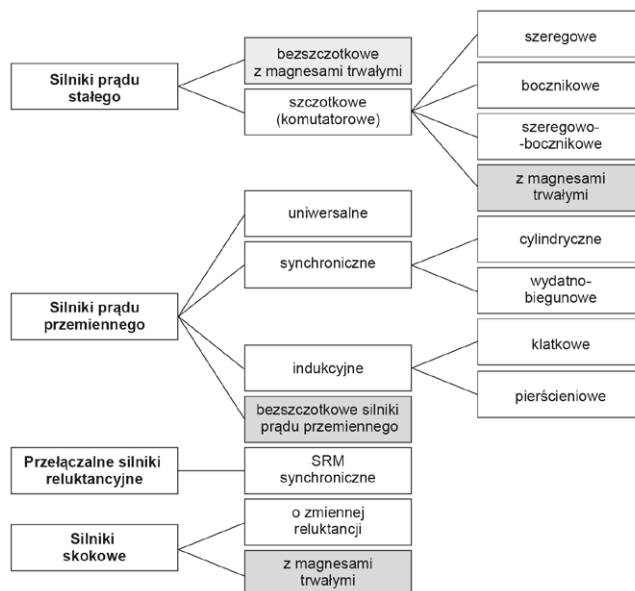
Maszyn elektrycznych nie można zastąpić innymi maszynami czy urządzeniami. Wytwarzają ok. 98% energii elektrycznej [1.2] i ok. 50% tej energii przetwarzają na energię mechaniczną. Są najczęściej używanymi maszynami w energetyce, przemyśle, rolnictwie, transporcie, gospodarce komunalnej, gospodarstwie domowym [1.2].

Ze względu na rodzaj prądu i zasadę działania maszyny elektryczne dzieli się na:

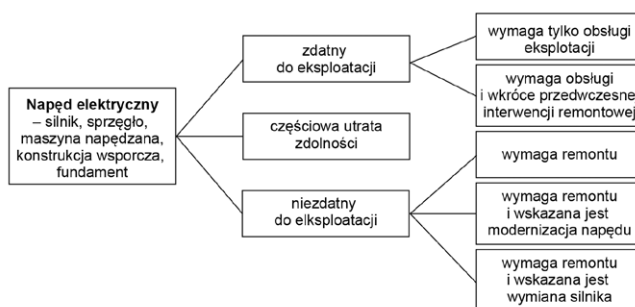
- maszyny prądu przemiennego:
  - maszyny synchroniczne,
  - maszyny indukcyjne (asynchroniczne) jednofazowe lub trójfazowe,
  - maszyny komutatorowe prądu przemiennego jednofazowe lub wielofazowe,
- maszyny prądu stałego.

Rozpatrując same silniki, można dokonać podziału ze względu na zasadę ich działania jak na rys. 10.

W niniejszej książce skoncentrowano się na podstawowych maszynach elektrycznych oraz transformatorach energetycznych pracujących w systemach elektroenergetycznych: blokowych, przesyłowych i rozdzielczych. Moc zainstalowanych transformatorów w systemie energetycznym jest 3–4 razy większa od mocy łącznej zainstalowanych generatorów synchronicznych i nadal rośnie. Stan ten wynika z konieczności wielokrotnego transformowania energii elektrycznej na drodze od źródła do odbiornika energii. Wśród transformatorów energetycznych można dokonać podziału ze względu na liczbę faz: jedno- i trójfazowe [1.2].



↑ Rys. 10. Podział silników ze względu na zasadę działania [1.31]



↑ Rys. 11. Klasyfikacja napędów ze względu na ich stan techniczny

Oprócz transformatorów energetycznych istnieje liczna grupa transformatorów specjalnych: autotransformatorów, transformatorów piecowych, spawalniczych, prostowniczych (wielofazowych), pomiarowych i innych [1.2].

Z wieloletnich obserwacji autorów w zakresie eksploatacji silników indukcyjnych trójfazowych klatkowych WN (wysokiego napięcia) wynika, że czas eksploatacji danego silnika w przemyśle, zwany niekiedy jego czasem życia, wynosi najczęściej kilkanaście – kilkadziesiąt lat. Zdarzają się coraz częściej przypadki, gdy silnik jest eksploatowany kilkadziesiąt lat. W sporadycznych przypadkach czas życia to kilka lat, jeszcze rzadziej mniej niż 1 rok. Okres eksploatacji silników wyraźnie wydłuża się w zakładach przemysłowych, w których służby techniczne charakteryzują się dużą „kulturą techniczną” i stosują na co dzień diagnostykę silników. W ramach codziennej obsługi technicznej napędów wraz z ich okresową diagnostyką wprowadzono na potrzeby ich racjonalnej eksploatacji klasyfikację na: napęd zdalny do dalszej eksploatacji, napęd z częściową utratą zdadności i napęd niezdatny do dalszej eksploatacji. Szczegółowo przedstawiono to na rys. 11.

Komentarza wymaga stan techniczny nazwany „wymaga obsługi i wkrótce przedwczesnej interwencji remontowej”. Jest to bardzo duża grupa silników oraz maszyn napędzanych, które można jeszcze eksploatować, ale na przykład stan techniczny ich łożysk tocznych przedwcześnie ulega ciągłemu zbyt szybkiemu pogarszaniu. Napęd miał pracować 4 lata, a tu po roku, 2 latach, należy wymienić łożyska, bo intensywnie się zużywają.

Stan techniczny „napęd z częściową utratą zdatności” to napęd, który z ważnych powodów technicznych, społecznych lub związanych z bezpieczeństwem pracy musi być eksploatowany, pomimo tego że częściowo utracił znamiona swojej zdatności, sprawności. Przykładowo jest to silnik z izolacją częściowo zużytą, ale jeszcze sprawną, silnik z izolacją popękaną na czołach, zabrudzoną, ale jeszcze sprawną, który musi pracować, bo stanowi napęd w wentylatorze spalin kotła, którego nie można w najbliższym czasie wyłączyć.

Stan techniczny: „wymaga remontu i wskazana jest modernizacja napędu” to przykładowo sytuacja, gdy w napędzie należy zmienić sprzęgło na bardziej elastyczne, a fundament osłonić termoizolacyjnie ze względu na wysokie temperatury medium, które tłoczy wentylator napędzany silnikiem elektrycznym. Jest to również sytuacja, gdy przykładowo silnik elektryczny wymaga remontu ze względu na zły stan izolacji. Decydując się na remont, powinniśmy wykonać nową izolację, ale inną niż ta, którą silnik miał do tej pory. Dotychczasową izolację termoutwardzalną zastępuje się nowocześniejszą typu VPI. Wykonany remont nie jest remontem ściśle odtworzeniowym, ale remontem połączonym z modernizacją.

Możliwy jest również i niekiedy bardzo wskazany tak zwany remont modyfikacyjny silnika [1.32, 1.33, 1.34]. Dotyczy to przede wszystkim silników WN większej mocy, projektowanych i wytwarzanych w latach 70. i 80. XX wieku, mających rezerwy cieplne, duże grubości izolacji (klasa B) i mało efektywne, hałaśliwe, dwukierunkowe zewnętrzne wentylatory promieniowe. W trakcie remontu modyfikacyjnego szereg parametrów technicznych silnika zostaje wyraźnie poprawionych nawet w stosunku do maszyny nowej [1.32, 1.33, 1.34], na przykład mniej izolacji żłobkowej, więcej miedzi w żłobkach, mniejsza gęstość prądu w przewodach, wyższa sprawność.

Stan techniczny „wymaga remontu i wskazana jest wymiana silnika” to sytuacja, gdy napęd wymaga remontu na przykład fundamentu i silnika. Jeżeli silnik jest wyeksploatowany, to jest wskazane, aby obok wykonania remontu fundamentu dokonać wymiany silnika na silnik energooszczędny o wyższej sprawności.

### 3. Awaryjność w przemyśle i energetyce

Współcześnie w krajowej elektroenergetyce poza Głównym Urzędem Statystycznym praktycznie nie funkcjonują dobrowolne, centralne systemy gromadzenia i przetwarzania danych technicznych i ekonomicznych [1.25, 1.36]. Wyjątkiem w tym zakresie jest utrzymywany w Agencji Rynku Energii S.A. system gromadzenia i przetwarzania danych o awaryjności bloków energetycznych o mocach 120–500 MW.

System ten obejmuje 113 bloków energetycznych o łącznej mocy stanowiącej ok. 2/3 zdolności wytwórczej krajowego systemu elektroenergetycznego. Z analizy statystyki awaryjności krajowych bloków energetycznych wynika, że następuje systematyczna poprawa wskaźników niezawodności jednostek wytwórczych w elektrowniach z blokami o mocy zainstalowanej od 120 do 500 MW [1.25, 1.35, 1.36]. Najniższą awaryjność *FOR* (wzór (4)) odnotowano dla bloków o zainstalowanej mocy 360 MW, najwyższą dla bloków o mocy 200 MW na węgiel brunatny i dla dwóch bloków o mocy 500 MW. Najwyższą dyspozycyjność *AF* (wzór (2)) osiągnęły nowoczesne bloki o mocy 360 MW, najniższą zaś odnotowano dla bloków o mocy 200 MW na węgiel brunatny i dla bloków o mocy 500 MW, które od początku sprawiały duże problemy eksploatacyjne.

Krajowe bloki energetyczne, z wyjątkiem bloków o mocy zainstalowanej 500 MW, mają zbliżoną do zachodnich dyspozycyjność *AF* i czasami niższą awaryjność *FOR* i *FOF* (wzór (3)), wyższy wskaźnik remontów planowych *SOF* (wzór (7)), co potwierdza znaczenie właściwej diagnostyki technicznej i optymalizacji remontów dla ograniczenia czasu postoju bloku energetycznego.

#### 3.1. Wskaźniki niezawodnościowe i eksploatacyjne krajowych bloków energetycznych

Wskaźniki eksploatacyjne umożliwiają przeprowadzenie oceny awaryjności, dyspozycyjności i niezawodności krajowych bloków energetycznych [1.25, 1.35, 1.36]. Obliczenia wykonuje się dla bloków energetycznych o mocach jednostkowych co najmniej 120 MW w elektrowniach ciepłych i dla dużych bloków ciepłowniczych za odpowiedni okres pracy. Dla każdego bloku oraz dla grupy bloków są obliczane następujące parametry: czas ruchu, czas postoju w rezerwie, czas postoju w remoncie (kapitałnym, średnim, bieżącym, awaryjnym), liczba odstawień (do rezerwy, remontu kapitałnego, średniego, bieżącego, awaryjnego), z których są obliczane następujące wskaźniki: remontów planowych, dyspozycyjności, awaryjności, stopnia wykorzystania mocy zainstalowanej, stopnia użytkowania mocy osiągalnej, udziału czasu awarii w czasie kalendarzowym, wykorzystania czasu kalendarzowego oraz średniego czasu ruchu.

W pierwszej kolejności są obliczane następujące wielkości:

- $T_p$  – czas pracy bloku lub grupy bloków w rozpatrywanym okresie,
- $T_r$  – czas postojów bloku lub grupy bloków w rezerwie w rozpatrywanym okresie,
- $T_{kp}$  – czas postojów bloku lub grupy bloków w remoncie kapitałnym,
- $T_s$  – czas postojów bloku lub grupy bloków w remoncie średnim,
- $T_b$  – czas postojów bloku lub grupy bloków w remoncie bieżącym,
- $T_a$  – czas postojów bloku lub grupy bloków w remoncie awaryjnym,
- $T_k$  – przedział czasu, za który są wykonywane obliczenia (miesięcznie, kwartalnie, rocznie),

- $L_r$  – liczba postojów w rezerwie,
- $L_{kp}$  – liczba postojów w remoncie kapitalnym,
- $L_s$  – liczba postojów w remoncie średnim,
- $L_b$  – liczba postojów w remoncie bieżącym,
- $L_a$  – liczba postojów w remoncie awaryjnym,
- $L_r$  – liczba wszystkich postojów. Do obliczeń wykorzystuje się ponadto poniższe dane:
- $A_n$  – wyprodukowana energia elektryczna,
- $P_z$  – moc zainstalowana,
- $P_{os}$  – moc osiągalna.

Na podstawie wyżej wymienionych wielkości są obliczane następujące wskaźniki [1.36]:

- **wskaźnik dyspozycyjności AF:**

$$AF = \frac{T_p + T_r}{T_k} 100 \quad (2)$$

- **udział czasu awarii w czasie kalendarzowym FOF:**

$$FOF = \frac{T_a}{T_k} 100 \quad (3)$$

- **wskaźnik awaryjności FOR:**

$$FOR = \frac{T_a}{T_p + T_a} 100 \quad (4)$$

- **wskaźnik wykorzystania mocy zainstalowanej GCF:**

$$GCF = \frac{A_n}{P_z T_k} 100 \quad (5)$$

- **wskaźnik użytkowania mocy osiągalnej GOF:**

$$GOF = \frac{A_n}{T_p P_{os}} 100 \quad (6)$$

- **wskaźnik remontów planowych SOF:**

$$SOF = \frac{T_{kp} + T_s + T_b}{T_k} 100 \quad (7)$$

- **wskaźnik wykorzystania czasu kalendarzowego SF:**

$$SF = \frac{T_p}{T_k} 100 \quad (8)$$

- **średni czas ruchu (obliczeniowy) ART:**

$$ART = \frac{T_p}{L_w} 100 \quad (9)$$

### 3.2. Analiza awaryjności maszyn w krajowych elektrowniach

W jednej z polskich elektrowni przeanalizowano awaryjność, dyspozycyjność, czasy awarii i remontów zespołów maszynowych od 1973 do 2000 r. [1.35]. Poszczególne bloki energetyczne, każdy po 200 MW, zostały przekazane do eksploatacji w latach 1972–1978. Analizowany okres ruchu elektrowni – 28 lat, charakteryzuje się wdrażaniem diagnostyki zespołów maszynowych w utrzymaniu ruchu maszyn i stopniowym odchodzeniem od prowadzenia remontów zapobiegawczych warunkowanych czasem na rzecz remontów warunkowanych stanem maszyny. W latach 1992–1994 zainstalowano system ciągłego monitorowania i diagnostyki dla maszyn krytycznych – tabela 1. W pierwszych latach uruchamiania poszczególnych bloków energetycznych wskaźnik awaryjności był stosunkowo wysoki (do 11,4%). Wiązało się to z okresem opanowywania technologii ruchu bloków. Po tym okresie nastąpił spadek awaryjności spowodowany stopniowym wdrożeniem diagnostyki w utrzymaniu ruchu zespołów maszynowych. Po zainstalowaniu systemu monitorowania i diagnostyki wskaźnik awaryjności nie przekroczył 1,7%.

Na rys. 12 przedstawiono wskaźniki awaryjności i dyspozycyjności poszczególnych bloków w latach 1973–2000. Na rys. 13–15 przedstawiono czas pracy i różnego rodzaju postoje bloków oraz porównanie czasów postojów bloków w remoncie bieżącym ze wskaźnikiem awaryjności.

Na rys. 16 przedstawiono awarie głównych elementów bloków energetycznych i ich przyczyny. Najpoważniejszą przyczyną awarii jest zużycie materiału, a następną – zła jakość urządzeń lub robót.

W tabeli 2 przedstawiono awaryjność w podziale na obiekty bloku w przykładowej elektrowni. Najbardziej awaryjne są układy pomocnicze kotła, następnie urządzenia odpowietrzania, kocioł właściwy, urządzenia pomocnicze turbiny. Generator i turbina nie wyróżniają się w statystykach.

### 3.3. Awaryjność maszyn potrzeb własnych

W napędach urządzeń potrzeb własnych elektrowni zawodowych i elektrociepłowni stosuje się silniki indukcyjne WN klatkowe prądu przemiennego o mocy 160 do 17 300 kW. Większość tych silników została wyprodukowana w latach 60. i 70. XX wieku. Prawie wszystkie eksploatowane silniki są po remontach przeprowadzanych po ich wcześniejszych awariach. W ramach remontów zachodziła najczęściej konieczność przezwojenia stojana. Liczba takich przezwojeń stojanów waha się od jednego do sześciu [1.38, 1.39, 1.40]. Przezwojano w szczególności stojany w silnikach napędzających pompy wody zasilającej, młyny węglowe i wentylatory młynowe. Uszkodzenia wirników występują głównie

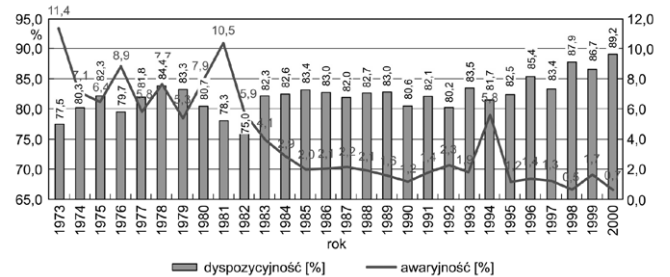


↓ **Tabela 1.** Awaryjność, dyspozycyjność, czas awarii i remontów w jednej z krajowych elektrowni dla bloków 1-8 [1.35]

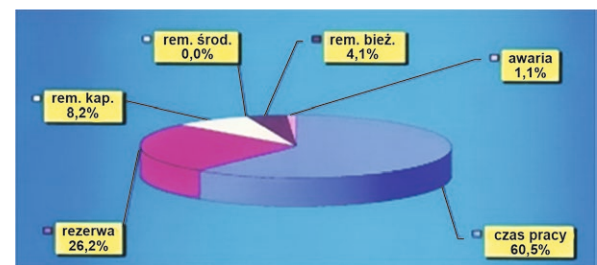
Rok	Wyszczególnienie	Jednostka	1	2	3	4	5	6	7	8
1973	Czas remontów	h	788	284	174	0	0	0	0	0
	Czas awarii	h	1 400	392	240	0	0	0	0	0
	Awaryjność	%	10,0	15,7	8,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Dyspozycyjność	%	75,0	82,3	76,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1974	Czas remontów	h	1 288	1 433	1 232	711	0	0	0	0
	Czas awarii	h	703	266	279	860	0	0	0	0
	Awaryjność	%	9,3	3,6	3,7	11,7	0,0	0,0	0,0	0,0
	Dyspozycyjność	%	77,3	80,0	82,7	80,5	0,0	0,0	0,0	0,0
1975	Czas remontów	h	1 599	783	1 062	760	0	0	0	0
	Czas awarii	h	474	406	363	737	0	0	0	0
	Awaryjność	%	6,7	5,1	4,7	9,2	0,0	0,0	0,0	0,0
	Dyspozycyjność	%	76,3	86,4	83,7	82,9	0,0	0,0	0,0	0,0
1976	Czas remontów	h	744	1 750	1 683	226	0	0	0	0
	Czas awarii	h	425	551	724	1 046	0	0	0	0
	Awaryjność	%	5,3	7,8	10,2	12,2	0,0	0,0	0,0	0,0
	Dyspozycyjność	%	86,7	73,8	72,6	85,5	0,0	0,0	0,0	0,0
1977	Czas remontów	h	1 551	736	640	1 676	0	0	0	0
	Czas awarii	h	863	369	367	160	0	0	0	0
	Awaryjność	%	12,0	4,6	4,5	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0
	Dyspozycyjność	%	72,4	87,4	88,5	79,1	0,0	0,0	0,0	0,0
1978	Czas remontów	h	940	686	738	402	464	532	489	0
	Czas awarii	h	648	304	695	872	418	475	0	0
	Awaryjność	%	8,3	3,8	8,7	10,4	6,0	11,9	0,0	0,0
	Dyspozycyjność	%	81,9	88,7	83,6	85,5	87,0	77,7	66,7	100,0
1979	Czas remontów	h	1 342	1 577	737	1 296	893	725	359	1 504
	Czas awarii	h	393	77	288	596	330	506	537	514
	Awaryjność	%	5,4	1,1	3,7	8,1	4,2	6,3	6,4	7,1
	Dyspozycyjność	%	80,2	81,1	88,3	78,4	86,0	85,9	89,8	77,0
1980	Czas remontów	h	872	649	1 308	827	1 372	1 637	880	1 340
	Czas awarii	h	1 204	582	338	476	450	476	535	634
	Awaryjność	%	15,3	7,4	4,7	6,2	6,3	6,7	7,0	8,7
	Dyspozycyjność	%	76,4	86,0	81,3	85,2	79,3	75,9	83,9	77,5
1981	Czas remontów	h	1 086	1 617	1 228	1 821	860	1 105	967	387
	Czas awarii	h	3 495	309	396	183	528	314	508	435
	Awaryjność	%	47,0	4,5	5,3	2,8	7,1	4,2	6,7	5,3
	Dyspozycyjność	%	47,7	78,0	81,5	77,1	84,2	83,8	83,2	90,6
1982	Czas remontów	h	6 555	1 139	1 068	1 047	1 464	754	1 084	1 131
	Czas awarii	h	1 104	1 082	51	104	406	203	218	136
	Awaryjność	%	50,1	14,2	0,7	1,3	5,6	2,5	2,8	1,8
	Dyspozycyjność	%	12,6	74,6	87,2	86,9	78,6	89,1	85,1	85,5
1983	Czas remontów	h	835	885	1 135	1 516	1 018	1 587	1 450	1 553
	Czas awarii	h	794	404	171	217	225	181	178	277
	Awaryjność	%	10,0	5,2	2,3	3,0	2,9	2,5	2,4	3,9
	Dyspozycyjność	%	81,4	85,3	85,1	80,2	85,8	79,8	81,4	79,1
1984	Czas remontów	h	3 335	1 336	1 591	1 163	825	872	779	577
	Czas awarii	h	138	289	200	534	100	136	135	197
	Awaryjność	%	2,5	3,9	2,8	7,0	1,3	1,7	1,7	2,4
	Dyspozycyjność	%	60,5	81,5	79,6	80,7	89,5	88,5	89,6	91,2
1985	Czas remontów	h	656	3 292	967	1 312	1 503	1 182	565	950
	Czas awarii	h	137	2	94	210	231	150	213	176
	Awaryjność	%	1,7	0,0	1,2	2,8	3,2	2,0	2,6	2,3
	Dyspozycyjność	%	90,9	62,4	87,9	82,6	80,2	84,8	91,1	87,1
1986	Czas remontów	h	1 243	776	872	3 382	831	1 031	1 586	945
	Czas awarii	h	202	209	157	163	52	153	5	282
	Awaryjność	%	2,8	2,6	2,0	3,1	0,7	2,0	0,1	3,7
	Dyspozycyjność	%	83,5	88,8	88,3	59,5	89,9	86,5	81,8	86,0
1987	Czas remontów	h	1 341	1 077	3 180	1 017	1 362	960	914	1 505
	Czas awarii	h	20	123	0	295	18	278	305	218
	Awaryjność	%	0,3	1,6	0,0	3,9	0,3	3,7	4,1	3,1
	Dyspozycyjność	%	84,5	86,3	63,7	85,0	84,2	85,9	86,1	80,3
1988	Czas remontów	h	2 480	977	1 430	1 331	1 005	1 692	1 105	1 000
	Czas awarii	h	183	116	124	222	2	67	373	21
	Awaryjność	%	2,9	1,5	1,7	3,1	0,0	1,0	5,4	0,3
	Dyspozycyjność	%	69,7	87,5	82,3	82,3	88,5	80,0	83,2	88,4
1988	Czas remontów	h	1 255	3 187	592	384	1 407	164	290	877
	Czas awarii	h	12	48	137	5	22	53	18	9
	Awaryjność	%	0,2	1,1	1,9	0,1	0,5	1,4	0,2	0,1
	Dyspozycyjność	%	85,5	63,1	91,7	95,6	83,7	97,5	96,5	89,9

↓ **Tabela 1. (cd.)** Awaryjność, dyspozycyjność, czas awarii i remontów w jednej z krajowych elektrowni dla bloków 1-8 [1.35]

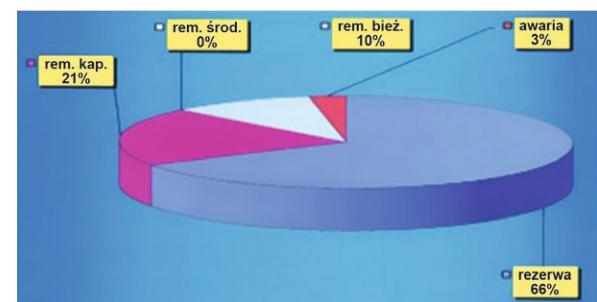
Rok	Wyszczególnienie	Jednostka	1	2	3	4	5	6	7	8
1999	Czas remontów	h	377	508	3 086	297	465	2 932	328	572
	Czas awarii	h	29	54	51	107	19	9	178	297
	Awaryjność	%	0,4	0,7	1,0	1,6	0,8	0,3	2,9	4,9
	Dyspozycyjność	%	95,4	93,6	64,2	95,4	94,5	66,4	94,2	90,1
2000	Czas remontów	h	621	252	182	795	2 947	478	1 521	506
	Czas awarii	h	12	13	5	0	55	39	9	167
	Awaryjność	%	0,2	0,3	0,1	0,0	2,4	1,0	0,1	2,2
	Dyspozycyjność	%	92,8	97,0	97,9	91,0	65,8	94,1	82,6	92,3



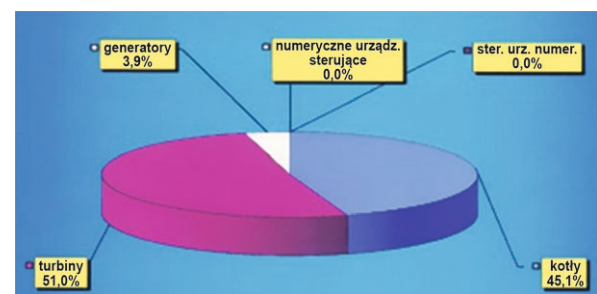
↑ **Rys. 12.** Wskaźniki awaryjności i dyspozycyjności jednej z krajowych elektrowni w latach 1973-2000 [1.35]



↑ **Rys. 13.** Czas pracy i postojów jednej z krajowych elektrowni [1.35]

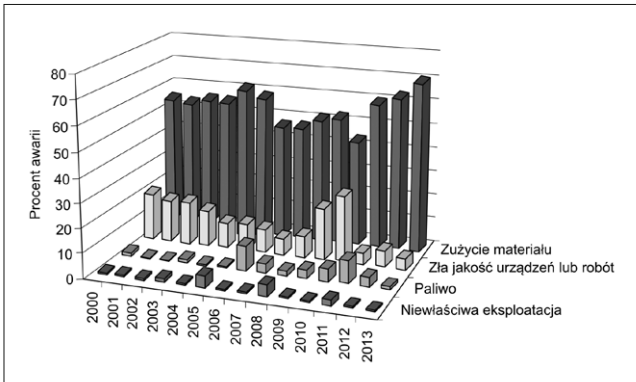


↑ **Rys. 14.** Czas postoju z podziałem na rodzaje w jednej z krajowych elektrowni [1.35]



↑ **Rys. 15.** Czas awarii z podziałem na rodzaje urządzeń w jednej z krajowych elektrowni [1.35]





↑ Rys. 16. Awarie głównych elementów bloków energetycznych i ich przyczyny [1.37]

↓ Tabela 2. Awaryjność w podziale na obiekty bloku w przykładowej elektrowni [1.62]

Okres	1.07. do 31.12. 2003		2009		2010		2011		2012		Do 10.2013	
	ilość odst.	czas postoju [h]	ilość odst.	czas postoju [h]	ilość odst.	czas postoju [h]	ilość odst.	czas postoju [h]	ilość odst.	czas postoju [h]	ilość odst.	czas postoju [h]
Kocioł właściwy	8	67,4	6	78,5	6	30,3	5	215,0	4	51,3	5	26,5
Układy pomocnicze kotła	6	939,4	6	970,4	8	373,3	2	11,4	1	17,7	5	112,1
Urządzenia nawęglania			1	7,5								
Urządzenia odpopielania	1	76,1	1	217,8		82,6			1	56,4		
Turbina właściwa	1	0,3	4	139,8	1	4,3					3	3,7
Urządzenia pomocnicze turbiny	1	28,5	3	66,8	5	63,5	1	39,8			2	92,8
Generator	1	0,6					2	111,3				
<b>Razem</b>	<b>18</b>	<b>1112,3</b>	<b>21</b>	<b>1480,8</b>	<b>20</b>	<b>554,0</b>	<b>10</b>	<b>377,5</b>	<b>6</b>	<b>125,4</b>	<b>15</b>	<b>235,0</b>

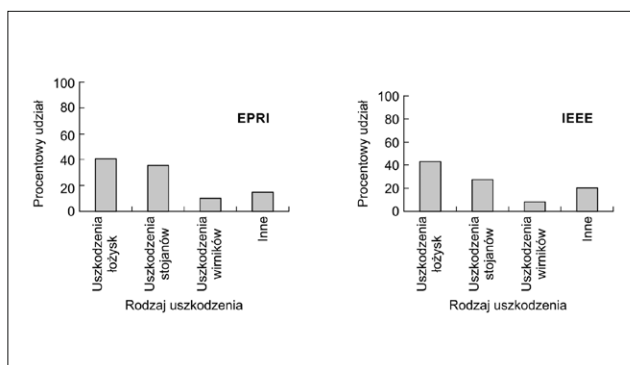
w strefie połączeń lutowanych prętów uzwojeń klatkowych z pierścieniami zwierającymi [1.38, 1.39, 1.40]. W silnikach o wirnikach dwuklatkowych uszkodzeniu ulegają przede wszystkim klatki rozruchowe wirnika. Współcześnie występuje wzrost awarii silników, których źródłem są uszkodzenia łożysk tocznych.

Statystyka awaryjności w jednej z krajowych elektrowni przedstawia się następująco – tabela 3 [1.14]. Z przedstawionego zestawienia widać, że ogólna liczba awarii silników WN maleje, a liczba awarii elektrycznych jest zdecydowanie mniejsza od liczby awarii mechanicznych. Ocenia się, że w większości krajowych zakła dów przemysłowych jest podobnie [1.14]. Analizując szczegółowo przyczyny awarii i nieoczekiwanych, nieplanowanych postojów napędów z silnikami indukcyjnymi klatkowymi WN, na podstawie własnych doświadczeń i obserwacji, ustalono następującą listę przyczyn [1.14]:

- stan łożysk,
- izolacja uzwojeń silników,
- niewyważenie, nieosiowość i luzy związane z ruchem wirnika,
- rezonanse,

↓ Tabela 3. Liczba awarii silników klatkowych WN w przykładowej krajowej elektrowni [1.14]

Rok	Liczba awarii ogółem	Liczba awarii mechanicznych	Liczba awarii elektrycznych
1994	44	27	17
1995	37	25	12
1996	30	21	9
1997	37	23	14
1998	31	21	10
1999	33	20	13
2000	29	18	11
2001	23	16	7
2002	27	18	9
2003	27	19	8
2004–2007	średnio 12	średnio 8	średnio 4
2008–2009	średnio 12	średnio 5	średnio 3
2010–2012	średnio 12	średnio 3	średnio 2



↑ Rys. 17. Najczęściej występujące uszkodzenia silników indukcyjnych według dwóch niezależnych amerykańskich źródeł [1.41]

- niesymetria szczeliny pomiędzy stojanem a wirnikiem,
  - uzwojenie klatkowe wirnika,
  - stan konstrukcji wsporczych, fundamentów i mocowania.
- Listę podano w kolejności od przyczyn najczęściej występujących do tych, które występujących najrzadziej. Według dwóch niezależnych amerykańskich źródeł: IEEE (ang. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) i EPRI (ang. *Electric Power Research Institute*), łożyska toczne należą do najczęstszych, poważnych przyczyn awarii silników indukcyjnych. Zestawienie uszkodzeń silników indukcyjnych ilustruje rys. 17 [1.41].

Długoletnie obserwacje w zakresie oceny przyczyn awarii silników indukcyjnych klatkowych WN w przemyśle krajowym oraz śledzenie literatury technicznej krajowej i światowej poświęconej temu tematowi upoważniają autorów do stwierdzenia, że awaryjność silników w ostatnich latach wyraźnie spada. Wynika to przede wszystkim z poprawy jakości eksploatacji, obsługi oraz diagnostyki silników, zastosowania coraz lepszych materiałów do ich produkcji, w tym w szczególności dobrych materiałów izolacyjnych, zastosowania coraz lepszych sprzęgieł, łożysk, smarów. Zmienia się

statystyka przyczyn uszkodzeń silników WN. Zmniejsza się liczba uszkodzeń obwodu elektrycznego i magnetycznego silników, a relatywnie powiększa się liczba uszkodzeń typu mechanicznego – w szczególności łożysk. Występują również coraz częściej uszkodzenia typu luz w układzie na przykład wał–pakiet wirnika, łożyska–tarcza łożyskowa, oraz uszkodzenia konstrukcji wsporczej i fundamentu pod napędem.

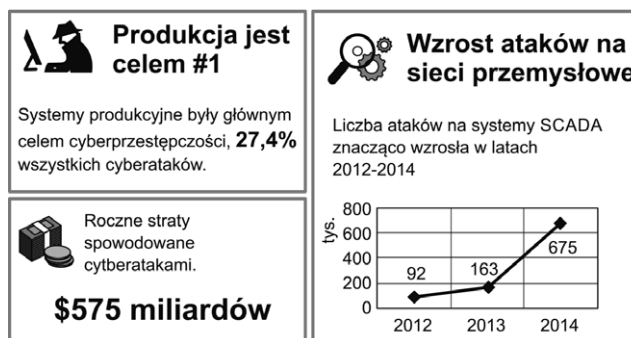
Z ekonomicznego punktu widzenia dla użytkowników silników WN najkosztowniejsze są uszkodzenia izolacji uzwojeń oraz poważne uszkodzenia fundamentów i konstrukcji wsporczych. Remont silnika, mający na celu gruntowną poprawę stanu jego izolacji, to najczęściej przezwonienie, co jest kosztowne (najczęściej kilkadziesiąt procent wartości silnika). Konieczność przezwajania silnika lub remont kapitalny fundamentu i konstrukcji wsporczej eliminuje dany napęd z cyklu produkcyjnego zakładu na okres od kilku do kilkunastu tygodni, co dodatkowo komplikuje sytuację i wyraźnie zwiększa koszty awarii.

Zakłady przemysłowe bardzo niechętnie udostępniają swoje statystyki przyczyn awarii maszyn, liczby przestoju spowodowanych stanem technicznym maszyn, ilości zużytych łożysk, liczby remontów itd. Pewną możliwość uzyskania informacji na powyższy temat dają firmy ubezpieczeniowe, które „likwidują zaistniałą szkodę” w danym zakładzie.

#### 4. Cyberbezpieczeństwo przemysłowe

Cyberbezpieczeństwo większość ludzi w sposób naturalny, wręcz intuicyjny, kojarzy jedynie z potrzebą zainstalowania w swoim osobistym komputerze, tablecie i telefonie komórkowym skutecznego oprogramowania antywirusowego. Cyberbezpieczeństwo to stosunkowo nowa przestrzeń działania w przemyśle, energetyce, życiu gospodarczym, życiu codziennym, która zajmuje się ochroną przed cyberatakami na wszystkie sfery bytu człowieka, głównie na wszelkie systemy informatyczne (rys. 18). Postęp w dziedzinie digitalizacji, rozwój technologii informatycznych, internet rze- czy, sztuczna inteligencja, systemy CPS (ang. *cyber-physical systems*), duże zbiory danych, globalnie tworzą świat nowych technologii, niosący nowe, dotychczas nieznanne zagrożenia cybernetyczne [1.42–1.57]. Dotychczasowe tradycyjne zagrożenia cywilizacyjno-techniczne, na przykład chemiczne, toksyczne, radiacyjne, medyczne, są zdaniem autorów stosunkowo dobrze rozpoznane. Są przedmiotem licznych badań naukowych, są opisane od strony teoretycznej, praktycznej, prawnej, prewencyjnej. Prace nad zagrożeniami cybernetycznymi w Polsce są stosunkowo skromne, bardzo wycinkowe, niepopularyzowane, a wręcz nieznanne szerokiemu ogółowi użytkowników komputerów, w tym inżynierom i studentom. Nieznane jest również szerokiemu ogółowi prawodawstwo krajowe i unijne poświęcone temu zagadnieniu. Wydaje się, że cyberbezpieczeństwo w Polsce jest niedoceniane i bardzo często mamy do czynienia z poglądem, że stanowi zbędne obciążenie w strukturze wydatków w przedsiębiorstwie przemysłowym, banku czy w biurze projektowym.

W początkowym okresie użytkowania komputerów, przy niewielkiej liczbie komputerów podłączonych do sieci,



↑ Rys. 18. Świat cyberataków – trendy [1.53]

cyberbezpieczeństwo zapewniali przyjęte przez ludzi zasady używania komputerów, systemy operacyjne i oprogramowanie. Było to możliwe głównie dzięki ograniczonej liczbie profesjonalnych i wysoce odpowiedzialnych użytkowników. Z upływem czasu liczba użytkowników lawinowo rośnie, codziennie do internetu są podłączane miliony nowych użytkowników. Model odpowiedzialnego użytkownika i samokontroli stał się niewystarczający [1.45]. Początkowo cyberprzestępcami byli nieprofesjonalni niedoświadczeni hakerzy, dla których celem było uzyskanie nieuprawnionego dostępu do komputera, podmiana strony internetowej itd. Współcześnie są to zmasowane udane ataki na instytucje państwowe, banki, organizacje gospodarcze, fabryki, elektrownie, systemy energetyczne, szpitale, obiekty militarne wykonywane najczęściej przez „zawodowców”. Poważne ataki hakerskie stały się normą. Celem ataku jest najczęściej produkcja w energetyce lub zakładzie przemysłowym [1.53]:

Cyberprzestępcy realizują swoje zadanie przez:

- wykradanie bądź zmodyfikowanie wrażliwych danych,
- sabotaż na sieć bądź instalacje.

Źródłem zagrożeń są głównie [1.50]:

- zorganizowane hakerskie grupy kryminalne,
- służby obcych/wrogich państw,
- terroryści,
- osoby wtajemniczone – pracownicy,
- szpieczy przemysłowi,
- sabotażyści,
- błędy operatorów systemów SCADA,
- przypadkowe infekcje,
- infekcje spowodowane przez dostęp podwykonawców.

Możliwe konsekwencje cyberataków [1.54] są następujące:

- brak dostępu do systemu produkcyjnego,
- utrata wydajności systemu,
- manipulacja/utrata/kradzież danych,
- utrata kontroli nad produkcją,
- zatrzymanie produkcji/maszyn,
- katastrofa ekologiczna,
- ryzyko śmierci i poważnych obrażeń,
- straty finansowe.
- nadszarpnięty wizerunek firmy.

Cyberbezpieczeństwo zawsze będzie zależało od najsłabszego wężła bądź ogniwa systemu. Profesjonalni użytkownicy komputerów wiedzą, że cyberbezpieczeństwo jest podstawą

funkcjonowania na co dzień. Jak twierdzi Przemysław Kania Dyrektor Generalny CISCO *w walce z cyberprzestępczością zawsze będziemy ten jeden krok za hakerami, to ciągła pogoń i doskonalenie naszych systemów przeciwdziałania. Im większa współpraca na poziomie korporacji i państw, tym bliżej jesteśmy zwycięstwa* [1.49].

Potencjalne konsekwencje ataku cybernetycznego na zakład przemysłowy są najczęściej następujące:

- wyłączenie instalacji (prostsze do przeprowadzenia):
  - wywołanie niepewności wśród operatorów i inżynierów,
  - zmiana „bezpiecznych ustawień” (ang. *fail safes*), by zatrzymać poszczególne maszyny i urządzenia lub całą produkcję;
- zniszczenie instalacji albo spowodowanie znaczących strat materialnych:
- potrzebna dużo większa wiedza,
- dużo trudniejsze do przeprowadzenia
- wymaga skoordynowanego ataku na system sterowania i SIS (System Informacyjny Schengen, ang. *Schengen Information System*),
- nie tylko SIS dba o bezpieczeństwo instalacji.

Ataki cybernetyczne schodzą na coraz niższą warstwę struktury zakładu, obiektu, biura, są coraz trudniejsze do wykrycia i jest ich z dnia na dzień coraz więcej. Oto kilka przykładów ataków cybernetycznych [1.45, 1.46, 1.47]:

- W latach 2009–2010 pojawił się wirus Stuxnet w obiektach nuklearnych w Iranie. Ponad rok skutecznie uszkadzał wirówki do produkcji paliwa jądrowego w zakładach wzbogacania uranu w Natanz. Atak nastąpił przy wykorzystaniu zainfekowanej pamięci podręcznej USB. Wirus zaatakował programowalne sterowniki logiczne PLC. Na przeszkodzie nie stanęły ani specjalistyczne oprogramowanie, ani brak połączenia z internetem [1.45].
- 10 kwietnia 2014 r. amerykański niszczyciel Donald Cook przyplłynął na Morze Czarne, a 12 kwietnia rosyjski bombowiec Su-24 przelatywał nad nim, nie posiadając przy tym ani bomb, ani rakiet, tylko elektroniczny przyrząd wojenny – gondolę zamontowaną pod kadłubem, która według rosyjskiego czasopisma „Rossiyskaya Gazeta” zawierała elektroniczny przyrząd wojenny. Podczas fazy zbliżania się przyrząd ten miał zneutralizować wszystkie radary niszczyciela Donald Cook, urządzenia kontrolne, systemy informacyjne itp. Niszczyciel USA był wyposażony w system ostatniej generacji Aegis, który zapewnia łączność między systemami obrony przeciwrakietowej wszystkich okrętów, na których jest zainstalowany – w ten sposób tworzy się sieć, która gwarantuje wychwytywanie, ściganie i zniszczenie setek celów w tym samym czasie. Innymi słowy, ten wszechpotężny współcześnie używany i montowany na okrętach wojennych NATO system obronny został wyłączony jak telewizor pilotem. Donald Cook jest niszczycielem z wyrzutniami rakiet czwartej generacji, którego podstawową bronią jest rakiet samosterująca Tomahawk z zasięgiem 2,5 tys. km, mogąca przenosić głowice nuklearne. W ramach rutynowej misji USS Donald Cook ma 56 rakiet Tomahawk, a w konfiguracji ofensywnej 96.

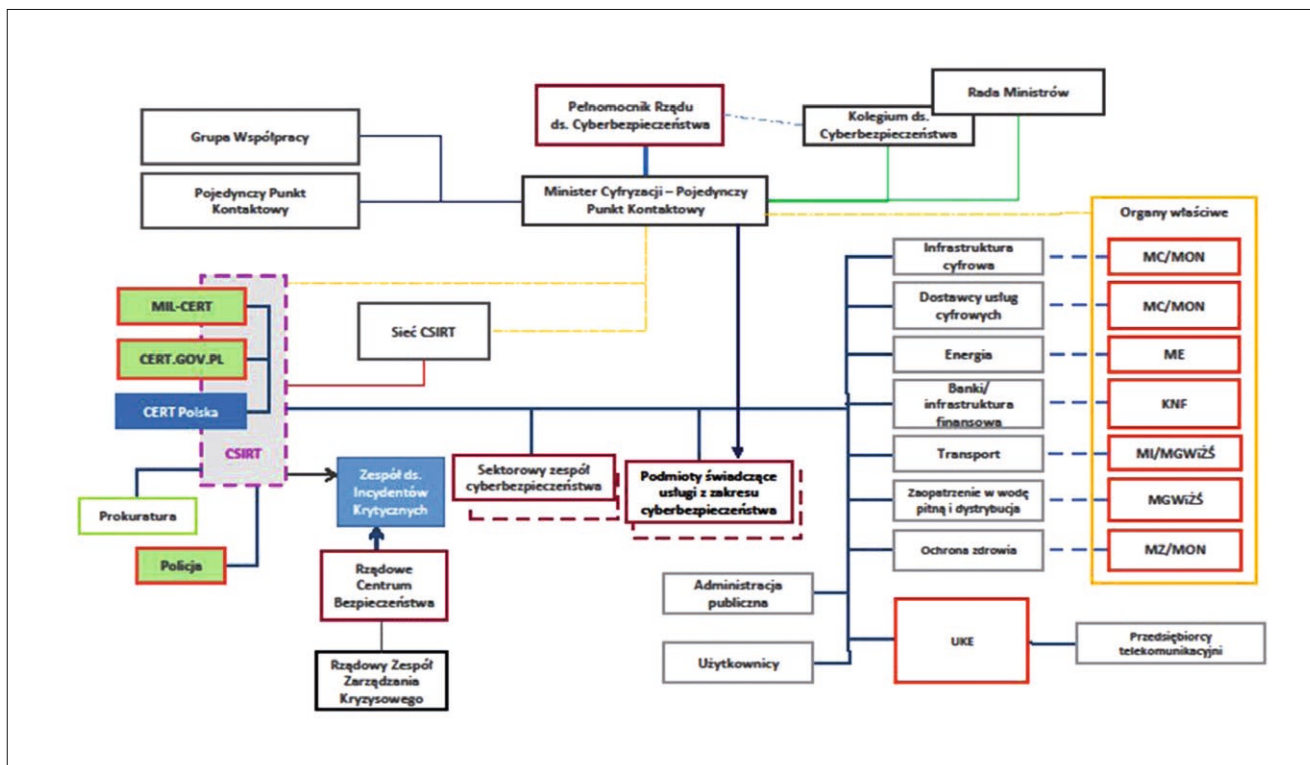
Donald Cook jest również wyposażony w cztery duże radary, których wydajność można porównać z mocą wielu stacji radarowych. W celach obronnych ma on jeszcze 50 rakiet przeciwlotniczych różnych typów. Ministerstwo Spraw Zagranicznych USA przyznało, że załoga niszczyciela Donalda Cooka była mocno zgorzonna po ataku cybernetycznym wykonanym przez rosyjski bombowiec Su-24 [1.46].

- W 2015 r. wirus Black Energy przejął kontrolę nad systemami automatycznego sterowania lokalnymi sieciami energetycznymi w zachodniej Ukrainie [1.45].
- 23 grudnia 2015 r. nastąpił cyberatak na sektor energetyczny Ukrainy [1.52]. Tego dnia o 15:30 operator w centrum sterowania zauważył podejrzaną zachowanie się systemu operacyjnego. Intruzi, działając zdalnie, doprowadzili do wyłączenia stacji elektroenergetycznych: 7–110 kV i 23–35 kV na 3 godziny. Atak na trzech dystrybutorów spowodował brak dostaw energii elektrycznej dla ponad 200 000 odbiorców (zdarzały się szacunki mówiące o 1 milionie klientów).
- 10 listopada 2017 r. została zaatakowana strona internetowa lotniska w Modlinie [1.47].
- W marcu 2018 r. zaatakowano serwery Teatru Współczesnego w Warszawie. W cyberataku przejęto plany widowni na spektakle grane od 21 marca do 6 maja [1.47].
- 20 marca 2018 roku nastąpił groźny cyberatak na polskie banki. W zamiarze atakujących było przejęcie prawdziwych loginów i haseł, a następnie wyprowadzenie pieniędzy z kont ich właścicieli [1.47].

W Polsce obowiązują następujące regulacje prawne w zakresie cyberbezpieczeństwa [1.56, 1.57]:

- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/1148 z dnia 6 lipca 2016 r. w sprawie środków na rzecz wysokiego wspólnego poziomu bezpieczeństwa sieci i systemów informatycznych na terytorium Unii.
  - Uchwała nr 52/2017 Rady Ministrów z dnia 27 kwietnia 2017 roku w sprawie Krajowych Ram Polityki Cyberbezpieczeństwa Rzeczypospolitej Polskiej na lata 2017–2022.
  - Ustawa o krajowym systemie cyberbezpieczeństwa uchwalona przez Sejm RP 5 lipca 2018 r., a następnie opublikowana w Dzienniku Ustaw RP 13 sierpnia 2018 r. Cele ustawy z 5 lipca 2018 r. są następujące:
    - organizacja systemu cyberbezpieczeństwa na poziomie krajowym,
    - ustanowienie obowiązków podmiotów zobowiązanych,
    - określenie zasad nadzoru i kontroli,
    - określenie zakresu Strategii Cyberbezpieczeństwa Rzeczypospolitej Polskiej.
- Krajowy system cyberbezpieczeństwa ma na celu zapewnienie cyberbezpieczeństwa na poziomie krajowym, w tym – rys. 19:
- niezakłócone świadczenie usług kluczowych i usług cyfrowych,
  - osiągnięcie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa systemów informacyjnych służących do świadczenia tych usług,
  - obsługa incydentów.





↑ Rys. 19. Architektura krajowego systemu cyberbezpieczeństwa [1.56]

W ustawie wprowadzono następujące pojęcia:

- Usługa kluczowa – usługa mająca kluczowe znaczenie dla utrzymania krytycznej działalności społecznej lub gospodarczej, wymieniona w wykazie usług kluczowych.
- Operator usługi kluczowej – podmiot z sektora energetyki (w tym m.in. podsektorów energii elektrycznej, ropy, gazu, wydobywania kopalin, ciepła) transportu, bankowości, infrastruktury rynków finansowych, służby zdrowia, zaopatrzenia w wodę pitną, infrastruktury cyfrowej, w stosunku do którego została wydana decyzja o uznaniu za operatora usługi kluczowej.
- Dostawca usługi cyfrowej – podmiot świadczący usługę przetwarzania w chmurze, wyszukiwarki internetowej oraz internetowej platformy handlowej.
- Cyberbezpieczeństwo – odporność systemów informacyjnych na działania naruszające dostępność, autentyczność, integralność i poufność przetwarzanych danych lub związanych z nimi usług oferowanych przez te systemy informacyjne.
- Incydent – zdarzenie, które ma lub może mieć niekorzystny wpływ na cyberbezpieczeństwo.
- Incydent poważny – incydent, który powoduje lub może spowodować poważne obniżenie jakości świadczonej usługi kluczowej lub przerwanie ciągłości świadczenia usługi kluczowej.
- Incydent krytyczny – incydent skutkujący znaczną szkodą dla bezpieczeństwa lub porządku publicznego, interesów międzynarodowych, interesów gospodarczych, działania instytucji publicznych, praw i wolności obywatelskich lub życia i zdrowia ludzi, klasyfikowany przez właściwy CSIRT MON, CSIRT NASK lub CSIRT GOV.

- Incydent w podmiocie publicznym – incydent, który powoduje lub może spowodować obniżenie jakości lub przewanie realizacji zadania publicznego realizowanego przez podmiot publiczny.
  - CSIRT (ang. *Computer Security Incident Response Team*) – Zespół Reagowania na Incydenty Bezpieczeństwa Komputerowego.
  - Obsługa incydentu – czynności umożliwiające wykrywanie, rejestrowanie, analizowanie, klasyfikowanie, priorytetyzację, podejmowanie działań naprawczych i ograniczenie skutków incydentu.
- Dobrymi praktykami w przeciwdziałaniu cyberatakami są następujące czynności i techniczne przedsięwzięcia [1.54]:
- komputery i sterowniki muszą być zabezpieczone przed szkodliwym oprogramowaniem, nieuprawnionym dostępem, sabotażem, szpiegostwem i manipulacją,
  - globalne wykorzystanie maszyn wymaga bezpiecznej komunikacji,
  - komunikacja zdalna pozwala uniknąć drogiej wizyt serwisowych,
  - systematyczne diagnozowanie systemu zabezpieczeń przed cyberatakami, aktualizacja zabezpieczeń.

Powstaje pytanie, jak wobec tego zapewnić praktycznie cyberbezpieczeństwo w swojej firmie? Należy przede wszystkim skomunikować się ze specjalistyczną firmą informatyczną lub nawet korporacją informatyczną mającą stosowne doświadczenie. Pomocne w dokonaniu wyboru może być chociażby uczestniczenie w specjalistycznych konferencjach [1.50–1.57]. Zagadnienia o wadze strategicznej (usługa kluczowa) można skonsultować z Ministerstwem Cyfryzacji RP.

## 5. Utrzymanie ruchu maszyn i urządzeń

Utrzymanie ruchu jest terminem odnoszącym się do teorii, metod, technologii oraz technik, które są stosowane w celu zapewnienia sprawnego funkcjonowania maszyn i urządzeń [1.63]. Cele utrzymania ruchu są następujące [1.63]:

- osiągnięcie pożądanej jakości wyrobów lub usług,
- maksymalizacja ekonomicznego okresu użytkowania wyposażenia produkcyjnego,
- utrzymanie warunków bezpiecznej eksploatacji,
- maksymalizacja zdolności produkcyjnych oraz minimalizacja kosztów produkcji poprzez zapewnienie nielicznych przerw w procesie produkcji.

Zagadnienie utrzymania ruchu w danym przedsiębiorstwie musi być rozpatrywane w kontekście jego kondycji ekonomicznej. Na całkowity koszt produkcji w przedsiębiorstwach produkcyjnych składa się wiele elementów. Do podstawowych należą koszty materiałów i energii w procesie produkcji, koszty pracy, koszty eksploatacji maszyn i urządzeń, w tym koszty ich używania i serwisowania. Koszty te korelują z zapewnieniem oczekiwanej nieustannej dyspozycyjności gwarantującej ciągłość produkcji [1.59]. Sytuacja konkurencyjna, w jakiej znajduje się energetyka i przemysł, zmusza przedsiębiorstwa do intensywnego poszukiwania możliwości zmniejszenia udziału bezpośrednich kosztów utrzymania ruchu w kosztach zmiennych przedsiębiorstwa [1.58]. Rośnie nie tylko znaczenie samego utrzymania urządzeń w sprawności eksploatacyjnej, ale rosną także koszty utrzymania tej sprawności. Stosunek kosztów utrzymania ruchu do obrotu wynosi 4–13% (w zależności od branży przemysłu) [1.58]. Obszar wszelkich działań w przedsiębiorstwie umożliwiających ciągłość w produkcji jest wyrazem realizacji przyjętej strategii eksploatacyjnej przedsiębiorstwa [1.58].

Optymalną metodą eksploatacji maszyn jest metoda eksploatacji zależna od ich stanu technicznego. Remont maszyny jest przeprowadzany tylko wtedy, gdy jest on konieczny. Wcześniej systematycznie wykonuje się pomiary diagnostyczne maszyn, określa się ich stan techniczny, indywidualnie dla każdej maszyny. Dzięki pomiarom diagnostycznym można stwierdzić początek pojawienia się uszkodzenia, a następnie obserwować jego rozwój, określać trend zmian.

Eksploatacja maszyn zależna od ich stanu technicznego jest strategią prowadzenia eksploatacji maszyn technicznie i ekonomicznie najkorzystniejszą. Jedną z możliwych dróg obniżenia kosztów działalności w przedsiębiorstwach jest objęcie całego parku maszynowego kompleksowym programem zabezpieczenia, diagnostyki i zarządzania maszynami (systemem nadzoru maszyn). System monitorowania i zabezpieczeń realizuje funkcję ochrony maszyn przed uszkodzeniami lub katastrofalnymi zniszczeniami w sytuacjach pogorszenia się ich stanu dynamicznego. System taki w połączeniu z odpowiednimi torami pomiarowymi pozwala zrealizować pełny nadzór zespołów maszynowych. Informacja o szybkości zmian stanu technicznego pozwala określić przewidywany czas niezbędny do dokonania naprawy maszyny, w wielu sytuacjach zakres takiej naprawy, a zatem w konsekwencji czas potrzebny na realizację zaplanowanych prac. Można

powiedzieć, że właściwa gospodarka remontowa prowadzi do całkiem nowego pojęcia związanego z eksploatacją posiadanego parku maszynowego – zarządzania maszynami. *Zarządzanie maszynami* umożliwia obniżenie kosztów produkcji, umożliwia wybór do eksploatacji maszyn o najlepszym stanie technicznym, planowanie zarówno zakresów, jak i kosztów remontów. Osiągnięcie tych celów jest możliwe, gdy systemy nadzoru maszyn zostaną uzupełnione systemami akwizycji danych diagnostycznych, ich archiwizacji i wizualizacji, systemami przetwarzania tych danych i ich analizy oraz systemami dostarczającymi informację o stanie maszyn.

W opinii licznych praktyków zajmujących się diagnostyką maszyn i urządzeń w przemyśle i energetyce uzasadnione organizacyjnie i ekonomicznie jest utrzymanie nadzoru diagnostycznego (Wydziałów Diagnostyki lub Wydziałów Diagnostyki i Kontroli Jakości) maszyn i urządzeń w strukturach właścicielskich przedsiębiorstwa [1.26]. Współczesne koncepcje utrzymania ruchu, czyli systemy prognostyczne, obok uznawania znaczenia przeglądów i remontów obejmują również [1.58]:

- narzędzia do wspierania decyzji: ocena ryzyka, modele intensywności uszkodzeń i analiza ich efektów oraz systemy ekspertowe,
- nowe techniki utrzymania ruchu, na przykład monitorowanie stanu,
- zmiany w sposobie myślenia o organizacji – współuczestnictwo i praca zespołowa,
- usuwanie usterek i awarii,
- zapobieganie usterkom i awariom.
- Do najważniejszych współczesnych koncepcji utrzymanie ruchu zaliczyć należy [1.58, 1.59]:
- RCM (ang. *reliability centered maintenance*) – utrzymanie ruchu skierowane na niezawodność, strategia wg niezawodności,
- TPM (ang. *total productive maintenance*) – całościowe utrzymanie ruchu zorientowane na produktywność, utrzymanie ruchu zintegrowane z produkcją.

RCM ma na celu osiągnięcie poziomu niezawodności, który jest spójny z bezpieczeństwem, aspektami środowiskowymi, kosztami operacyjnymi oraz celami biznesowymi przedsiębiorstwa [1.60]. Strategia remontowa RCM opiera się na odpowiedziach na 7 pytań:

1. Jaka jest funkcja instalacji bądź maszyny?
2. Jaka utrata funkcji następuje w momencie awarii?
3. Jakie są przyczyny każdej utraty funkcji?
4. Co się dzieje w momencie każdej awarii?
5. Jakie są konsekwencje każdej awarii?
6. Co zrobić, aby zapobiec lub przewidzieć awarię?
7. Co należy zrobić, gdy nie ma możliwości zapobiegnięcia awarii?

RCM jest wdrażane z sukcesem w wielu zakładach przemysłu i energetyki w Polsce między innymi w GDF Suez Energy Polska, Elektrownia Połaniec [1.60]. RCM jest wykorzystywany do budowy w danym zakładzie przemysłowym systemu utrzymania ruchu od podstaw. Szczególne znaczenie podczas wdrażania RCM przypisuje się pracy zespołowej. W pracach

związanych z utrzymaniem ruchu muszą brać udział operatorzy maszyn i urządzeń [1.58].

TPM jest koncepcją utrzymania ruchu polegającą na wprowadzeniu autonomicznego utrzymania ruchu maszyn i urządzeń przez operatorów. Musi dojść do integracji procesu produkcyjnego z procesem obsługowym. Operatorzy przejmują bezpośrednio [1.58]:

- konserwację,
- czynności inspekcyjne,
- proste prace naprawcze,
- operatorzy współdziałają z obsługą remontową podczas przestoju maszyn i urządzeń.

Według wiedzy autorów system utrzymania ruchu TPM stosuje z powodzeniem koncern Toyota. W literaturze specjalistycznej [1.58, 1.59] są opisane również inne współczesne sposoby utrzymania ruchu maszyn i urządzeń w przemyśle i energetyce. □

Fragment pochodzi z książki:

*Eksploatacja i diagnostyka maszyn elektrycznych i transformatorów*, Tadeusz Glinka, Sławomir Szymaniec, Wydawnictwo Naukowe PWN SA

## Wydarzenia

### Nowy pomysł na czujniki piezo

Zespół badawczy pod przewodnictwem profesora Hanjun Ryu z Uniwersytetu Chung-Ang w Korei Południowej wprowadził nowatorskie strategie produkcyjne, aby przezwyciężyć ograniczenia czujników piezo- i tryboelektrycznych związane z kruchością stosowanych materiałów i warunkami środowiskowymi. Artykuł na temat badań został opublikowany w *International Journal of Extreme Manufacturing*.

– Nasze badanie opisuje materiały i strategie wytwarzania komponentów dla czujników dotykowych wykorzystujących efekty piezoelektryczne i tryboelektryczne – powiedział profesor Ryu.

Zespół przeprowadził kompleksowy przegląd strategii produkcyjnych, skupiając się na technikach zwiększających czułość, elastyczność i możliwości samodzielnego zasilania. Badaniu poddano różne właściwości materiałów, procesy wytwarzania i projekty urządzeń, aby pokonać wyzwania, takie jak kruchość materiałów piezoelektrycznych i wrażliwość na warunki środowiskowe czujników tryboelektrycznych. Strategie te miały

na celu umożliwienie rozwoju wysoko-wydajnych czujników do zastosowań w robotyce, urządzeniach noszonych i systemach opieki zdrowotnej.

W przypadku konstrukcji piezoelektrycznych naukowcy podkreślili znaczenie zwiększenia stałej piezoelektrycznej za pomocą metod, takich jak domieszkowanie, kontrola krystaliczności i integracja materiałów kompozytowych. Do godnych uwagi zaleceń należy wykorzystanie bezołowiowej ceramiki i mieszanek polimerowych w celu tworzenia elastycznych, przyjaznych dla środowiska czujników odpowiednich do dynamicznych zastosowań. Stwierdzono również, że integracja druku 3D i technik krystalizacji opartych na rozpuszczalnikach znacznie poprawia czułość i zdolność adaptacji ich konstrukcji.

Czujniki tryboelektryczne zostały ulepszone za pomocą metod modyfikacji powierzchni, takich jak obróbka plazmowa, mikrostrukturyzacja i optymalizacja stałej dielektrycznej. Podejście to zwiększyło wydajność transferu ładunku i umożliwiło rozwój trwałych odmian o dużej wydajności. Naukowcy wykazali również

skuteczność materiałów hybrydowych i nanostruktur w zwiększaniu wydajności tryboelektrycznej przy jednoczesnym zachowaniu elastyczności i odporności na warunki środowiskowe.

Wyniki badania wskazują na to, że połączenie innowacyjnej inżynierii materiałowej i zaawansowanych technik wytwarzania jest niezbędne do tworzenia czujników zdolnych do detekcji multimodalnej oraz interakcji w czasie rzeczywistym. To interdyscyplinarne podejście obiecuje poszerzyć zakres zastosowań czujników dotykowych w różnych branżach.

Badanie podkreśla również potencjał integracji z technologią sztucznej inteligencji w celu uzyskania zaawansowanego przetwarzania danych i wykrywania wielu sygnałów jednocześnie. Rozpoznawanie tekstury i nacisku z pomocą SI może znacznie zwiększyć dokładność i funkcjonalność korzystających z czujników urządzeń. Toruje to drogę dla rozwoju sensorów nowej generacji, które naśladują ludzkie zdolności sensoryczne, jednocześnie osiągając wyższą wydajność operacyjną.

Źródło: techxplore

Reklama

**napędy  
i sterowanie**

miesięcznik  
naukowo-techniczny

**Znajdziesz nas na Facebooku**

 Napędy i Sterowanie