

Aleksander Uklański

Instytut Techniki Ciepłej
Politechniki Warszawskiej

NIEZAWODNOŚĆ W ELEKTROENERGETYCE

Opracowanie jest próbą zastosowania pojęcia niezawodności działania, najważniejszej z cech eksploatacyjnych maszyn i urządzeń technicznych, do krajowego systemu elektroenergetycznego stanowiącego jeden z głównych, jeżeli nie podstawowy element gospodarki narodowej. Przyjmuje się strukturę szeregową systemu, a człony tej struktury, jako podsystemy. Wykazuje się, że decydującą rolę w osiągnięciu niezawodności ma podsystem wytwórczy, a w nim zespoły parowych bloków energetycznych. Analizuje się niezawodność kotłów, rurociągów, turbin, prądnic, transformatorów. Podkreśla się rolę statystyki, jako narzędzia do badania niezawodności bloków.

Niezawodność działania lub pracy jest najważniejszą z cech, którymi można ocenić jakość i dobroć maszyn i urządzeń technicznych pod względem ich przydatności do eksploatacji. Inne cechy są w większości z niezawodnością związane i na nią korzystnie lub niekorzystnie wpływają.

Przez niezawodność rozumie się, według znanego określenia [1], zdolność urządzenia do prawidłowego działania w określonych warunkach, w dłuższym okresie. Teoria niezawodności, oparta na statystyce matematycznej i rachunku prawdopodobieństwa, dostosowana jest przede wszystkim do urządzeń masowej produkcji o jednym określonym sposobie działania, które można jednoznacznie ocenić, jako prawidłowe lub nie. Dla takich urządzeń miarą niezawodności jest prawdopodobieństwo prawidłowego działania w określonych warunkach i określonym czasie. W odniesieniu do urządzeń elektroenergetyki, mimo że takimi, jak opisane wyżej, na ogół nie są, stosowana jest taka sama miara niezawodności. Prawdopodobieństwo wyraża się stosunkiem

rzeczywistej liczby zadziałań do całkowitej możliwej i oczekiwanej lub też rzeczywistego czasu pracy do całkowitego planowanego w przyjętym okresie. To prawdopodobieństwo, czyli wskaźnik (współczynnik) niezawodności jest w urządzeniach technicznych zawsze mniejsze od jedności, wobec uszkodzeń i zakłóceń w pracy, zwanych w elektroenergetyce awaryjnością, której wskaźnik jest dopełnieniem wskaźnika niezawodności do jedności.

Teoria rozpatruje urządzenia abstrakcyjne, złożone z uporządkowanych elementów, których niezawodność jest dana lub może być zbadana. Elementy urządzenia, działającego jako całość, są oczywiście powiązane ze sobą bezpośrednio lub pośrednio i wykazują wzajemne zależności, tworzą więc system zgodnie z najprostszym określeniem teorii systemów [2]. Elementem może być nie tylko najprostsza, nierozkładalna część systemu, ale również dowolne urządzenie w systemie (podsystem), którego niezawodność bada się niezależnie od niezawodności składających się nań części. Elementem urządzenia (systemu) mogą być obok obiektów materialnych (konkretnych) również czynniki niematerialne, abstrakcyjne, np. podsystem kierowania czy zarządzania.

Teoria niezawodności określa niezawodność systemu w postaci tzw. charakterystyki niezawodności na podstawie znajomości charakterystyk elementów oraz struktury systemu: szeregowej, równoległej lub mieszanej. Elementy są połączone szeregowo, jeżeli uszkodzenie lub zakłócenie pracy dowolnego elementu powoduje te same skutki w systemie jako całości. W strukturze szeregowej wskaźnik niezawodności systemu jest iloczynem wskaźników poszczególnych elementów, jest więc tym większy, im mniejsza ich liczba i większa niezawodność.

Pojęcie niezawodności może być oczywiście zastosowane także do systemu elektroenergetycznego. Niezawodność jego funkcjonowania ma szczególną wagę, ze względu na znaczenie dla wszystkich gałęzi gospodarki narodowej niezawodnej, tj. nieprzerwanej w dłuższym okresie, dostawy potrzebnej ilości energii elektrycznej dobrej jakości, a więc o stałej częstotliwości i napięciu, jak też energii cieplnej w postaci pary lub wody gorącej o określonych parametrach.

Jako zdarzenie w rozumieniu rachunku prawdopodobieństwa przyjmuje się w elektroenergetyce godzinę pracy, niezależnie od stopnia wykorzystania mocy urządzenia, a za okres liczenia czasu pracy - rok. Liczenie godzin pracy pozwala na zastosowanie wskaźnika niezawodności zarówno do statystyki zdarzeń przeszłych, jak i do oceny prawdopodobieństwa zdarzeń przyszłych, tj. do prognozowania.

Usiłując, dla ułatwienia oceny niezawodności systemu elektroenergetycznego, przedstawić go w strukturze szeregowej, można rozbić go na elementy stanowiące podsystemy: dyspozytorski, wytwórczy (obejmujący elektrownie i elektrociepłownie) oraz przesyłowo-rozdzielczy [1]. Do podsystemu dyspozytorskiego zaliczyć można też nieodzowne w elektroenergetyce elementy informatyki. Podsystem wytwórczy, którego zadaniem jest osiągnięcie w każdej chwili potrzebnej mocy elektrycznej i cieplnej, powinien obejmować też elementy rezerwy natychmiastowej. Taką rezerwę w warunkach krajowych stanowią: niecałkowite obciążenie pracujących kotłów i turbozespołów prądotwórczych, tj. rezerwa wirująca, elektrownie wodne o minutowym czasie ruchu, rewersyjne lub ze zbiornikami retencyjnymi oraz moce przesyłowe ze związanych systemów zagranicznych.

Określenie drogą badań niezawodności podsystemów: dyspozytorskiego i przesyłowo-rozdzielczego, z uwagi na wielość ośrodków dyspozycji oraz mnogość i różnorodność odbiorców energii elektrycznej i cieplnej byłoby zadaniem trudnym, jeżeli nie niemożliwym. Można przyjąć, że niezawodności tych podsystemów są znacznie wyższe niż podsystemu wytwórczego albo, że niezawodność systemu jest bliska niezawodności podsystemu wytwórczego albo nawet, że jest mu równa, przy założeniu wskaźników niezawodności podsystemów pierwszego i trzeciego równych jedności.

Niezawodność podsystemu wytwórczego zależy od aktualnie potrzebnej mocy elektrycznej i cieplnej oraz posiadanych rezerw tych mocy. Przy zmiennym zapotrzebowaniu na moc w ciągu doby i roku oraz nie zawsze wystarczających rezerwach można by mówić - wbrew podstawowemu określeniu - o niezawodności podsystemu wytwórczego tylko w krótkich, kilkugodzinnych okresach.

Słuszny teoretycznie wniosek, że wobec niemożności oceny (zgodnej z podstawowym określeniem) niezawodności żadnego z trzech podsystemów, niezawodność systemu jest wielkością matematycznie nieoznaczoną, byłby w praktyce nieużyteczny. Pozostaje wtedy przyjąć, że niezawodność systemu elektroenergetycznego jest bliska lub dorównuje niezawodności podsystemu wytwórczego, z zastrzeżeniem co do długości okresu, w którym ocenia się niezawodność. Ocena niezawodności w okresie rocznym wymagałaby, aby rozwój potencjału podsystemu wytwórczego wyprzedzał wzrost potrzebnych w systemie mocy przynajmniej o wartość statystycznie potrzebnych rezerw.

Podsystem wytwórczy ma w zasadzie strukturę podobną do równoległej, nie można mu jednak przypisać żadnej określonej struktury, która ułatwiłaby ocenę jego niezawodności. W podsystemie wytwórczym elementami są elektrownie i elektrociepłownie różnego wieku i mocy, w układach kolektorowych i blokowych. W układzie kolektorowym niezawodność turbozespołów prądowców jest w zasadzie większa niż w blokowym, wobec posiadanych na ogół rezerw w wydajności kotłów i transformatorów, mniejszych mocy, prostszych układów cieplnych, mniejszych wymiarów, mas i prostszej budowy maszyn, niższych parametrów pary i na ogół niższych napięć, prostszych układów zabezpieczeń, wreszcie łatwiejszego dozoru i obsługi w eksploatacji.

Układy kolektorowe występują przede wszystkim w elektroenergetyce przemysłowej, która przy odpowiednich połączeniach z siecią państwową może z niej pobierać energię brakującą lub rezerwową, a w razie nadwyżek mocy może tę sieć zasilac. Dobra niezawodność układów kolektorowych powiększa wtedy niezawodność urządzeń elektroenergetyki zawodowej. Wpływ ten jest pomijalny wobec małego udziału mocy elektroenergetyki przemysłowej w ogólnej mocy całego systemu. Układy kolektorowe występują również w elektroenergetyce zawodowej. Ich dodatki wpływ na niezawodność podsystemu wytwórczego jest nieznaczny wobec dominującego i stale rosnącego udziału układów blokowych, których niezawodność decyduje więc o niezawodności podsystemu.

Układy blokowe złożone z kilku bloków energetycznych takiej samej lub zbliżonej mocy, przede wszystkim z przegrzewem

międzystopniowym, stanowią jakby połączenia równoległe kilku elektrowni lub elektrociepłowni. Zespół wszystkich elektrowni i elektrociepłowni z blokami energetycznymi można traktować znowu jako system o strukturze podobnej do równoległej, z elementami o takiej samej strukturze. Nie ma to znaczenia dla oceny niezawodności tego systemu, uwydatnia jednak podstawową cechę systemu elektroenergetycznego - pracę równoległą prawie wszystkich źródeł energii elektrycznej.

Struktura bloku energetycznego, traktowanego jako system sam w sobie, jest wyraźnie szeregową, obejmując elementy: sterowanie blokiem, kocioł parowy z urządzeniami pomocniczymi, układ rurociągów z uzbrojeniem łączącym kocioł z turbiną, turbina z urządzeniami pomocniczymi, prądnice z układem wzbudzenia i chłodzenia uzwojeń, transformator blokowy z układem chłodzenia. Zakłócenia i uszkodzenia, powodujące awaryjne postoje bloków i zmniejszające zarówno niezawodność poszczególnych elementów jak i całego bloku, występują we wszystkich elementach. Mogą być one spowodowane błędami lub usterkami projektów, konstrukcji, wykonania, montażu i eksploatacji, a także wpływami środowiska pracy.

Najniższą niezawodność wykazuje zazwyczaj kocioł parowy z urządzeniami pomocniczymi ze względu na znaczną liczbę tych urządzeń i niemożliwość ich dostatecznego rezerwowania (młyny węglowe, podajniki, palniki, urządzenia przygotowania wody, pompy zasilające, wentylatory, urządzenia odpylające), najwyższe wartości temperatury w procesie przemiany energii, wielkie wymiary i masy metalu, ogromną liczbę połączeń spawanych, niszczące działanie ognia i gorących zapyłonych spalin, złożony układ regulacji i zabezpieczeń, trudności dozoru i obsługi.

Niezawodność turbiny z urządzeniami pomocniczymi jest na ogół większa niż kotła, z uwagi na znacznie niższe wartości temperatury, mniejszą liczbę i prostszą budowę urządzeń pomocniczych o dobrej niezawodności, łatwiejszy dozór i obsługę. Uszkodzenia i zakłócenia wywoływane są głównie przez zjawiska dynamiczne cieplne i mechaniczne, związane z przepływem ciepła i masy przez długie, wirujący, precyzyjny i wrażliwy na wpływ czynnika układ łopatkowy, przepływem powodującym zmę-

czenie cieplne w kadłubach i wirnikach oraz zmęczenie mechaniczne, przede wszystkim w wirujących łopatkach wskutek naturalnego stanu drgań wszystkich elementów turbiny wraz z fundamentem. Znaczne i różne przemieszczenia elementów wirujących i nieruchomych powodują zmiany szczelin między nimi. Występują wysokie, graniczne naprężenia w elementach wirujących, znaczne obciążenie łożysk smarowanych olejem, poddanych niekorzystnym wpływom, wreszcie możliwy niekorzystny wpływ współpracy z kotłem (zanieczyszczona para, uderzenia wodne) i z prądnicą (zwarcia elektryczne).

Niezawodność prądnicy z układem wzbudzenia i chłodzenia uzwojeń jest na ogół większa niż turbiny, z powodu prostoty przemiany energii mechanicznej na elektryczną w porównaniu z przemianą energii cieplnej na mechaniczną w turbinie, niższych znacznie naprężeń w elementach wirujących, niższego poziomu temperatury. Miejscem lub źródłem uszkodzeń są: złożony układ wzbudzenia oraz układ chłodzenia uzwojeń stojana i wirnika, przemieszczenia uzwojeń pod wpływem ciepła i sił odśrodkowych (w wirniku) grożące trwałości izolacji, ewentualny wpływ współpracy z turbiną (możliwość przeciążenia), ewentualny ujemny wpływ pracy równoległej, złożony układ zabezpieczeń.

Z kolei niezawodność transformatora blokowego wraz z układem chłodzenia jest większa niż prądnicy, z oczywistej przyczyny bezruchu. Miejscem lub źródłem zakłóceń i uszkodzeń jest układ chłodzenia, przemieszczenia uzwojeń pod wpływem ciepła, wreszcie wpływy atmosferyczne, z uwagi na zwykłe miejsce ustawienia transformatora.

Niezawodność układu rurociągów wraz z uzbrojeniem (odwodnienia, kompensatory, armatura) można uznać za dobrą z uwagi na prostotę spełnianego zadania. Miejscem i źródłem uszkodzeń i zakłóceń są połączenia rurociągów i armatury umożliwiające powstanie nieszczelności.

Iloczyn wskaźników niezawodności omówionych elementów jest zazwyczaj mniejszy od jedności. Nawet bardzo dobra niezawodność elementu sterowania blokiem nie zdoła znacznie zwiększyć tego iloczynu, co powoduje, że wskaźnik niezawodności pojedynczego bloku może wynosić np. zaledwie 0,9. Ważna jest

przeło rola wszystkich wskazań, zaleceń i przepisów, których zakres może i powinien być bardzo szeroki, zmierzających do podniesienia niezawodności wszystkich elementów i całego bloku.

Z wyjątkiem elementu sterowania, tylko nieliczne części składowe pozostałych elementów przechodzą badania niezawodności wymagane przez teorię i w związku z tym nie ma podstaw do oceny z góry niezawodności elementu. Rozwój budowy urządzeń bloku nie odbywa się na podstawie badań prototypów w wytwórniach, niemożliwych w ogólności do przeprowadzenia, a na podstawie doświadczeń z prototypami w eksploatacji, która jest przecież naturalnym terenem badania niezawodności zarówno części składowych jak i kompletnych urządzeń. Doświadczenia te prowadzą - nie zawsze - do poprawek trudnych do realizacji, nie zawsze udanych. W warunkach krajowych usterki i pomyłki mogą występować zarówno w konstrukcjach licencyjnych, jak i we wprowadzonych w nich zmianach, jak też w konstrukcjach własnych.

Narzędziem do badania niezawodności w okresach minionych, niezbędnym do prognozowania przyszłej niezawodności bloków i podsystemu wytwórczego jest statystyka. Powinna ona być prowadzona w pojedynczych blokach w okresach rocznych, w których system dysponuje dostatecznymi rezerwami. Pomijając bloki małej mocy, np. mniejszej od 100 MW oraz reprezentowane w systemie jednym lub dwoma egzemplarzami, statystyka powinna obejmować liczniejsze grupy bloków tej samej konstrukcji i w każdym roku określać średni wskaźnik niezawodności całej grupy, za cały okres pracy wszystkich bloków w grupie, poczynając od pierwszego roku eksploatacji każdego pojedynczego bloku. Na tej zasadzie badań jeden z instytutów krajowych na początku lat siedemdziesiątych niezawodność turbin i całych bloków w dwóch grupach bloków, o mocy 125 i 200 MW. Badania wykazały np. w obu typach turbin, że po początkowym okresie miernej średniej niezawodności (obliczanej za cały okres eksploatacji) i kolejnym okresie wzrostu następuje ponowny spadek do wartości nawet niższej niż pierwotna a dopiero potem stopniowy, powolny ale ciągły wzrost. Przebieg ten nie daje już dzisiaj podstawy do prognozy. Badania te wykazały jeszcze

pewną osobliwość, że w obu grupach niezawodność bloków rosła i malała ze wzrostem i spadkiem niezawodności turbin blokowych, niezależnie od wielkości kotła i rodzaju paliwa, tj., że niezawodność turbin decydowała o niezawodności bloku. Był to raczej przypadek, a nie prawidłowość, dla której brak byłoby zasadnego wytłumaczenia.

Ocena niezawodności ogółu bloków w systemie powinna opierać się na średniej ważonej niezawodności wszystkich badanych grup, z uwzględnieniem ich przewidywanego udziału w produkcji energii elektrycznej w okresie objętym prognozą. Obie grupy bloków 125 i 200 MW reprezentują obecnie ok. 70% mocy systemu. Udział ten wystarcza w razie posiadania danych o przebiegu niezawodności tych grup w latach siedemdziesiątych do prognozy niezawodności podsystemu wytwórczego na najbliższe lata. Od roku 1981 rośnie grupa bloków 360 MW, obiecujących większą niezawodność niż obie grupy bloków 125 i 200 MW, podnosząc niezawodność podsystemu wytwórczego elektroenergetyki.

BIBLIOGRAFIA

- [1] B o j a r s k i W.: Zadanie systemu elektroenergetycznego i ocena jakości jego pracy. Archiwum Energetyki. Nr 3/1974.
- [2] M ł y n a r s k i S.: Elementy teorii systemów i cybernetyki. PWN, Warszawa 1979.

НАДЕЖНОСТЬ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

К р а т к о е с о д е р ж а н и е

Работа является попыткой применения понятия надежности, наиболее выжного среди эксплуатационных качеств машин и технических устройств, в отечественной электроэнергетической системе, являющейся одним из главных, если не основным, элементов народного хозяйства. Принимается, что система имеет последовательную структуру, а составляющие этой структуры

рассматриваются как подсистемы. Показывается, что решающее влияние на достижение надежности оказывает подсистема производственная, а в ней - комплексы паровых электроэнергетических блоков. Анализируется надежность котлов, трубопроводов, турбин, генераторов, трансформаторов. Подчеркивается роль статистики как инструмента в исследованиях надежности блоков.

Рękopis dostarczone w październiku 1983 r.