

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA

---

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI I ELEKTRONIKI  
KATEDRA ELEKTROENERGETYKI

**ROZPRAWA DOKTORSKA**

**OPTYMALIZACJA W DIAGNOSTYCE URZĄDZEŃ  
ELEKTROENERGETYCZNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA**

**MGR INŻ. SZCZEPAN MOSKWA**

Promotor:  
Prof. dr hab. inż. Romuald Włodek

Kraków, 2007

*Składam serdeczne podziękowania mojej Żonie za  
cierpliwość i wyrozumiałość w trakcie mojej pracy nad  
rozprawą, oraz Panu prof. dr hab. inż. Romualdowi  
Włodkowi za pomoc, mobilizację do pracy oraz cenne  
uwagi dotyczące treści rozprawy.*

# Spis treści

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Wykaz oznaczeń i pojęć</b>                                                     | 3  |
| <b>1. Wstęp</b>                                                                   | 5  |
| <b>2. Studium literaturowe</b>                                                    | 7  |
| <b>3. Tezy i cel pracy</b>                                                        | 11 |
| <b>4. Diagnostyka jako element procesu eksploatacji</b>                           | 13 |
| 4.1. Eksploatacja a jakość zasilania                                              | 13 |
| 4.2. Znaczenie diagnostyki w procesie eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych | 15 |
| 4.3. Diagnostyka eksploatacyjna                                                   | 18 |
| 4.4. Ocena stanu technicznego urządzenia                                          | 19 |
| 4.5. Diagnostyka uszkodzeń                                                        | 20 |
| 4.6. Możliwości optymalizacji diagnostyki eksploatacyjnej                         | 22 |
| <b>5. Procedura diagnostyczna</b>                                                 | 24 |
| 5.1. Zakres i formy diagnostyki technicznej                                       | 24 |
| 5.2. Stan techniczny urządzeń elektroenergetycznych                               | 25 |
| 5.3. Schemat procedury diagnostycznej                                             | 27 |
| 5.4. Proces budowy procedury diagnostycznej                                       | 28 |
| 5.5. Kryterium ekonomiczne procedury diagnostycznej                               | 29 |
| 5.6. Obsługa diagnostyczna w eksploatacji                                         | 31 |
| 5.7. Analiza i przetwarzanie informacji diagnostycznych                           | 34 |
| 5.8. Założenia optymalizacji procedury diagnostycznej                             | 34 |
| <b>6. Analiza niezawodnościowa w diagnostyce urządzeń elektroenergetycznych</b>   | 36 |
| 6.1. Niezawodność a diagnostyka                                                   | 36 |
| 6.2. Analiza ilościowa niezawodności                                              | 37 |
| 6.3. Wskaźniki niezawodnościowe                                                   | 38 |
| 6.3.1. Kryteria doboru                                                            | 38 |
| 6.3.2. Funkcja niezawodności                                                      | 39 |
| 6.3.3. Intensywność uszkodzeń                                                     | 40 |
| 6.3.4. Statystyczne wskaźniki nieuszkodzalności                                   | 41 |
| 6.3.5. Statystyczna intensywność uszkodzeń                                        | 41 |
| 6.3.6. Wskaźniki gotowości                                                        | 42 |
| 6.3.7. Wskaźniki obsługiwalności                                                  | 43 |
| <b>7. Analiza diagnostyczna</b>                                                   | 44 |
| 7.1. Proces analizy diagnostycznej                                                | 44 |
| 7.2. Rola współczesnej analizy diagnostycznej                                     | 47 |

|            |                                                                                                  |            |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.3.       | Klasyfikacja stanu urządzenia . . . . .                                                          | 48         |
| 7.4.       | Proces zmian stanów urządzeń elektroenergetycznych . . . . .                                     | 49         |
| 7.5.       | Procesy losowe w diagnostyce . . . . .                                                           | 52         |
| 7.6.       | Modele zmian stanów oparte na teorii procesów losowych Markowa .                                 | 53         |
| <b>8.</b>  | <b>Optymalizacja w diagnostyce urządzeń elektroenergetycznych . .</b>                            | <b>57</b>  |
| 8.1.       | Kryteria optymalizacyjne . . . . .                                                               | 57         |
| 8.2.       | Powaryjne testy diagnostyczne systemów wieloelementowych . . .                                   | 58         |
| 8.3.       | Optymalizacja procesu diagnostycznego . . . . .                                                  | 60         |
| 8.4.       | Optymalizacja kosztów diagnostyki . . . . .                                                      | 62         |
| 8.5.       | Optymalizacja procedur diagnostycznych . . . . .                                                 | 64         |
| <b>9.</b>  | <b>Modele diagnostyczne . . . . .</b>                                                            | <b>66</b>  |
| 9.1.       | Pojęcie ogólne modelu . . . . .                                                                  | 66         |
| 9.2.       | Proces i kryteria modelowania . . . . .                                                          | 67         |
| 9.2.1.     | Klasyfikacja modeli . . . . .                                                                    | 67         |
| 9.2.2.     | Proces formułowania modelu matematycznego . . . . .                                              | 68         |
| 9.3.       | Modele struktur niezawodnościowych . . . . .                                                     | 71         |
| 9.3.1.     | Rozwój diagnostyki w oparciu o modele struktury<br>niezawodnościowej . . . . .                   | 75         |
| 9.4.       | Model dwustanowy urządzenia . . . . .                                                            | 76         |
| 9.5.       | Dyspozycyjność obiektu . . . . .                                                                 | 78         |
| 9.6.       | Model trójstanowy . . . . .                                                                      | 82         |
| 9.7.       | Model trójstanowy bez odnowy . . . . .                                                           | 87         |
| 9.8.       | Model trójstanowy z częściową odnową . . . . .                                                   | 89         |
| 9.9.       | Model trójstanowy z pełną odnową lub wymianą . . . . .                                           | 91         |
| <b>10.</b> | <b>Optymalizacja strategii obsługi diagnostycznych . . . . .</b>                                 | <b>94</b>  |
| 10.1.      | Optymalizacja kosztów eksploatacji urządzeń . . . . .                                            | 94         |
| 10.2.      | Okresowe wymiany/naprawy urządzeń z uwzględnieniem czasu<br>poprawnej pracy . . . . .            | 96         |
| 10.3.      | Optymalizacja czasookresów badań profilatycznych z uwzględnieniem<br>poziomu gotowości . . . . . | 97         |
| 10.4.      | Analiza okresów badań diagnostycznych . . . . .                                                  | 101        |
| 10.5.      | Analiza okresów badań diagnostycznych z uwzględnieniem odnowy<br>po obsłudze . . . . .           | 105        |
| 10.6.      | Optymalizacja nakładów na obsługę diagnostyczną . . . . .                                        | 109        |
| <b>11.</b> | <b>Wnioski . . . . .</b>                                                                         | <b>117</b> |
|            | <b>Bibliografia . . . . .</b>                                                                    | <b>120</b> |

## Wykaz oznaczeń i pojęć

|                |                                                               |
|----------------|---------------------------------------------------------------|
| $A(t)$         | – funkcja dyspozycyjności; gotowość                           |
| $\Delta t$     | – bardzo mały przedział czasu                                 |
| $D_i$          | – stan obsługi diagnostycznej; zmienna stanu                  |
| $E(\cdot)$     | – wartość oczekiwana                                          |
| $F(t)$         | – funkcja zawodności                                          |
| $h(t)$         | – gęstość odnowy                                              |
| $H(t)$         | – funkcja odnowy                                              |
| $i, j$         | – indeksy, oznaczenia kolejnych stanów systemu;               |
| $k$            | – element dyskretnego zbioru $T$ ; numer kroku                |
| $K$            | – koszty (ściślejsze określenie ustalają indeksy)             |
| $\lambda(t)$   | – intensywność uszkodzeń; gęstość prawdopodobieństwa przejść  |
| $M(t)$         | – prawdopodobieństwo obsługi                                  |
| $\mu(t)$       | – intensywność odnowień/obsługi                               |
| $n, k, N$      | – liczebność próby                                            |
| $P$            | – miara probabilistyczna, rozkład prawdopodobieństwa          |
| $p_{ij}^{(k)}$ | – prawdopodobieństwo przejścia pomiędzy stanami $S_i$ i $S_j$ |
| $\mathbf{p}$   | – wektor prawdopodobieństw                                    |
| $\mathbf{P}$   | – stochastyczna macierz przejść                               |
| $R(t)$         | – funkcja niezawodności                                       |
| $S$            | – zbiór stanów; zmienna losowa                                |
| $t$            | – czas (ściślejsze określenie ustalają indeksy)               |
| $T$            | – zbiór lub przedział czasu; zmienna losowa                   |
| $V$            | – przestrzeń zdarzeń elementarnych                            |
| $X$            | – zbiór stanów                                                |
| $X(t)$         | – wektor, zmienna stanu                                       |
| $x_i(t)$       | – zmienna stanu; element zbioru $X$                           |

|                       |                                                                                                                        |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ASM                   | – system zarządzania majątkiem                                                                                         |
| ATF                   | – średni czas do uszkodzenia                                                                                           |
| awaria                | – uszkodzenie katastroficzne uniemożliwiające dalszą pracę urządzenia                                                  |
| badanie               | – operacja diagnostyczna określająca zależności funkcyjne lub czasowe badanych wielkości                               |
| badanie diagnostyczne | – procedura badania przeprowadzona w celu postawienia diagnozy                                                         |
| blackout              | – zapad systemu elektroenergetycznego                                                                                  |
| CADMAT                | – projektowanie, produkcja i badanie wspomagane komputerowo                                                            |
| CBM                   | – diagnostyka/obsługa realizowana w zależności od stanu urządzenia                                                     |
| CM                    | – diagnostyka/obsługa korygująca                                                                                       |
| dane pomiarowe        | – informacje ilościowe i jakościowe otrzymane w wyniku operacji diagnostycznych                                        |
| DGA                   | – analiza gazów rozpuszczonych w oleju                                                                                 |
| diagnostyka           | – zorganizowany zbiór metod i środków do identyfikacji stanu obiektu                                                   |
| ES                    | – system ekspertowy                                                                                                    |
| FEMA                  | – analiza rodzajów i skutków uszkodzeń                                                                                 |
| LCC                   | – koszt cyklu życia                                                                                                    |
| MBDS                  | – systemów diagnostycznych bazujący na modelu                                                                          |
| MTBF                  | – średni czas pomiędzy kolejnymi uszkodzeniami                                                                         |
| MTTFF                 | – oczekiwany czas do pierwszego uszkodzenia                                                                            |
| MTTR                  | – średni czas naprawy urządzenia                                                                                       |
| RCM                   | – diagnostyka/obsługa zorientowana na niezawodność                                                                     |
| TBM                   | – diagnostyka/obsługa okresowa                                                                                         |
| PM                    | – obsług przewencyjnych                                                                                                |
| pomiar                | – operacja diagnostyczna mająca na celu określenie ilościowe badanych wielkości                                        |
| próba                 | – operacja diagnostyczna o ambiwalentnym wyniku                                                                        |
| stan systemu          | – wyszczególniona kombinacja stanów elementów                                                                          |
| uszkodzenie           | – przypadek losowy, defekt urządzenia powodujący częściową lub całkowitą utratę zdolności wykonywania stawianych zadań |

# 1. Wstęp

Jednym z kierunków rozwoju elektroenergetyki ostatnich lat jest poprawa standardów jakościowych obsługi odbiorców oraz parametrów technicznych dostarczanej energii elektrycznej. Prowadzone badania oraz opracowania prezentowane w literaturze przedmiotu, materiałach konferencyjnych czy raportach komitetów normalizacyjnych obejmują zagadnienia jakości parametrów energii elektrycznej, w tym również niezawodności zasilania odbiorców [17, 51, 57, 68, 100].

Realizacja wymagań rynku energii elektrycznej pod względem pewności dostaw energii elektrycznej stawia nowe wyzwania diagnostyce elektroenergetycznej – zwiększenie niezawodności systemu elektroenergetycznego oraz urządzeń będących jego częściami składowymi [51].

Zgodnie z §43 rozporządzenia Ministra Gospodarki [90] w sprawie szczegółowych zasad kształtowania i kalkulacji taryf oraz zasad rozliczeń w obrocie energią elektryczną, za niedotrzymanie standardów jakościowych obsługi, odbiorcy – na jego wniosek – przysługuje bonifikata i upusty, w wysokości określonej w taryfie lub umowie. Natomiast standardy jakościowe obsługi odbiorców określone są w rozdziale 6 rozporządzenia Ministra Gospodarki [91] w sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznych, obrotu energią elektryczną, świadczenia usług przesyłowych, ruchu sieciowego i eksploatacji sieci oraz standardów jakościowych obsługi odbiorców, albo mogą być określone w umowie sprzedaży energii elektrycznej. Jeżeli strony nie ustaliły innych standardów jakościowych obsługi odbiorców w umowie sprzedaży energii elektrycznej, to dotrzymaniem standardów obsługi odbiorców przez dystrybutora energii elektrycznej (zakład energetyczny) będzie zachowanie warunków określonych w §32 ust. 2 i 3 „rozporządzenia przyłączeniowego”, z których wynika, iż łączny czas trwania w ciągu roku wyłączeń awaryjnych, liczony dla poszczególnych wyłączeń od chwili zgłoszenia przez odbiorcę braku zasilania do jego przywrócenia, dla podmiotów zakwalifikowanych do IV lub V grupy przyłączeniowej nie może przekroczyć 72 godzin oraz czas trwania jednorazowej przerwy w dostarczaniu energii elektrycznej nie może przekroczyć 48 godzin.

Wobec powyższego konsekwencje techniczne i ekonomiczne awarii urządzeń, w tym również gorsza jakość zasilania, wysuwają diagnostykę oraz znaczenie informacji diagnostycznej o stanie urządzeń i systemu na pierwszy plan w procesie eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia.

Procedury diagnostyczne wykorzystywane w energetyce dostarczają informacji o stanie technicznym badanych urządzeń oraz o ich zdolności, tj. gotowości do wykonywania określonych zadań. Natomiast w przypadku niezdatności urządzenia (uszkodzenia bądź awarii) celem diagnostyki jest dostarczenie szybkiej, jednoznacznej informacji identyfikującej przyczynę niezdatności. Diagnostyka może być realizowana poprzez procedury kontrolno – pomiarowe, wynikające ze specyfiki technicznej urządzeń, poprzez systemy nadzoru bieżącego i analizy techniczne oparte na wskaźnikach statystyczno – probabilistycznych oraz modelach matematycznych i wynikach symulacji przeprowadzonych z ich wykorzystaniem. Urządzenia elektroenergetyczne, które w praktyce mają różny charakter i warunki pracy, znajdujące się na różnych etapach procesu starzenia, należy we współczesnej analizie diagnostycznej traktować jako modele matematyczno – ekonomiczne. Jest to konsekwencją komercjalizacji rynku energetycznego, gdzie istotnym, a czasami najważniejszym, czynnikiem jest rachunek ekonomiczny eksploatacji systemu energetycznego.

Zgodnie z [29, 81, 96] prawidłowe badania diagnostyczne przyczyniają się do zwiększenia gotowości urządzenia, zmniejszenia kosztów obsługi, redukcji ryzyka szkód pośrednich, poprawy bezpieczeństwa systemu oraz optymalizacji użytkowania.

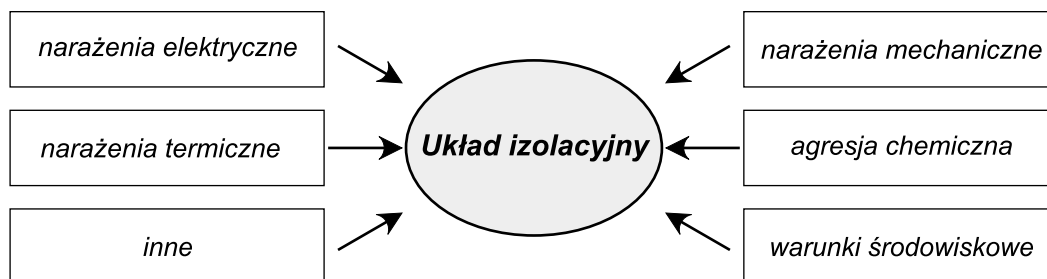
Istota, jak również waga problematyki, skłoniły autora do wyboru tematu rozprawy doktorskiej dotyczącej diagnostyki urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia i możliwości jej optymalizacji, ze szczególnym uwzględnieniem procedur obsługi diagnostycznej w trakcie eksploatacji.

## 2. Studium literaturowe

Specyficzne warunki pracy i budowa urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia powodują, że głównymi elementami determinującymi zdolność tych urządzeń do pracy są ciągłość obwodu prądowego oraz stan układu izolacyjnego. Prace prowadzone w ramach wysokonapięciowych badań diagnostycznych, np. [15, 26, 25, 59, 66, 92, 93] wskazują różnorakie przyczyny degradacji i uszkodzeń układu izolacyjnego, które można podzielić na kilka grup (rys. 2.1):

- narażenia elektryczne, do których zaliczane są: natężenie pola elektrycznego, wyładowania niezupełne, przepięcia wewnętrzne i zewnętrzne,
- narażenia mechaniczne, będące skutkiem bezpośredniego oddziaływania mechanicznego części ruchowych urządzenia, ciężaru własnego układu izolacyjnego, naprężeń statycznych i dynamicznych w wyniku zginania, ściskania – naciągania materiału izolacyjnego, wskutek działań dynamicznych prądu,
- narażenia termiczne, na które składają się temperatura otoczenia i temperatura pracy urządzenia,
- agresja chemiczna substancji chemicznych mających bezpośredni kontakt z izolacją i powodujących jej degradację,
- warunki środowiskowe, którymi ogólnie określić można warunki atmosferyczne, lokalizację miejsca pracy urządzenia oraz strukturę ukształtowania i zagospodarowania terenu wokół niego,
- inne – jak na przykład świadome lub nieświadome działanie człowieka – błędy montażowe, dewastacja, kradzież, oraz szkody poczynione przez zwierzęta.

Liczne publikacje w czasopismach międzynarodowych i krajowych (np. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Electrical Technology, Archives of Electrical Engineering, Elektroenergetyka, Przegląd Elektrotechniczny, ii.), tematyka organizowanych konferencji i sympozjów poświęconych na tematyce diagnostyki urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia



**Rys. 2.1.** Przyczyny degradacji układu izolacyjnego

i ich układom izolacyjnym (m.in. ISH<sup>1</sup>, CEIDP<sup>2</sup>, CIRED<sup>3</sup>, EPE<sup>4</sup>, APE<sup>5</sup>, EUI<sup>6</sup>, IW<sup>7</sup>) wskazują jak wiele badań jest prowadzonych w tej dziedzinie.

Organizacje międzynarodowe zajmujące się problematyką diagnostyki urządzeń elektroenergetycznych to między innymi:

- CIGRE – *Conseil International des Grands Réseaux Electriques*,
- CENELEC – *Comité Européen de Normalisation Electrotechnique*,
- IEC – *International Electrotechnical Commission*,
- UNIPED – *Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Energie Electrique*,
- IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*.

W Polsce prace badawcze w zakresie diagnostyki urządzeń elektroenergetycznych prowadzi większość uczelni technicznych oraz ośrodki naukowo – badawcze, w tym takie jak:

- Instytut Energetyki w Warszawie,
- Instytut Elektrotechniki; oddziały w Warszawie, Wrocławiu, Gdańsku,
- Energopomiar – Elektryka Gliwice,
- Centrum Badawcze ABB w Krakowie.

Duży wkład w rozwój diagnostyki wysokonapięciowej mają również instytucje komercyjne, między innymi firmy produkujące urządzenia elektroenergetyczne lub aparaturę pomiarową do ich badania.

Zainteresowanie stosowaniem coraz nowszych i doskonalszych rozwiązań diagnostycznych wykazują wszyscy użytkownicy urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia, począwszy od dystrybutora krajowego, poprzez elektroenergetyczne spółki dystrybucyjne i przedsiębiorstwa produkcyjne, aż do użytkowników indywidualnych nie będących bezpośrednimi użytkownikami tych urządzeń lecz odczuwających bezpośrednio skutki ich awarii.

<sup>1</sup> International Symposium on High Voltage Engineering

<sup>2</sup> IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena

<sup>3</sup> Congrès International des Réseaux Electriques de Distribution

<sup>4</sup> International Scientific Conference Electric Power Engineering

<sup>5</sup> Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce”

<sup>6</sup> Sympozjum Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia

<sup>7</sup> Ogólnopolskie Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć

Główne cele stawiane nowoczesnej diagnostyce urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia to [29, 30, 31, 50, 54, 55]:

- skrócenie czasu obsługi diagnostycznej i prowadzenie prac niewymagających wyłączeń urządzeń, tj. badania typu on-line, a więc zwiększenie gotowości urządzenia;
- rozwijanie systemów samodiagnostujących się w celu zwiększenia bezpieczeństwa oraz niezawodności urządzeń;
- optymalizacja czasu eksploatacji, czyli tzw. predykcja pozostałego czasu życia i plan prac remontowych będących wynikiem analizy diagnostycznej, mniejsze prawdopodobieństwo uszkodzenia i awarii;
- szybsza diagnostyka poawaryjna i usunięcie awarii,
- zmniejszenie kosztów obsługi, tj. minimalizacja częstotliwości i zakresu usług diagnostycznych poprzez lepsze wykorzystanie danych pomiarowych oraz wyniki symulacji matematycznych procesów zmian zachodzących w urządzeniu i/lub jego układzie izolacyjnym,
- ograniczenie szkód będących następstwem błędów montażowych.

Problematykę omawianych zagadnień można podzielić na trzy obszary:

1. *Badania niezawodnościowe*, obejmujące etap projektowania i produkcji urządzeń, jak również niezawodność i awaryjność urządzeń w trakcie eksploatacji. Główne narzędzia teorii niezawodności oparte są na analizie statystycznej i probabilistycznej. Tematyka ta jest szeroko omawiana w wydawnictwach, np. [48, 49, 52, 87], jak również w publikacjach i artykułach, np. [3, 27, 48, 59, 89, 99] opisujących szczegółowe zagadnienia i problemy niezawodności urządzeń elektrycznych. Normy przedmiotowe Polskiego Komitetu Normalizacyjnego dotyczące niezawodności to między innymi [71, 72, 73, 74, 83].
2. *Badania materiałowe*, które mają na celu opracowanie i wskazanie technik pomiarowych oceny stanu materiału izolacyjnego stosowanego w konstrukcjach urządzeń elektroenergetycznych [36, 50, 88, 109].
3. *Badania eksploatacyjne*, które obejmują szeroką grupę różnych metod pomiarowych [4, 40, 45, 105, 112] do oceny stanu technicznego urządzenia w „chwili badania”. Dodatkowo badania te obejmują analizę charakteru zmian zachodzących w badanym urządzeniu oraz pomiary jego warunków eksploatacyjnych.

Badania i prace badawcze w zakresie diagnostyki mają na celu z jednej strony opracowanie nowych, lepszych metod identyfikujących stan techniczny urządzenia, a z drugiej – sformułowanie metod i procedur diagnostycznych optymalnych pod względem kosztów oraz efektywniejszego wykorzystania informacji diagnostycznych [33, 35, 41].

Optymalizacja diagnostyki realizowana jest głównie poprzez analizę otrzymanych danych pomiarowych i wyznaczenie czasookresów kolejnych badań. Funkcja celu będąca podstawą optymalizacji uwzględnia różne parametry, w zależności od ich istotności w procesie eksploatacji. Najczęściej głównym kry-

terium jest wskaźnik ekonomiczny determinujący odpowiednią strategię obsług diagnostycznych [24, 53, 110].

Efektywniejsze wykorzystanie posiadanych informacji diagnostycznych i wyników badań urządzeń oraz ich procesu eksploatacji również stanowi element optymalizujący diagnostykę. Analiza procesów degradacji układu izolacyjnego, mechanizmów zmian stanu oraz wpływu różnego rodzaju narażeń na pracę badanego urządzenia pozwala zminimalizować koszty diagnostyki oraz koszty eksploatacji zdeterminowanej wynikami badań diagnostycznych.

Coraz szersze stosowanie systemów typu *asset managment* wykorzystujące narzędzia badań operacyjnych [19, 20, 32] oraz próby aplikacji metod symulacyjnych i decyzyjnych w procesie diagnostyki urządzeń [69, 118], które dotychczas były wykorzystywane w innych dziedzinach technicznych i nie tylko, również wpływa na optymalizację decyzji diagnostycznych i eksploatacyjnych.

Postępujący rozwój struktur elektroenergetycznych kraju, rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną, coraz większe wymagania dotyczące jakości zasilania [51, 57, 68, 106], wymagania wolnego rynku energii elektrycznej, jak również przypadki awarii systemowych potocznie zwanych *blackout'ami* [85], powodują, iż diagnostyka urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia jest jednym z głównych zainteresowań energetyki zawodowej. Powstałe rozwiązania są stosowane przez użytkowników urządzeń elektroenergetycznych oraz wprowadzane do systemów zarządzania majątkiem sieciowym oraz systemów ekspertowych [37, 46].

### 3. Tezy i cel pracy

Po zapoznaniu się z rozległą problematyką tematu oraz przeprowadzeniu studium literaturowego, w pracy postawiono następujące tezy:

- zastosowanie modelowania matematycznego w diagnostyce jest etapem do optymalizacji efektywności metod i procedur diagnostycznych,
- istnieje możliwość opracowania diagnostycznych modeli matematycznych dla urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia, opartych na teorii procesów losowych Markowa.

Zakres pracy obejmuje opis diagnostyki jako elementu całego procesu eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych, budowę procedury diagnostycznej, elementy klasycznej teorii niezawodności urządzeń, modelowanie matematyczne w eksploatacji i diagnostyce oraz metody optymalizacji wykorzystywane w badaniach diagnostycznych.

W celu udowodnienia wyżej wymienionych tez, w pracy przedstawiono algorytmy diagnostyczne, dzięki którym istnieje możliwość ograniczenia czasu obsługi diagnostycznej i zminimalizowanie czasu wyłączenia z ruchu urządzeń. Mając na uwadze zjawiska fizyczne i charakter zmian stanu technicznego urządzeń elektroenergetycznych zaproponowano również diagnostyczne modele matematyczne oparte na teorii procesów losowych Markowa i obejmujące zagadnienia procedur diagnostycznych z uwzględnieniem czasu poprawnej pracy badanego urządzenia, czasu obsługi diagnostycznej, intensywności uszkodzeń oraz narażeń zewnętrznych oddziałujących na obiekt. Przedstawione modele zostały wykorzystane do symulacji wspomagających procesy decyzyjne w diagnostyce oraz optymalizacji procedur diagnostycznych. W pracy wykazano możliwości i celowość stosowania optymalizacji procedur diagnostycznych ze względów techniczno – ekonomicznych.

Wykazano również, poprzez przykłady obliczeniowe, prawidłowość zastosowania teorii łańcuchów oraz dyskretnych procesów Markowa w modelowaniu matematycznym procedur diagnostycznych. Przykłady obliczeniowe wykonane na podstawie przedstawionych teorii dotyczą urządzeń elektroenergetycznych, takich jak elektroenergetyczne linie napowietrzne i kablowe oraz transformatory. Otrzymane rozwiązania są wynikiem obliczeń z wykorzystaniem rzeczywistych danych eksploatacyjnych oraz aktualnie dostępnych metod pomiarów

i opracowania wyników, dostarczających informacji dla decyzji diagnostycznych.

Część obliczeń jednak ma charakter czysto poznawczy i stanowi rodzaj spekulacji naukowej mogącej być potwierdzoną lub nie tylko długotrwałymi badaniami obiektów pracujących w elektroenergetyce.

W pracy wykorzystano niektóre wyniki projektu badawczego finansowanego przez Komitet Badań Naukowych (umowa nr 18.18.120.398) nt. „Modelowanie procedur diagnostycznych dla urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia”.

## 4. Diagnostyka jako element procesu eksploatacji

### 4.1. Eksploatacja a jakość zasilania

Zmiany gospodarcze i legislacyjne zachodzące w elektroenergetyce zawodowej wywarły znaczący wpływ na sposób podejścia do eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych, jak również na znaczenie diagnostyki w procesie eksploatacji. Tradycyjnie modele eksploatacji przedstawione na przykład w [42, 116], oparte na racjonalnym wykorzystaniu urządzeń elektrycznych w oparciu o odpowiednie normy i zalecenia organizacji technicznych oraz doświadczenie eksploatacyjne obsługi, stawiały badania diagnostyczne na równi z innymi elementami procesu eksploatacji, jak na przykład naprawy planowe i remonty okresowe. Oznacza to, że badania diagnostyczne były częściej przeprowadzane w celu sprawdzenia zachowania zdolności urządzenia na odpowiednim poziomie lub w celu zdiagnozowania jego niezdatności, niż dla profilaktyki i predykcji ewentualnych uszkodzeń. Obsługę diagnostyczną tego typu określa się mianem korygującej – CM<sup>1</sup>.

Prace prowadzone między innymi w ramach posiedzeń grup roboczych CIGRE [2, 17, 38, 57] oraz wprowadzane przez Polski Komitet Normalizacyjny zmiany, na przykład w normach [81, 82], dotyczących badań diagnostycznych i eksploatacji urządzeń, wskazują na rosnącą rolę obsługi diagnostycznej typu RCM<sup>2</sup> w procesie eksploatacji. Głównym celem obsługi tego typu jest zachowanie wysokiego poziomu lub zwiększenie niezawodności urządzeń elektroenergetycznych.

Ponadto prócz wspomnianych powyżej typów obsług diagnostycznych, można wyróżnić jeszcze inne strategie obsługi – typu CBM<sup>3</sup> oraz TBM<sup>4</sup>, należące do grupy obsług prewencyjnych PM<sup>5</sup>. Obsługa typu CBM obejmuje diagnostykę eksploatacyjną opartą na stanie technicznym urządzenia oraz prowadzoną

---

<sup>1</sup> ang. *Corrective Maintenance*

<sup>2</sup> ang. *Reliability Centered Maintenance*

<sup>3</sup> ang. *Condition Based Maintenance*

<sup>4</sup> ang. *Time Based Maintenance*

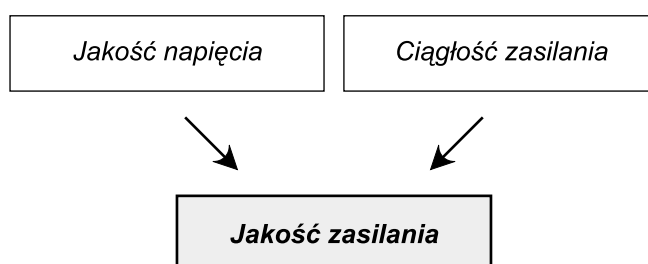
<sup>5</sup> ang. *Preventive Maintenance*

w chwili widocznego pogorszenia się zdolności tego urządzenia. Głównym założeniem diagnostyki typu CBM jest określenie przyczyn ewentualnej niezdatności w celu jej usunięcia.

Natomiast często stosowana jest do tej pory strategia obsługi diagnostycznej typu TBM – oparta na badaniach okresowych. Dla urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia tego typu obsługa jest wymieniana na przykład w instrukcjach eksploatacji linii napowietrznych średnich i wysokich napięć [11, 84, 115]. Podstawę obsługi typu TBM stanowi wyznaczenie czasookresów badań dla każdej z grup urządzeń, na podstawie doświadczenia eksploatacyjnego oraz dotychczasowych wyników obsług diagnostycznych.

W praktyce można również spotkać hybrydowy model obsługi diagnostycznej, będący połączeniem wybranych elementów poszczególnych strategii ze względu na kryteria niezawodnościowe lub/i ekonomiczne.

Elementem łączącym oba te kryteria jest wymóg jakości zasilania – SQ<sup>6</sup> stawiany współczesnej energetyce. Opracowanie [100], w oparciu o normy europejskie CENELEC [76] oraz międzynarodowe IEC [77, 70] dotyczące parametrów napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych oraz kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń, z uwzględnieniem również dyrektyw Unii Europejskiej nr 85/374/EEC i 89/336/EEC, podaje definicję jakości zasilania energią elektryczną, według której jest ona określana na podstawie ciągłości zasilania i jakości parametrów technicznych napięcia (rys. 4.1).



**Rys. 4.1.** Elementy składowe jakości zasilania

Efektem tak pojętej definicji jakości zasilania energią elektryczną jest wzrost nacisku na zapewnienie wysokiej zdolności systemów i urządzeń elektroenergetycznych. W celu określenia jakości zasilania, UNIPED<sup>7</sup> [100] proponuje wprowadzenie następujących wskaźników:

- częstotliwość przerw w zasilaniu: średnia liczba przerw na rok na klienta (przerwy/rok/klient);
- brak zasilania: średnia liczba minut bez zasilania na rok na klienta (minuty/rok/klient);

<sup>6</sup> ang. *Supply Quality*

<sup>7</sup> fr. *Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Énergie Électrique*

- czas trwania przerw: średni czas trwania przerw w zasilaniu u klienta (minuty/przerwy).

Wymienione wskaźniki w praktyce uzupełniane są o inne, dotyczące dodatkowych parametrów jakości zasilania, np.:

- średni czas pomiędzy kolejnymi uszkodzeniami MTBF<sup>8</sup>,
- średni czas naprawy urządzenia MTTR<sup>9</sup>.

Charakter powyższych wskaźników sugeruje, iż właściwym dla zwiększenia jakości zasilania jest:

- opracowanie procedur diagnostycznych umożliwiających działanie prewencyjne w celu zminimalizowania częstotliwości przerw w zasilaniu,
- stworzenie nowych procedur poawaryjnych, które pozwolą na szybkie zdiagnozowanie niezdatności urządzenia oraz jej usunięcie.

Dzięki takim działaniom, w ramach strategii eksploatacyjnych, wyżej wymienione wskaźniki mogą być minimalizowane, co w konsekwencji prowadzi do optymalizacji diagnostyki i zwiększenia ciągłości zasilania.

Zwiększenie pewności zasilania można również zrealizować poprzez strukturę sieci elektroenergetycznej oraz redundancję urządzeń rezerwowych. Koszty takiego rozwiązania są jednak relatywnie bardzo duże, w związku z powyższym jest ono stosowane tylko w przypadku ważnych strategicznie obiektów i układów sieciowych.

Założenia dotyczące ciągłości zasilania realizuje się również między innymi poprzez produkcję urządzeń o coraz większej niezawodności, instalację automatyki zabezpieczeniowej i systemów nadzoru bieżącego, opracowywanie modeli eksploatacji oraz informatyzację obsługi wprowadzając systemy ekspertowe ES<sup>10</sup> [117] i programy komputerowe zarządzania systemami energetycznymi i majątkiem sieciowym typu ASM<sup>11</sup> [111].

## 4.2. Znaczenie diagnostyki w procesie eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych

Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dn. 25.09.2000 r. [91] zobowiązuje operatorów systemów przesyłowych i rozdzielczych energii elektrycznej, a także podmioty zaliczone do I - IV oraz VI grupy przyłączeniowej, do opracowania instrukcji eksploatacji, która powinna zawierać m.in. czasookresy badań sprawdzających zdatność urządzeń. Rozporządzenie to mówi, iż wszystkie prace ruchowe, próby techniczne urządzeń i instalacji energetycznych powinny być prowadzone zgodnie z polskimi normami, wymaganiami odrębnych przepisów, instrukcji eksploatacji oraz uzgodnień z użytkownikiem.

<sup>8</sup> ang. *Mean Time Between Failures*

<sup>9</sup> ang. *Mean Time To Repair*

<sup>10</sup> ang. *Expert System*

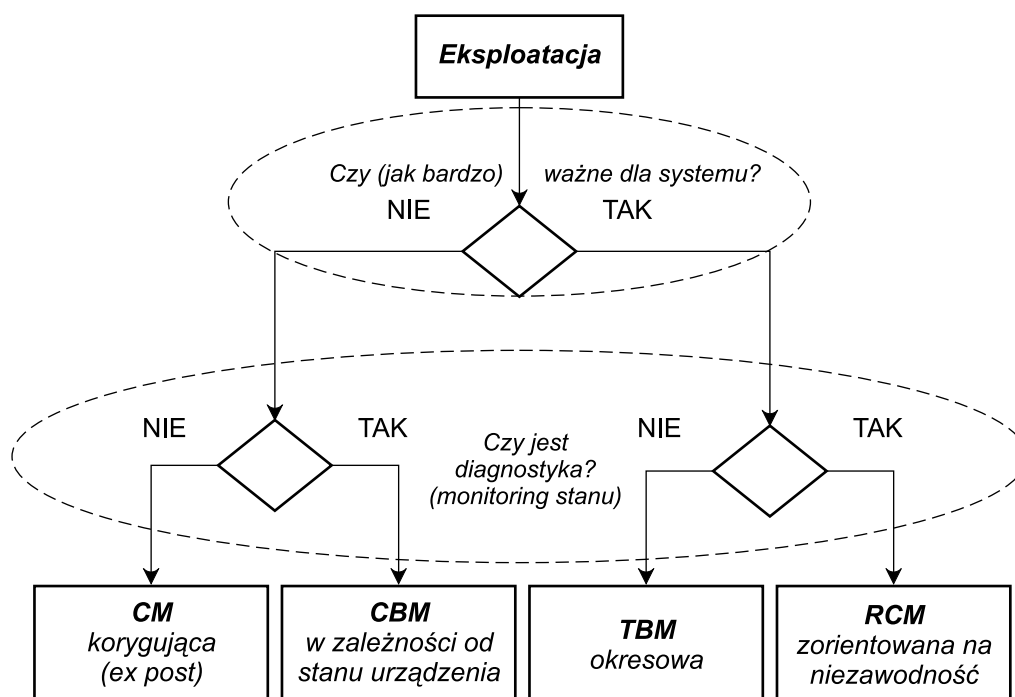
<sup>11</sup> ang. *Asset Management System*

W zależności od strategii przyjętej przez zarządy przedsiębiorstw energetycznych, modele eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych kładą większy lub mniejszy nacisk na diagnostykę i zarządzanie ryzykiem. Znaczący wpływ, w niektórych przypadkach decydujący, na wybór strategii eksploatacyjnej ma wynikający z niej bilans ekonomiczny zysków i strat.

Z ekonomicznego punktu widzenia, konsekwencją braku ciągłości zasilania jest brak sprzedaży energii elektrycznej, a więc brak przychodów z tym związanych. Dodatkowo straty finansowe mogą być wynikiem roszczeń odbiorców energii elektrycznej o odszkodowania tytułem niedotrzymania warunków umowy dostawy energii oraz rekompensaty strat poniesionych w wyniku braku zasilania. Jeśli przerwa w dostawie energii jest wynikiem nieplanowanego wyłączenia z powodu awarii do sumy strat dochodzą koszty usunięcia awarii.

Na przedsiębiorstwa dystrybucyjne mogą też być nakładane kary pieniężne wynikające z *Prawa Energetycznego*, między innymi ze względu na „nie utrzymywanie w należyтым stanie technicznym obiektów, instalacji i urządzeń”.

Tradycyjne modele eksploatacji opierają się głównie na działaniach korygujących stan techniczny systemu i urządzeń (CM) oraz na diagnostyce okresowej (TBM), na przykład w cyklach rocznych lub pięcioletnich [45, 84, 115, 116]. Polskie normy przedmiotowe [80, 75] nie określają szczegółowo czasookresów badań diagnostycznych, a jedynie zalecają, aby przeglądy obejmujące oględziny i pomiary były wykonywane w najkrótszych, określonych odstępach czasu, wynikających z warunków pracy urządzeń.

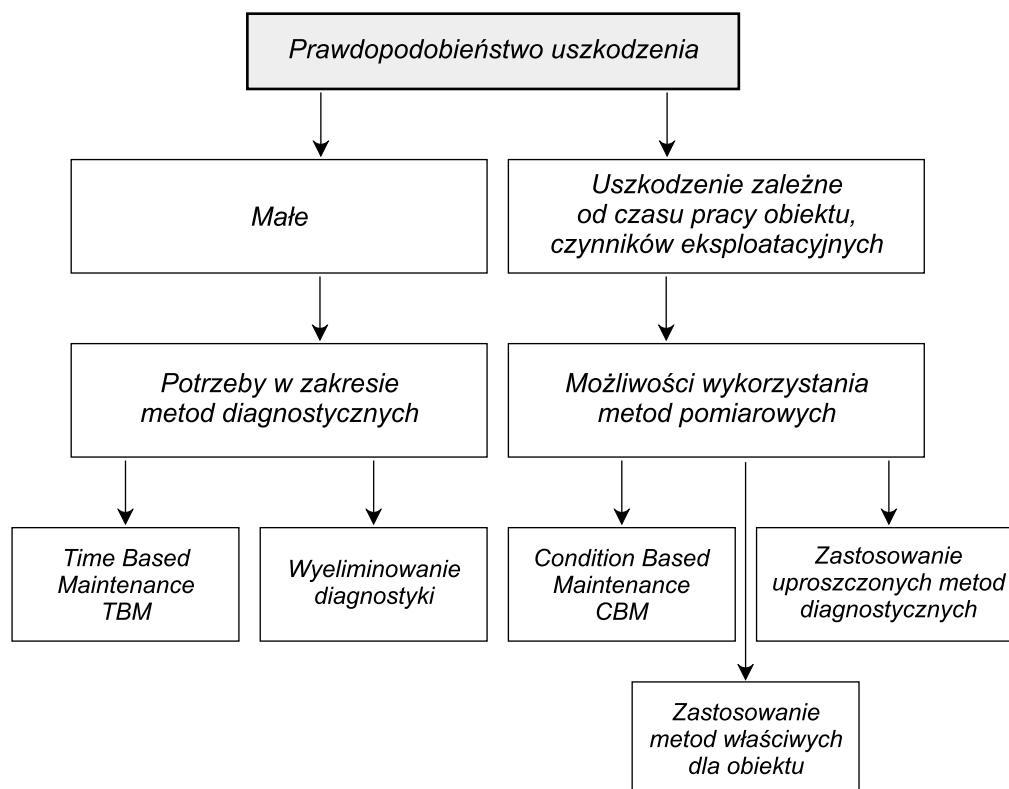


Rys. 4.2. Algorytm decyzyjny wyboru strategii obsługi eksploatacyjnej [57]

Na podstawie efektów prac sesji CIGRE nr SC-23/39 w 2000 roku, w pracy [57] proponuje się proces decyzyjny przy wyborze strategii eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych (rys. 4.2), jako wybór jednego spośród czterech rodzajów obsługi diagnostycznej urządzenia w wyniku odpowiedzi dwustopniowej.

Pierwszym kryterium w przedstawianym procesie decyzyjnym jest określenie poziomu istotności poprawnej pracy danego obiektu z punktu widzenia całego systemu. Kolejny stopień decyzji dotyczy diagnostyki bieżącej, której obecność lub brak w znacznym stopniu decyduje o strategii całego procesu eksploatacji. Jednocześnie w pracy podkreślono tendencje do częstszego stosowania strategii eksploatacyjnych z obsługą diagnostyczną, zorientowanej na niezawodność (RCM). Przedstawiony proces decyzyjny jest przykładem podkreślającym znaczenie diagnostyki jako elementu eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych.

Innym przykładem wyboru strategii obsługi diagnostycznej (typu TBM lub CBM) w trakcie procesu eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych jest algorytm decyzyjny przedstawiony na rysunku 4.3. W tym przypadku głównym parametrem decyzyjnym jest prawdopodobieństwo uszkodzenia. Kolejny etap wyboru dokonywany jest w oparciu o potrzeby i możliwości zastosowania metod diagnostycznych.



Rys. 4.3. Algorytm wyboru strategii eksploatacyjnej [23]

Ponieważ algorytm ten dąży do minimalizacji kosztów obsługi diagnostycznej, efektem jego może być również decyzja o niestosowaniu diagnostyki.

### 4.3. Diagnostyka eksploatacyjna

Z teoretycznego punktu widzenia, zasada eksploatacji jest typową matematyczną implikacją:

$$\text{if } p \text{ then } q \quad (4.1)$$

mówiącą: „jeżeli  $p$ , to należy robić  $q$ ”, gdzie  $p$  jest poprzednikiem stwierdzającym obecny stan urządzenia, natomiast  $q$  jest następnikiem określającym stany możliwe do spełnienia, rodzaj i zasadność podejmowanych działań w zależności od rodzaju przyjętej strategii obsługi urządzeń elektroenergetycznych.

W praktyce zasady eksploatacji nie zawsze formułowane są według takiego schematu, ale zawsze można je przekształcić zgodnie z powyższym modelem.

W wyniku przedstawionego wyrażenia (4.1), eksploatacja urządzeń elektroenergetycznych może przebiegać w czasie według jednego z dwu następujących modeli [60, 61]:

1. praca urządzenia do końca jego czasu życia lub trwałości technicznej z minimalnym nakładem na diagnostykę, a zatem przy niskich kosztach eksploatacji;
2. monitoring stanu urządzenia za pomocą systemów diagnostyki technicznej i przedłużenie czasu ich eksploatacji, a także podwyższanie i utrzymanie na stałym poziomie zdolności (dyspozycyjności) do pracy.

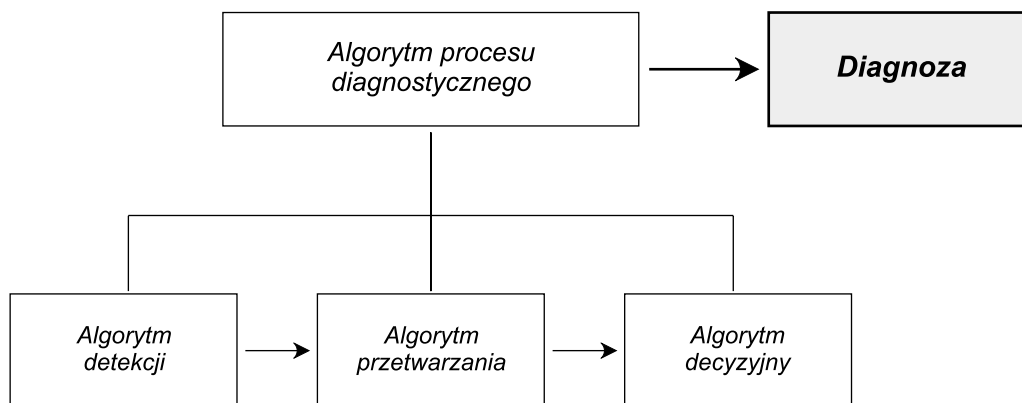
W pierwszym przypadku poprzednik  $p$  może przyjmować wartości *zdatny* albo *niezdatny*, co z kolei implikuje działanie  $q$  w postaci dalszego wykorzystania urządzenia lub jego naprawy bądź wymiany. Analiza zdolności może być przeprowadzona na podstawie efektów pracy – działania lub jego braku, bądź też w wyniku przeprowadzonych prób i badań.

Drugi model, oprócz wymienionych powyżej wartości  $p$ , może także zawierać wszystkie pośrednie stany techniczne urządzenia. Natomiast następnik  $q$  może wprowadzać w proces eksploatacji takie działania jak konserwacja, remonty i naprawy. Całkowite koszty eksploatacji zawierają w tym przypadku koszty technicznej diagnostyki systemu i przetwarzania zebranych danych oraz ewentualnych remontów lub modernizacji urządzeń.

Informacja o stanie urządzenia, będąca podstawą podejmowanych decyzji w procesie eksploatacji, jest wynikiem diagnostyki eksploatacyjnej, która w najprostszym przypadku ma charakter korygująco – informujący: CBM lub TBM. Bardziej zaawansowana diagnostyka bieżąca typu RCM oraz kontrolno – monitorująca ma charakter diagnostyki predykcyjnej PM, która może dostarczać informacji, między innymi o prawdopodobieństwie wystąpienia uszkodzenia lub awarii.

#### 4.4. Ocena stanu technicznego urządzenia

Diagnostyka aktualnego stanu technicznego opiera się na gromadzeniu i analizie danych pomiarowych zgodnie z przyjętymi zasadami i normami przedmiotowymi. Na podstawie otrzymanych wyników podejmuje się decyzję dotyczącą stanu technicznego urządzenia.



**Rys. 4.4.** Algorytm procesu diagnostyki

W algorytmie procesu diagnostyki, przedstawionym na rysunku 4.4, można wyróżnić trzy poziomy technicznej realizacji procedury diagnostycznej [61] w celu pozyskania całościowej i jakościowej informacji o stanie badanego urządzenia:

1. pozyskiwanie danych pomiarowych poprzez obserwację pracy urządzenia oraz różnego rodzaju próby, pomiary i badania (algorytm detekcji);
2. przetwarzanie i analiza zgromadzonych danych bezpośrednio przez personel prowadzący badania diagnostyczne lub poprzez porównanie z wartościami referencyjnymi, przetworzenie statystyczne bądź analizę i symulacje matematyczne (algorytm przetwarzania);
3. podjęcie decyzji końcowej etapu przetwarzania, która jest informacją o stanie technicznym badanego urządzenia (algorytm decyzyjny).

Końcowym wynikiem takiej procedury diagnostycznej jest oczywiście diagnoza, ale również informacja pozyskana w poszczególnych etapach postępowania, która może być wykorzystana w trakcie przyszłej diagnostyki.

Możliwość obserwacji zmian zachodzących w czasie w badanym urządzeniu może być wykorzystana do analizy i oceny ogólnego trendu zmian intensywności i rodzaju uszkodzeń danego typu obiektów.

Jedną z głównych przyczyn awarii urządzeń elektroenergetycznych jest uszkodzenie układu izolacyjnego. Do monitorowania stanu izolacji w celu przeprowadzenia jej regeneracji przed uszkodzeniem katastrofalnym można stosować szereg różnorodnych technik diagnostycznych. Każdy pojedynczy pomiar ze względu na zakres badanych cech i parametrów, daje tylko jeden punkt wi-

dzenia na ogólny stan urządzenia i dopiero grupa różnych pomiarów może utworzyć kompletny obraz stanu układu izolacyjnego. Ograniczenia czasowe w praktyce wymuszają wybór odpowiedniej strategii pomiarów dla różnych typów urządzeń w celu ich pełnej analizy diagnostycznej.

Przyczynami, które powodują utratę właściwości izolacji mogą być: uszkodzenia mechaniczne, wibracja, nadmierne nagrzanie lub schłodzenie, brud, olej, wilgoć, przepięcia. Każda z nich może pojawić się w większości urządzeń elektroenergetycznych [10]. Wśród nich wyróżnić można pięć podstawowych czynników powodujących degradację izolacji:

1. narażenia elektryczne i mechaniczne,
2. narażenia chemiczne,
3. narażenia termiczne,
4. zanieczyszczenie środowiska,
5. czas.

W trakcie normalnej eksploatacji izolacja starzeje się na skutek wymienionych narażeń, które oddziałują wspólnie prowadząc do stopniowego spadku jakości izolacji. Proces degradacji w skutek starzenia jest w większości przypadków procesem powolnym i mogącym trwać wiele lat [93].

Do oceny pogarszającego się stanu izolacji, w praktyce wykonuje się systematyczne pomiary diagnostyczne urządzeń elektroenergetycznych [107, 108]. Regularne pomiary izolacji urządzeń elektroenergetycznych mogą pomóc w wykryciu pogarszającego się stanu izolacji. Czasami pomiary izolacji są traktowane jako obiektywny wskaźnik jakości izolacji. Takie podejście jest prawdziwe w sytuacji, kiedy podczas instalowania urządzeń sprawdzana jest zgodność z wyspecyfikowanymi przez producenta poziomami parametrów. Dla obiektów w trakcie eksploatacji kluczowym wskaźnikiem są tendencje i trendy zmian rezultatów systematycznie przeprowadzanych pomiarów. Z tego powodu bardzo istotne jest archiwizowanie wyników pomiarów izolacji, w odpowiedniej relacji do warunków w jakich pomiary były dokonywane, oddzielnie dla każdego elementu aparatu lub urządzenia (elementu sieci).

## 4.5. Diagnostyka uszkodzeń

W przypadku wystąpienia niezdatności urządzenia lub awarii systemu głównym celem prowadzonych wówczas badań diagnostycznych jest postawienie diagnozy dotyczącej przyczyny niezdatności lub awarii oraz sprawdzenie możliwości i sposobów jej usunięcia poprzez naprawę, remont lub wymianę uszkodzonego obiektu.

Ocenę stanu niezdatności urządzenia przeprowadza się na podstawie obserwacji symptomów braku możliwości wykonania przez urządzenie stawianych mu zadań. Znajomość objawów niezdatności obiektu oraz zaszłań elementów automatyki zabezpieczeniowej pozwala na wnioskowanie dotyczące przyczyn i rodzaju uszkodzenia. Postawioną wstępnie hipotezę, będącą wynikiem obser-

wacji symptomów niezdatności, weryfikuje się poprzez badania diagnostyczne. Dużą rolę w określeniu i zdiagnozowaniu właściwych przyczyn niezdatności obiektu ma doświadczenie personelu prowadzącego badania diagnostyczne.

Powtarzalność uszkodzeń i ich przyczyn poszczególnych urządzeń i obiektów elektroenergetycznych oraz zgromadzone doświadczenie eksploatacyjne i diagnostyczne pozwala na tworzenie automatycznych systemów diagnostycznych, przedstawionych na przykład w publikacjach [24, 46, 113].

Metody wykrywania uszkodzeń i ich lokalizacji można podzielić na:

- metody estymacyjne oparte na modelowaniu i detekcji za pomocą estymacji zmiennych stanu oraz parametrów badanego systemu,
- metody korzystające z baz wiedzy, będące podstawą systemów ekspertowych,
- metody rozpoznawania wzorców opartych między innymi na sieciach neuronowych, sieci Bayesa, czy sztucznej inteligencji AI<sup>12</sup>.

Formalizacja procedur diagnostycznych stanowi podstawę do budowy inteligentnych systemów diagnostyki oraz samodiagnostyki urządzeń. Z uwagi na specyfikę konstrukcji oraz warunki pracy urządzeń elektroenergetycznych, w literaturze proponowane są różne modele poawaryjnych procedur diagnostycznych, będące algorytmami postępowania od momentu wystąpienia awarii urządzenia, poprzez identyfikację uszkodzenia, naprawę lub remont do ponownego włączenia w proces eksploatacji. Głównie dotyczą one procedur charakterystycznych dla danego typu lub grupy urządzeń.

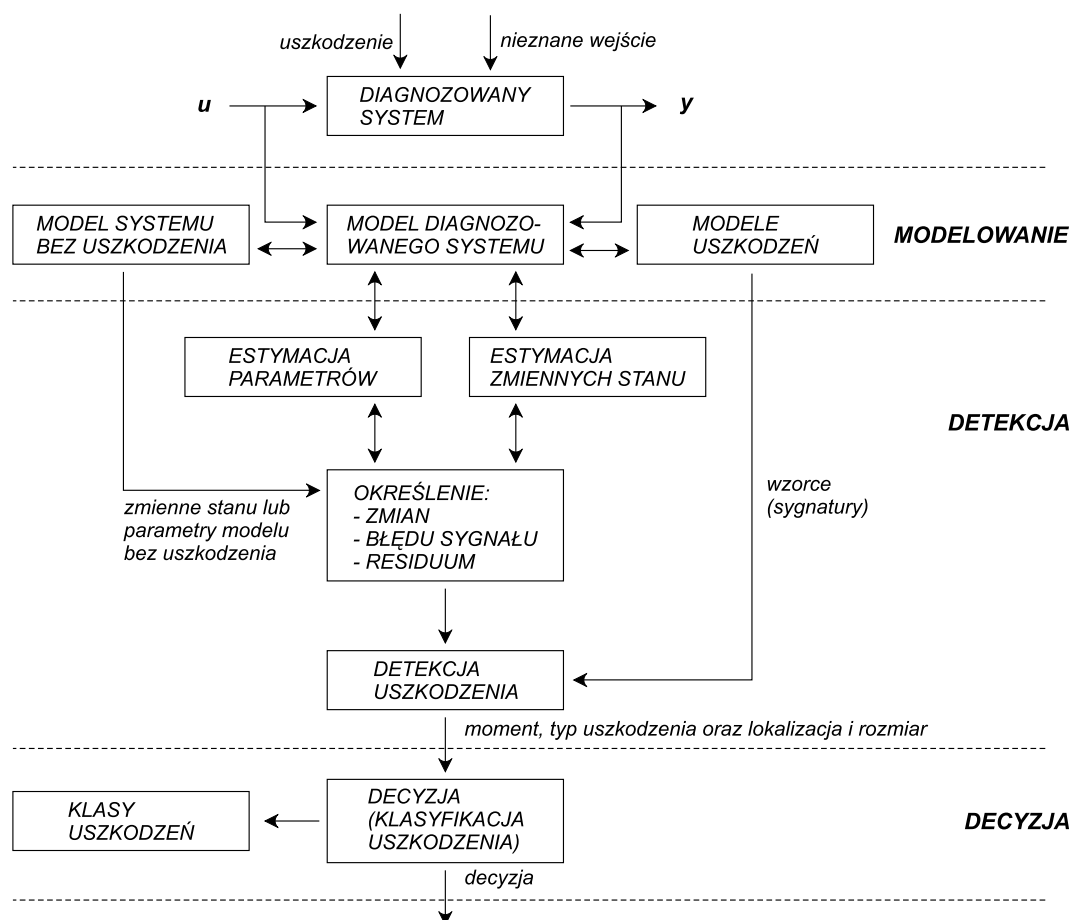
Autorzy pracy [40] proponują zastosowanie teorii sieci Petriego w procesie diagnostyki uszkodzeń transformatorów. Zgodnie z przedstawionym tam algorytmem diagnostycznym decyzja i właściwe dla niej działanie jest podejmowane w ściśle określonej kolejności. Cały proces diagnostyczny zawiera kolejno: identyfikację obiektu, identyfikację uszkodzenia (na podstawie zadziałania zabezpieczeń), rozpoznanie możliwości naprawy w miejscu zainstalowania transformatora oraz sposobu jej realizacji. Końcowy element proponowanego modelu stanowi ponowne włączenie diagnozowanego urządzenia do pracy.

Natomiast w pracy [46] została przedstawiona ogólna metoda detekcji i lokalizacji uszkodzeń systemu (rys. 4.5), rozumianego jako grupa urządzeń wzajemnie powiązanych zależnościami technicznymi, jak również pojedyncze urządzenie będące połączeniem elementów, z których każdy może ulec uszkodzeniu.

Decyzja klasyfikująca uszkodzenie jest wynikiem procesu modelowania porównawczego. W zależności od złożoności badanego systemu oraz posiadanych informacji na temat jego typowych uszkodzeń, proces diagnostyczny można modyfikować i rozwijać. Inne metody identyfikacji uszkodzeń urządzeń wieloelementowych lub grup urządzeń, zostały przedstawione w rozdziałach późniejszych.

---

<sup>12</sup> ang. *Artificial Intelligence*



Rys. 4.5. Metody estymacyjne detekcji i lokalizacji uszkodzeń [46]

## 4.6. Możliwości optymalizacji diagnostyki eksploatacyjnej

Proces wyboru strategii obsługi diagnostycznej oraz umiejscowienie diagnostyki w całym procesie eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych wskazują na możliwości optymalizacji diagnostyki eksploatacyjnej. Funkcją celu dla tej optymalizacji byłyby całkowite koszty eksploatacji urządzeń. Poszczególne składowe tych kosztów w postaci nakładów na diagnostykę, kosztów przestojów urządzeń w trakcie obsługi, jak również kosztów awarii można zminimalizować między innymi poprzez:

- optymalizację liczby badań diagnostycznych ze względu na informację diagnostyczną o urządzeniu,
- optymalizację okresu badań danego urządzenia z uwzględnieniem aktualnego okresu eksploatacji urządzenia oraz intensywności narażeń,
- automatyzację procesu diagnostyki, a więc skrócenie czasu przestoju w trakcie obsługi diagnostycznej,

- wykorzystanie baz wiedzy odnośnie trendu uszkodzeń, wpływu czynników eksploatacyjnych i środowiskowych na urządzenie,
- stosowanie monitoringu procesu eksploatacji,
- gromadzenie i analizę danych diagnostycznych na przestrzeni całego okresu eksploatacji urządzenia.

## 5. Procedura diagnostyczna

### 5.1. Zakres i formy diagnostyki technicznej

Procedura diagnostyczna w zależności od zakresu przyjętych metod oraz celu może przyjmować różne formy w toku procesu eksploatacji, wśród których można wymienić diagnozowanie, genezowanie, monitorowanie i prognozowanie [7].

Przez *diagnozowanie* określić można procedurę diagnostyczną mającą na celu ocenę aktualnego stanu technicznego urządzenia lub określenie rodzaju uszkodzenia w przypadku niezdatności urządzenia. Jeśli pozyskane w tym procesie dane diagnostyczne zostaną zarchiwizowane i przeanalizowane wraz z danymi eksploatacyjnymi wówczas formę prowadzonej diagnostyki określić można jako *genezowanie*.

*Genezowanie* ma na celu ustalenie oraz scharakteryzowanie zmian następujących w urządzeniu. Znajomość genezy powstania uszkodzenia w urządzeniu pozwala na działanie prewencyjne w przypadku obserwacji tych samych procesów zmian w innym urządzeniu tego samego typu.

Diagnostyka bieżąca w postaci *monitorowania* rozumiana jest jako obserwacja w sposób ciągły lub sekwencyjny wartości parametrów pracy urządzenia lub jego właściwości w trakcie eksploatacji. Konsekwencją wymienionych powyżej form diagnostyki może być proces mający na celu określenie stanu badanego urządzenia w przyszłości, czyli *prognozowanie*.

Określenie prognozy jest możliwe, jeżeli znane są czynniki, takie jak: stan urządzenia w momencie stawiania prognozy, intensywność zachodzenia pewnych zjawisk powodujących zmianę stanu technicznego badanego urządzenia, a także prawdopodobieństwo wystąpienia nieprzewidywalnych uszkodzeń. Jeżeli wymienione czynniki są określone w sposób dokładny i czas prognozowania nie jest zbyt odległy, to prawdopodobieństwo zdarzenia, że prognoza się sprawdzi jest duże. Jeżeli jednak czynniki prognozowania są mało znane, a czas prognozowania odległy, to prognoza staje się mniej ścisła.

Realizacja procedury diagnostycznej w jednej z wymienionych form jest między innymi konsekwencją przyjętego typu obsługi diagnostycznej – CM,

TBM, CBM lub RBM. W ramach jednego typu obsługi, diagnostyka może być prowadzona w kilku formach.

Optymalnym rozwiązaniem ze względów technicznych, w celu zachowania jak najwyższej niezawodności urządzeń, w konsekwencji niezawodności zasilania, jest jednoczesne stosowanie wszystkich wymienionych form diagnostycznych. Jednak strategia eksploatacyjna uwzględniająca w praktyce również kryteria finansowe, ogranicza zakres stosowanej diagnostyki i jej formę. Dlatego też elementy nadzoru bieżącego i monitoringu stosuje się głównie dla obiektów o dużym znaczeniu technicznym lub wartości finansowej.

Zakres prowadzonych prac diagnostycznych uwarunkowany jest również konstrukcją urządzenia. Próby, pomiary diagnostyczne i badania są przeprowadzane zwykle bezpośrednio na danym obiekcie technicznym, ale ich wyniki mogą służyć do prowadzenia komputerowych symulacji w ramach genezowania i prognozowania diagnostycznego. Coraz szersze stosowanie technologii IT<sup>1</sup> w elektroenergetyce pozwala na efektywniejsze wykorzystanie zebranych danych diagnostycznych poprzez ich cyfrowe przetwarzanie. Wynikiem takich działań może być prognozowanie możliwych stanów pracy urządzenia elektroenergetycznego.

## 5.2. Stan techniczny urządzeń elektroenergetycznych

Wnioskowanie diagnostyczne we wszystkich jej formach sprowadza się do jakościowego określenia stanu technicznego urządzenia i – na tej podstawie – podjęcia dalszej decyzji eksploatacyjnej, bądź oceny prawdopodobieństwa uszkodzenia.

Stan techniczny urządzenia można zidentyfikować jako zbiór wartości niezależnych i zupełnych parametrów stanu w danej chwili [8, 43, 79]. Jako parametry stanu należy tutaj rozumieć jakościowe i ilościowe właściwości urządzenia, mogące służyć do porównania z wartościami wzorcowymi. Parametry stanu obiektu są niezależne w sensie matematycznym wówczas, gdy nie można sformułować takiej funkcji opisującej parametr – zmienną stanu za pomocą innych parametrów stanu.

Zbiór parametrów można natomiast określić jako zupełny, gdy nie istnieją inne, niezależne parametry, które należałoby ustalić w trakcie procesu diagnostycznego, a których zmiana wartości powodowałaby istotną zmianę wartości parametrów sygnału diagnostycznego.

---

<sup>1</sup> ang. *Information Technology*

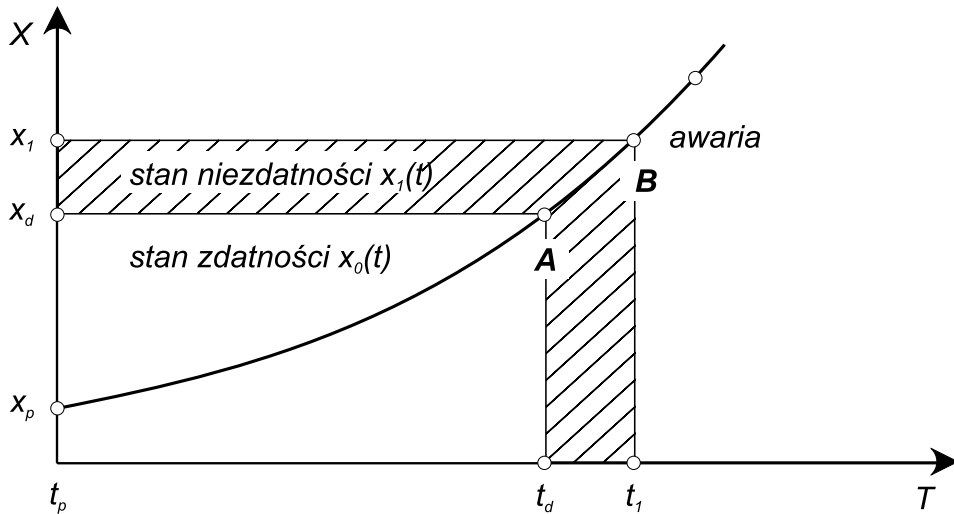
Zmienne stanu  $x_i(t)$  to uporządkowany ciąg wartości liczbowych parametrów stanu i można je traktować jako wektor  $X(t)$ .

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \dots \\ x_i(t) \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Najmniejszy – biwalentny, zbiór stanów urządzenia obejmuje dwie klasy stanów [65]:

1. stan zdatności –  $x_0(t)$ ,
2. stan niezdatności –  $x_1(t)$ .

Urządzenie znajduje się w stanie zdatności, jeśli parametry stanu zawierają się w zakresie dopuszczalnym  $\{x_{min}, x_{max}\}$ . Jeśli chociaż jeden z parametrów przyjmuje wartości poza zakresem dopuszczalnym to urządzenie znajduje się w stanie niezdatności. Graficzna ilustracja stanu zdatności i niezdatności urządzenia opisanego dwoma parametrami została przedstawiona na rysunku 5.1.

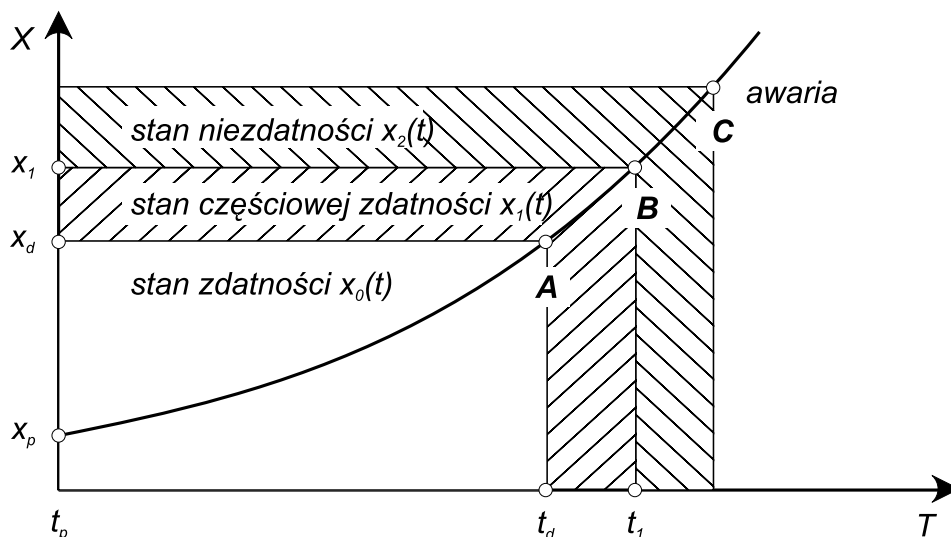


**Rys. 5.1.** Graficzna ilustracja dwuwymiarowej oceny stanu:  $x_{min} = x_p$ ,  $t_p$  – początkowa wartość parametrów stanu,  $x_{max} = x_d$ ,  $t_d$  – dopuszczalna wartość parametrów

Powyższy zbiór stanów może być rozbudowany dodatkowo o stany dopuszczalne  $x_1(t)$ , będące stanami pośrednimi pomiędzy stanem zdatności  $x_0(t)$  i niezdatności  $x_2(t)$ .

W praktyce stany dopuszczalne są klasyfikowane jako stany częściowej zdatności, niejasne, częściowej niezdatności. Kryterium ograniczającym liczbę stanów urządzenia, określanych w trakcie obsługi diagnostycznej, jest liczba

parametrów diagnostycznych oraz warunki eksploatacyjne i strategia obsługi urządzeń. Reprezentacja graficzna stanów dopuszczalnych na przestrzeni stanów, została przedstawiona na rysunku 5.2.



**Rys. 5.2.** Graficzna ilustracja trójwymiarowej oceny stanu:  $x_p$  – początkowa cecha stanu,  $x_d$  – dopuszczalna cecha stanu,  $x_1$  – graniczna cecha stanu

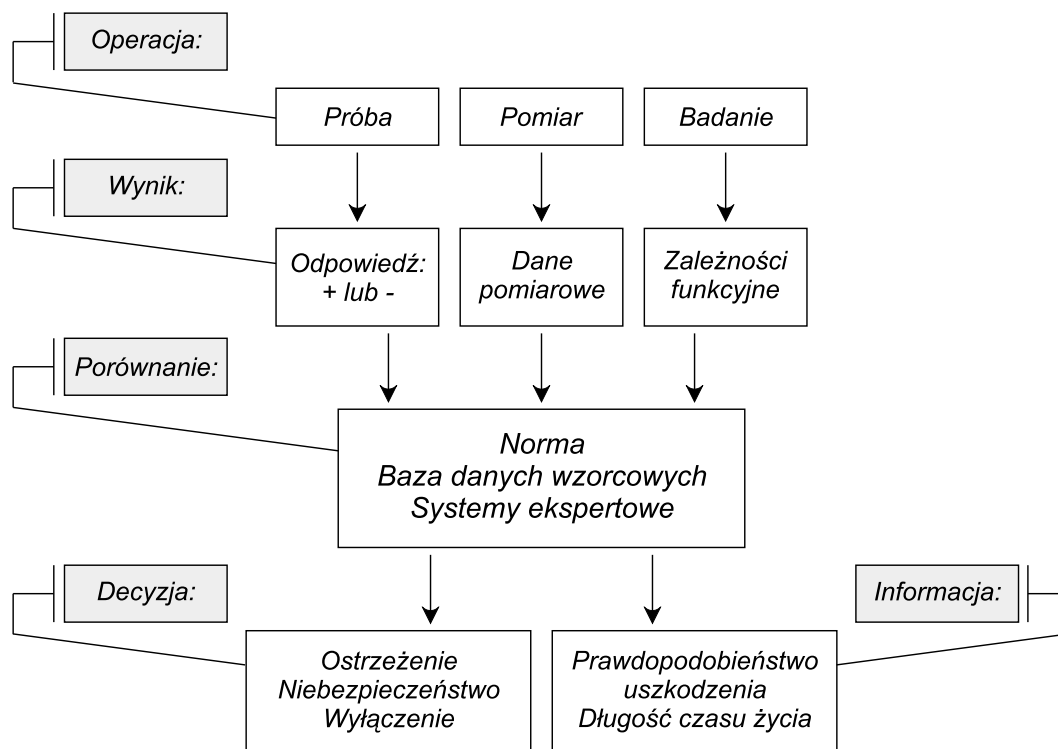
### 5.3. Schemat procedury diagnostycznej

Klasyfikacja różnych typów diagnostyki oraz jej form, w ramach których może być realizowana, wskazuje jak rozległy jest zakres i rodzaj działań prowadzonych w ramach obsługi diagnostycznej. Zakres i kolejność czynności podejmowanych w trakcie obsługi diagnostycznej określana jest jako procedura diagnostyczna.

Procedura diagnostyczna zwykle określona jest indywidualnie dla danej grupy lub typu obiektów, z uwzględnieniem warunków eksploatacji, podatności diagnostycznej urządzenia oraz dostępności metod diagnostycznych. Każdą procedurę można jednak scharakteryzować zgodnie ze schematem ogólnym przedstawionym na rysunku 5.3.

W ogólnej charakterystyce procedury diagnostycznej wyróżniono trzy rodzaje operacji diagnostycznych, których wynikiem są różne formy końcowej informacji diagnostycznej [61]:

1. **Próby** polegające na poddaniu urządzenia działaniu określonego narażenia w określonych warunkach. Odpowiedź jest ambiwalentna: spełnia wymagania – nie spełnia wymagań (np.: próby napięciowe). Klasyfikacja stanu urządzenia na podstawie próby może dotyczyć tylko stanów „dobry – zły”, a w konsekwencji decyduje o dalszej eksploatacji lub wycofaniu.



Rys. 5.3. Schemat procedury diagnostycznej

2. **Pomiary**, w wyniku których otrzymuje się wartości określonych wielkości mierzonych. Na podstawie danych pomiarowych, wykorzystując dostępne bazy danych wzorcowych, określa się dokładny stan urządzenia, włącznie ze stanami pośrednimi pomiędzy stanem wyjściowym i niezdatnością. Decyzja uzyskana przy tego typu operacji diagnostycznej może określać ostrzeżenie lub niebezpieczeństwo dalszego eksploataowania.
3. **Badania**, dzięki którym otrzymuje się zależności funkcyjne określonych wielkości lub zależności czasowe, gdy celem badania są określone procesy starzeniowe, zużyciowe lub uszkodzeniowe. Procedura diagnostyczna, której podstawą są badania diagnostyczne przyjmuje formę genezowania i prognozowania stanu urządzenia. Informacja diagnostyczna uzyskana tą metodą jest najpełniejsza i pozwala na prognozowanie długości życia urządzenia.

#### 5.4. Proces budowy procedury diagnostycznej

Proces budowy procedury diagnostycznej rozpoczyna się od identyfikacji sygnałów oraz symptomów generowanych przez obiekt poddawany diagnostyce. W pierwszym etapie należy również uszczegółwić i wyznaczyć sygnały istotne dla diagnostyki badanego obiektu. Następnie należy określić metody

i tryb pozyskiwania danych diagnostycznych. Zakres stosowanych metod diagnostycznych i badań jest ograniczany przez kryterium ekonomiczne.

Najwłaściwsze i najdokładniejsze informacje dla celów diagnostycznych powinny mieć charakter ilościowy. Jakościowe dane diagnostyczne pozwalają określić tylko ewentualną zdatność urządzenia lub jej brak. Natomiast nie pozwalają na ustalenie poziomu zdatności.

Kolejnym etapem procedury diagnostycznej jest ustalenie sposobu przetwarzania informacji. Sygnały wykorzystywane w diagnostyce urządzeń elektroenergetycznych można podzielić na zdeterminowane (deterministyczne) i losowe (stochastyczne). Sygnały te można opisać za pomocą wielkości matematycznych.

Konsekwencją przetwarzania danych diagnostycznych jest informacja diagnostyczna, która może być zobrazowana poprzez układy wizualizacji i rejestracji, statystyczne opracowanie i prezentację wyników [62].

Kończącym etapem jest wnioskowanie diagnostyczne. Ze względu na rodzaj wnioskowania wyróżnić można:

- diagnostykę holistyczną, oceniającą stan urządzenia z uwzględnieniem oddziaływania innych urządzeń – uwzględniająca dynamikę systemu i procesy starzeniowe,
- symptomową, informującą o stanie bieżącym tylko na podstawie wyników badań, bez uwzględniania czynników zewnętrznych.

### 5.5. Kryterium ekonomiczne procedury diagnostycznej

Wymagania i zasady gospodarki wolnorynkowej stawiają przed diagnostyką urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia przede wszystkim dwa cele: zwiększenie niezawodności urządzenia i systemu oraz obniżenie kosztów cyklu życia urządzenia LCC<sup>2</sup> [57, 81].

Koszty LCC obejmują oprócz kosztów wytwarzania również koszty eksploatacji, na które mają wpływ takie czynniki jak nieuszkodzalność, obsługiwalność i środki obsługi, w tym w dużej mierze zakres i złożoność procedury diagnostycznej. Właściwa diagnostyka bieżąca zapewniająca informację o aktualnym stanie technicznym urządzenia oraz diagnostyka prognozująca określającą prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia, mogą w znaczącym stopniu wpłynąć na LCC poprzez ograniczenie liczby cykli i zakresu diagnostyki oraz zmniejszenie kosztów remontów i awarii urządzeń.

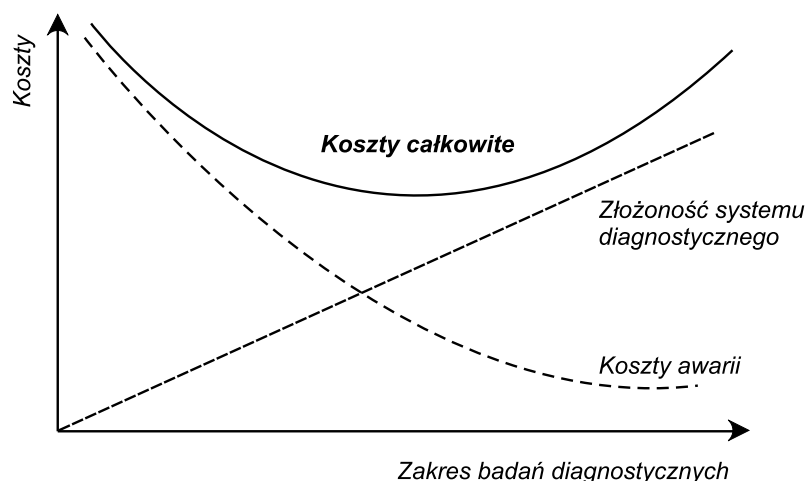
W celu zminimalizowania kosztów procesu diagnostycznego, zgodnie z tendencjami przedstawionymi w [2, 15, 38, 57, 97], proponuje się stosowanie metod diagnostycznych niewymagających wyłączania z ruchu badanych obiektów. Zależność kosztów poniesionych na diagnostykę jest wprost proporcjonalna do

---

<sup>2</sup> ang. *Life Cycle Cost*

zakresu prowadzonych obsług diagnostycznych oraz złożoności systemu diagnostycznego, którego wzrost automatycznie zwiększa liczbę i zakres badań. Jednocześnie lepsza znajomość aktualnego stanu urządzeń elektroenergetycznych pozwala na znaczne obniżenie ryzyka uszkodzeń, co z kolei przyczynia się do zmniejszenia kosztów ewentualnych awarii, poprzez ograniczenie ich liczby, zakresu oraz szybszej identyfikacji przyczyny uszkodzeń.

Szacunkowa zależność funkcyjna kosztów całkowitych będących sumą kosztów diagnostyki oraz kosztów awarii została przedstawiona na rysunku 5.4. Krzywa wypadkowa całkowitych kosztów poniesionych na stworzenie i rozwój systemu diagnostycznego oraz kosztów potencjalnych awarii posiada lokalne minimum, stanowiące optymalne rozwiązanie dla danej strategii eksploatacyjnej oraz procedury diagnostycznej.



**Rys. 5.4.** Funkcja zależności kosztów systemu diagnostycznego i kosztów awarii

Optymalizacja dignostyki ze względu na koszty LCC w znacznej mierze sprowadza się do obniżenia kosztów poszczególnych badań oraz procedury diagnostycznej jako całości [47, 104].

Wraz z wymaganiami tanich badań diagnostycznych urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia, pojawiają się również ograniczenia w spełnieniu tych wymagań. Podstawowym problemem jest podatność badanego urządzenia na badanie diagnostyczne, wynikająca z jego specyficznej budowy. Innym wymogiem, będącym równocześnie ograniczeniem, stawianym diagnostyce wysokonapięciowej jest prowadzenie badań diagnostycznych niewymagających przerw w pracy diagnozowanego urządzenia [67]. Norma *PN-IEC 706-5* [81] wręcz podaje iż:

„Zaleca się zwrócić szczególną uwagę na techniki badań diagnostycznych mające potencjalny wpływ na poprawę obsługiwalności wyrobu i minimalizację czasu przestoju z przyczyn wewnętrznych, a stąd – zwiększenie gotowości i zysków oraz zmniejszenie ogólnych kosztów.”

Ponadto z punktu widzenia prognozowania diagnostycznego istotnym czynnikiem ograniczającym jest gromadzenie danych z okresu, kiedy stosowana była strategia eksploatacji z obsługą typu CM. Problem ten jednak został rozwiązany (lub częściowo rozwiązany) z chwilą wprowadzenia informatyzacji energetyki i tworzenia baz danych eksploatacyjnych, mogących stanowić podstawę systemów typu ASM oraz systemów ekspertowych (ES).

## 5.6. Obsługa diagnostyczna w eksploatacji

Różnorodność konstrukcji urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia oraz metod badań stosowanych w procesach diagnostycznych tych urządzeń jest bardzo duża. Wśród stosowanych metod badań diagnostycznych [21, 26, 86] wyróżnić można między innymi:

- metody mechaniczne,
- metody elektryczne,
- metody chemiczne,
- metody termowizyjne,
- metody akustyczne.

Dlatego też poniżej zostaną wskazane tylko wybrane, przykładowe metody badań dla energetycznych linii napowietrznych, linii kablowych oraz transformatorów energetycznych.

Wymagania norm nie określają w sposób jednoznaczny zakresu i okresów badań jakimi należy poddać urządzenia energetyczne. Norma PN-EN 50110-1:2001 [75] nie podaje okresów badań, a jedynie stwierdza, iż przeglądy obejmujące oględzinom i pomiary powinny być wykonywane w określonych odstępach czasu. Podobnie norma PN-IEC 60364-6:61:2000 [80] podaje tylko ogólne wymagania, takie iż badania okresowe instalacji powinny być wykonywane w ciągu najkrótszego okresu czasu wynikającego z warunków pracy i charakteru instalacji lub urządzenia. Szczegółowe wytyczne dotyczące czasookresów i rodzajów badań diagnostycznych ujęte są w instrukcjach eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych, na przykład [84] lub opracowanych indywidualnie przez poszczególnych użytkowników zgodnie z wymogami prawnymi [115, 116]. Oprócz podstawowych oględzin i badań, w niektórych przypadkach stosuje się również inne, bardziej precyzyjne metody diagnostyczne w celu dokładniejszego poznania stanu urządzenia.

W warunkach krajowych, w przypadku elektroenergetycznych linii napowietrznych, definiowanych jako budowle przeznaczone do przesyłania energii elektrycznej, których elementami wspólnymi są konstrukcje wsporcze, przewody, izolatory, osprzęt oraz instalacja ochronna, diagnostyka eksploatacyjna obejmuje [1, 11, 115]:

- dla linii wysokich i średnich napięć wykonuje się pomiary stanu izolatorów oraz pozostałego osprzętu z wykorzystaniem między innymi termowizji, kamer UV, metod akustycznych i innych;

- dla linii o napięciu znamionowym wyższym niż 1 kV (po wykonaniu naprawy uziemień) wykonuje się pomiary:
  - rezystancji uziemień przewodów odgromowych, odgromników i iskierników,
  - rezystancji uziemień ochronnych słupów lub napięć rażenia.
- dla linii o napięciu znamionowym do 1 kV (nie rzadziej niż co 5 lat) wykonuje się:
  - pomiar napięć i obciążeń (w miarę możliwości podczas największego obciążenia),
  - sprawdzenie skuteczności działania środków ochrony przeciwporażeniowej,
  - pomiar rezystancji uziemień roboczych i ochronnych (po naprawie uziemienia).

Ponadto, oprócz wymienionych pomiarów dokonuje się oceny stanu technicznego linii:

- dla linii o napięciu 110 kV nie rzadziej niż raz na 3 lata,
- dla linii o napięciu poniżej 110 kV co 5 lat.

Oceny stanu technicznego dokonuje się na podstawie:

- a) danych stanowiących charakterystykę techniczną linii,
- b) wyników oględzin, przeglądów, prób i pomiarów eksploatacyjnych,
- c) zaleceń wynikających z programu pracy linii,
- d) analizy awaryjności,
- e) wymagań związanych z konstrukcją linii określonych w dokumentacji technicznej,
- f) wymagań wynikających z lokalnych warunków eksploatacji,
- g) wieku linii oraz zakresu i terminów wykonania zabiegów konserwacyjnych napraw i remontów,
- h) warunków wynikających z planowanej rozbudowy sieci,
- i) warunków bezpieczeństwa i higieny pracy oraz ochrony przeciwporażeniowej,
- j) warunków ochrony środowiska naturalnego.

W trakcie procesu eksploatacji elektroenergetycznych linii kablowych prowadzi się również ocenę stanu technicznego, podobnie jak to zostało przedstawione powyżej. Różnica wynikająca z konstrukcji linii kablowej w stosunku do napowietrznej skutkuje nieuwzględnieniem punktów a) i e) [116] wymienionych powyżej. Pomiary i badania linii kablowych wykonuje się w cyklach 5 letnich lub 10 letnich. Rodzaje badań eksploatacyjnych wykonuje się z uwzględnieniem napięć znamionowych oraz rodzaju izolacji i konstrukcji kabli. Do typowych pomiarów linii kablowych zaliczyć można [116]:

- sprawdzenie ciągłości żył,
- pomiar rezystancji izolacji,
- próbę napięciową izolacji,
- próbę napięciową powłoki.

Ogólnie wszystkie wymienione badania mogą być zaliczone do prostego typu pomiarów „dobry – zły”, jednak pomiar rezystancji (w szczególności wskaźników rezystancyjnych) może być również użyty do szerszej oceny diagnostycznej i klasyfikacji stanu technicznego badanego urządzenia.

Zalecenie dotyczące zakresu prób diagnostycznych transformatorów podają normy PN-81/E-04070, PN-83/E-06040. Dla przykładu, zgodnie z zarządzeniem Ministra Górnictwa i Energetyki, dla transformatorów energetycznych o mocy powyżej 100 MVA i napięciu 220 kV i wyższym istnieje obowiązek przeprowadzania badań w 5-letnim okresie cyklicznym i obejmujących oględziny zewnętrzne oraz pomiary, którymi są między innymi [15, 22]:

- pomiar rezystancji izolacji i wskaźnika  $R_{60}/R_{15}$ ,
- pomiar pojemności i współczynnika stratności  $\tan\delta$ ,
- pomiar rezystancji uzwojeń,
- badanie podobciążeniowego przełącznika zaczepów,
- analizę chromatograficzną gazów rozpuszczonych w oleju DGA<sup>3</sup>,
- badanie wyładowań niezupełnych,
- badanie wibroakustyczne dla jednostek o mocy większej od 250 MVA,
- badanie oleju i jego właściwości dielektrycznych i fizykochemicznych.

Jednocześnie autor [15], mając na uwadze względy ekonomiczne i techniczne diagnostyki, proponuje pewne zmiany w dotychczasowej diagnostyce transformatorowej, poprzez wprowadzenie procedury diagnostycznej trójstopniowej obejmującej:

1. **Stopień pierwszy – podstawowy** w okresach 2 lat lub roku, a w uzasadnionych przypadkach krótszych:
  - oględziny zewnętrzne,
  - fizykochemiczne badanie oleju,
  - badanie chromatograficzne DGA,
  - badania przełączników zaczepów.
2. **Stopień drugi – badania szczegółowe**
  - a) bez wyłączania transformatora z ruchu:
    - pomiar wnz metodą akustyczną,
    - analizę wibroakustyczną,
    - badania termowizyjne,
    - badania zawartości związków furanu w oleju;
  - b) badania wymagające wyłączenia transformatora:
    - badanie stanu mechanicznego uzwojeń;
    - badanie podobciążeniowego przełącznika zaczepów,
    - inne badania dobierane indywidualnie w zależności od potrzeb.
3. **Stopień trzeci**, dla którego proponowany jest cykl 10-letni badań:
  - pomiar prądów magnesujących,
  - pomiar rezystancji uzwojeń,

---

<sup>3</sup> amg. *Dissolved Gas Analysis*

- pomiar rezystancji izolacji,
- pomiar pojemności i współczynnika stratności  $\tan\delta$ .

Istotne znaczenie strategiczne i ekonomiczne transformatorów dla całego systemu energetycznego wymusza dalsze prace nad rozwojem nowych technik i metod diagnostycznych. Nowoczesne metody i rodzaje badań diagnostycznych transformatora, nie wymienione powyżej, przedstawione są między innymi w publikacjach [92, 118].

### 5.7. Analiza i przetwarzanie informacji diagnostycznych

Zebrane i przeanalizowane dane pomiarowe zgodnie z zasadami dotyczącymi badań eksploatacyjnych przedstawionymi powyżej stanowią podstawę do oceny stanu technicznego badanych urządzeń elektroenergetycznych. Analiza zgromadzonych danych ilościowych i jakościowych obejmuje następujące procesy [43, 63, 86]:

1. porównanie ze wskazaniami normatywnymi, dzięki czemu można uzyskać jako wynik informację *dobry – zły* lub *zdatny – niezdatny*. Często jednak sama informacja *zdatny* jest nie wystarczająca dla podjęcia dalszych decyzji diagnostycznych i eksploatacyjnych. Istotną wówczas informacją jest jak bardzo badany obiekt jest zdatny do wykonywania stawianych mu zadań;
2. analiza posiadanych danych poprzez odniesienie ich do posiadanej, wzorcowej bazy danych eksploatacyjnej może pomóc w ustaleniu, w jakim pośrednim stanie *zdatności* obiekt się znajduje. Rozróżnienie stanów pośrednich pozwala na otrzymanie dokładniejszej informacji diagnostycznej w postaci ostrzeżenia lub informacji o niebezpieczeństwie awarii w toku dalszej eksploatacji urządzenia;
3. wyznaczenie wskaźników awaryjności i niezawodności oraz zebranie informacji o narażeniach oddziałujących na urządzenie. Dodatkowa analiza otrzymanych w ten sposób informacji, w oparciu o modele matematyczne, pozwala oszacować prawdopodobieństwo uszkodzenia oraz czas pozostałego życia urządzenia.

### 5.8. Założenia optymalizacji procedury diagnostycznej

Poza automatyzacją procedury diagnostycznej oraz efektywniejszym wykorzystaniem pozyskiwanych danych diagnostycznych, istotnym elementem mogącym wpłynąć na koszty diagnostyki jest liczba i długość okresów obsług diagnostycznych przeprowadzanych w trakcie eksploatacji urządzeń.

Przyjmując, iż na podstawie wnioskowania diagnostycznego znamy rozkłady statystyczne czasów do uszkodzenia urządzenia, można zoptymalizować

czasookresy kontroli/badań. Dodatkowe założenia dla tej optymalizacji są następujące:

- informacja o stanie urządzenia jest pozyskiwana tylko poprzez przeprowadzenie kontroli (brak widocznych symptomów uszkodzenia lub awarii urządzenia),
- nakłady finansowe na diagnostykę są stałe ze względu na powtarzalny proces diagnostyczny,
- straty wywołane uszkodzeniem są proporcjonalne do czasu użytkowania, ze względu na amortyzację finansową urządzenia,
- w czasie kontroli stan urządzenia nie ulega zmianie.

## 6. Analiza niezawodnościowa w diagnostyce urządzeń elektroenergetycznych

### 6.1. Niezawodność a diagnostyka

Zgodnie z tym co zostało przedstawione w rozdziałach wcześniejszych, jednym z głównym zadań współczesnej diagnostyki urządzeń elektroenergetycznych jest zwiększenie niezawodności tych urządzeń, a w konsekwencji – niezawodności zasilania.

Teoria niezawodności stanowi podstawę wniosków dla konstrukcji oraz eksploatacji urządzeń i systemów energetycznych [12, 48]. Zagadnienia dotyczące zapewnienia wysokiego poziomu niezawodności urządzenia są uwzględniane od momentu jego projektowania, poprzez budowę i cały okres eksploatacji.

W diagnostyce urządzeń elektroenergetycznych analiza niezawodnościowa jest wykorzystywana zarówno w diagnozowaniu, jak również w prognozowaniu stanu urządzenia, które traktowane jest wówczas jako model niezawodnościowy. Główną cechą analizy niezawodnościowej jest określenie ilościowe stanu urządzenia poprzez wyznaczenie wskaźników niezawodnościowych z wykorzystaniem metod statystycznych i probabilistycznych, a także na podstawie przyjętych modeli matematycznych oraz posiadanych danych diagnostycznych i eksploatacyjnych.

Zgodnie z definicją podaną w [78] poprzez pojęcie niezawodności urządzenia elektrycznego określa się jego zdolność do wykonywania postawionego mu przez projektanta zadania w określonych warunkach eksploatacyjnych i w określonym czasie. Jest to więc obiektywna cecha urządzenia i jednocześnie cecha względna, ponieważ jest uzależniona od:

- rodzaju postawionego zadania;
- zbioru warunków eksploatacyjnych;
- przewidywanego czasu wykonywania zadania i eksploatacji.

Urządzenie elektryczne wykonujące poprawnie swoje zadania w trakcie eksploatacji, spełnia założone w fazie projektowania funkcje. Można zatem przyjąć zbiór istotnych wymagań dla urządzenia o danym przeznaczeniu. Spełnienie

przez urządzenie elektryczne danego zbioru wymagań warunkowane jest stanem fizycznym tego urządzenia. Dla tak stawianych założeń dotyczących niezawodności, diagnostyka eksploatacyjna stanowi narzędzie weryfikujące stan urządzenia i umożliwiające ocenę jego niezawodności.

## 6.2. Analiza ilościowa niezawodności

Pojęciem niezawodności w sensie ilościowym określa się prawdopodobieństwo poprawnego wykonania przez obiekt postawionego zadania, które ma być realizowane w określonych warunkach i określonym czasie. Ze względu na wykorzystywanie obiektów rzeczywistych a nie idealnych, możliwości ich uszkodzenia lub nieuszkodzenia można rozważać tylko w sensie probabilistycznym. Wszelkiego rodzaju uszkodzenia tych obiektów, a także czasy ich napraw oraz użytkowania mają charakter czysto przypadkowy i dlatego też muszą być rozpatrywane jako zmienne losowe.

Starzenie się obiektu oraz jego zużycie w warunkach normalnych dla tego obiektu objawia się zmianami początkowych wymiarów, kształtów, właściwości strukturalnych, wytrzymałości itp. Określenie tych zmian nie jest proste, ponieważ wymaga określenia stanu granicznego tego zużycia biorąc pod uwagę nie tylko aspekt techniczny, ale również ekonomiczny, czy społeczny. Jako stan graniczny zużycia należy rozumieć taki stan, który determinuje moment wymiany lub naprawy tego urządzenia.

Ze względu na pracę danego obiektu w systemie, jak również jego obsługę przez człowieka, zmienność zadań stawianych systemowi, czy danemu urządzeniu w czasie eksploatacji wskazuje, iż określenie tylko jednego wskaźnika niezawodnościowego może być niewystarczające. W związku z tym należy dla danego obiektu zgromadzić cały kompleks takich wskaźników według zaleceń odpowiednich instrukcji eksploatacji i proponowanych w normach przedmiotowych. Z punktu widzenia pracy urządzenia wskazanym jest gromadzenie dodatkowych informacji dotyczących warunków pracy i narażeń środowiskowych [67, 104].

Wobec powyższego, właściwości niezawodnościowe obiektów podlegają procesom losowym, dlatego też podstawę pojęcia niezawodności stanowi statystyka oraz probabilistyka. Dla określenia prawdopodobieństwa poprawnej pracy urządzenia wymagane jest sformułowanie jego modelu matematycznego. Można przy tym dla danego obiektu budować wiele różnych modeli matematycznych, każdorazowo uwzględniając jedne aspekty, a rezygnując z innych. Jediną możliwością sprawdzenia poprawności doboru modelu matematycznego jest odniesienie go do praktyki eksploatacyjnej. Jest to więc kryterium „pozamatematyczne” [48].

Probabilistyczny wskaźnik niezawodnościowy wymaga znajomości probabilistycznego rozkładu uszkodzeń urządzenia elektrycznego np. trwałości, czasu poprawnej pracy aż do chwili uszkodzenia itp. W praktyce znajomość paramet-

trów rozkładu zmiennej losowej zdarza się bardzo rzadko. Zwykle nieznane parametry rozkładu prawdopodobieństwa oszacowuje się za pomocą estymatorów punktowych i przedziałowych. W związku z tym probabilistyczne wskaźniki niezawodności powinny być wyznaczone na określonym poziomie ufności.

Statystyczna postać wskaźnika niezawodności umożliwia jego ilościowe wyznaczenie na podstawie empirycznych danych o uszkodzeniach urządzenia elektrycznego. Oszacowania te są punktowymi estymatorami probabilistycznych wskaźników niezawodności, zatem właściwe oszacowanie statystycznych wskaźników niezawodności polega na wyznaczeniu granicy właściwego przedziału ufności dla nieznanego probabilistycznego wskaźnika niezawodności, przy zadanym poziomie ufności. Ocena niezawodności urządzeń elektroenergetycznych musi również uwzględniać proces i strategię eksploatacji.

### 6.3. Wskaźniki niezawodnościowe

#### 6.3.1. Kryteria doboru

Ze względu na właściwości konstrukcyjne i eksploatacyjne badanego urządzenia oraz kryteria oceny jego niezawodności, wyznacza się między innymi charakterystyki niezawodności [49, 48, 71, 73]:

- awaryjności (intensywności uszkodzeń)  $F(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,
- nieuszkodzalności (niezawodności)  $R(t)$ ,
- gotowości  $A(t)$ ,
- obsługiwalności  $M(t)$ .

Funkcje matematyczne służące do wyliczenia wyżej wymienionych wskaźników mogą opierać się na danych statystycznych i ich estymatach. Diagnostyka stanu urządzenia oparta jest na empirycznym opisie jego niezawodności. Natomiast prognozowanie diagnostyczne wykorzystuje funkcje probabilistyczne.

Kryterium wyboru wskaźników jest istotnym zagadnieniem przy opisie niezawodności obiektu, dlatego też w trakcie jej oceny należy wziąć pod uwagę wymienione poniżej elementy.

**Klasy obiektu** – określane na podstawie właściwości konstrukcyjnych urządzeń bądź ich elementów składowych:

- naprawialne,
- nienaprawialne.

Niezawodność obiektów wyżej wymienionych klas jest opisywana za pomocą wskaźników gotowości, nieuszkodzalności i obsługiwalności profilaktycznej (w przypadku obiektów odnawialnych dodatkowo obsługiwalności korekcyjnej).

**Rodzaj obiektu** (ustalane umownie, w zależności od celu):

- element – obiekt, który w trakcie analizy niezawodnościowej traktowany jest jako integralna całość,

- system – zbiór elementów funkcjonalnie ze sobą powiązanych i tworzących określoną strukturę niezawodnościową.

**Rodzaj użytkowania obiektu:**

- użytkowanie krótkotrwałe – obiekt wykonuje swoje zadania w bardzo krótkim czasie (chwilowo), którego chwila rozpoczęcia jest przypadkowa;
- użytkowanie dorywcze – wykonywanie przez obiekt funkcji użytecznych w ciągu krótkiego (niezbyt długiego) czasu. Chwila rozpoczęcia użytkowania i czas jego trwania ma z reguły charakter losowo zmienny. Po wykonaniu zadania obiekt ma przestój z przyczyn zewnętrznych;
- użytkowanie okresowe – obiekt pracuje w ciągu określonego czasu, po czym ma przestój z przyczyn zewnętrznych. Funkcjonowanie i przestój obiektu z przyczyn zewnętrznych są najczęściej uwarunkowane określonymi czynnikami i są programowe;
- użytkowanie ciągłe – obiekt pracuje w sposób ciągły przez cały okres eksploatacji. Jego zatrzymanie następuje tylko w przypadku uszkodzenia bądź awarii.

### 6.3.2. Funkcja niezawodności

Przedstawione poniżej funkcje stanowią podstawę rozważań niezawodnościowych urządzeń elektroenergetycznych [26, 49, 56]. Podstawowa funkcja niezawodności obiektu nieodnawialnego  $R(t)$  jest miarą prawdopodobieństwa wykonania zadania przez urządzenie, czyli przebywania w stanie zdatności w przedziale czasu  $(0, t)$ :

$$R(t) = P(T > t) \text{ dla } t \geq 0 \quad (6.1)$$

gdzie:

$T$  – zmienna losowa,  
 $t$  – czas.

Jednocześnie  $R(t)$  jest dopełnieniem funkcji zawodności  $F(t)$ , która przyjmuje wartości prawdopodobieństwa zdarzenia przeciwnego, czyli niezdatności:

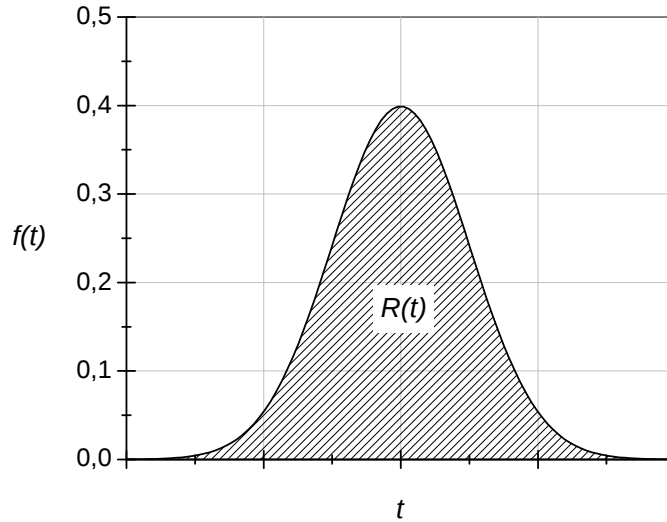
$$R(t) = 1 - F(t) \quad (6.2)$$

oraz

$$F(t) = P(T < t) \text{ dla } t \geq 0 \quad (6.3)$$

gdzie:

$F(t)$  – dystrybuanta zmiennej losowej  $T$ .



**Rys. 6.1.** Gęstość prawdopodobieństwa zdatności  $f(t)$  dla rozkładu normalnego czasu do uszkodzenia

Jeżeli funkcja niezawodności jest ciągła to można ją wyznaczyć całkując funkcję gęstości prawdopodobieństwa przebywania w stanie zdatności  $f(t)$ :

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(s) ds \text{ dla } t \geq 0 \quad (6.4)$$

Przykład zależności pomiędzy wymienionymi funkcjami obrazuje rysunek 6.1.

### 6.3.3. Intensywność uszkodzeń

Kolejnym wskaźnikiem niezawodnościowym jest intensywność uszkodzeń określana jako stosunek gęstości prawdopodobieństwa  $f(t)$  i funkcji niezawodności  $R(t)$ , a charakteryzującą niezawodność urządzenia:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (6.5)$$

Skumulowana intensywność uszkodzeń lub funkcja wiodąca  $\Lambda(t)$  jest określana jako:

$$\Lambda(t) = \int_0^t \lambda(s) ds = \ln \frac{R(0)}{R(t)} \text{ dla } t \geq 0 \quad (6.6)$$

Każdy z przedstawionych wskaźników niezawodnościowych można wyznaczyć za pomocą pozostałych. Przyjmując dany rozkład intensywności uszkodzeń  $\lambda$ , otrzymuje się określoną funkcję niezawodności  $R(t)$  odpowiadającą rozkładowi zmiennej losowej  $T$  o dystrybucie prawdopodobieństwa  $F(t)$  i funkcji gęstości  $f(t)$ .

#### 6.3.4. Statystyczne wskaźniki nieuszkodzalności

W analizie statystycznej grupy urządzeń jako wskaźnik nieuszkodzalności wyznacza się między innymi prawdopodobieństwo poprawnej pracy do uszkodzenia  $R(t_m)$  będące wartością oczekiwaną chwilowej wartości funkcji niezawodności:

$$R(t_m) = \frac{n - m + 1}{n + 1} \quad \text{dla } 0 \leq m \leq n \text{ i } t \geq 0 \quad (6.7)$$

gdzie:

- $t_m$  –  $m$ -ta realizacja zmiennej  $T$ ,
- $m$  – liczba obiektów uszkodzonych,
- $n$  – liczebność próbki.

Na podstawie wyznaczonych chwilowych wartości funkcji niezawodności  $R(t)$  można sporządzić jej wykres. Analogicznie do funkcji niezawodności określana jest funkcja intensywność uszkodzeń na podstawie oszacowania statystycznej intensywności uszkodzeń.

#### 6.3.5. Statystyczna intensywność uszkodzeń

Funkcja **intensywność uszkodzeń** jest wyznaczana jako gęstość warunkowego prawdopodobieństwa zdarzenia, że w danych warunkach użytkowania i obsługiwanego obiekt – urządzenie, który jest zdatny w chwili  $t$ , uszkodzi się w przedziale czasu  $< t; t + \Delta t >$ :

$$\lambda(t) = \frac{m(\Delta t)}{\Delta t \cdot n(t)} \quad (6.8)$$

gdzie:

- $m(\Delta t)$  – liczba obiektów, które uległy uszkodzeniu w przedziale czasu  $< t; t + \Delta t >$ ,
- $n(t)$  – liczba obiektów będących w stanie zdatności w chwili  $t$ .

Wykorzystując współzależności funkcjonalne funkcji niezawodności oraz uwzględniając charakter pracy urządzenia i jego klasę naprawialności można wyznaczyć inne charakterystyki i wartości wskaźników stosowanych do opisu niezawodności urządzenia [27, 48, 49].

### 6.3.6. Wskaźniki gotowości

W przypadku obiektów odnawialnych można wyznaczyć również funkcje dyspozycyjności i odnowy. Ponieważ wskaźniki nieuszkodzalności odnosiły się głównie do obiektów nieodnawialnych, poniżej zostały opisane wskaźniki gotowości. Gotowość obiektu odnawialnego może być wyznaczona jako:

**Gotowość chwilowa**  $A(t)$  – prawdopodobieństwo zdarzenia, że w danych warunkach użytkowania/obsługiwanego i chwili  $t$  obiekt jest zdalny:

$$A(t) = R(t) + \int_0^t R(t-x) \cdot h(x) dx \quad (6.9)$$

gdzie:

$h(t)$  – gęstość odnowy określana wzorem:

$$h(t) = \frac{dH(t)}{dt} \quad (6.10)$$

Natomiast funkcja odnowy  $H(t)$  jest wyznaczana jako:

$$H(t) = \sum_{s=1}^{\infty} \Phi_{(s)}(t) \quad (6.11)$$

Funkcja  $\Phi_{(s)}(t)$  we wzorze (6.11) jest dystrybucją rozkładu prawdopodobieństwa czasu eksploatacji, od gotowości do uszkodzenia, który składa się z czasów zdalności  $T_z$  i niezdalności  $T_n$  po uszkodzeniu. Zwykle zakłada się, że czasy zdalności i niezdalności są niezależnymi zmiennymi losowymi.

**Gotowość asymptotyczna**  $A$  – prawdopodobieństwo zdarzenia, że w danych warunkach użytkowania/obsługiwanego i chwili  $t$ , dostatecznie odległej od początku użytkowania, obiekt jest zdalny:

$$A = \frac{E(T_z)}{E(T_z) + E(T_n)} \quad (6.12)$$

gdzie:

$E(T_z)$  – wartość oczekiwana czasu zdalności,

$E(T_n)$  – wartość oczekiwana czasu niezdalności.

### 6.3.7. Wskaźniki obsługiwalności

W celu określenia ilościowego obsługi w trakcie procesu eksploatacji wyznacza się również prawdopodobieństwo obsługi  $M(t)$  w czasie  $t$ :

$$M(t) = p_m(t) \quad (6.13)$$

oraz intensywność obsługi:

$$\mu = \frac{1}{t_\mu} \quad (6.14)$$

będącej odwrotnością czasu przeznaczanego na obsługę  $t_\mu$ .

### Rozkłady prawdopodobieństwa stosowane do opisu niezawodności obiektów

Do wyznaczenia wskaźników niezawodnościowych niezbędna jest znajomość rozkładu zmiennych losowych, takich jak na przykład czas do uszkodzenia, czas naprawy, czas obsługi profilaktycznej, liczba uszkodzeń itp. Najczęściej do obliczeń technicznych przyjmuje się rozkłady: normalny, Weibulla lub wykładniczy, opisane między innymi w [56, 58].

Szczególnym przypadkiem jest rozkład uszkodzeń relaksacyjnych. Odzworowuje mechanizm uszkodzeń polegający na tym, że istotny czynnik fizyczny powoduje zużywanie się materiału (względny spadek wytrzymałości materiału). Jest to przyczyną zwiększania się podatności obiektu na uszkodzenia nagłe, które mogą pojawić się, gdy ten czynnik w losowej chwili osiągnie wartość ekstremalną. Jeżeli takie zjawisko nie pojawi się, to uszkodzenie zaistnieje z chwilą osiągnięcia granicznego poziomu zużycia.

## 7. Analiza diagnostyczna

### 7.1. Proces analizy diagnostycznej

Analiza diagnostyczna w klasycznym ujęciu charakteryzuje się triadą: badanie stanu faktycznego – analiza – informacja diagnostyczna. Proces przetwarzania i oceny, czyli analizę pozyskanych w wyniku obsługi diagnostycznych danych, można podzielić na trzy fazy zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 7.1.

Pierwszą fazą analizy diagnostycznej jest pozyskanie informacji i danych diagnostycznych do analizy, w z góry określonym celu. Wybór metody badań diagnostycznych już na wstępie procesu analizy pozwala wyznaczyć zakres problemów, na które w trakcie procesu będzie trzeba zwrócić szczególną uwagę.

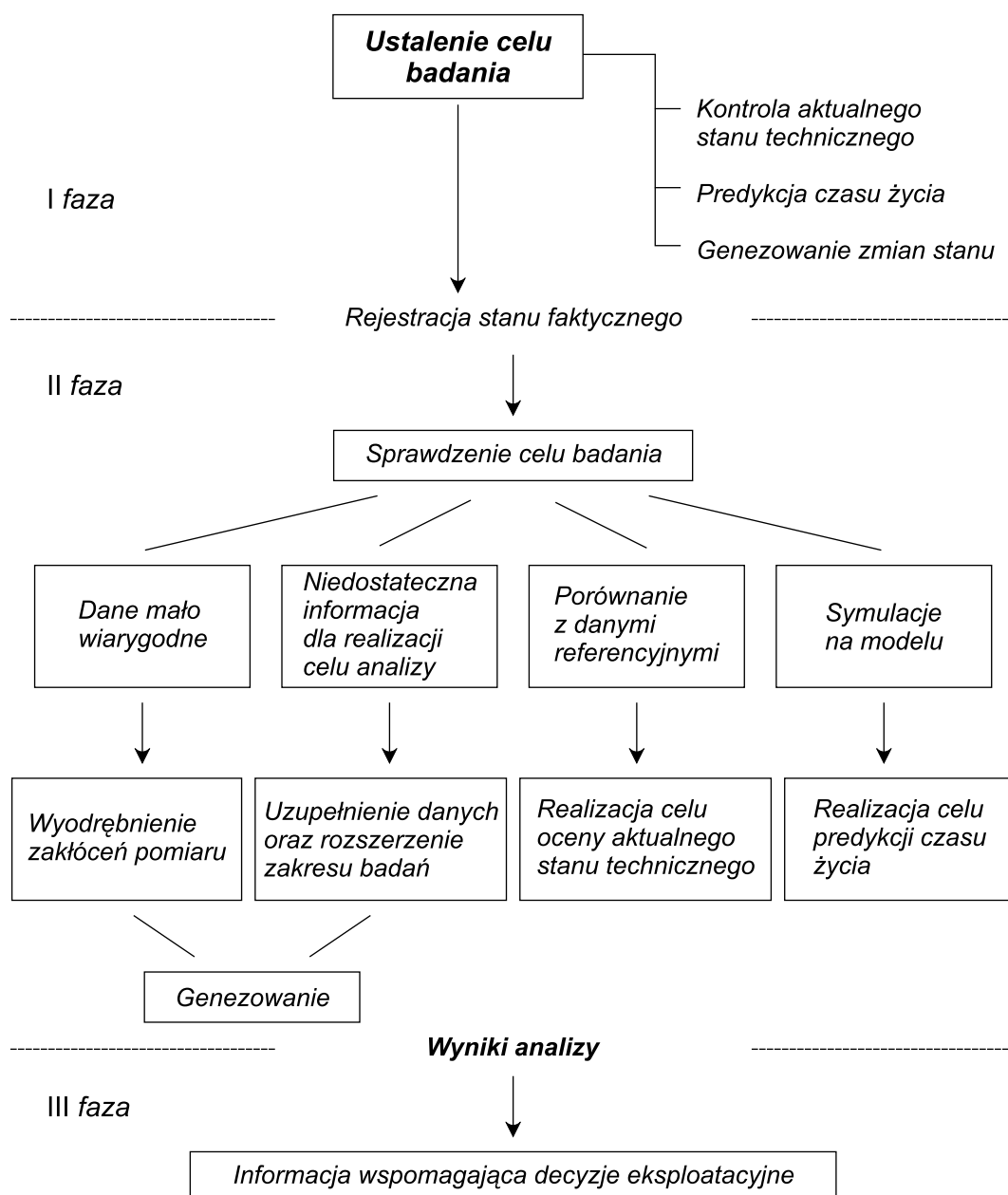
W celu przeprowadzenia pełnej i dokładnej analizy diagnostycznej, z uwzględnieniem kryteriów optymalizacji przyjętych dla całego procesu diagnostyki, należy określić główne cele badań oraz wyznaczyć i zidentyfikować elementy składowe systemu – urządzenia. Stanowi to podstawę do rozpoczęcia oceny istniejącego stanu, ponieważ pozwala wyeliminować z procesu przetwarzania danych działania zbędne, których wynik jest nieistotny dla celu całej analizy.

Pełna i prawidłowa rejestracja stanu faktycznego zależy w głównej mierze od możliwości uzyskania odpowiedniej ilości informacji diagnostycznych i eksploatacyjnych. W zakresie gromadzenia informacji diagnostycznych można wyróżnić kilka problemów z tym związanych.

- Pierwszym jest zbyt duża ilość danych, co jest bardzo częste w erze informatyzacji, a utrudnia zauważenie ważnych dla diagnozy obszarów. Ponadto nadmiar danych zwiększa koszty diagnostyki, nie zawsze wnosząc dodatkowe informacje do procesu analizy;
- Również niewłaściwe jest nadmierne ograniczanie ilości informacji, ponieważ utrudnia to dążenie do ich kompleksowego wykorzystania oraz powoduje ominięcie niektórych ważnych źródeł danych;
- Istotnym problemem jest również jakość pozyskiwanych informacji, która jest obniżana przez nieprecyzyjność, niedostosowanie do potrzeb i oczekiwań diagnozy, niewłaściwe opracowanie czy też celowe błędne przedstawienie dla zatuszowania złych wyników;

— Ostatnim problemem są błędy pomiarowe oraz niekompletne przekazywanie danych diagnostycznych.

W pierwszej fazie analizy należy zwrócić szczególną uwagę na wyznaczane cele, ze względu na możliwość spełnienia stawianych założeń, a także możliwości osiąganych efektów w wyniku przeprowadzenia wybranych badań.



**Rys. 7.1.** Schemat analizy diagnostycznej

Sprawdzenie celu badania, w drugiej fazie analizy, realizowane jest poprzez przetwarzanie danych w sposób zależny od celu. Jeśli otrzymane dane nie spełniają stawianych wymogów niezbędnych dla otrzymania informacji diagnostycznej, analiza jest prowadzona pod kątem wyodrębnienia błędów pomiarowych lub określeniu braków w zebranych danych. Wraz z rozszerzeniem zakresu danych pomiarowych otrzymuje się podstawę do genezowania zmian stanów urządzeń oraz narażeń będących ich przyczyną.

Proste porównanie z danymi wzorcowymi (rozdz. 5.3) pozwala na sklasyfikowanie bieżącego stanu urządzenia jak również pozyskanie informacji wykorzystywanych do opracowania modelu diagnostycznego badanego urządzenia. Symulacje przeprowadzane na modelu dodatkowo pozwalają na predykcję czasu życia urządzeń elektroenergetycznych.

Wszystkie działania drugiej fazy analizy diagnostycznej, sprawdzające cel badań, są z sobą powiązane i pozwalają na uzyskanie informacji wykorzystywanych wzajemnie.

Ostania faza jest etapem prezentacji wyników analizy. W zależności od celu i potrzeb oraz możliwości technicznych, wyniki analizy można podawać w postaci opisowej, liczbowej, wyników symulacji – wykresów, schematów itp. Otrzymane na drodze analizy informacje diagnostyczne mogą służyć i służą w szerokim zakresie do celów wspomagania decyzji eksploatacyjnych w zarządzaniu majątkiem sieciowym.

System wspomagania decyzji eksploatacyjnych w oparciu o informację diagnostyczną działa dzięki dostarczaniu do procesu analizy wybranych danych zgodnie z treścią sformułowanego celu. Narzędzia w postaci modelowania, symulacji i prognozowania wykorzystywane w takim systemie rozwijają klasyczną analizę diagnostyczną o analizę przyczynowo - skutkową oraz analizę wariantów decyzji z wykorzystaniem modelowania symulacyjnego itp. Ostateczna decyzja sugerowana przez system uwzględnia również dodatkowe kryteria (np. finansowe, ekologiczne ii) podane na początku procesu diagnostycznego.

Nowoczesne formy zarządzania majątkiem sieciowym zakładów energetycznych wykształciły dwa kierunki prowadzonych badań diagnostycznych: pierwszy – diagnostyka bieżąca i profilaktyczna, drugi – analiza prognostyczna i synteza procesów eksploatacyjnych.

Analiza dąży do znalezienia możliwości optymalizacji diagnostyki i organizacji procesu diagnostycznego, jak również samej eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych. Dokonywane jest to poprzez diagnozę aktualnego stanu urządzenia oraz niesprawności stwierdzonych w czasie rejestracji stanu faktycznego. Trwałą tendencją w rozwoju metod i narzędzi analitycznych oraz oprogramowania do zarządzania majątkiem jest dążenie do zwiększenia zależności pomiędzy analizą pozyskanych danych a procesami zmian zachodzącymi w rzeczywistych obiektach.

## 7.2. Rola współczesnej analizy diagnostycznej

Aktualny kierunek rozwoju diagnostyki jako zespołu działań mających za zadanie określenie stanu technicznego badanego obiektu, w szczególności urządzeń elektroenergetycznych, ewoluje w stronę pogłębionej analizy diagnostycznej wspomaganej komputerowo, w tym również oceny samych danych. Ze względu na zmianę priorytetów określających strategię eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych, głównym celem diagnostyki jest ocena zmian zachodzących w urządzeniu, predykcja czasu życia oraz wyznaczenie prawdopodobieństwa awarii, w celu znalezienia optymalnej strategii obsługi i eksploatacji urządzenia zarówno pod kątem technicznym, ekonomicznym, jak również ekologicznym.

Wymieniony jako ostatni aspekt ekologiczny staje się coraz częściej najważniejszym, zdominowawszy pozostałe. W związku z powyższym analiza diagnostyka urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia jest prowadzona także w celu zwiększenia kompatybilności elektromagnetycznej EMC tych urządzeń oraz zminimalizowania możliwości wystąpienia awarii, której skutki byłyby negatywne dla środowiska [77].

Ponadto dynamiczny rozwój nowych, niekonwencjonalnych, ekologicznych źródeł energii stawia przed diagnostyką kolejne zadania związane z dużym wpływem czynników atmosferycznych, które mogą być traktowane w pełni jako zmienne losowe, na ciągłość zasilania i pracę źródeł energii odnawialnej (np. elektrowni wodnych, wiatrowych, słonecznych, geotermalnych itp.) [6].

Badania mające na celu tylko np. wyznaczenie rezystancji układu izolacyjnego, poziom degradacji tego układu, wytrzymałość elektryczną itp. w kontekście przedstawionych celów są w większości przypadków niewystarczające. Dlatego sam charakter działań diagnostycznych też uległ ewolucji i rozwija się w kierunku badań predykcyjnych, systemów nadzoru bieżącego oraz systemów diagnostycznych bazujący na modelu MBDS<sup>1</sup> [9, 34, 114, 117], obejmujących nowoczesne elementy planowania eksploatacji oraz gromadzenia danych eksploatacyjnych i diagnostycznych.

Elementy pomiarów bezpośrednich na obiekcie, zwłaszcza wymagające wyłączeń, mogą być, dzięki zastosowaniu narzędzi analizy stanu technicznego badanych urządzeń, w niektórych przypadkach ograniczone, prowadzone w dłuższych czasookresach lub nawet zastąpione przez symulacje matematyczne na modelach tworzonych w oparciu o bazy wiedzy dla danego typu obiektów.

Proponowane w dalszej części modele odnoszą się do strategii obsługi urządzeń typu CM i CBM. Pozwalają na porównanie badanych strategii i zoptymalizowanie ich ze względu na koszty przy zachowaniu porównywalnego poziomu niezawodności (gotowości) obiektu.

---

<sup>1</sup> ang. *Model-Based Diagnostic System*

### 7.3. Klasyfikacja stanu urządzenia

Kontrola aktualnego stanu technicznego urządzenia w procesie analizy diagnostycznej może się odbywać między innymi poprzez porównanie otrzymanych wyników badań z danymi referencyjnymi. W większości przypadków klasyfikacja, oznaczenie i usystematyzowanie stanów urządzenia następuje na podstawie określenia przedziałów wartości danych pomiarowych dla określonego stanu technicznego urządzenia.

Przykładowo, w trakcie okresowo wykonywanych badań stanu izolacji otrzymuje się między innymi wartości wskaźników rezystancyjnych, takich jak:

- współczynnik prądu polaryzacji  $PI^2$ , określany w oparciu o pomiar rezystancji w czasie, w ściśle określonych odcinkach czasu (niezależny od temperatury). Wartość wskaźnika PI może dać zgrubną informację co do stanu izolacji;
- współczynnik absorpcji  $DAR^3$ , wyznaczany jako stosunek wartości początkowej prądu przewodnościowego do wartości ustalonej, informujący o zmianach w izolacji, takich jak np. zawilgocenie;
- stała czasowa  $TC^4$ , której tendencja malejąca wskazuje na osłabienie izolacji;
- charakterystyki rozładowania dielektryka  $DD^5$ , pozwalającej na ocenę starzenia się oraz pogarszania parametrów izolacji. Wskaźnik DD może identyfikować zaabsorbowaną przez izolację wilgoć, ponieważ ma ona wpływ na charakterystykę czasową prądu absorpcji dielektryka.

Dzięki znajomości zjawisk zachodzących w izolacji elektrycznej oraz wartości referencyjnych dla badanego urządzenia można klasyfikować jego stan techniczny zgodnie z przyjętym podziałem. Poza podstawowymi stanami zdatności i niezdatności, w tabeli 7.1 wyznaczono również stany pośrednie, takie jak: „jak nowy”, dobry, niejasny i słaby [103].

**Tabela 7.1**

Klasyfikacja stanu izolacji na podstawie wyników pomiarowych

| Definicja wskaźnika | $PI^*$<br>$\frac{R \text{ po } 10 \text{ min}}{R \text{ po } 1 \text{ min}}$ | $DAR$<br>$\frac{R \text{ po } 60 \text{ s}}{R \text{ po } 15 \text{ s}}$ | $TC$<br>$R \times C$ | $DD$<br>$\frac{I \text{ rozładowania (po } 60 \text{ s)}}{U \times C}$ |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Stan izolacji       |                                                                              |                                                                          |                      |                                                                        |
| $S_3$ – słaby       | $< 1$                                                                        | $< 1$                                                                    | $< 100$              | $> 4$                                                                  |
| $S_2$ – niejasny    | $1 \div 2$                                                                   | $1 \div 1,4$                                                             | $100 \div 800$       | $2 \div 4$                                                             |
| $S_1$ – dobry       | $2 \div 4$                                                                   | $1,4 \div 1,6$                                                           | $800 \div 2000$      | $< 2$                                                                  |
| $S_0$ – „jak nowy”  | $> 4$                                                                        | $> 1,6$                                                                  | $> 2000$             |                                                                        |

\* Objaśnienia w tekście

<sup>2</sup> ang. *Polarization Index*

<sup>3</sup> ang. *Dielectric Absorption Ratio*

<sup>4</sup> ang. *Time Constant*

<sup>5</sup> ang. *Dielectric Discharge*

Procedura diagnostyczna zawierająca tylko porównanie z bazą danych wzorcowych może dać tylko informację o aktualnym stanie, bez możliwości oceny ewentualnych przyszłych zmian w czasie lub predykcji czasu życia.

Efekty pomiarów dostarczających dane wyjściowe do procedur diagnostycznych zależą zasadniczo od stanu eksploatacyjnego, w którym pracuje układ izolacyjny. Z drugiej strony dane eksploatacyjne zależą od czasu, w którym były zbierane w trakcie całego procesu.

Proces starzenia się układu izolacyjnego jest przedstawiany za pomocą wielu różnych modeli matematycznych, np. jako proces ciągły w czasie, w oparciu o prawa zjawisk chemicznych, lub jako proces o skokowych zmianach stanu technicznego urządzenia (możliwości pracy), np. zainicjowanych przez przepięcie lub inne zdarzenie losowe.

Analiza diagnostyczna urządzeń elektroenergetycznych obejmuje ocenę aktualnego stanu urządzenia, ale również proces zmian tego stanu wraz z określeniem narażeń powodujących zmiany. Podstawą poprawnej pracy urządzeń elektroenergetycznych poza ciągłością obwodów prądowych jest niezawodność układu izolacyjnego [112]. Różnorodność materiałów izolacyjnych oraz struktur układów izolacyjnych i ich znaczenie powoduje, iż sformułowanie modelu matematycznego obrazującego proces zmian stanu badanego układu izolacyjnego stanowi temat wielu opracowań badawczych i naukowych [28, 36, 93, 109].

Główną przyczyną degradacji nieodnawialnych materiałów izolacyjnych jest czas ich eksploatacji w określonych warunkach. W literaturze przedmiotu można znaleźć modele starzeniowe izolacji, uwzględniające różne rodzaje narażeń oraz ich liczbę, jak na przykład jednonarażeniowe, proste modele Peeka i Montsingera, model Arrheniusa czy model Dakina lub wielonarażeniowy model Wasilenki-Cygana oraz modele „szkoły bolońskiej” [13, 93, 109]. Wspomniane modele przyjmują proces zmian stanu układu izolacyjnego jako proces ciągły.

#### 7.4. Proces zmian stanów urządzeń elektroenergetycznych

Urządzenia elektroenergetyczne wysokiego napięcia mogą ulec uszkodzeniu<sup>6</sup> lub awarii<sup>7</sup> ze względu na warunki pracy i narażenia działające na urządzenia w trakcie całego okresu eksploatacji. Przyczyny zmian stanu z dobrego na niesprawny mogą być różnorodne, często o charakterze losowym, co utrudnia działania prewencyjne. Przykład praktycznej klasyfikacji przyczyn awaryjności przewodów linii napowietrznych 15 kV przedstawiono w tabeli 7.2.

---

<sup>6</sup> def. przypadek losowy, defekt urządzenia powodujący częściową lub całkowitą utratę zdolności wykonywania stawianych zadań;

<sup>7</sup> def. uszkodzenie uniemożliwiające dalszą pracę urządzenia;

**Tabela 7.2**

Przyczyny awaryjności przewodów elektroenergetycznych linii napowietrznych 15 kV w rejonach Polski południowej

|                                   |       |
|-----------------------------------|-------|
| Starzenie lub zmęczenie materiału | 71%   |
| Wichury                           | 12,5% |
| Oblodzenie, sadź                  | 13,5% |
| Niewyjaśnione                     | 3%    |

Przyczyny zmian mogą lecz nie muszą mieć charakteru losowego, natomiast czas przejścia ze stanu zdatności do niezdatności jest zawsze wartością losową, ponieważ o awarii lub uszkodzeniu mówi się tylko w kontekście nieplanowanej zmiany stanu technicznego. Obserwacja parametrów pracy urządzeń oraz niektórych narażeń mogących mieć istotny wpływ na ich pracę często pozwala na uniknięcie uszkodzeń. Znajomość powiązań pomiędzy obserwowalnymi symptomami zjawisk mogących być przyczyną awarii pozwala na wcześniejsze zniwelowanie potencjalnych przyczyn uszkodzeń lub wcześniejsze wyłączenie urządzenia. Na przykład długotrwałe przeciążenie urządzenia w sposób oczywisty prowadzi do jego uszkodzenia, ale samo wystąpienie tego przeciążenia może być przypadkowe. Jednakże awarii z takiego powodu łatwo zapobiec, ponieważ zwykle można wcześniej zaobserwować przyczynę (przeciążenie) i ją wyeliminować.

Tradycyjne podejście do zagadnień niezawodności urządzeń elektroenergetycznych charakteryzuje się wyznaczaniem zależności funkcyjnych możliwości wykonywania przez urządzenia określonych zadań w czasie z uwzględnieniem procesów degradacji.

Dysponując informacją o liczbie awarii i uszkodzeń w danej jednostce czasu, jak również ich przyczyn, można dla celów analizy diagnostycznej wyznaczyć przedstawione wcześniej wskaźniki awaryjności. Losowość awarii niewynikających wprost z czasu eksploatacji urządzeń jest określana między innymi za pomocą analizy statystycznej błędów produkcyjnych lub montażowych ujawniających się w początkowym okresie eksploatacji urządzeń.

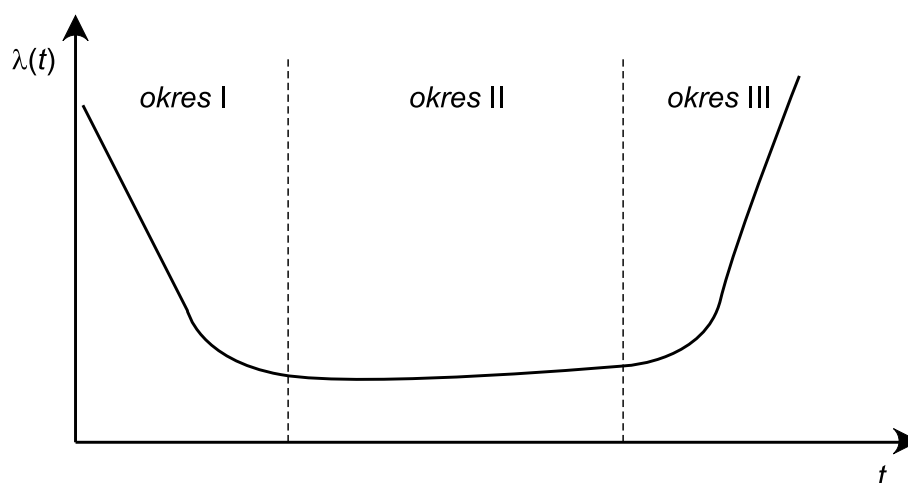
Tak zwana „krzywa wannowa” (rys. 7.2) obrazująca przebieg funkcji ryzyka na podstawie informacji *post factum*, przedstawia zależność prawdopodobieństwa uszkodzenia w czasie eksploatacji dla typowego urządzenia [26, 56].

W jej przebiegu można wyznaczyć trzy okresy:

- I - okres początkowy,
- II - okres tzw. normalnego użytkowania; praktycznie stała wartość intensywności uszkodzeń  $\lambda(t)$ ,
- III - okres, w którym pojawiają się uszkodzenia będące konsekwencją procesu starzeniowego.

Dzięki analizie niezawodnościowej i wynikającej z niej znajomości wskaźników awaryjności można podejmować racjonalne decyzje dotyczące moderniza-

cji (np. badany typ urządzeń charakteryzuje się dużymi błędami konstrukcyjnymi ujawniającymi się w danych warunkach eksploatacyjnych) lub wymiany urządzeń (np. duże prawdopodobieństwo awarii urządzeń w badanej populacji obiektów tego samego typu i eksploatowanych w porównywalnym okresie czasu) [12]. W celu optymalizacji kosztów eksploatacji można jednak stosować diagnostykę predykcyjną opartą na modelowaniu matematycznym procesu awaryjności urządzeń.



**Rys. 7.2.** Przykładowy przebieg intensywności uszkodzeń w funkcji czasu eksploatacji  $\lambda(t)$ .

Podjęcie probabilistyczne do oceny i predykcji stanu urządzenia na podstawie analizy modeli matematycznych przedstawiających strumień uszkodzeń i odnowień zostało przedstawione w [28]. Prezentowane modele pozwalają na odwzorowanie losowego charakteru uszkodzeń, co umożliwia podjęcie dalszych decyzji eksploatacyjnych na podstawie wyników symulacji wpływu kontroli diagnostycznej na strumień uszkodzeń urządzeń [29].

Ponadto ocena awaryjności i niezawodności urządzeń elektroenergetycznych (np. linii kablowych) w oparciu o model probabilistyczny w pracy [98, 99] uwzględnia takie parametry, jak czas przerwy w zasilaniu odbiorców, koszt awarii i koszt jej usunięcia. Stosowanie modeli tego typu pozwala na optymalizację czasu eksploatacji urządzeń, czasookresów badań diagnostycznych oraz terminów reinwestycji [16, 28, 95].

Zastosowanie modeli matematycznych może uwzględniać nie tylko elementy stałe narażeń, ale również oddziaływanie czynników występujących przypadkowo, niezależnie od pracy urządzeń, takie jak np. zmiany środowiskowe (temperatura, wilgotność, opady itp.), średnia liczba przebiegów atmosferycznych, działania zwierząt i ludzi. Czynniki te mogą być przyczyną awarii niezależnie od czasu eksploatacji urządzenia czy też jego konstrukcji.

W modelach proponowanych w dalszej części pracy można uwzględniać stany pośrednie urządzeń pomiędzy stanem pełnej zdatności i awarii oraz

ewentualne odnowy urządzeń. Możliwości szerokiego dopasowania modeli matematycznych, w zależności od rodzaju modelowanego urządzenia oraz potrzeb, pozwala na ich stosowanie zarówno jako uzupełnienie diagnostyki bieżącej, jak również ewentualnej diagnostyki predykcyjnej.

## 7.5. Procesy losowe w diagnostyce

Uwzględniając proces zmian zachodzących w stanie urządzeń elektroenergetycznych, w trakcie analizy diagnostycznej można wykorzystać modele matematyczne tych procesów z zastosowaniem teorii procesów losowych. Proces *stochastyczny* lub *losowy* charakteryzuje się przypadkowymi zmianami wartości zmiennych stanu w czasie. Odwzorowanie matematyczne takiego procesu dla określonej przestrzeni probabilistycznej  $(V, F, P)$ , czyli przestrzeni zdarzeń elementarnych  $V$ , ciała zdarzeń  $F$  i określonej na nim miary probabilistycznej  $P$  (rozkładu prawdopodobieństwa) oraz zbioru chwil  $T \subset R$  i stanów  $S \subset R$ , ma postać [5, 102]:

$$X : V \times T \rightarrow S \subset R \quad (7.1)$$

co oznacza, że dla każdego ustalonego  $t \in R$  i dowolnej liczby  $x \in R$

$$\{e \in V : X(e, t) < x\} \in F, \quad (7.2)$$

gdzie:

$e$  – zdarzenie elementarne.

Innymi słowy, proces stochastyczny jest to rodzina zmiennych losowych  $\{X_t, t \in T\}$ , gdzie  $t$  przybiera zbiór indeksów  $T$ , natomiast  $X_t$  jest stanem systemu w chwili  $t$  [18]. Pod pojęciem systemu należy rozumieć urządzenie – system fizyczny, którego stan – położenie zmienia się w czasie.

Dla tak przyjętej definicji procesu losowego oraz celów modelu diagnostycznego przyjmuje się następujące założenia:

- urządzenie jest traktowane jako system fizyczny o zmiennych stanach,
- zmiana stanu rozpatrywanego systemu może następować w sposób przypadkowy w czasie,
- dla przedstawianych dalej modeli zmienna losowa  $X_t$  reprezentująca możliwe stany systemu przyjmuje wartości dyskretne.

W ogólnym przypadku zarówno zbiór stanów, jak i zbiór chwil mogą przyjmować wartości ciągłe bądź dyskretne. Zgodnie z podziałem przedstawionym w tabeli 7.3, w zależności od właściwości zbiorów  $T$  i  $S$  można sklasyfikować cztery rodzaje procesów losowych:

1. **łańcuch losowy**, dla którego zbiór stanów  $X$  i chwil  $T$  jest co najwyżej przeliczalny;

2. **ciąg losowy** – zbiór stanów  $X$  jest przedziałem ciągłym, a zbiór chwil  $T$  jest co najwyżej przeliczalny;
3. **dyskretny proces losowy** – zbiór stanów  $X$  jest co najwyżej przeliczalny, a zbiór chwil  $T$  stanowi przedział.
4. **proces losowy z czasem ciągłym** – zbiory stanów  $X$  i chwil  $T$  są przedziałami.

**Tabela 7.3**

Klasyfikacja dwuwymiarowych procesów losowych ze względu na właściwości zbiorów stanów procesu  $X$  i chwil  $T$  [5]

|          |                          | <b>T</b>                 |                                |
|----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------|
|          |                          | Co najwyżej przeliczalny | Przedział                      |
| <b>X</b> | Co najwyżej przeliczalny | Łącuch losowy            | Ciąg losowy                    |
|          | Przedział                | Dyskretny proces losowy  | Proces losowy z czasem ciągłym |

Do modelowania i symulacji procesów zmian stanów urządzeń można wykorzystać każdy rodzaj procesu losowego. Ze względów praktycznych, w analizie diagnostycznej najczęściej stosowane są jednak procesy losowe, w których zmienna losowa stanu  $X$  przyjmuje wartości dyskretne.

## 7.6. Modele zmian stanów oparte na teorii procesów losowych Markowa

Procesy Markowa są modelami służącymi do badania systemów, których stan w ustalonej chwili wystarcza do wyznaczenia charakterystyk probabilistycznych przyszłego rozwoju systemu. Procesem Markowa nazywa się proces losowy  $\{X_t, t \in T\}$ , dla którego zachodzi równość nazywana warunkiem Markowa [14, 18, 79, 101]:

$$\begin{aligned}
 P(X_{t_n} < x_n | X_{t_1} < x_1, X_{t_2} < x_2, \dots, X_{t_{n-1}} < x_{n-1}) = \\
 = P(X_{t_n} < x_n | X_{t_{n-1}} < x_{n-1})
 \end{aligned}
 \tag{7.3}$$

dla dowolnego ciągu chwil:  $t_1 < t_2 < \dots < t_n$ ,  $(t_1, t_2, \dots, t_n \in T)$  i dowolnych liczb rzeczywistych  $(x_1, x_2, \dots, x_n \in X)$ .

Z warunku tego wynika, że warunkowy rozkład prawdopodobieństwa zmiennej losowej  $X_t$  łącznie z rozkładem zmiennej losowej  $X_s$ , pozwalają na wyzna-

czenie rozkładu zmiennej losowej  $X_t$ , pod warunkiem, że zmienna losowa  $X_s$ , ( $s < t$ ) przyjmie wybrane wartości.

Ponieważ procesy Markowa są procesami o przyrostach niezależnych, zatem do ich opisu i analizy wystarczające są rozkłady jednowymiarowe zmiennych. Jeżeli jest znany stan procesu Markowa  $X_t$  w chwili  $t$  to dodatkowa informacja o stanie procesu w chwilach wcześniejszych  $s$  nie wpływa na rozkład wartości procesu w chwilach późniejszych.

### Łańcuch Markowa

Łańcuch Markowa jest szczególnym przypadkiem procesu Markowa, dla którego zbiór  $X$  stanów procesu, stanowiący przeciwdziedzinę odwzorowania, oraz zbiór chwil  $T$  są co najwyżej przeliczalne [5, 18].

W takim przypadku proces Markowa można przedstawić w postaci grafu, którego wierzchołki odpowiadają poszczególnym stanom procesu, natomiast łączące je łuki, wskazują jakie są dopuszczalne przejścia pomiędzy stanami. Przy łukach tych zaznacza się zazwyczaj informacje o prawdopodobieństwie przejścia pomiędzy odpowiednimi stanami.

Dlatego też dla łańcucha Markowa warunek 7.3 przyjmuje postać:

$$\begin{aligned} P(X_k = j | X_0 = i_0, X_1 = i_1, \dots, X_{k-1} = i_{k-1}) = \\ = P(X_k = j | X_{k-1} = i_{k-1}) \end{aligned} \quad (7.4)$$

dla dowolnego  $k$ , dowolnych  $i_0, \dots, i_{k-1}$  oraz  $j$  całkowitych.

Prawdopodobieństwo przejścia w  $k$ -tym kroku określa się jako:

$$p_{ij}^{(k)} = P(X_k = j | X_{k-1} = i) \quad (7.5)$$

Jeżeli prawdopodobieństwa przejść  $p_{ij}^{(k)}$  nie zależą od numeru kroku  $k$ , to łańcuch Markowa nazywany jest jednorodnym, a w zapisie opuszcza się wskaźnik  $(k)$ . Dużą zaletą wykorzystania łańcuchów Markowa jest możliwość zapisania wszystkich prawdopodobieństw przejść pomiędzy stanami w macierzy  $\mathbf{P}$  o przeliczalnej lub skończonej liczbie kolumn i wierszy.

Suma prawdopodobieństw występujących w poszczególnych wierszach macierzy jest równa 1. Każdą macierz spełniającą ten warunek nazywamy macierzą stochastyczną. Do określenia konkretnego łańcucha Markowa wystarczy znajomość danej macierzy stochastycznej wraz z rozkładem początkowym zmiennej losowej  $X$ .

Znając macierz  $\mathbf{P}$  można wyznaczyć macierz przejść dla dwóch i większej liczby kroków poprzez mnożenie macierzy przejść w pojedynczych krokach. Szczególnym przypadkiem tego jest macierz prawdopodobieństw przejść

w  $k$  krokach dla łańcucha jednorodnego. Macierz ta jest  $k$ -tą potęgą macierzy przejść w jednym kroku ( $\mathbf{P}^{(k)} = \mathbf{P}^k$ ).

Oznaczając przez:

$$p_{ij}(n) = P(X_k = j | X_{k-n} = i) \text{ dla } n \leq k \quad (7.6)$$

prawdopodobieństwo przejścia ze stanu  $i$  do stanu  $j$  w  $n$  krokach, otrzymuje się równania Chapmana-Kołmogorowa, w postaci:

$$p_{ij}(n) = p_{ik}(n-m)p_{kj}(m) \quad (7.7)$$

oraz  $1 \leq m < n$ .

Jeżeli znany jest rozkład początkowy, tzn. rozkład zmiennej losowej  $X_0$ , to rozkład zmiennej losowej  $X_n$  w jednorodnym łańcuchu Markowa można wyznaczyć na podstawie zależności:

$$\mathbf{p}_n = \mathbf{p}_0 \mathbf{P}^n \quad (7.8)$$

gdzie:

- $\mathbf{p}_n$  – wektor prawdopodobieństw po  $n$  krokach,
- $\mathbf{p}_0$  – wektor prawdopodobieństw w chwili początkowej,
- $\mathbf{P}^n$  – macierz przejść pomiędzy stanami.

czyli prawdopodobieństwo przejścia ze stanu  $i$  do  $j$  w  $n$ -tym kroku wynosi:

$$p_{ij}^{(n)} = \sum_i p_i(0) p_{ij}(n) \quad (7.9)$$

gdzie:

- $p_i(0)$  – prawdopodobieństwo przebywania w stanie  $i$  w chwili początkowej,
- $p_{ij}$  – prawdopodobieństwo przejścia pomiędzy stanami  $i$  i  $j$  w pojedynczym kroku.

### Jednorodność procesu losowego

Proces losowy, w szczególności łańcuch Markowa, nazywany jest jednorodnym, jeżeli prawdopodobieństwa przejść  $p_{ij}$  pomiędzy stanami  $i$  i  $j$  nie zależą od momentu przejścia lub numeru kroku  $n$ :

$$\forall_n p_{ij}^{(n)} = p_{ij} \quad (7.10)$$

Zakładając jednorodność procesu losowego można wyznaczyć prawdopodobieństwo przebywania systemu w danym stanie  $j$  w czasie  $(t + dt)$ :

$$p_j(t+dt) = p_j(t)[1 - \sum_{i=j} \lambda_{ij} dt] + \sum_{j=1} \lambda_{ij} p_i(t)dt \quad (7.11)$$

gdzie:

$\lambda_{ij}$  – gęstość prawdopodobieństwa przejścia między stanami.

Znając gęstości prawdopodobieństw przejść między stanami można określić prawdopodobieństwo  $p_j$  jako funkcję czasu przekształcając równanie (7.11) do postaci:

$$\frac{p_j(t+dt) - p_j(t)}{dt} = - \sum_{i=j} \lambda_{ij} p_j(t) + \sum_{j=1} \lambda_{ij} p_i(t) \quad (7.12)$$

Przy założeniu, że  $dt \rightarrow 0$  przyrost czasu jest nieskończenie mały, z powyższego równania otrzymuje się równanie różniczkowe Chapmana-Kołmogorowa.

Jednorodny dyskretny proces Markowa  $X_t, t \geq 0$  przyjmujący wartości w dyskretnym zbiorze stanów nazywany jest procesem rozwoju i zanikania lub procesem urodzin i śmierci, jeżeli są spełnione następujące postulaty dotyczące prawdopodobieństwa przejść:

$$p_{ij}(t) = \begin{cases} \lambda_i t + 0(t) & \text{dla } j = i + 1 \geq 0 \\ \mu_i t + 0(t) & \text{dla } j = i - 1 \geq 0 \\ 1 - (\lambda_i + \mu_i)t + 0(t) & \text{dla } j = i \geq 1 \\ 1 - \lambda_0(t) + 0(t) & \text{dla } j = i = 0 \\ 0(t) & \text{dla } |i - j| > 1 \end{cases} \quad (7.13)$$

oraz

$$p_{ij}(0) = \delta_{ij} \quad \text{gdzie} \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad (7.14)$$

Stałe intensywności przejść  $\lambda_i$  oraz  $\mu_i$  nazywane są w tym przypadku odpowiednio intensywnościami rozwoju i zanikania.

Znajomość macierzy przejść  $\Lambda$  pozwala na zapisanie równań Chapmana - Kołmogorowa dla prawdopodobieństw znajdowania się procesu w stanie  $n$  w chwili  $t$ .

Przykłady wykorzystania powyższej zależności Chapmana - Kołmogorowa zostały przedstawione w rozdziałach 9 i 10 dla modeli opartych na teorii dyskretnych procesów Markowa.

## 8. Optymalizacja w diagnostyce urządzeń elektroenergetycznych

### 8.1. Kryteria optymalizacyjne

Podstawą rozważań optymalizacyjnych jest sprecyzowanie kryterium lub kryteriów, według których będą prowadzone obliczenia. W przypadku diagnostyki urządzeń elektroenergetycznych można wymienić kilka obszarów, w ramach których można dokonać optymalizacji.

Mając na uwadze dotychczasowe rozważania, jako pierwsze należy wymienić kryterium ekonomiczne, dla którego optymalizacja procesu diagnostycznego ma na celu minimalizację kosztów z tym związanych.

Konsekwencją powyższego kryterium jest również optymalizacja liczby usług diagnostycznych w toku całego okresu eksploatacji oraz skrócenie czasu takiej obsługi.

Kryterium techniczne ukierunkowuje działania optymalizacyjne na uzyskanie jak najpełniejszej informacji diagnostycznej poprzez ilość danych pozyskiwanych w procesie diagnostycznym oraz zakresu analizy diagnostycznej tych danych. Wzrost informacji pierwotnych (uzyskanych wprost z badanego urządzenia) zwiększa prawdopodobieństwo trafnej analizy i decyzji diagnostycznej. Zgodnie z rozważaniami dotyczącymi kryterium ekonomicznego w rozdziale 5.5 optymalny proces diagnostyczny stanowi kompromis pomiędzy kryterium ekonomicznym i technicznym.

Poza wymienionymi kryteriami, dodatkowymi czynnikami mogącymi wpłynąć na wybór, zakres i rodzaj strategii diagnostycznej są:

- cel obsługi diagnostycznej,
- warunki realizacji obsługi,
- czas kontroli.

Celem obsługi diagnostycznej może być:

- ocena ilościowa i jakościowa stanu technicznego oraz zdolności urządzenia,
- kontrola profilaktyczna wybranych parametrów urządzenia oraz wskaźników pracy,
- prognozowanie,

- diagnostyka poawaryjna – lokalizacja i identyfikacja uszkodzeń,
- samokontrola systemów diagnostycznych.

Natomiast ze względu na warunki realizacji procedury diagnostycznej można wymienić następujące rodzaje obsługi:

- aktywna, polegająca na testowaniu i badaniu urządzeń,
- pasywna, bez działań zewnętrznych, polegająca głównie na rejestracji parametrów pracy urządzenia,
- statyczna, obsługa/ocena stanu urządzenia wykonywana w określonych warunkach,
- dynamiczna, rejestracja i obserwacja procesów przejściowych.

Elementem optymalizowanym ze względu na kryterium ekonomiczne jest czas i częstotliwość prowadzonych obsług. Tego rodzaju optymalizacja powinna uwzględniać też czas kontroli diagnostycznej, według którego można rozróżnić diagnostykę:

- ciągłą, tj. monitoring,
- okresową, tj. zgodnie z harmonogramem prac diagnostycznych,
- bieżącą, tj. prowadzona w miarę potrzeb (losowo).

W celu optymalizacji według wymienionych kryteriów, z uwzględnieniem różnego rodzaju diagnostyk, niezbędne są dane w postaci:

- zbioru klas stanu urządzenia, określony na przykład według reguł przedstawionych w podrozdziałach 5.2 i 7.3,
- modelu funkcjonowania urządzenia oraz jego obsługi, w postaci równań, schematu funkcjonalnego lub grafu zmian stanów.

Po usystematyzowaniu zagadnień związanych z diagnostyką urządzeń elektroenergetycznych można wyznaczyć obszary diagnostyki nadające się do optymalizacji.

## **8.2. Poawaryjne testy diagnostyczne systemów wieloelementowych**

W diagnostyce poawaryjnej istotnym czynnikiem jest czas identyfikacji elementu uszkodzonego w urządzeniu. W przypadku urządzeń o prostej konstrukcji proces ten jest nieskomplikowany i szybki. Również, jeśli awaria w systemie jest spowodowana przez urządzenie wyposażone w zabezpieczenia identyfikujące lub sygnalizujące uszkodzenie, proces diagnostyczny jest uproszczony.

Natomiast, jeśli konstrukcja urządzenia jest wieloelementowa i skomplikowana, jak również w przypadku systemów – zbioru wielu urządzeń wzajemnie zależnych pod względem funkcjonalnym, identyfikacja uszkodzenia może być czasowo- i pracochłonna. Jeśli linie energetyczne rozpatrywać pod kątem diagnostyki uszkodzenia na trasie, to również można te urządzenia traktować jako system wieloelementowy z punktu widzenia testów diagnostycznych.

Ze względów optymalizacyjnych ważnym zagadnieniem jest wybór rodzaju testu diagnostycznego, od którego zależy czas znalezienia elementu uszkodzonego w zbiorze wieloelementowym.

Testy tego rodzaju można przeprowadzać między innymi następującymi metodami [8]:

- metodą kolejnych sprawdzeń nazywaną metodą „dziecięcą”. Zasada testowania tą metodą polega na weryfikowaniu kolejno hipotez o możliwych uszkodzonych elementach. Sprawdzenia dokonuje się do chwili pozytywnej weryfikacji jednej z hipotez lub negatywnej weryfikacji  $n - 1$  z  $n$  postawionych hipotez. W przypadku jeśli  $n - 1$  elementów jest sprawnych to przyczyną awarii musi być uszkodzenie nie sprawdzonego elementu. Dlatego też nie ma konieczności sprawdzania hipotezy o jego uszkodzeniu;
- metodą informacyjną polegającą na tym, że przy wyborze cech niezbędnych do rozpoznania stanu wykorzystuje się ilość informacji dostarczonej w trakcie danego badania przez każdy z parametrów  $y_i$ ;
- metodą kontroli grupowej dedykowaną głównie do badania obiektów złożonych, gdzie sprawdzenia dokonuje się na grupie elementów. Identyfikacji elementu uszkodzonego dokonuje się dzieląc zbiór elementów na dwie grupy elementów – zdatnych i niezdatnych. Poprzez kolejne iteracyjne podziały grup elementów dokonuje się wykrycia uszkodzonego elementu;
- metodą podziału połówkowego, zbliżoną do metody kontroli grupowej z tą różnicą, że stosowana jest dla zbioru elementów, dla których nieznane jest prawdopodobieństwo uszkodzenia. Metoda ta nie uwzględnia kosztów sprawdzeń, których liczba zależy od przypadku. Po podziale zbioru elementów na pół, dokonuje się sprawdzenia jednej z grup. Jeśli wszystkie elementy okażą się zdadne, dzieli się pozostałą grupę znowu na dwie równe grupy i sprawdza jedną z nich. Taki podział wraz ze sprawdzeniami prowadzony jest aż do znalezienia elementu uszkodzonego. W najlepszym przypadku element uszkodzony może zostać wykryty już w trakcie sprawdzeń pierwszej grupy podziału, a w najgorszym dopiero po sprawdzeniu wszystkich pozostałych elementów;
- metodą równych prawdopodobieństw, stosowaną dla zbiorów wieloelementowych, dla których znane są prawdopodobieństwa uszkodzeń poszczególnych elementów. Sprawdzenia dokonuje się analogicznie jak w przypadku metody podziału połówkowego z tą różnicą, iż podziału na grupy dokonuje się tak, aby sumy prawdopodobieństw uszkodzeń w grupach były sobie równe. Następnie algorytm sprawdzenia jest taki sam jak w metodzie podziału połówkowego;
- metodą algorytmów wykorzystujących teorię sieci Petriego, algorytmów genetycznych lub grupowania Gray’a [40, 55, 114, 118].

Wybór i zastosowanie rodzaju testu w trakcie diagnostyki poawaryjnej jest wynikiem strategii obsługi, standardów pracy obowiązujących w danym

przedsiębiorstwie oraz doświadczenia personelu odpowiedzialnego za obsługę diagnostyczną. Wraz ze wzrostem zakresu unifikacji procedur diagnostycznych danych urządzeń, zyskują na znaczeniu metody informacyjne oraz wykorzystujące rodzaje testów i narzędzi matematycznych wymienionych powyżej.

### 8.3. Optymalizacja procesu diagnostycznego

Omawiane obsługi i procesy diagnostyczne jak również testy poawaryjne można zoptymalizować ze względu na wymienione wcześniej kryteria. Dla celów optymalizacji diagnostyki można zastosować kilka ogólnych metod optymalizacyjnych wykorzystujących teorię statystyczno - probabilistyczną.

Dzięki metodzie maksymalnej ilości informacji można wyznaczyć minimalną liczbę sprawdzeń diagnostycznych oraz kolejność ich wykonywania. Przyjmując, że badany obiekt może znajdować się w jednym ze stanów  $S_i$  ze zbioru  $S$  oraz oznaczając przez  $p_i$  prawdopodobieństwo znalezienia się obiektu w stanie  $S_i$ , nieokreśloność stanu można wyrazić entropią<sup>1</sup>:

$$H(S_i) = - \sum_{i=1}^k p_i \log_2 p_i \quad (8.1)$$

gdzie:

- $S_i$  – jeden z możliwych stanów obiektu,  $S_i \in S$ ,
- $p_i$  – prawdopodobieństwo znalezienia się obiektu w stanie  $S_i$ ,
- $k$  – liczba sprawdzeń.

Entropię można interpretować jako niepewność wystąpienia danego zdarzenia elementarnego w następnej chwili, w tym przypadku znalezienia się w danym stanie  $S_i$ . W trakcie procesu diagnostycznego badana nieokreśloność stanu ulega stopniowemu zmniejszaniu dzięki badaniu poszczególnych cech  $y_i$  stanu obiektu, z których każda zawiera pewną ilość informacji  $I(y_i)$ . Informacje te można wyliczyć jako różnicę początkowej entropii stanu obiektu i entropii, jaka pozostaje po wybraniu cechy  $y_i$  do zbioru cech badanych:

$$I(y_i) = H(S_i) - H(S_i/y_i) \quad (8.2)$$

gdzie:

- $I(y_i)$  – informacja pozyskana w trakcie badania cechy  $y_i$ ,
- $H(S_i)$  – entropia stanu  $S_i$ ,
- $H(S_i/y_i)$  – średnia entropia warunkowa stanu  $S_i$ , pod warunkiem badania cechy  $y_i$ .

<sup>1</sup> def. średnia ilość informacji, przypadająca na znak symbolizujący zajście zdarzenia z pewnego zbioru

Dla entropii drugiego rzędu<sup>2</sup> występują tylko dwie możliwe wartości cech mierzonych. Oznaczając wyniki sprawdzeń cech odpowiednio  $y_i = 1$  jako  $k_j$  (wartość dopuszczalna) oraz  $y_i = 0$  jako  $k_n$  (wartość niedopuszczalna), wówczas można wyznaczyć sprawdzenie niosące maksymalną ilość informacji  $I(k)$  według zależności:

$$I(k) = p_i(k_j)H(k_j) + p_i(k_n)H(k_n) \quad (8.3)$$

gdzie:

- $k_j$  – wartość dopuszczalna badanej cechy,
- $k_n$  – wartość niedopuszczalna badanej cechy.

W celu optymalizacji procesu diagnostycznego na podstawie entropii należy w trakcie pomiarów określić niepewność metody oraz wyznaczyć liczbę i rodzaj sprawdzeń, na podstawie, których jest możliwe określenie prawdopodobieństwa przebywania urządzenia w danym stanie. W praktyce wymagałoby to porównania wyników klasyfikacji stanów technicznych na podstawie poszczególnych rodzajów badań, na przykład tak jak to zostało przedstawione w tabeli 7.1 przy jednoczesnym oznaczeniu dokładności klasyfikacji danym sprawdzeniem.

Inną metodą optymalizacji diagnostyki może być wybór sprawdzenia ze względu na maksimum skuteczności informacyjnej  $\eta_j$ , będącej stosunkiem pozyskanej informacji w trakcie obsługi diagnostycznej do jej kosztu:

$$\eta_j = \frac{I(k_j)}{c_j} \quad (8.4)$$

gdzie:

- $I(k_j)$  – informacja pozyskana w trakcie  $k_j$  sprawdzenia,
- $c_j$  – koszt obsługi diagnostycznej.

Ze względu na optymalizację liczby wykonywanych sprawdzeń diagnostycznych można stosować metodę „słabych ogniów”. Metoda ta opiera się na znajomości prawdopodobieństw warunkowych znalezienia się w danym stanie. Kolejność sprawdzeń wykonuje się według malejących prawdopodobieństw znalezienia się w danym stanie  $S_i$ :

$$p_i > p_{i-1} > \dots > p_1 \quad (8.5)$$

Podobne rezultaty można uzyskać za pomocą metody spadku skuteczności probabilistycznej, w której kryterium doboru sprawdzeń jest warunkowane wartością skuteczności probabilistycznej:

$$\eta_i > \eta_{i-1} > \dots > \eta_1 \quad (8.6)$$

---

<sup>2</sup> def. rząd entropii odpowiada liczbie wartości dopuszczalnych badanej cechy

Jako skuteczność probabilistyczną definiuje się zależność:

$$\eta_i = \frac{p_i}{t_i} \quad (8.7)$$

gdzie:

$p_i$  – prawdopodobieństwo znalezienia się w danym stanie,  
 $t_i$  – czas lokalizacji uszkodzenia.

Optymalizację metodą „słabych ogniw” oraz spadku skuteczności probabilistycznej można również przeprowadzić z wykorzystaniem modeli niezawodnościowych, przedstawionych w rozdziale 9.

Innym szerokim zagadnieniem optymalizacji diagnostyki jest minimalizacja jej kosztów.

## 8.4. Optymalizacja kosztów diagnostyki

Diagnostyka eksploatacyjna stanowi istotny element całościowego procesu eksploatacji, determinującym strategię eksploatacyjną realizowaną przez użytkowników obiektów elektroenergetycznych. Wpływ diagnostyki na wybór jednej ze strategii eksploatacji i obsługi urządzeń elektroenergetycznych został przedstawiony w rozdziale 4.

Po analizie praktykowanych procedur diagnostycznych przez operatora systemowego PSE<sup>3</sup>, zakłady energetyczne i spółki dystrybucyjne oraz zapoznaniu się z metodami oceny niezawodności obiektów w trakcie ich eksploatacji [71, 72, 73, 74, 83, 75, 81] można wskazać obszary, które mogą stanowić podstawę optymalizacji procesu diagnostycznego ze względu na zmniejszenie kosztów obsługi urządzenia lub utrzymania ich na dotychczasowym poziomie przy jednoczesnym zapewnieniu wysokiej niezawodności dostaw energii elektrycznej.

Wśród kosztów diagnostyki  $K_d$  urządzeń elektroenergetycznych wymieniane są koszty obsługi diagnostycznej oraz kosztów aparatury badawczej. Znajomość czasu obsługi pozwala na wyznaczenie kosztu diagnostyki jako sumy:

$$K_d = at + bK_{ap} \quad (8.8)$$

gdzie:

$a, b$  – współczynniki wagowe,  
 $t$  – czas obsługi,  
 $K_{ap}$  – koszt aparatury diagnostycznej.

Przy optymalizacji kosztów diagnostyki należy również uwzględnić koszty skutków awarii w postaci kosztów napraw  $K_a$ , niedostarczonej (więc nie-

<sup>3</sup> Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A.

sprzedanej) energii elektrycznej  $K_{nse}$  oraz kar wynikających z umów o dostawę energii elektrycznej  $K_u$  zawartych przez zakład energetyczny.

Ponieważ koszty wynikające z awarii są specyficzne dla poszczególnych urządzeń lub grup urządzeń, dlatego też zależności wyznaczające wielkość tych kosztów mogą być każdorazowo inne. Przykładowo dla linii kablowych można wyznaczyć koszty awarii według zależności przedstawionych w [44]:

$$f(K_a) = \frac{1}{\sqrt{2K_a\sigma}} \exp \left[ -\frac{(\log K_a - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (8.9)$$

gdzie:

$\sigma$  – parametr kształtu,  
 $\mu$  – parametr skali.

Natomiast koszt strat z powodu niesprzedanej energii jest iloczynem:

$$K_{nse} = E(nse)l_e \quad (8.10)$$

gdzie:

$E(nse)$  – wartość oczekiwana niedostarczonej energii elektrycznej,  
 $l_e$  – równoważnik niedostarczonej energii.

Koszt kar, które zakład energetyczny jest zobowiązany wypłacić odbiorcom energii elektrycznej jest wielkością zależną od czasu trwania przerwy w dostawie, wysokości kary w przeliczeniu na jednostkę czasu oraz prawdopodobieństwa ubiegania się o odszkodowanie przez odbiorców.

$$K_u = tw_t(t)p_o \quad (8.11)$$

gdzie:

$t$  – czas przerwy zasilania,  
 $w_t$  – wysokość kary zależnej od długości przerwy zasilania,  
 $p_o$  – prawdopodobieństwo wystąpienia odbiorcy o odszkodowanie.

W celu wyznaczenia powyższych wartości należy przyjąć pewne poziomy krytyczne prawdopodobieństw awarii lub niezawodności, których przekroczenie będzie wiązało się z dużym prawdopodobieństwem wystąpienia odbiorców o odszkodowanie za czas przerwy w zasilaniu. Pomimo iż proces degradacji stanu technicznego urządzenia jest procesem ciągłym w czasie oraz wypadkową wpływu wielu narażeń, dla celów obliczeniowych można go zdyskretyzować, tak aby przyjęte stany miały sens techniczny i ekonomiczny.

Podział ten w dużej mierze jest dokonywany w oparciu o doświadczenie zawodowe i „wycucie inżynierskie” zespołu opracowującego procedury diagnostyczne i analizującego otrzymane wyniki, jak również aktualną sytuację społeczną, polityczną i ekonomiczną.

Inaczej będą ustalane odpowiednie kryteria przez ten sam zespół ekspertów w warunkach niezadowolenia społecznego, a inaczej przy „normalnym” nasta-

wieniu społeczeństwa, które nie będzie wymagało nadzwyczajnego działania od energetyki w celu zapewnienia wyższej jakości energii elektrycznej.

Sens ekonomiczny brany pod uwagę przy ustalaniu poszczególnych poziomów badań i stanu układów izolacyjnych zależy w dużej mierze od kondycji finansowej danego przedsiębiorstwa, jak również gospodarki krajowej, z którą jest ono powiązane. Możliwości finansowe pozwalające na częstszą regenerację lub wymianę urządzeń mogą spowodować zawyżenie poziomów krytycznych.

Samo opracowanie statystyczne zgromadzonych danych często może ograniczyć się do wyznaczenia odpowiednich prawdopodobieństw przejść pomiędzy stanami, intensywności tych przejść, jak również prawdopodobieństwa przebywania w danym stanie w funkcji czasu.

Duże znaczenie pod względem optymalizacji kosztów i czasu oraz otrzymywanych wyników, jest dobór odpowiednich narzędzi i algorytmów postępowania przedstawionych w rozdziałach wcześniejszych.

Diagnostykę prowadzi się między innymi w celu predykcji chwili awarii i jej zapobiegnięciu. Wobec powyższego, koszty diagnostyki i budowy systemu diagnostycznego powinny być niższe niż poniesione na naprawę awarii i jej skutków. Oczywiście istnieją systemy, których niezawodność działania jest rozpatrywana ze względu na zagrożenia zdrowia i życia ludzkiego, bądź też ze względów strategicznych i wówczas zależność kosztów diagnostyki i awarii może być inna. W takich przypadkach dąży się również do minimalizacji kosztów diagnostyki, z tym wyjątkiem, że kryterium granicznym jest osiągnięty stopień niezawodnościowy systemu.

Konkluzją powyższych rozważań jest stwierdzenie, że istnieje pewne optimum zależności kosztów procesu diagnostyki od zakresu prowadzonych badań, przy jednoczesnym uwzględnieniu ewentualnych kosztów awarii. Analiza kosztów awarii oraz metody oceny pod względem ekonomicznym skutków zawodności systemów energetycznych zostały przedstawione w [96, 97]. Inny przykład wyznaczania optymalnej liczby obsługi urządzeń elektroenergetyczny ze względu na analizę strumieni uszkodzeń układów izolacyjnych, przy zastosowaniu narzędzi matematycznych, w tym sieci Petriego, przedstawiono w [16, 29].

## 8.5. Optymalizacja procedur diagnostycznych

Dokonany przegląd zagadnień dotyczących metod i budowy procesów diagnostycznych wskazuje, że istnieje możliwość optymalizacji w diagnostyce poprzez ograniczenie liczby i rodzajów sprawdzeń. Zwłaszcza w przypadku diagnostyki uszkodzeń nie wszystkie sprawdzenia muszą być wykonane dla pełnej identyfikacji stanu obiektu. Wykazano również, że dla tego samego urządzenia lub systemu można zastosować różne testy diagnostyczne zawierające zbiory różnych sprawdzeń, wykonanych często w różnej kolejności.

Metody optymalizacyjne proponowane powyżej opierają się na przyjętych kryteriach:

- minimalizacji kosztów,
- ograniczenia liczby sprawdzeń,
- minimalizacji czasu trwania badania diagnostycznego,
- pozyskania maksymalnej ilości informacji w trakcie badania,
- wyznaczenie maksymalnego prawdopodobieństwa wykrycia uszkodzenia przy ograniczonym koszcie badania diagnostycznego.

Klasyczne podejście do zagadnień niezawodności urządzeń elektroenergetycznych wskazuje zależności funkcyjne przyczyn i skutków awarii, jednak zwykle *post factum*. Dzięki informacjom uzyskanym z analizy niezawodnościowej można podejmować racjonalne decyzje dotyczące modernizacji lub wymiany urządzeń. Zastosowanie diagnostyki predykcyjnej opartej na analizie niezawodnościowej, wykorzystującej teorię procesów losowych Markowa, może dodatkowo stanowić podstawę planowania terminów prac remontowo – naprawczych oraz modernizacyjnych.

W dalszej części pracy zostaną przedstawione metody i modele diagnostyczne do identyfikacji stanu urządzenia przed awarią. Zostanie pokazana, z wykorzystaniem proponowanych narzędzi obliczeniowych, optymalizacja czasookresów badań i obsług diagnostycznych oraz możliwość analizy zmian stanów bez konieczności zwiększania liczby badań.

## 9. Modele diagnostyczne

### 9.1. Pojęcie ogólne modelu

Uwzględniając zagadnienia szeroko pojętej diagnostyki, jednym z podstawowych warunków poprawnej realizacji analizy diagnostycznej wykorzystującej symulacje matematyczne jest opracowanie, na podstawie informacji dotyczących procesu oraz warunków eksploatacji urządzenia, modelu umożliwiającego rozwiązanie danego problemu [65].

Model w znaczeniu ogólnym, stanowi reprezentację wiedzy o badanym obiekcie – urządzeniu, która może być kształtowana kilkoma sposobami.

W literaturze można spotkać, wśród wielu różnych, następujące definicje modeli:

- przez model rozumie się taki dający się wyobrazić lub materialnie zrealizować układ, który odzwierciedlając lub odtwarzając przedmiot badania zdolny jest zastępować go tak, że jego badanie dostarcza nowej wiedzy o tym przedmiocie [7],
- narzędzie, za pomocą którego można opisać system i jego zachowanie się w różnych warunkach zewnętrznych [8],
- teoretyczny opis analizowanego obiektu, charakteryzujący się następującymi cechami [5]:
  - uproszczeniem rzeczywistości,
  - zbieżnością z rzeczywistością w sensie przyjętych kryteriów,
  - prostotą umożliwiającą jego analizę dostępnymi metodami obliczeniowymi,
  - jest źródłem informacji o obiekcie badań.

Na tej podstawie można przyjąć definicję modelu jako wyobrażenia – obrazu zastępującego rzeczywisty obiekt, odzwierciedlającego właściwości badanego urządzenia oraz jego budowę. Z założenia jest on pewnym uproszczeniem lub idealizacją rzeczywistości. Sformalizowany, matematyczny opis badanego obiektu ustala dokładnie strukturę, skład, elementy wejściowe i reguły przekształcania sygnałów wejściowych w wyjściowe.

Proces modelowania może dotyczyć pewnego wydzielonego obszaru rzeczywistości, w tym przypadku urządzeń elektroenergetycznych, który można

określić mianem systemu. System natomiast można zdefiniować jako celowo wyodrębnioną zbiorowość elementów powiązanych zależnościami funkcyjnymi lub oddziaływaniami, czyli układ elementów mający określoną strukturę i stanowiący logicznie uporządkowaną całość. Dlatego też elektroenergetyczne linie napowietrzne lub kablowe można traktować w procesie modelowania jako systemy. Aktualnie modele matematyczne są wykorzystywane coraz częściej do symulacji komputerowych w diagnostyce predykcyjnej [46].

## 9.2. Proces i kryteria modelowania

### 9.2.1. Klasyfikacja modeli

Tworzenie modelu badanego urządzenia należy rozpocząć od określenia celu modelowania, wymagań oraz środków potrzebnych do budowy danego modelu. Z powyższych założeń można ustalić postać tworzonego modelu.

Są dwie podstawowe klasy modeli:

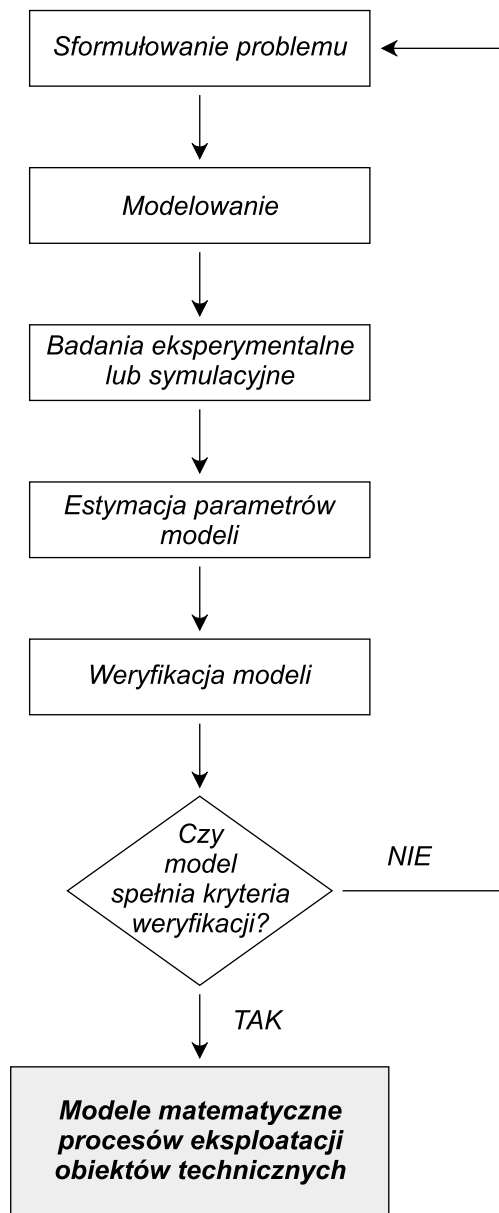
1. modele strukturalne, które odzwierciedlają elementy systemu i relacje między nimi, na przykład modele struktur niezawodnościowych,
2. modele funkcjonalne, które odzwierciedlają wpływy elementów systemu i relacji między nimi na sposób funkcjonowania i realizacji systemu (modele wielostanowe procesów eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych).

Modele można klasyfikować również według innych kryteriów. Biorąc pod uwagę budowę modelu, a dokładniej sposoby odzwierciedlania właściwości, procesów i związków zachodzących w analizowanym systemie – urządzeniu, a także celowość tych badań, modele można podzielić na cztery klasy:

1. modele materialne (rzeczywiste) wykonywane z reguły w celu przeprowadzenia badań;
2. modele idealne niepodobne do badanego systemu ani pod względem fizycznym, ani geometrycznym;
3. modele sformalizowane jeszcze bardziej abstrakcyjna reprezentacja modeli fizycznych (materialnych, idealnych). Tworzy się je wtedy, gdy pojęcia występujące w modelach fizycznych da się wyrazić za pomocą relacji matematyczno - logicznych. Model tego typu nie jest modelem poglądowym, a jedynie umownym. Modele sformalizowane nazywane są najczęściej modelami matematycznymi, a najczęstszą formą zapisywania ich są równania różniczkowe i całkowe. Analiza modeli matematycznych pozwala uzyskać ważne informacje o systemie, nieodzowne dla eksploatacji;
4. modele energetyczne od niedawna uznawane jako oddzielna klasa, ze względu na „materiał”, z którego są wykonywane. Budowane są w oparciu o zmiany energetyczne zachodzące w systemie. Modele te są coraz częściej stosowane ze względu na bardzo duże możliwości przy stosunkowo niskich kosztach.

### 9.2.2. Proces formułowania modelu matematycznego

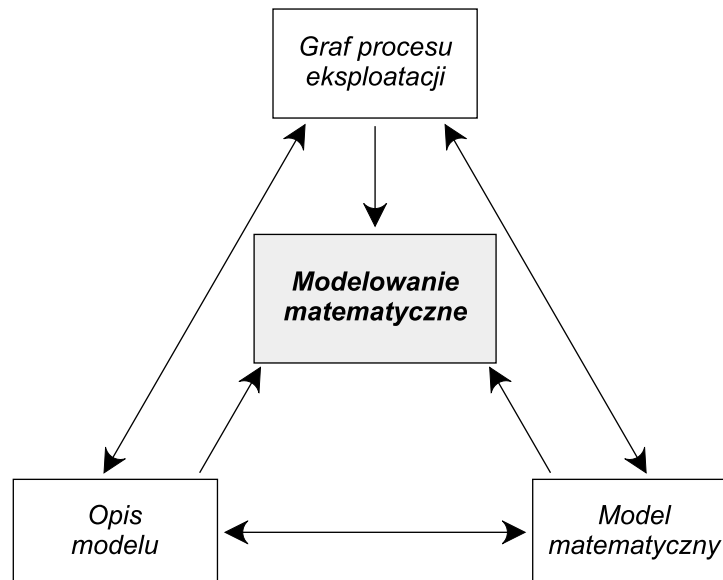
Proces ogólnego formułowania modelu matematycznego procesu eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych, uwzględniający wymienione powyżej założenia modelowania, można podzielić na kilka etapów, zgodnie z algorytmem przedstawionym na rysunku 9.1.



**Rys. 9.1.** Proces budowy modeli matematycznych procesów eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych

Podczas prowadzenia badań w oparciu o modele matematyczne ważne jest ustalenie struktury modelu najlepiej opisującej rzeczywiste zmiany badanego

urządzenia. Dla tego celu można w procesie modelowania wyodrębnić trzy elementy składowe wzajemnie zależne (rys. 9.2).



**Rys. 9.2.** Elementy składowe etapu modelowania procesu eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych [42]

W trakcie opisu założeń niezbędnych do sformułowania modelu procesu eksploatacji danego urządzenia należy zwrócić uwagę na: określenie stanu technicznego obiektu, opis procesu zmian stanów technicznych, proces zmian stanów eksploatacyjnych, model procesu eksploatacji obiektów.

Stan urządzenia wynika z jego przeszłości, a jego znajomość niezbędna jest do ustalenia zachowania się obiektu w przyszłości. Stan urządzeń elektroenergetycznych jest uwarunkowany czynnikami konstrukcyjnymi, technologicznymi oraz montażowymi. W procesie eksploatacji działają czynniki zarówno zewnętrzne, jak i wewnętrzne, mające charakter losowy. Dlatego też właśnie cechy opisujące właściwości obiektów w danej chwili mają również charakter losowy. Na tej podstawie można wnioskować, że urządzenia, które pracowały ten sam okres czasu mogą znajdować się w skrajnie różnych stanach technicznych. Każde urządzenie funkcjonuje w danym czasie  $t \in T$ . Natomiast zbiór  $T$  czasów eksploatacji może być:

- podzbiorem pewnego przedziału osi liczbowej (czas ciągły),
- podzbiorem dyskretno - ciągłym,
- podzbiorem przeliczalnym (czas dyskretny).

Aby przedstawić kolejność zdarzeń i wzajemne relacje między nimi, dla konstruowanych modeli, stosuje się grafy i schematy blokowe. Są one bardzo wygodne w czasie prac na modelach fizycznych i matematycznych. Uwidaczniają zależności i związki między podukładami stanowiącymi składowe danego systemu, uwydatniają opis działania, kolejność przyczyn i skutków.

Przy pewnych uproszczeniach stan techniczny urządzenia można traktować jako zbiór niezależnych i zupełnych (zawierających conajmniej jedną wartość cechy stanu) wartości cech stanu w danej chwili  $t$ .

Prognozowanie zachowania się obiektu w przyszłości jest oparte na analizie jego zachowania, lub obiektów podobnych, w przeszłości. Najczęściej spotykanym modelem matematycznym obiektu jest skończony ciąg liczb informujący o wartościach liczbowych (w odpowiednich jednostkach) jego cech mierzalnych lub o występowaniu albo niewystępowaniu określonych cech niemierzalnych.

Przykładem może być model matematyczny urządzenia elektroenergetycznego, którego stan fizyczny może być określony  $n$ -wymiarowym wektorem o składowych wyrażających takie  $N$ -cech mierzalnych, jak np. admitancja lub rezystancja izolacji.

$$Y(t) = [y_1, y_2, \dots, y_n, \dots, y_n]^T \quad (9.1)$$

Wektor  $Y(t)$  jest wynikiem pomiaru stanu izolacji. Funkcja wektorowa  $Y(t)$  określa w każdej chwili  $t$  stan fizyczny izolacji. W różnych chwilach stan ten na ogół jest różny. W związku z możliwościami zmian stanu fizycznego, obiekt może wykonywać postawione mu zadanie lepiej lub gorzej, a nawet nie wykonywać go wcale. Różnym stanom fizycznym obiektu odpowiadają różne stany niezawodnościowe  $X(t)$ .

Jako wynik pomiarów w danej chwili  $t_0$ , stan  $Y(t_0)$  jest zdarzeniem elementarnym w nieskończonej przestrzeni możliwych stanów izolacji:

$$Y(t_0) \in \Omega_y^N \quad (9.2)$$

Zmienna  $X(t_0)$ , nazywana stanem niezawodnościowym obiektu wskazuje poziom narażeń – prawdopodobieństwo awarii pod wpływem danych narażeń. Zmienna ta jest klasyfikacją przeprowadzoną w skończonej przestrzeni stanów niezawodnościowych  $\Omega$ :

$$\Omega_x^I = \{X_0, X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_I\}. \quad (9.3)$$

W najprostszym ujęciu można rozróżnić dwa stany niezawodnościowe – zdadności  $X_0$  i niezdadności  $X_1$ , będący dopełnieniem stanu zdadności. Zakłada się, iż część wspólna obszarów zdadności i niezdadności jest zbiorem pustym, a realizacja procesu opisującego zmiany między tymi stanami właściwości fizycznych rozpatrywanego obiektu następuje w bardzo krótkim czasie, bliskim zeru ( $t \rightarrow 0$ ).

### 9.3. Modele struktur niezawodnościowych

Urządzenie elektryczne jako obiekt niezawodnościowy można traktować (w zależności od sytuacji) jako element lub system złożony z określonej liczby elementów. Analiza niezawodności urządzenia traktowanego jako element jest stosunkowo prosta, a wskaźniki niezawodności dobrane i oszacowane we właściwy sposób są szczególnie ważne dla użytkownika tych urządzeń oraz projektanta systemów złożonych z określonej liczby takich urządzeń.

Na etapie konstruowania urządzenia należy przeprowadzić analizę niezawodnościowo - konstrukcyjną. Urządzenie musi być wówczas traktowane jak system. Jednakże nawet pełna znajomość niezawodności wszystkich elementów składowych systemu nie wystarczy do oceny jego niezawodności. Istnieją, bowiem wzajemne oddziaływania (wpływy) elementów podczas pracy urządzenia. Oddziaływanie to jest często wielopłaszczyznowe, a przez to trudne do uwzględnienia.

Współdziałanie wielu elementów urządzenia lub kilku urządzeń traktowanych jako zbiór obiektów określane jest mianem struktury niezawodnościowej [73, 78]. W zależności od budowy tej struktury wyznaczana jest niezawodność całego systemu. Struktura niezawodnościowa obiektu pełni istotną rolę w teorii niezawodności systemów. Wśród podstawowych struktur niezawodnościowych można wymienić strukturę szeregową, równoległą oraz progową typu „ $k$  z  $n$ ”.

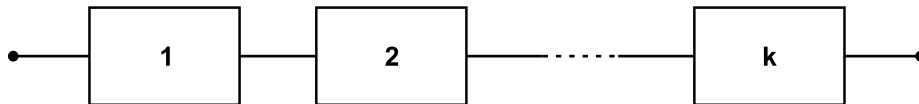
#### Struktura szeregową

Idea modelu systemu o szeregowej strukturze niezawodnościowej została przedstawiona na rysunku 9.3. Funkcja niezawodności  $R_s(t)$  urządzenia dla modelu o  $k$ -elementach (przy założeniu, że zmienne losowe  $T_i$  są wzajemnie niezależne) jest równa [94]:

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^k P(T_i > t) = \prod_{i=1}^k R_i(t) \quad (9.4)$$

gdzie:

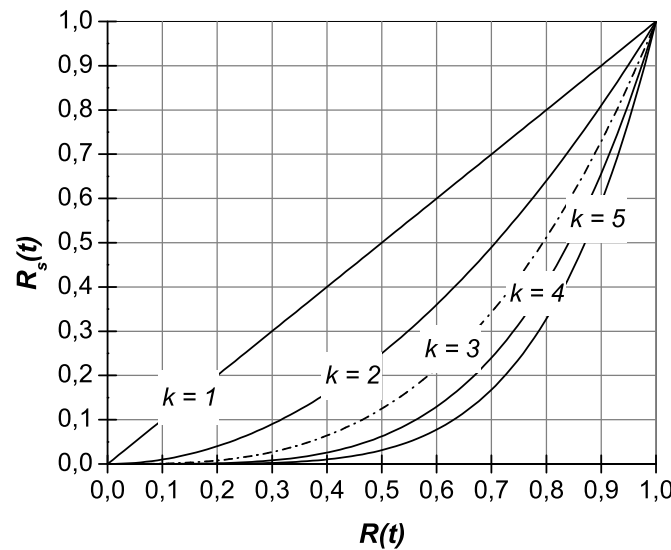
$R_i(t)$  – funkcja niezawodności  $i$ -tego elementu.



**Rys. 9.3.** Schemat blokowy szeregowej struktury niezawodnościowej  $k$  - elementowej

Z zależności (9.4) wynika, że im większa jest liczba elementów składających się na urządzenie (system) o strukturze niezawodnościowej szeregowej, tym

mniejszy wpływ na niezawodność urządzenia ma niezawodność elementu „słabego” lub „mocnego” – niezawodność maleje szybko wraz ze wzrostem liczby elementów. Zmiana niezawodności systemu w zależności od liczby elementów została przedstawiona na wykresie 9.4. Zwiększenie niezawodności takiej struktury wymaga poprawy niezawodności wszystkich elementów.



**Rys. 9.4.** Wykresy funkcji niezawodności szeregowej struktury niezawodnościowej  $k$  - elementowej; poziom niezawodności poszczególnych elementów  $R_i(t)$  jest taki sam

### Struktura równoległa

W przypadku struktury równoległej schemat blokowy został przedstawiony na rysunku 9.5, natomiast funkcja niezawodności  $R_r(t)$  przyjmuje postać [94]:

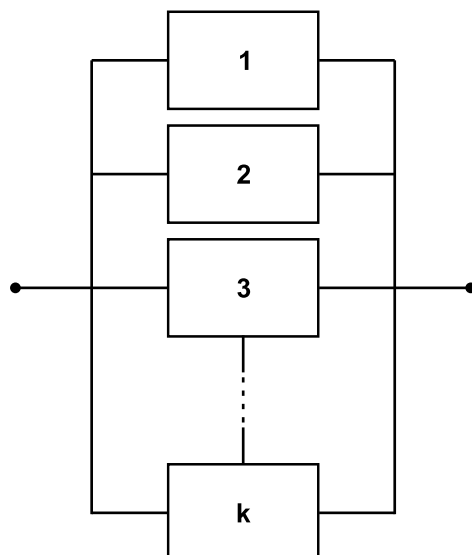
$$R_r(t) = 1 - \prod_{i=1}^k P(T_i > t) = 1 - \prod_{i=1}^k [1 - R_i(t)] \quad (9.5)$$

gdzie:

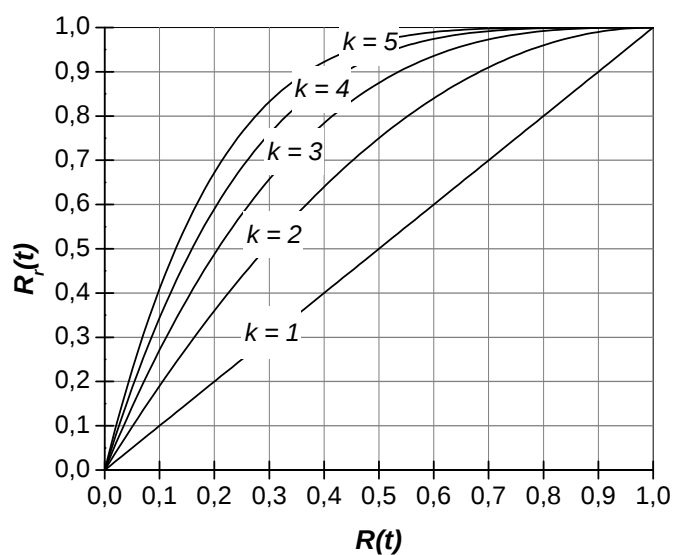
$R_i(t)$  – funkcja niezawodności  $i$ -tego elementu.

Dla urządzenia o strukturze niezawodnościowej równoległej łatwo jest uzyskać wymaganą wartość funkcji niezawodności  $R_r(t)$ , nawet w przypadku urządzeń o względnie małej wartości funkcji niezawodności  $R_i(t)$ . Jest to układ

o wysokim stopniu niezawodności, którego zmiana funkcji niezawodności została przedstawiona na wykresie 9.6.



**Rys. 9.5.** Schemat blokowy równoległej struktury niezawodnościowej  $k$  - elementowej



**Rys. 9.6.** Funkcja niezawodności równoległej struktury niezawodnościowej;  $k$  – liczba elementów systemu



Wówczas mając do czynienia ze strukturą równoległą (w tym także progową) niezawodność  $k$  elementów z  $n$  wyznacza się z zależności:

$$R_s(t) = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i} \quad (9.7)$$

gdzie:

$p = e^{-\lambda t}$  – prawdopodobieństwo przebywania w pojedynczym stanie,  
 $\lambda$  – intensywność uszkodzenia pojedynczego elementu,  
 $\mu$  – intensywność odnowy pojedynczego elementu.

Natomiast czas MTTF dla tej samej struktury wyznacza się zgodnie z zależnością:

$$\text{MTTF} = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=k}^n \frac{1}{i} \quad \text{dla } 1 \leq k \leq n \quad (9.8)$$

### 9.3.1. Rozwój diagnostyki w oparciu o modele struktury niezawodnościowej

Rozwój diagnostyki według modelu związany jest z rozwojem komputerowych metod obliczeniowych i inżynierii oprogramowania. Tradycyjne (klasyczne) modele struktur niezawodnościowych służące do wyznaczania niezawodności systemów lub obiektów wieloelementowych mogą służyć do analizy diagnostycznej mającej na celu wyznaczenie maksymalnego czasu pracy badanego obiektu do chwili osiągnięcia przyjętej wartości krytycznej prawdopodobieństwa awarii (uszkodzenia). Znajomość struktury niezawodnościowej obiektu oraz prawdopodobieństw awarii poszczególnych elementów składowych pozwala w razie uszkodzenia na wybór jednej z metod diagnostyki poawaryjnej przedstawionych w rozdziale 8.

Struktura progowa typu „ $k$  z  $n$ ” wskazuje możliwość zastosowania teorii procesów losowych Markowa do analizy diagnostycznej również w tego typu modelach matematycznych. Struktura ta jest przykładem systemu redundancyjnego w celu zwiększenia niezawodności poprzez zwiększenie liczby elementów i ich wzajemne rezerwowanie.

Ponadto analiza struktury niezawodnościowej może stanowić podstawę do analizy procesów zmian stanów układu i budowy modelu odzwierciedlającego ten proces. Diagnostyka bazująca na modelu badanego systemu stara się wyznaczyć relacje pomiędzy defektami i ich symptomami. Zastosowanie narzędzi matematycznych w diagnostyce tego typu pozwala na opracowywanie modeli samouczących się, które w oparciu o systemy CAD<sup>2</sup>, CAM<sup>3</sup> i CAE<sup>4</sup> wykorzystywane są w tworzeniu baz wiedzy systemów ekspertowych.

<sup>2</sup> ang. *Computer Aided Design*

<sup>3</sup> ang. *Computer Aided Manufacturing*

<sup>4</sup> ang. *Computer Aided Engineering*

## 9.4. Model dwustanowy urządzenia

W literaturze przedmiotu dotyczącej niezawodności i analizy diagnostycznej procesu eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych zastosowanie teorii procesów losowych Markowa przedstawiane jest na przykładzie prostego modelu dwustanowego [48]. Model ten, chociaż prosty w swej budowie, pozwala dokładnie przekazać ideę i możliwości stosowania teorii procesów losowych Markowa dla potrzeb modelowania procesów eksploatacyjnych urządzeń elektrycznych. Metodę formułowania takiego modelu w postaci dyskretnego procesu losowego przedstawiono poniżej na przykładzie elektroenergetycznej linii kablowej SN.

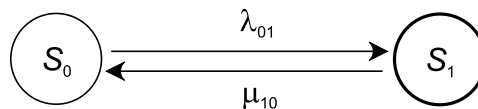
### Model matematyczny

Przykładowo, elektroenergetyczna linia kablowa, jako obiekt modelowany, może znajdować się w dwóch stanch:  $S_0$  lub  $S_1$  – (w sposób losowy). Jako stan  $S_0$  określa się stan normalnej pracy, z którego może nastąpić przejście w wyniku uszkodzenia jednego z elementów linii w stan awarii  $S_1$ .

Przejście pomiędzy stanami, wynikające z charakteru oraz przyczyn uszkodzeń i awarii linii jest całkowicie losowe. W związku z powyższym można stwierdzić, że dla modelowanego procesu przyjmuje się dwuelementową przestrzeń stanów  $X_t$ . Ponieważ zmiana może nastąpić w dowolnej chwili  $t$ , jako zbiór chwil przyjmuje się przedział ciągły czasu  $T$  taki, że  $t \in T$ .

Zmiana stanu  $S_0$  na stan awarii  $S_1$  następuje z intensywnością uszkodzeń  $\lambda$ . Natomiast odwrotny kierunek zmian – odnowy – zachodzi z intensywnością odnowień  $\mu$ .

Graf procesu został przedstawiony na rysunku 9.8.



**Rys. 9.8.** Graf procesu dwustanowego z odnową

Jeśli do powyższych założeń zostanie dodane następne, określające że prawdopodobieństwo przejścia zależy tylko od stanu wyjściowego, a nie od czasu kiedy takie przejście ma nastąpić, to można rozpatrywać opisany model matematyczny jako *dyskretny proces Markowa* [5, 18].

Dla przedstawionego grafu stanów (rys. 9.8) można oszacować prawdopodobieństwo znalezienia się układu w jednym ze stanów w czasie  $t$  odpowiednio  $p_0(t)$  oraz  $p_1(t)$  dla stanów  $S_0$  i  $S_1$ .

Pierwszy przypadek dotyczy stanu  $S_0$ , w którym układ może przebywać po czasie  $\Delta t$  w wyniku zmian stanów procesu mogących przebiegać dwoma wariantami:

**Wariant pierwszy** – w chwili  $t$  układ znajdował się w stanie  $S_0$  i w nim pozostał po czasie  $\Delta t$ . Prawdopodobieństwo tego wariantu jest równe iloczynowi prawdopodobieństwa znajdowania się układu w stanie  $S_0$  w chwili  $t$  oraz prawdopodobieństwa warunkowego, że układ pozostał (nie zmienił się) w stanie  $S_0$  równym  $1 - \lambda\Delta t$ , czyli:

$$p_0^i(t + \Delta t) = p_0(1 - \lambda\Delta t) \quad (9.9)$$

**Wariant drugi** – w chwili  $t$  układ znajdował się w stanie  $S_1$  i przeszedł do stanu  $S_0$  w czasie  $\Delta t$ . Analogicznie prawdopodobieństwo zaistnienia tego wariantu jest iloczynem:

$$p_0^{ii}(t + \Delta t) = p_1\mu\Delta t \quad (9.10)$$

Ostatecznie szukane prawdopodobieństwo  $p_0(t + \Delta t)$  jest sumą (9.9) oraz (9.10):

$$p_0(t + \Delta t) = p_0^i(t + \Delta t) + p_0^{ii}(t + \Delta t) = p_0(1 - \lambda\Delta t) + p_1\mu\Delta t \quad (9.11)$$

Otrzymane równanie można przekształcić do postaci:

$$\frac{p_0(t + \Delta t) - p_0}{\Delta t} = -\lambda p_0 + \mu p_1 \quad (9.12)$$

W przypadku, gdy  $\Delta t \rightarrow 0$  postać równania (9.12) przekształca się w równanie różniczkowe:

$$p_0'(t) = -\lambda p_0 + \mu p_1 \quad (9.13)$$

Analogicznie do przedstawionych obliczeń, można wyznaczyć funkcję prawdopodobieństwa przebywania układu w stanie  $S_1$  w chwili  $t$ . Równie określające to prawdopodobieństwo ma postać:

$$p_1'(t) = \lambda p_0 - \mu p_1 \quad (9.14)$$

W celu znalezienia rozwiązania układu równań (9.13), (9.14), należy określić warunki początkowe układu. Jeśli wyjściowym stanem układu będzie  $S_0$ , to warunki początkowe będą miały następującą postać:

$$p_0(0) = 1, \quad p_1(0) = 0 \quad (9.15)$$

Dla przyjętych założeń oraz warunków początkowych, funkcje prawdopodobieństwa przebywania układu w jednym ze stanów w chwili  $t$  są następujące:

$$p_0(t) = \frac{\mu + \lambda e^{-(\lambda+\mu)t}}{\lambda + \mu} \quad (9.16)$$

$$p_1(t) = \frac{\lambda + \lambda e^{-(\lambda+\mu)t}}{\lambda + \mu} \quad (9.17)$$

Otrzymane funkcje prawdopodobieństw mają charakter funkcji wykładniczych, o stałej czasowej  $1/(\lambda + \mu)$ . Ponadto można zauważyć, iż prawdopodobieństwa te dopełniają się wzajemnie  $p_0(t) + p_1(t) = 1$ .

Dla dostatecznie długiego czasu  $t \rightarrow \infty$  można wyznaczyć wartości ustalone prawdopodobieństw [14]:

$$p_0(t \rightarrow \infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} p_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (9.18)$$

$$p_1(t \rightarrow \infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} p_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (9.19)$$

## 9.5. Dyspozycyjność obiektu

Możliwości zastosowania dwustanowego modelu dyskretnego procesu Markowa można przedstawić na przykładzie oceny odnowień w zależności od intensywności uszkodzeń elektroenergetycznej sieci kablowej 15 kV.

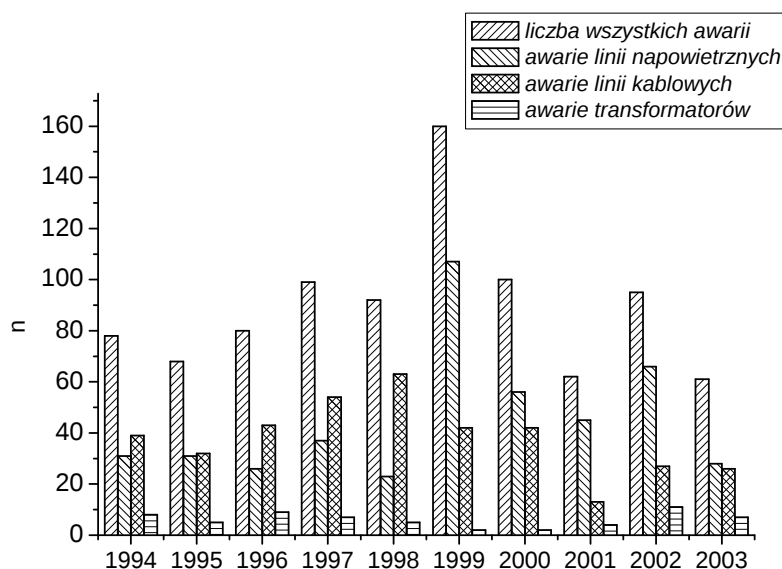
Znając histogram awaryjności dla badanego obiektu można wyznaczyć intensywność uszkodzeń  $\lambda$ . Dla celów obliczeniowych przyjęto dane o awaryjność urządzeń elektroenergetycznych w jednym z rejonów zakładu energetycznego południowej Polski w latach 1994 - 2003 (rys. 9.9).

Wskaźniki awaryjności linii:

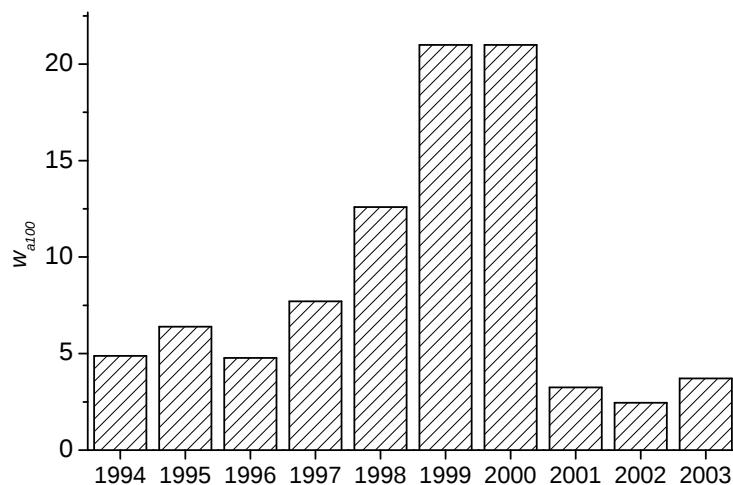
$$w_{a100} = \frac{i_r}{l_c} 100 \left[ \frac{1}{100 \text{ km rok}} \right] \quad (9.20)$$

gdzie:

$i_r$  – liczba awarii w roku [1/rok],  
 $l_c$  – długość całkowita linii [km].



**Rys. 9.9.** Awaryjność urządzeń SN dla regionu energetycznego w latach 1994 - 2003



**Rys. 9.10.** Wskaźnik awaryjności linii kablowej SN

dla rozpatrywanej sieci kablowej w kolejnych latach kształtował się zgodnie z wykresem 9.10. Aproksymując histogram wskaźnika awaryjności, najlepsze dopasowanie uzyskano za pomocą rozkładu gamma, dla którego wartość oczekiwana dla badanego okresu wynosi  $E(w_{a100}) = 5,8621$  awarii na rok/100km. Ponieważ prowadzone obliczenia mają charakter poglądowy, dla uproszczenia pominięto zmienność awarii.

Na podstawie otrzymanej wartości oczekiwanej  $E(w_{a100})$  przyjęto intensywność przejść ze stanu zdatności do stanu uszkodzenia na poziomie  $\lambda = 0,01606 \text{ [doba}^{-1}\text{]}$  na 100 kilometrów linii.

Liczba odnowień profilaktycznych jest zależna od wyniku i częstotliwości kontroli stanu technicznego linii. Przyjmuje się, że częstość takich działań jest raz na rok. Jeśli w chwili oględzin stan któregoś z elementów linii jest niezadowolający lub uległ on uszkodzeniu, a nie wywołało to jeszcze awarii linii, to następuje jego odnowa lub wymiana. Jest to działanie prewencyjne, zapobiegające wystąpieniu awarii.

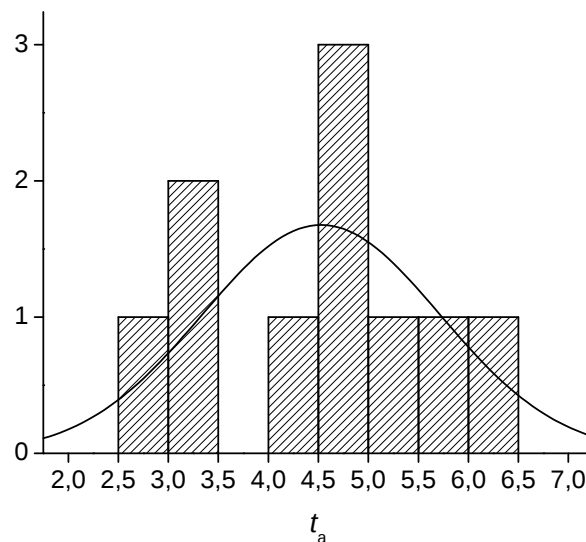
Wykorzystując przedstawiony model można wyznaczyć prawdopodobieństwo, iż w trakcie oględzin można trafić na stan kiedy element linii jest uszkodzony, a nie nastąpiła jeszcze awaria. Prawdopodobieństwo odnowy profilaktycznej jest równe:

$$P_{odn} = tp_1(t) \quad (9.21)$$

gdzie:

$p_1(t)$  – prawdopodobieństwo przebywania w stanie  $S_1$  (9.17) podczas kontroli.

Intensywność przejść (odnowa) pomiędzy stanem uszkodzenia  $S_1$  a stanem zdatności  $S_0$  jest wynikiem czasu potrzebnego na usunięcie skutków awarii urządzenia. Rozkład średniego czasu usunięcia skutków awarii dla opisywanego rejonu został przedstawiony na wykresie 9.11.



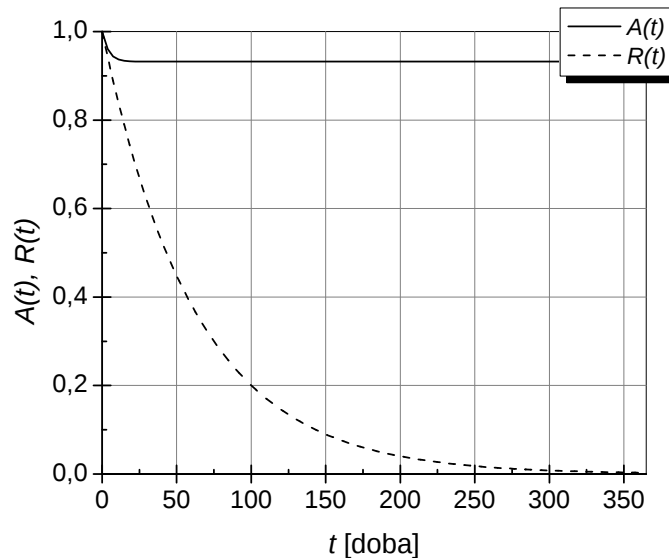
**Rys. 9.11.** Histogram średniego czasu usunięcia skutków awarii  $t_a$  aproksymowany rozkładem normalnym  $N(4,5276; 1,1934)$

Funkcja niezawodności  $R(t)$  rozpatrywanego obiektu nie uwzględnia intensywności odnowy, w związku z czym jej postać jest następująca:

$$R(t) = e^{(-0,01606 \cdot t)} \quad (9.22)$$

Natomiast dyspozycyjność  $A(t)$  analizowanej sieci kablowej jest równa prawdopodobieństwu przebywania obiektu w stanie  $S_0$ , stąd:

$$A(t) = p_0(t) = \frac{0,2212}{0,2373} + \frac{0,01606}{0,2373} \cdot e^{(-0,2373 \cdot t)} \quad (9.23)$$



**Rys. 9.12.** Funkcja niezawodności  $R(t)$  i dyspozycyjności  $A(t)$  dla modelu dwustanowego linii kablowej

Porównanie wykresów funkcji  $R(t)$  oraz  $A(t)$  dla okresu 1 roku przy założeniu, iż wyjściowym stanem był stan  $S_0$ , zostało przedstawione na rysunku 9.12.

Proces eksploatacji elektroenergetycznych linii kablowych, ze względu na właściwości układu izolacyjnego, również może być poddany analizie diagnostycznej z wykorzystaniem modelu matematycznego opartego na teorii procesów losowych Markowa. Model ten może być jednak rozbudowany o stany pośrednie.

Analiza strumienia uszkodzeń i odnowień dla układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych na przykładzie linii kablowej został przedstawiony między innymi w [28].

## 9.6. Model trójstanowy

Omawiany powyżej model obejmował tylko dwa stany dopuszczalne, natomiast proponowany model pokazuje możliwości aplikacji teorii łańcuchów losowych Markowa do oceny prawdopodobieństwa uszkodzenia kabli w funkcji czasu. W szczególności dotyczy to układów izolacyjnych kabli elektroenergetycznych, który ulega procesom nieodwracalnej degradacji, w wyniku narażeń różnorodnych narażeń w trakcie czasu procesu eksploatacji.

Kabel w trakcie okresu pomiędzy badaniami może znaleźć się w stanie pogorszonego stanu układu izolacyjnego, ale jednocześnie spełniać dalej swoje zadania eksploatacyjne. Jednak przejście z poziomu gorszego stanu układu izolacyjnego do stanu uszkodzenia/awarii jest bardziej prawdopodobne niż przejście bezpośrednio ze stanu „normalnego”. Założenia przyjęte dla poniższego modelu matematycznego są następujące:

1. Układ może znaleźć się w jednym z trzech stanów:
  - $S_0$  – stan „normalny” - pozytywna ocena w trakcie badań eksploatacyjnych i dopuszczenie linii do dalszej eksploatacji,
  - $S_1$  – stan przejściowy - obniżona wytrzymałość izolacji, która została zidentyfikowana w okresie pomiędzy badaniami i klasyfikuje kabel do wymiany,
  - $S_2$  – uszkodzenie izolacji kabla, będące przyczyną awarii i wymiany poawaryjnej uszkodzonego odcinka.
2. Przejście pomiędzy stanami ma charakter skokowy i jest inicjowane czynnikami pojawiającymi się losowo, niezależnie od czasu.
3. Proces losowy zmian stanu układu ma charakter stacjonarny.
4. Zbiór chwil czasu  $T$  jest zbiorem dyskretnym.

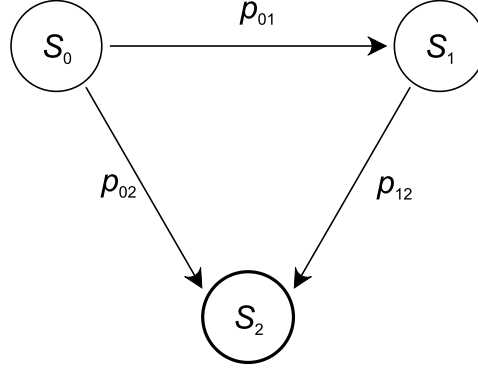
Układ izolacyjny podlega nieodwracalnym procesom degradacji, co prowadzi nieuchronie do jego uszkodzenia. Uszkodzenie może nastąpić zarówno w chwili, gdy układ znajduje się w stanie  $S_0$ , jak również w stanie  $S_1$ . Graf opisanego procesu został przedstawiony na rysunku 9.13.

Prawdopodobieństwa przejść  $p_{ij}$  pomiędzy stanami  $i, j \in \{0, 1, 2\}$  przyjmują wartości stałe, warunkujące stacjonarność procesu.

Przyjęty proces jest rozpatrywany w oparciu o teorię łańcuchów losowych Markowa. Dla łańcucha losowego zbiór stanów procesów  $S$  i odpowiadających im zmiennych losowych  $X$  jest przeliczalny i w rozważanym przypadku zawiera trzy możliwe zdarzenia elementarne. Ponadto zbiór chwil czasu, którym przyporządkowane są zmienne losowe, jest również dyskretny.

Przy przyjętych założeniach przyjęty model procesu losowego spełnia warunek Markowa, który w przypadku łańcucha losowego przyjmuje postać (7.4).

Warunek Markowa gwarantuje, że dla danego łańcucha stochastycznego, przyszłość jest niezależna od przeszłości przy danej teraźniejszości.



**Rys. 9.13.** Graf modelu trójstanowego dla łańcucha losowego

Podstawowym elementem opisu stanu obiektu jest macierz prawdopodobieństw przejść  $\mathbf{P}$ . Wiersze macierzy stanowią prawdopodobieństwa przejść  $p_{ij}^{(n)}$  pomiędzy stanami  $i$  i  $j$  w  $n$ -tym kroku, gdzie  $i$  jest stanem wyjściowym a  $j$  stanem docelowym. Dla  $i = j$  określa się prawdopodobieństwo pozostania w stanie wyjściowym. W przypadku jednorodnego łańcucha Markowa, prawdopodobieństwo przejścia nie zależy od numeru  $n$  kroku i określane jest jako  $p_{ij}$ .

Jeśli liczba stanów jest skończona oraz jeśli istnieją wartości graniczne prawdopodobieństw przejść

$$p_j = \lim_{n \rightarrow \infty} p_{ij}(n), \quad j = 1, \dots, N, \quad \sum_{j=1}^N p_j = 1 \quad (9.24)$$

i są niezależne od  $i$ , to można wyznaczyć prawdopodobieństwo przebywania w poszczególnych stanach po dostatecznej dużej liczbie kroków.

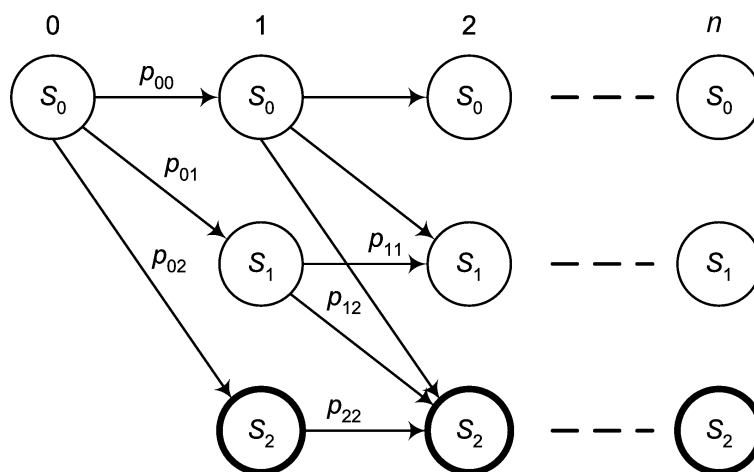
Rozkład zmiennej losowej  $X_n$  – prawdopodobieństwo przejść pomiędzy stanami w  $n$ -krokach, można wyznaczyć na podstawie zależności (7.8):

$$\mathbf{p}_n = \mathbf{p}_0 \mathbf{P}^n \quad (9.25)$$

Dla przyjętego grafu (rys. 9.13) i zgodnie z przyjętymi oznaczeniami, macierz przejść pomiędzy stanami w jednym kroku jest następująca:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} & p_{02} \\ 0 & p_{11} & p_{12} \\ 0 & 0 & p_{22} \end{bmatrix} \quad (9.26)$$

Realizacja procesu, przy stanie początkowym  $S_0$  może przebiegać zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 9.14.



**Rys. 9.14.** Schemat zmian stanów w modelu trójstanowym łańcucha losowego, przy wyjściowym stanie  $S_0$

Jako rozwiązanie równania (9.25) otrzymuje się funkcje prawdopodobieństw przejść  $p_{ij}$  pomiędzy stanami  $i$  i  $j$  w  $n$  krokach:

$$p_{00}(n) = (1 - p_{01} - p_{02})^n \quad (9.27)$$

$$p_{01}(n) = \frac{p_{00}}{p_{12} - p_{01} - p_{02}} ((1 - p_{01} - p_{02})^n - (1 - p_{12})^n) \quad (9.28)$$

$$p_{02}(n) = 1 - p_{00}(n) - p_{01}(n) \quad (9.29)$$

$$p_{12}(n) = 1 - (1 - p_{12})^n \quad (9.30)$$

W celu zobrazowania przebiegów powyższych funkcji, wykonano obliczenia dla przykładowej linii kablowej. Dane techniczne modelowanej linii kablowej (w roku 2003) są przedstawione w tabeli 9.1 oraz tabeli 9.2 zawierającej liczbę uszkodzeń kabli z podziałem na rodzaj izolacji.

**Tabela 9.1**

Udział kabli w zależności od rozdziału izolacji,  
w awaryjność linii kablowej w 2003 roku

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| Długość sieci ogółem 928,8                  | km |
| Udział kabli                                | %  |
| PO – izolacja papierowo - olejowa           | 64 |
| PE – izolacja polietylenowa                 | 15 |
| XLPE – izolacja z polietylenu usieciowanego | 21 |

Wartości wyjściowe do obliczeń:

Liczba uszkodzeń ogółem:  $i_a = 185$

Wskaźnik awaryjności :  $w_{a100} = 19,9$  [uszkodzeń/100 km rok]

Prawdopodobieństwa przejść w pojedynczym kroku, wyznaczone na podstawie powyższych danych są przedstawione w tabeli 9.3.

**Tabela 9.2**

Liczba uszkodzeń kabli z podziałem na rodzaj izolacji [%]

| Rodzaj izolacji | elektryczne | wszystkie |
|-----------------|-------------|-----------|
| PO              | 4,6         | 6,9       |
| PE              | 85,3        | 85,3      |
| XLPE            | 1,6         | 1,0       |

**Tabela 9.3**

Prawdopodobieństwa przejść pomiędzy stanami w zależności od rodzaju izolacji

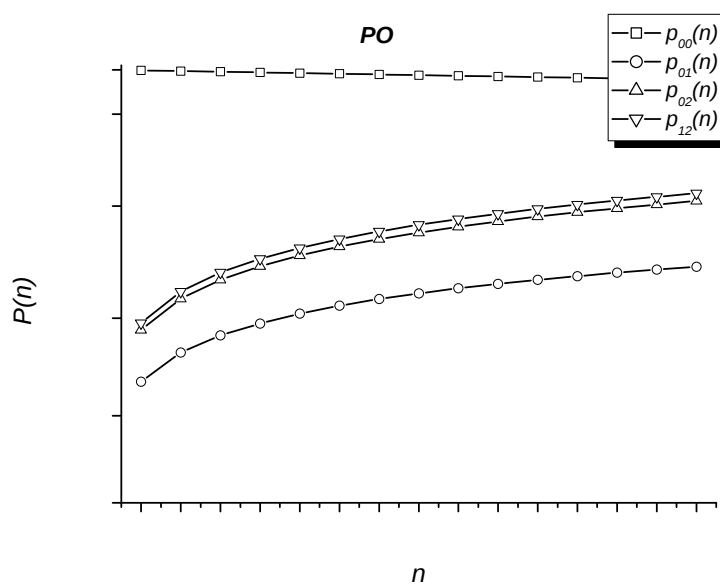
|          | PO     | PE     | XLPE   |
|----------|--------|--------|--------|
| $p_{12}$ | 0,0023 | 0,2041 | 0,0027 |
| $p_{13}$ | 0,0077 | 0,6123 | 0,0082 |
| $p_{23}$ | 0,0099 | 0,7959 | 0,0107 |

Obliczenia przebiegów funkcji (9.27) - (9.30) przeprowadzono dla  $n = 15$  kroków. W celu zwiększenia dokładności wyznaczanych przebiegów, dysponując odpowiednią wiedzą eksploatacyjną i danymi pozwalającymi wyznaczyć prawdopodobieństwa przejść w pojedynczym kroku, można zmniejszyć długość czasu reprezentowaną przez pojedynczy krok jednocześnie zwiększając ich liczbę. Wyniki obliczeń prawdopodobieństwa przejść pomiędzy stanami w  $n$  krokach uwzględniające rodzaj izolacji przedstawiono na rysunkach 9.15, 9.16, 9.17.

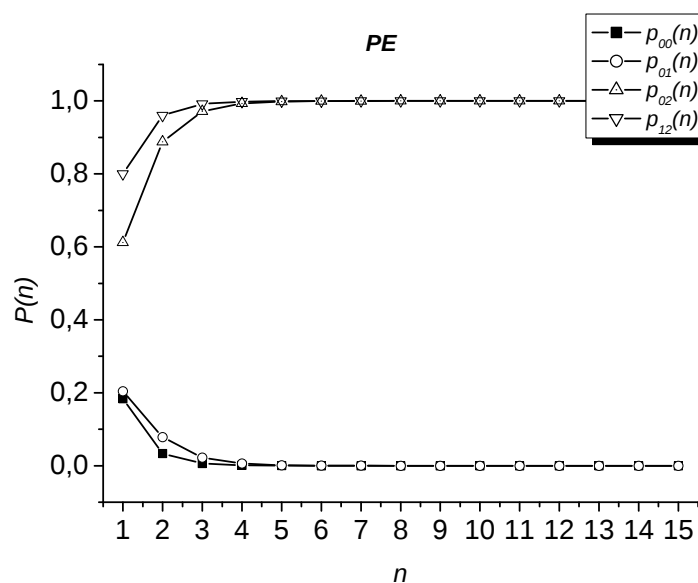
Otrzymane wykresy mogą służyć do analizy porównawczej kabli ze względu na rodzaj izolacji, która wskazuje na stosunkowo dużą niezawodność kabli o izolacji papierowo - olejowej stanowiących 64% całej sieci i jednocześnie na największe prawdopodobieństwo uszkodzenia kabli o izolacji polwinilowej.

Znajomość przebiegów funkcji prawdopodobieństw przejść pomiędzy stanami w czasie pozwala na ocenę prawdopodobieństwa uszkodzenia układu. Wobec powyższego okresy obsługi w ramach diagnostyki typu CM można przyjąć na podstawie wartości prawdopodobieństwa uszkodzenia. W rozważanym przykładzie dla kabli o izolacji PO i XLPE może być okres pięcioletni, ponieważ prawdopodobieństwo przebywania układu w stanie „normalnym” po tym czasie jest bliskie 1. Natomiast stan kabli o izolacji PE należy badać nawet z roczną częstotliwością ze względu na wysokie prawdopodobieństwo uszkodzenia.

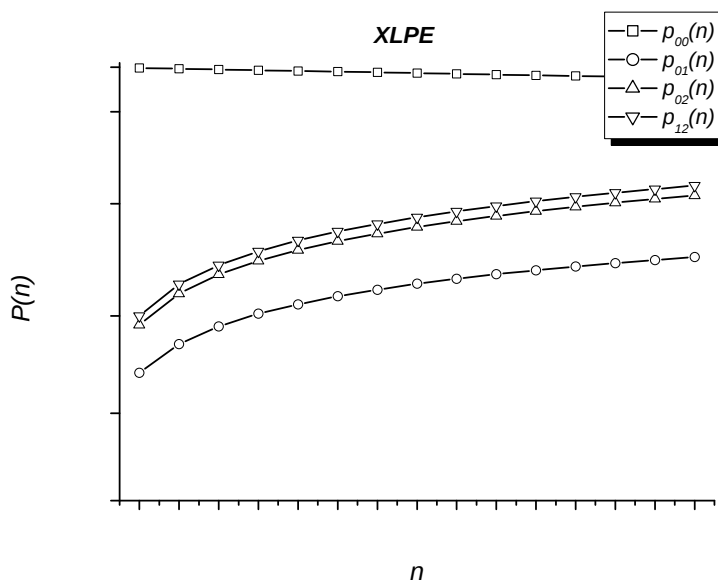
Wykorzystanie powyższego modelu pozwala na ocenę prawdopodobieństwa uszkodzenia w danym czasie, natomiast budowa podobnego modelu z zastosowaniem teorii dyskretnego procesu losowego Markowa daje możliwość na oszacowanie wpływu intensywności narażeń na stan urządzenia.



**Rys. 9.15.** Przebiegi funkcji prawdopodobieństw przejść (9.27) - (9.30) pomiędzy poszczególnymi stanami  $S_0, S_1, S_2$  w  $n \leq 15$  krokach linii kablowej o izolacji papierowo - olejowej



**Rys. 9.16.** Przebiegi funkcji prawdopodobieństw przejść (9.27) - (9.30) pomiędzy poszczególnymi stanami  $S_0, S_1, S_2$  w  $n \leq 15$  krokach linii kablowej o izolacji polwinitowej



**Rys. 9.17.** Przebiegi funkcji prawdopodobieństw przejść (9.27) - (9.30) pomiędzy poszczególnymi stanami  $S_0, S_1, S_2$  w  $n \leq 15$  krokach linii kablowej o izolacji z polietylenu usieciowanego

## 9.7. Model trójstanowy bez odnowy

Rozwijając model przedstawiony w podrozdziale 9.6, poniżej opisano modele trójstanowe bazujące na dyskretnym procesie losowym z czasem ciągłym  $T$ . Model tego typu daje możliwość dokładniejszych symulacji zmian jakie mogą zajść w badanym urządzeniu w czasie. W tym przypadku, w celu wyznaczenia funkcji prawdopodobieństw, istotna jest znajomość intensywności przejść pomiędzy stanami  $\lambda$ , która może być określona na podstawie czasu przebywania  $t_i$  w danym stanie  $S_i$  przed przejściem do stanu  $S_j$  według zależności:

$$\lambda = \frac{1}{t_i} \quad (9.31)$$

Ponadto, aby proces traktować jako jednorodny zakłada się, że intensywności przejść są niezależne od czasu, czyli  $\lambda_i(t) = \lambda_i = \text{const}$ .

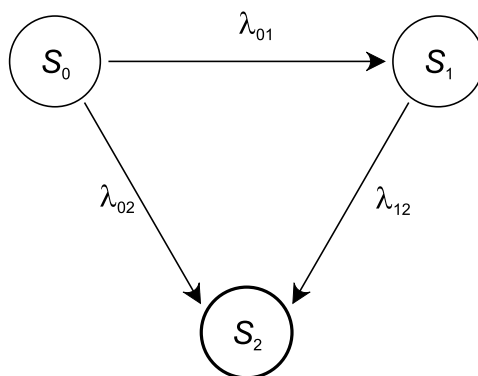
Podstawowym założeniem technicznym w prezentowanym modelu jest eksploatacja urządzeń do końca ich zdolności, bez prowadzenia jakichkolwiek prac napraw lub odnowy stanu obiektu. Jedyne obsługi urządzenia wykonywane w trakcie procesu eksploatacji, dotyczą kontroli jego stanu w sposób mniej lub bardziej dokładny, w zależności od znaczenia urządzenia.

Przyjęty zbiór stanów obejmuje:

- $S_0$  – stan „normalny”, pełnej zdatności urządzenia,
- $S_1$  – stan przejściowy, niepełnej zdatności urządzenia lecz bez uszkodzenia,
- $S_2$  – uszkodzenie, stan niezdatności urządzenia.

Dodatkowo zakłada się iż nagła awaria obiektu „nowego” (przejście ze stanu  $S_0$  do  $S_2$ ) może nastąpić rzadziej niż uszkodzenie poprzez stan  $S_1$ . W przeciwnym przypadku słuszniejsze byłoby stosowanie modelu dwustanowego.

Graf dyskretnego procesu Markowa bez odnowy (rys. 9.18) jest analogiczny jak graf łańcucha losowego (rys. 9.13) lecz przejścia pomiędzy stanami są opisane intensywnościami  $\lambda_{ij}$  zamiast prawdopodobieństwami.



**Rys. 9.18.** Graf dyskretnego procesu Markowa bez odnowy

Zgodnie z regułą mnemotechniczną przedstawioną wcześniej [18, 79] dla grafu procesu przedstawionego na rysunku 9.18 model matematyczny procesu jest układem równań Chapmana - Kołmogorowa prawdopodobieństw znalezienia się układu w danym stanie w chwili  $t \geq 0$ :

$$p'_0(t) = -(\lambda_{01} + \lambda_{02})p_0(t) \quad (9.32)$$

$$p'_1(t) = \lambda_{01}p_0(t) - \lambda_{12}p_1(t) \quad (9.33)$$

$$p'_2(t) = \lambda_{02}p_0(t) + \lambda_{12}p_1(t) \quad (9.34)$$

Rozwiązanie powyższego układu równań, dla warunków początkowych:

$$p_0(0) = 1, \quad p_1(0) = 0, \quad p_2(0) = 0$$

w postaci ogólnej dla poszczególnych funkcji prawdopodobieństw jest następująca:

$$p_0(t) = e^{-t(\lambda_{01} + \lambda_{02})} \quad (9.35)$$

$$p_1(t) = \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{01} + \lambda_{02} - \lambda_{12}} e^{-t(\lambda_{01} + \lambda_{02})} \left( -1 + e^{-t(\lambda_{01} + \lambda_{02} - \lambda_{12})} \right) \quad (9.36)$$

$$\begin{aligned} p_2(t) &= \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{01} + \lambda_{02} - \lambda_{12}} \left( 1 - e^{-t\lambda_{12}} \right) \\ &+ \frac{\lambda_{02}}{\lambda_{01} + \lambda_{02} - \lambda_{12}} \left( 1 - e^{-t(\lambda_{01} + \lambda_{02})} \right) \\ &- \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{01} + \lambda_{02} - \lambda_{12}} \left( 1 + e^{-t(\lambda_{01} + \lambda_{02})} \right) \end{aligned} \quad (9.37)$$

Otrzymane równania mogą stanowić podstawę analizy diagnostycznej do predykcji czasu MTTF oraz symulacji przebiegu procesu tych zmian w zależności od intensywności przejść pomiędzy stanami. Czas MTTF dla tego przykładu jest równy:

$$\text{MTTF} = p_0(t) = e^{-t(\lambda_{01} + \lambda_{02})} \quad (9.38)$$

Natomiast funkcja niezawodności jest sumą przebywania w stanach  $S_0$  i  $S_1$ :

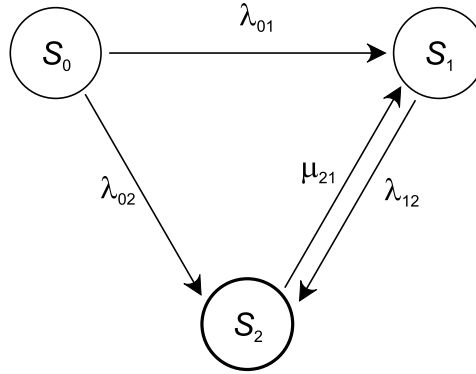
$$R(t) = p_0(t) + p_1(t) \quad (9.39)$$

Zależność funkcji prawdopodobieństw przebywania w danym stanie od intensywności przejść, która jest zależna od intensywności narażeń (ich poziomu i czasu trwania) pozwala na analizę zmian stanów wraz ze zmianą narażeń, przy założeniu zachowania jednorodności

Kolejne modele stanowią modyfikację powyższego poprzez stosowanie różnego rodzaju odnowy.

## 9.8. Model trójstanowy z częściową odnową

Dla tych samych założeń co w przypadku wcześniejszym, dotyczących jednorodnego, dyskretnego procesu Markowa, jako rozwinięcie modelu z podrozdziału 9.7, wyznaczono trójstanowy model matematyczny z częściową odnową w modelowanym obiekcie. Wynikiem tego założenia jest graf (rys. 9.19), na którym zaznaczono intensywność odnowy  $\mu_{21}$  jako przejście ze stanu uszkodzenia  $S_2$  do stanu o częściowej zdatności  $S_1$ , np. w wyniku regeneracji układu izolacyjnego.



**Rys. 9.19.** Graf modelu trójstanowego z częściową odnową

Układ równań różniczkowych Chapmana - Kolmogorowa pozwalający na wyznaczenie funkcji prawdopodobieństw w danym stanie jest następujący:

$$p_0'(t) = -(\lambda_{01} + \lambda_{02})p_0(t) \quad (9.40)$$

$$p_1'(t) = \lambda_{01}p_0(t) - \lambda_{12}p_1(t) + \lambda_{21}p_2(t) \quad (9.41)$$

$$p_2'(t) = \lambda_{02}p_0(t) + \lambda_{12}p_1(t) - \lambda_{21}p_2(t) \quad (9.42)$$

Przyjmując, że stanem wyjściowym procesu jest stan  $S_0$ , warunki początkowe – prawdopodobieństwa w chwili  $t = 0$  są następujące:

$$p_0(0) = 1, \quad p_1(0) = 0, \quad p_2(0) = 0$$

,

Stosując przekształcenie Laplace'a do układu równań 9.40, 9.41, 9.42:

$$P_0(s)s - p_0(0) = -(\lambda_{01} + \lambda_{02})P_0(s) \quad (9.43)$$

$$P_1(s)s - p_1(0) = \lambda_{01}P_0(s) - \lambda_{12}P_1(s) + \lambda_{21}P_2(s) \quad (9.44)$$

$$P_2(s)s - p_2(0) = \lambda_{02}P_0(s) + \lambda_{12}P_1(s) - \lambda_{21}P_2(s) \quad (9.45)$$

otrzymuje się rozwiązania funkcji prawdopodobieństw w postaci:

$$p_0(t) = e^{-t(\lambda_{01} + \lambda_{02})} \quad (9.46)$$

$$\begin{aligned}
p_1(t) &= \frac{\lambda_{01}\lambda_{02}}{z} \left( -e^{-t(\lambda_{01}+\lambda_{02})} + e^{-t(\lambda_{12}+\lambda_{21})} \right) \\
&+ \frac{\lambda_{01}\lambda_{21}}{z} \left( 1 - e^{-t(\lambda_{01}+\lambda_{02})} \right) + \frac{\lambda_{02}\lambda_{21}}{z} \left( 1 - e^{-t(\lambda_{12}+\lambda_{21})} \right) \quad (9.47) \\
&- \frac{\lambda_{12}\lambda_{21}}{z} \left( 1 - e^{-t(\lambda_{01}+\lambda_{02})} \right) - \frac{\lambda_{21}^2}{z} \left( 1 - e^{-t(\lambda_{01}+\lambda_{02})} \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
p_2(t) &= \frac{\lambda_{12}(\lambda_{01} + \lambda_{02} - \lambda_{12} - \lambda_{21})}{z} \\
&+ \frac{(\lambda_{12} - \lambda_{02})(\lambda_{12} + \lambda_{21})}{z} e^{-t(\lambda_{01}+\lambda_{02})} \quad (9.48) \\
&+ \frac{\lambda_{02}\lambda_{21} - \lambda_{01}\lambda_{12}}{z} e^{-t(\lambda_{12}+\lambda_{21})}
\end{aligned}$$

gdzie:

$$z = (\lambda_{01} + \lambda_{02} - \lambda_{12} - \lambda_{21})(\lambda_{12} + \lambda_{21})$$

Model może zostać wykorzystany do symulacji wpływu intensywności odnowy na dyspozycyjność urządzenia  $A(t)$ , jak również do analizy prawdopodobieństwa pracy urządzenia w określonym czasie eksploatacji.

Ze względu na możliwość odnowy, dyspozycyjność obiektu jest sumą prawdopodobieństw:

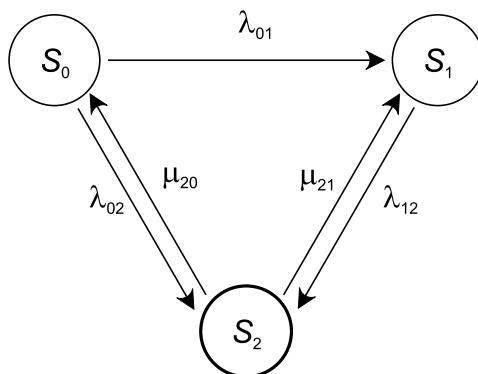
$$A(t) = p_0(t) + p_1(t) \quad (9.49)$$

Analiza diagnostyczna zmian stanu technicznego z zastosowaniem powyższego modelu jest właściwa dla urządzeń, których odnowa po wystąpieniu awarii do stanu „normalnego” nie jest możliwa, natomiast jest opłacalna regeneracja do stanu pośredniego. Analiza opłacalności regeneracji może być przeprowadzona poprzez ocenę kosztów ewentualnych awarii i wymiany urządzenia na nowe.

Jeżeli jest możliwa pełna odnowa po awarii lub następuje wymiana urządzenia proces eksploatacji urządzenia może być modelowany z zastosowaniem modelu przedstawionego poniżej.

## 9.9. Model trójstanowy z pełną odnową lub wymianą

Dalsze dopasowanie modelu obejmuje realizację odnowy lub wymiany, w zależności możliwości i opłacalności takiego rozwiązania. Analiza wpływu wymiany przy jednoczesnej możliwości stosowania odnowy następuje poprzez wyznaczenie prawdopodobieństw przebywania urządzenia w danym stanie, jak w przypadkach wcześniejszych i przy tych samych założeniach.



**Rys. 9.20.** Graf modelu trójstanowego z odnową lub wymianą

Analogicznie do przypadków wcześniejszych, model matematyczny procesu trójstanowego z pełną odnową lub wymianą przyjmuje postać układu trzech równań różniczkowych Chapmana - Kołmogorowa zgodnie z zależnościami prezentowanymi przez graf na rysunku 9.20:

$$p_0'(t) = -(\lambda_{01} + \lambda_{02})p_0(t) + \lambda_{20}p_2(t) \quad (9.50)$$

$$p_1'(t) = \lambda_{01}p_0(t) - \lambda_{12}p_1(t) \quad (9.51)$$

$$p_2'(t) = \lambda_{02}p_0(t) + \lambda_{12}p_1(t) \quad (9.52)$$

Ze względu na złożoność analitycznego rozwiązania ogólnego powyższego modelu, nie jest ono prezentowane.

Dyspozycyjność  $A(t)$  dla tego modelu jest wyznaczana zgodnie z zależnością (9.49).

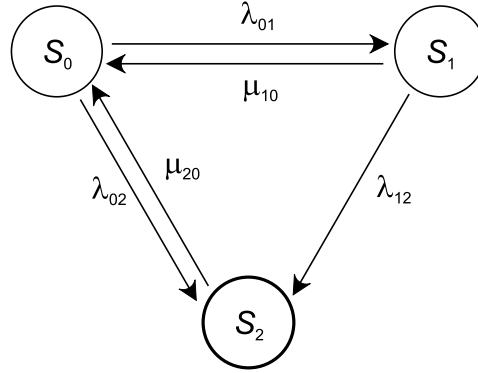
Analiza wpływu pełnej odnowy na proces zmian stanu urządzenia, a w konsekwencji na przyjęcie odpowiedniej strategii eksploatacyjnej możliwa jest poprzez symulacje z wykorzystaniem danych eksploatacyjnych oraz prezentowanych modeli. Kryterium wyboru najlepszej strategii jest uwarunkowane intensywnościami przejść pomiędzy stanami jak również innymi wcześniej wspomnianymi czynnikami.

Proces formułowania modelu w celach analizy zmian stanów powinien obejmować wszelkie możliwe zmiany w związku z powyższym kolejny prezentowany model uwzględnia proces pełnej odnowy z każdego z pozostałych stanów.

### Model trójstanowy z pełną wymianą

Ostatni prezentowany wariant modelu układu trójstanowego zakłada możliwość wymiany obiektu lub przywrócenie mu pierwotnych parametrów każdorazowo, gdy urządzenie znajdzie się w stanie innym niż  $S_0$ . Symulacja matematyczna oparta na tym modelu może wskazać jak zwiększy się dyspozycyjność

obiekту, przy próbie utrzymania najwyższych poziomów jego zdolności. Ponadto istnieje możliwość symulacji wpływu intensywności odnowy na dyspozycyjność oraz koszty obsługi diagnostycznej tego typu. Graf dla tego przypadku został przedstawiony na rysunku 9.21.



**Rys. 9.21.** Graf modelu trójstanowego z pełną wymianą

Model matematyczny odpowiadający przyjętym założeniom jest następujący:

$$p'_0(t) = -(\lambda_{01} + \lambda_{02})p_0(t) + \lambda_{10}p_1(t) + \lambda_{20}p_2(t) \quad (9.53)$$

$$p'_1(t) = \lambda_{01}p_0(t) - (\lambda_{10} + \lambda_{12})p_1(t) \quad (9.54)$$

$$p'_2(t) = \lambda_{02}p_0(t) + \lambda_{12}p_1(t) - \lambda_{20}p_2(t) \quad (9.55)$$

Dzięki wykorzystaniu prezentowanych modeli możliwa jest analiza wpływu intensywności uszkodzeń przy różnych strategiach obsługi diagnostycznej i jej wpływu na niezawodność bądź dyspozycyjność urządzenia. Na podstawie otrzymanych wyników symulacji można wybrać najbardziej odpowiedni wariant obsługi dla zakładanych kosztów.

## 10. Optymalizacja strategii obsługi diagnostycznych

### 10.1. Optymalizacja kosztów eksploatacji urządzeń

Umiejętność szybkiego reagowania i usuwania powstałych awarii i ich skutków jest tylko dążeniem do minimalizacji strat już powstałych. Prowadzone badania w ramach diagnostyki eksploatacyjnej i nadzoru bieżącego mają za zadanie określenie aktualnego stanu urządzenia, w celu uniknięcia ewentualnej awarii. Znajomość dystrybuanty rozkładu czasu poprawnej pracy  $R(t)$  może w znaczącym stopniu obniżyć koszty eksploatacyjne. Proponowane w rozdziale wcześniejszym modele diagnostyczne pozwalają wyznaczyć dyspozycyjność  $A(t)$  dla danego urządzenia w oparciu o teorię procesów losowych Markowa. W zależności od rodzaju urządzenia oraz przyjętej strategii jego eksploatacji można dla niego zastosować jeden z poniższych modeli matematycznych, które uwzględniają różne rodzaje strategii obsługi.

Całkowity koszt eksploatacji urządzenia można określić jako sumę trzech składowych [42]:

$$K_{eks} = aK_{eks.b} + bK_a + cK_{s.aw} \quad (10.1)$$

gdzie:

- $K_{eks}$  – koszty całkowite eksploatacji urządzenia,
- $K_{eks.b}$  – koszty eksploatacji bieżącej,
- $K_a$  – koszty usunięcia awarii,
- $K_{s.aw}$  – koszty skutków awarii,
- $a, b, c$  – współczynniki wagowe.

Współczynniki wagowe w zależność (10.1) mogą uwzględniać nieekonomiczne koszty przyjętej strategii eksploatacji urządzeń oraz zależności pomiędzy kosztami poniesionymi na diagnostykę i kosztami awarii (podrozdział 5.5).

Składniki kosztów dotyczące awarii są zależne od diagnostyki poawaryjnej, czyli możliwości szybkiego zdiagnozowania miejsca uszkodzenia i jego przyczyny, a następnie czasu usunięcia awarii. Koszty usunięcia awarii  $K_a$  można zminimalizować wykorzystując testy i metody opisane w rozdziale 8.

Skutki techniczne awarii, których konsekwencją jest czas usuwania awarii, a więc przerwy w pracy urządzeń oraz uwarunkowania legislacyjne dotyczące odszkodowań dla odbiorców energii elektrycznej są głównymi czynnikami wpływającymi na koszty skutków awarii  $K_{s.aw}$ . Koszty te można minimalizować głównie dzięki ograniczeniu rozmiarów awarii poprzez diagnostykę on-line, która pozwala na szybkie zdiagnozowanie stanu uszkodzenia.

Natomiast koszty eksploatacji bieżącej są sumą wszelkich prowadzonych obsług urządzenia, w tym będących konsekwencją decyzji diagnostycznych oraz samej diagnostyki obejmującej pomiary, badania i analizę otrzymanych danych pomiarowych:

$$K_{eks.b} = K_{kons.b} + K_d \quad (10.2)$$

gdzie:

$K_{kons.b}$  – koszty obsługi bieżącej,  
 $K_d$  – koszty diagnostyki.

W związku z powyższym koszty eksploatacji bieżącej można minimalizować poprzez dobór odpowiedniej strategii obsługi, diagnostyki (liczba i rodzaj testów, badań oraz pomiarów diagnostycznych) oraz procedur diagnostycznych pozwalających na ocenę i typologię stanu technicznego urządzeń przy jak najrzadszym prowadzeniu obsług diagnostycznych wymagających wyłączenia urządzenia z ruchu.

Wszelkie te działania zmierzają do zapewnienia najwyższego poziomu niezawodności urządzenia przy założonych kosztach eksploatacyjnych  $K_{eks}$ . Jako kryterium optymalizacji można przyjąć iloraz oczekiwanych kosztów eksploatacyjnych urządzenia  $K_{eks.b}$  w przedziale czasu i udziału czasu sprawności obiektu w ogólnym czasie jego użytkowania  $MUT^1$ .

$$E_{min}(K) = \frac{K_{eks.b}}{MUT} \quad (10.3)$$

Poszczególne strategie proponowane poniżej mają zastosowanie, gdy spełnione są następujące założenia:

1. nie można przewidzieć chwili uszkodzenia urządzenia;
2. nie można przewidzieć chwili osiągnięcia przez urządzenie stanów krytycznych;
3. stan obiektu może być ustalony tylko po dokonaniu odpowiedniej obsługi;
4. urządzenie może pracować w pośrednich stanach technicznych pomiędzy stanem „nowym” i stanu uszkodzenia;
5. intensywność przejść pomiędzy poszczególnymi stanami jest stała w czasie, zależna od warunków pracy i otoczenia urządzenia oraz stopnia jego zużycia.

---

<sup>1</sup> ang. *Mean Up Time*

## 10.2. Okresowe wymiany/naprawy urządzeń z uwzględnieniem czasu poprawnej pracy

Ze względu na charakter konstrukcji urządzeń elektroenergetycznych, w szczególności urządzeń z układem izolacyjnym opartym na dielektryku stałym, może w nich dochodzić do częściowych uszkodzeń powodujących tylko zwiększenie prawdopodobieństwa awarii. Wykrycie takiej zmiany stanu jest możliwe podczas badań diagnostycznych lub w trakcie ciągłej diagnostyki stanu rzeczywistego (monitoringu).

W grupie takich samych lub podobnych konstrukcyjnie urządzeń elektroenergetycznych możliwe jest zgromadzenie informacji o częstotliwości zmian systemu, z uwzględnieniem wieloelementowych zbiorów stanów.

Znajomość procesów zmian oraz możliwość konstrukcji modeli matematycznych obrazujących te zmiany pozwalają na ograniczenie diagnostyki bezpośredniej badanych urządzeń, a zastąpienie jej (przynajmniej częściowo), analizą matematyczną procesów uszkodzeń, co również ogranicza prawdopodobieństwo awarii, przy jednoczesnym zmniejszeniu kosztów eksploatacji tych urządzeń.

Na podstawie modeli matematycznych procesów zmian stanu technicznego urządzeń można ocenić oczekiwany czas poprawnej pracy  $MUT$ . W pracy [39] wykazano, że jeśli istnieje ciągła dystrybuanta  $R(t)$  czasu poprawnej pracy obiektu (urządzenia lub systemu), istnieje optymalna strategia obsługi (badania lub odnowy i wymiany) profilaktycznej dla tego obiektu.

Cechą charakterystyczną optymalnej strategii w tym przypadku jest stały (nie będący zmienną losową) okres obsługi profilaktycznej dla całego okresu eksploatacji urządzenia. Dla takiej strategii eksploatacji, obsługę diagnostyczną urządzenia przeprowadza się w chwili uszkodzenia powodującego awarię albo przepracowaniu przez urządzenie pewnego ustalonego przedziału czasu  $t_x$ . Poszukiwany optymalny okres obsługi w tym przypadku jest wartością minimalną zmiennej losowej czasu  $\min(T, t_x)$ , ze względu na prawdopodobieństwo uszkodzenia.

Dla celów analizy matematycznej, przyjmuje się założenie, iż analizowany obiekt ma być eksploatowany w nieskończonym (w praktyce bardzo długim) przedziale czasu. Ponadto zmienna losowa  $T$  o ciągłej i różniczkowalnej dystrybuancie  $F(t)$  oznacza czas poprawnej pracy urządzenia.

Wartość oczekiwana zmiennej losowej  $E_{\min}(T, t_x)$  wyrażona jest wzorem:

$$E_{\min}(T, t_x) = \int_0^{t_x} [1 - f(s)] ds = R(t_x) \quad (10.4)$$

gdzie:

$f(s)$  – funkcja gęstość prawdopodobieństwa uszkodzenia,  
 $R(t_x)$  – oczekiwany czas eksploatacji pojedynczego urządzenia  
 podczas stosowania przyjętej strategii obsługi.

Iloraz  $F(t)/R(t)$  jest prawdopodobieństwem wystąpienia uszkodzenia w jednostce czasu  $\lambda(t)\Delta t$ , przy założeniu, że okres obsługi profilaktycznej wynosi  $t_x$ .

### 10.3. Optymalizacja czasookresów badań profilaktycznych z uwzględnieniem poziomu gotowości

Dzięki proponowanym modelom diagnostycznym procesów zmian stanów technicznych urządzeń elektroenergetycznych (rozdz. 9) można zoptymalizować czasookresy ich badań profilaktycznych ze względu na koszty  $K_d$ . Zgodnie z instrukcjami eksploatacji właściwymi dla danych urządzeń, badania profilaktyczne przeprowadza się w stałych okresach czasu  $t_d$ , np. w ramach strategii obsługi diagnostycznej typu TBM.

Przyjmując, że obsługa (badania i naprawy lub wymiany) przeprowadzane są w stałych odstępach czasu, proces badań profilaktycznych można podzielić na stałe cykle. Długość pojedynczego cyklu  $T_{ob.}$  jest równa:

$$T_{ob.} = t_d + t_o \quad (10.5)$$

gdzie:

$t_d$  – okres badań,

$t_o$  – czas potrzebny na obsługę.

Oczekiwany czas zdatności obiektu  $t_{zd}$  w jednym cyklu jest równy:

$$t_{zd} = E(R(t)) = \int_0^{t_d} [1 - F(t)] dt \quad (10.6)$$

Stosunek oczekiwanego czasu zdatności urządzenia w cyklu do długości cyklu:

$$m(x) = \frac{t_{zd}}{T_{ob.}} \quad (10.7)$$

W związku z powyższym, uwzględniając koszt obsługi  $K_d$  oraz jednostkowy koszt amortyzacji urządzenia  $K_{am}$ , całkowity koszt cyklu badań:

$$E_{min}(K_o(x)) = \frac{K_{am} + K_d/(t_o + t_d)}{m(x)} \quad (10.8)$$

Jest to funkcja celu, dla której szukana jest wartość minimalna. Jednocześnie określony optymalny czasookres badań wyznaczony został poniżej

dla urządzenia elektroenergetycznego z układem izolacyjnym opartym na dielektryku stałym (np. linia kablowa), z wykorzystaniem diagnostycznego modelu trójstanowego bez odnowy (podrozdział 9.7), gdzie dopuszczalne są stany pełnej zdatności  $S_0$ , częściowej zdatności  $S_1$  oraz niezdatności  $S_2$ .

W przyjętym modelu, zgodnie z grafem na rysunku 9.18, awaria urządzenia – linii kablowej może nastąpić, na przykład w wyniku uszkodzenia układu izolacyjnego uniemożliwiającego dalszą pracę urządzenia lub uszkodzenia katastrofalnego. Jednocześnie linia może pracować przy częściowym uszkodzeniu (stan  $S_1$ ), na przykład w wyniku zestarzenia się izolacji.

Dla rozpatrywanego modelu przyjęto, że funkcja niezawodności  $R(t)$  (9.39) jest sumą prawdopodobieństw przebywania urządzenia w stanie  $S_0$  lub  $S_1$ , czyli:

$$\begin{aligned} R(t) &= p_0(t) + p_1(t) \\ &= e^{-t(\lambda_{01}+\lambda_{02})} + \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{01} + \lambda_{02} - \lambda_{12}} e^{-t(\lambda_{01}+\lambda_{02})} \left( -1 + e^{-t(\lambda_{01}+\lambda_{02}-\lambda_{12})} \right) \end{aligned} \quad (10.9)$$

Podstawiając otrzymaną zależność do równania 10.6 otrzymuje się równanie oczekiwanego czasu zdatności urządzenia  $t_{zd}$  dla rozpatrywanego modelu:

$$\begin{aligned} t_{zd} &= \frac{e^{-x(\lambda_{01}+\lambda_{02}+\lambda_{12})}}{\lambda_{12}(\lambda_{01} + \lambda_{02})(\lambda_{01} + \lambda_{02} - \lambda_{12})} \\ &\cdot \left( \lambda_{12}(\lambda_{01} - \lambda_{02})e^{x\lambda_{12}} - \lambda_{01}(\lambda_{01} + \lambda_{02})e^{x\lambda_{01}+\lambda_{02}} \right. \\ &+ \left. (\lambda_{01} + \lambda_{12})(\lambda_{01} + \lambda_{02} - \lambda_{12})e^{x(\lambda_{01}+\lambda_{02}+\lambda_{12})} \right) \end{aligned} \quad (10.10)$$

Podstawiając zależność na  $t_{zd}$  do wzorów (10.7) i (10.8), w celu wyznaczenia wartości optymalnej okresu badań ze względu na koszty, należy rozwiązać równanie:

$$\frac{dK_o(x)}{dx} = 0 \quad (10.11)$$

Wyznaczając wartość drugiej pochodnej funkcji  $K_o(x_0)$  można określić, czy otrzymane rozwiązanie dla  $x_0$  jest poszukiwaną wartością minimalną spełniającą warunek  $K_o''(x_0) > 0$ , czy maksymalną –  $K_o''(x_0) < 0$ .

Stosując rozwinięcie funkcji eksponentialnych (10.10) w szereg wielomianowy drugiego rzędu można otrzymać jednoznaczne rozwiązanie funkcji (10.11), które ze względu na dużą liczbę zmiennych jest mało czytelne. Dlatego też rozwiązanie w takiej formie nie jest prezentowane.

Wykonano przykładowe obliczenia optymalnego okresu obsługi. W obliczeniach tych przyjęto założenie, że intensywność przejść pomiędzy stanem

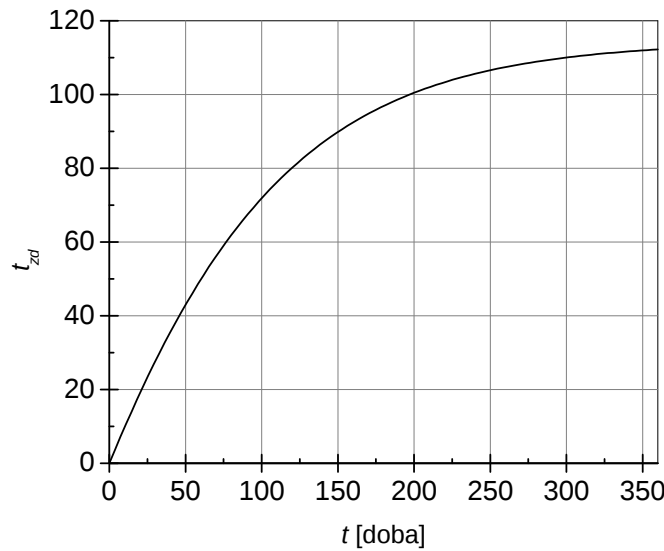
wyjściowym a stanem awarii  $\lambda_{02}$  jest w przybliżeniu o połowę mniejsza niż intensywność przejść przez stan pośredni, czyli:

$$\lambda_{01} = \lambda_{12} \approx 0,5\lambda_{02} \quad (10.12)$$

W oparciu o dane z przykładu omawianego w rozdziale wcześniejszym (9.5) przyjęto teoretyczne, jednorodne intensywności przejść pomiędzy stanami równe:

$$\lambda_{01} = \lambda_{12} = 0,0125, \quad \lambda_{02} = 0,005 \quad [\text{doba}]^{-1}$$

Przebieg funkcji czasu zdatności w ciągu jednego roku dla powyższych danych, został pokazany na rysunku 10.1.



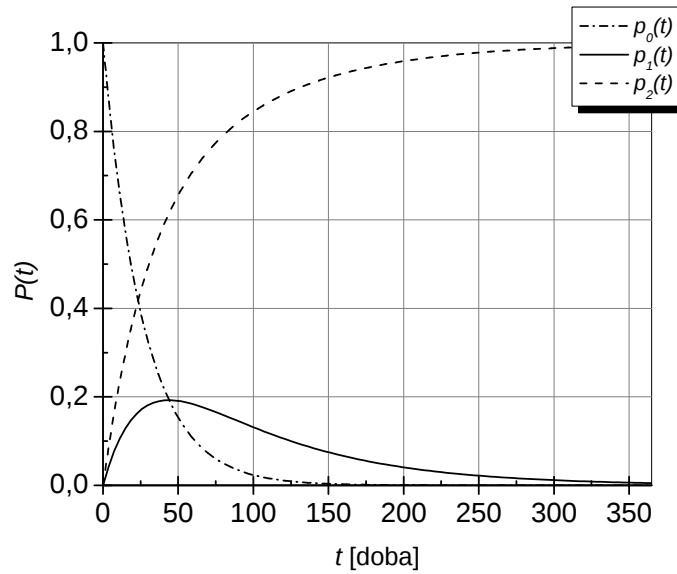
**Rys. 10.1.** Oczekiwany czas zdatności  $t_{zd}$  (10.10) dla  $\lambda_{01} = \lambda_{12} = 0,0125$ ,  $\lambda_{02} = 0,005 \text{ [doba]}^{-1}$

Natomiast wykresy funkcji prawdopodobieństw przebywania w danym stanie dla przyjętych wartości zostały przedstawione na rysunku 10.2. Prawdopodobieństwo przebywania w stanie pełnej zdatności  $S_0$  jest opisane równaniem (9.35), w stanie  $S_1$  równaniem (9.35) i w stanie awarii  $S_2$  równaniem (9.38).

Wyznaczając funkcję niezawodności  $R(t)$  (10.9) zgodnie z powyższymi danymi otrzymuje się zależność:

$$R(t) = 0,5 e^{-0,0375t} + 0,5 e^{-0,0125t} \quad (10.13)$$

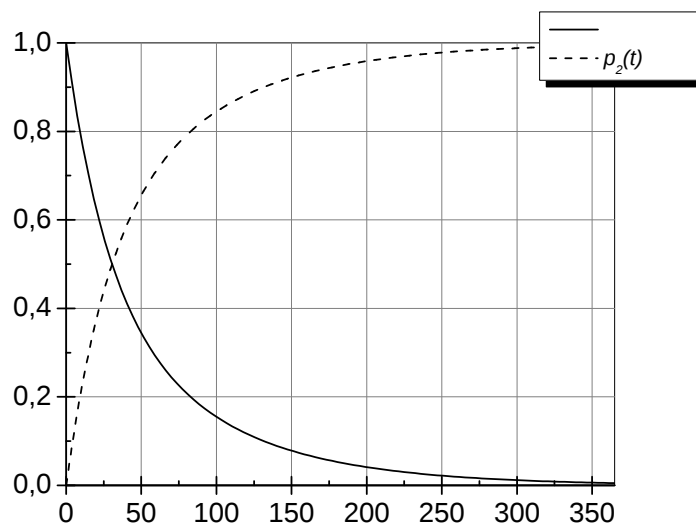
Charakterystyka powyższej funkcji została przedstawiona na rysunku 10.3.



**Rys. 10.2.** Przebiegi prawdopodobieństw przebywania w danym stanie –  $p_0$  (9.35),  $p_1$  (9.35),  $p_2$  (9.38), dla intensywności przejść  $\lambda_{01} = \lambda_{12} = 0,0125$ ,  $\lambda_{02} = 0,005$   $[\text{doba}]^{-1}$

W celu rozwiązania równania (10.11) przyjęto dodatkowe założenia, że czas badania jest równy jednemu dniowi ( $t_o = 1$ ) oraz koszt obsługi jest porównywalny z jednostkowym kosztem amortyzacji ( $K_d = K_{am}$ ).

Dla przyjętych powyżej wartości wykonano obliczenia, których wynikiem był optymalny okres obsługi ze względu na koszty równy 239 dni.



**Rys. 10.3.** Przebiegi funkcji niezawodności  $R(t) = p_0(t) + p_1(t)$  (10.9) i awaryjności  $F(t) = p_2(t)$  dla  $\lambda_{01} = \lambda_{12} = 0,0125$ ,  $\lambda_{02} = 0,005$   $[\text{doba}]^{-1}$

#### 10.4. Analiza okresów badań diagnostycznych

W większości przypadków, okresowo wykonuje się ocenę stanu technicznego urządzeń elektroenergetycznych, w szczególności ich układów izolacyjnych oraz torów prądowych. Są to działania niezbędne do ustalenia ich zdolności do dalszej współpracy z siecią, a także w celu ustalenia harmonogramu i zakresu niezbędnych prac doraźnych, okresowych oraz remontowych.

Doraźna ocena stanu technicznego, np. linii kablowej wykonywana jest każdorazowo po zabiegu diagnostycznym oraz według uznania operatora sieci. Obejmuje ona ustalenie usterek, które muszą być usunięte w trybie prac doraźnych (w czasie najbliższych trzech miesięcy), ustalenie prac eksploatacyjnych na najbliższy rok, a przede wszystkim ustalenie uszkodzeń zagrażających otoczeniu lub mogących spowodować powiększenie skutków awarii i wymagających natychmiastowej naprawy [115, 116].

Oprócz wszelkiego rodzaju pomiarów, ważnym elementem eksploatacji elektroenergetycznych linii kablowych są oględziny widocznych elementów linii. Są one elementem okresowej oceny stanu technicznego. Oględziny wykonywane są w miarę możliwości, podczas ruchu sieci. Ogólnie oględziny podzielić można na dwie grupy:

- 1) oględziny standardowe – okresowe,
- 2) oględziny niestandardowe.

Oględziny okresowe to typowe, planowane prace mające na celu utrzymanie linii kablowych we właściwym stanie technicznym, obejmujące trasy i widoczne elementy wszystkich eksploatowanych linii kablowych.

Niestandardowe oględziny eksploatacyjne są pracami nieplanowanymi i zarządzanymi przez eksploatatora linii kablowej. Można je podzielić na trzy zasadnicze grupy:

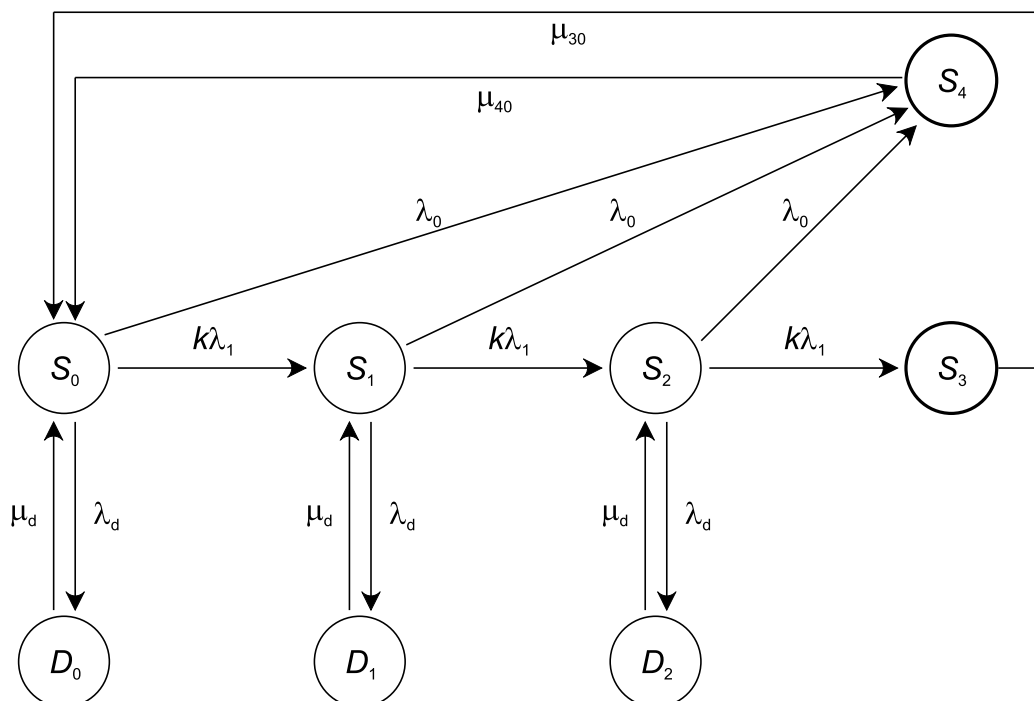
- 1) doraźne, podlegają im tylko te linie kablowe, których stan techniczny tego wymaga; przeprowadza się je tylko w wyniku zaistniałych konieczności (powódź, pożar w pobliżu linii, osunięcie się ziemi itp.);
- 2) zakłóceniewe, obejmują widoczne części linii, których ryzyko uszkodzenia jest duże i mogą spowodować zakłócenia pracy linii kablowej;
- 3) inspekcyjne, obejmują dowolną liczbę tras i widocznych części linii.

Uszkodzenie izolacji linii kablowej powoduje lokalne obniżenie wytrzymałości elektrycznej kabla. Najczęstszymi powodami uszkodzenia izolacji linii kablowej są zawilgocenia izolacji skutkiem nieszczelności powłoki ochronnej kabla. Częstymi przyczynami są również procesy starzeniowe izolacji, błędy fabryczne oraz błędy montażowe. W celu maksymalnego ograniczenia liczby awarii, elektroenergetyczne linie kablowe przechodzą różne zabiegi konserwacyjne mające na celu utrzymanie ich w dobrym stanie.

Dla tak opisanego procesu eksploatacji można przeprowadzić analizę wpływu obsługi diagnostycznej na dyspozycyjność urządzenia, w tym przypadku linii kablowej.

Przykładowy wielostanowy model eksploatacji oparty jest na dyskretnym procesie losowym. Dla rozpatrywanego modelu przyjęto następujące założenia:

- proces eksploatacji realizowany jest na 8-elementowym zbiorze stanów, w tym:
  - trzech dopuszczalnych stanów układu izolacyjnego  $S_0, S_1$  i  $S_2$  (odpowiednio „jak nowy”, dobry i osłabiony);
  - dwóch stanów uszkodzeń:  $S_3$  – uszkodzenie w wyniku narażeń ciągłych,  $S_4$  – stany awarii; uszkodzenie katastrofalne;
  - trzech stanów obsługi diagnostycznej ( $D_0, D_1$  i  $D_2$ ).
- obsługa urządzenia w rozpatrywanym przypadku ma na celu tylko kontrolę stanu, bez ewentualnych prac naprawczo-remontowych. Decyzja o wymianie lub naprawie linii nie jest zdeterminowana wynikami obsługi diagnostycznej. Kryterium wymiany może być z góry przyjęty okres eksploatacji.
- intensywności przejść pomiędzy stanami są stałe w czasie i ustalone na podstawie średnich czasów przebywania w danym stanie;
- istnieje możliwość przejścia ze stanów  $S_0, S_1, S_2$  do stanu  $S_4$  w wyniku nagłego uszkodzenia katastrofального. Prawdopodobieństwo takiego uszkodzenia jest niezależne od stanu, w jakim akurat znajduje się linia.



**Rys. 10.4.** Graf procesu eksploatacji układu izolacyjnego opartego na dielektryku stałym z uwzględnieniem obsługi diagnostycznej;  $S$  - stany układu,  $D$  - stany obsługi diagnostycznej

Model pozwala wyznaczyć optymalną intensywność obsługi diagnostycznej w zależności od intensywności przejść pomiędzy stanami. W rozpatrywanym przypadku dyskretny proces losowy jest realizowany zgodnie z zależnościami przedstawionymi na rysunku 10.4.

Układ może znajdować się w ośmiu różnych stanach, więc wektor prawdopodobieństwa ma w tym przypadku postać:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_0 & p_1 & p_2 & p_3 & p_4 & p_5 & p_6 & p_7 \end{bmatrix} \quad (10.14)$$

Przyjmując, że wszystkie zmienne losowe mają ten sam rozkład, tzn.  $\mathbf{P}_n(t) = \mathbf{P}_n(0) = \mathbf{P}$  jest stałym wektorem oraz rozpatrywany proces jest procesem stacjonarny, wówczas równania Chapmana - Kołmogorowa mają postać:

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{\Lambda} = 0 \quad (10.15)$$

Macierz przejść  $\mathbf{\Lambda}$  określona zgodnie z grafem procesu (rys. 10.4) jest następująca:

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} z & k\lambda_1 & 0 & \lambda_d & 0 & 0 & \lambda_0 & 0 \\ 0 & z & k\lambda_1 & 0 & \lambda_d & 0 & \lambda_0 & 0 \\ 0 & 0 & z & 0 & 0 & \lambda_d & \lambda_0 & k\lambda_1 \\ \mu_d & 0 & 0 & -\mu_d & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_d & 0 & 0 & -\mu_d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_d & 0 & 0 & -\mu_d & 0 & 0 \\ \mu_{40} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_{40} & 0 \\ \mu_{30} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_{30} \end{bmatrix} \quad (10.16)$$

gdzie:

$$z = -k\lambda_1 - \lambda_d - \lambda_0.$$

Do celów obliczeniowych przyjęto następujące wartości:

- średni statystyczny czas do uszkodzenia katastroficznego pojedynczego od-cinka linii równy 500 dni, stąd  $\lambda_0 = 1/500$  [doba<sup>-1</sup>],
- średni statystyczny czas życia układu izolacyjnego (bez napraw i konser-wacji bierzącej) równy 1000 dni, stąd  $\lambda_1 = 1/1000$  [doba<sup>-1</sup>],
- czas pełnego usunięcia awarii równy 2 dni (1 dzień naprawa i 1 dzień ba-dania po naprawie), stąd  $\mu_{40} = 1/2$  [doba<sup>-1</sup>],
- czas pełnej wymiany jednostki na nową równy 7 dni, stąd  $\mu_{30} = 1/7$  [doba<sup>-1</sup>],
- czas obsługi diagnostycznej równy 1 dzień, stąd  $\mu_d = 1$  [doba<sup>-1</sup>],
- liczba stanów pośrednich  $k = 3$ ,
- $\lambda_d^{-1} = \text{const}$  – parametr, ze względu na który wyznaczany jest optymalny czasookres badań.

Rozwiązując równanie (10.15) z uwzględnieniem warunku normalizującego:

$$\sum_{i=0}^7 p_i = 1 \quad (10.17)$$

otrzymuje się prawdopodobieństwa przebywania w danym stanie układu w funkcji czasu.

Odpowiednio z przyjętym modelem prawdopodobieństwa przebywania w danym stanie mają postać:

— dla stanów  $S_0, S_1, S_2$ :

$$p_0 = \frac{5000}{7(1411 + 1400\lambda_d)} \quad (10.18)$$

$$p_1 = \frac{3000}{7(1411 + 1400\lambda_d)} \quad (10.19)$$

$$p_2 = \frac{1800}{7(1411 + 1400\lambda_d)} \quad (10.20)$$

— dla stanów obsługi  $D_0, D_1, D_2$ :

$$p_3 = \frac{5000\lambda_d}{7(1411 + 1400\lambda_d)} \quad (10.21)$$

$$p_4 = \frac{3000\lambda_d}{7(1411 + 1400\lambda_d)} \quad (10.22)$$

$$p_5 = \frac{1800\lambda_d}{7(1411 + 1400\lambda_d)} \quad (10.23)$$

— dla stanów uszkodzeń  $S_3, S_4$ :

$$p_6 = \frac{28}{5(1411 + 1400\lambda_d)} \quad (10.24)$$

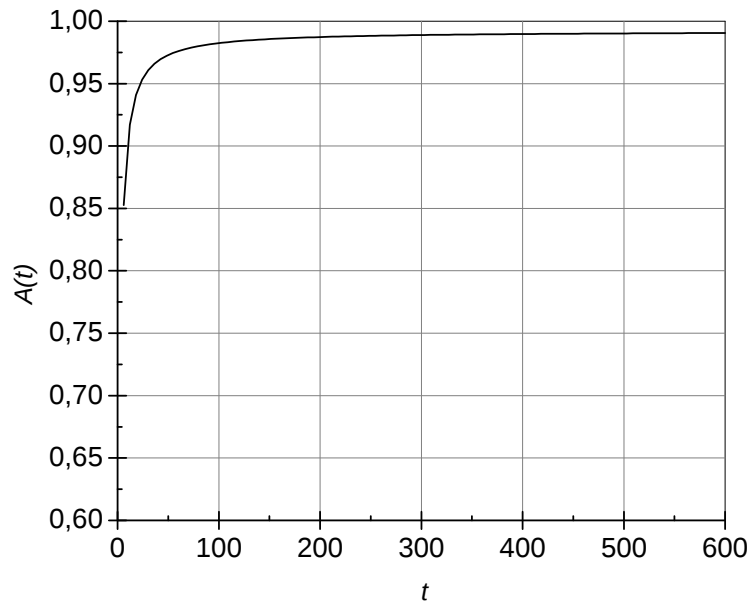
$$p_7 = \frac{27}{7(1411 + 1400\lambda_d)} \quad (10.25)$$

Funkcja dyspozycyjności obiektu jest sumą prawdopodobieństw przebywania w jednym ze stanów  $S_0, S_1, S_2$ :

$$A(t) = p_0 + p_1 + p_2 = \frac{1400}{1411 + 1400\lambda_d} \quad (10.26)$$

Funkcja dyspozycyjności  $A(t)$  osiąga wartość maksymalną na poziomie 0,9922. Ze względu na stacjonarność procesu istnieje wartość graniczna wyznaczanych funkcji prawdopodobieństw przebywania w danym stanie. Wykres tej funkcji został przedstawiony na rysunku 10.5.

Funkcja dyspozycyjności opisana równaniem (10.26) jest zależna od intensywności obsługi  $\lambda_d$ , a więc czasu trwania obsługi. Z przeprowadzonych



**Rys. 10.5.** Przebieg funkcji dyspozycyjności urządzenia  $A(t)$  (10.26) w zależności od okresu obsługi diagnostycznej  $t$  od 0 do 600 dni

obliczeń wynika, że dla  $t \leq 300$  [dni] wartość dyspozycyjności maleje ze względu na ujemny wpływ zbyt dużej intensywności obsługi lub czasu przebywania urządzenia w stanie obsługi. W związku z powyższym okresy obsługi należy dobierać do spodziewanej intensywności uszkodzeń.

W warunkach rzeczywistych wpływ obsługi diagnostycznej tylko w celu kontroli stanu bez ewentualnego wpływu na jej stan nie ma znaczenia dla ogólnej dyspozycyjności urządzenia, poza przerwami w pracy wynikającymi z prowadzonych prac diagnostycznych. W związku z powyższym, w celu zwiększenia efektywności oddziaływania diagnostyki na proces eksploatacji, można rozważyć model z obsługą diagnostyczną, która zawiera elementy regeneracji układu, a więc przejścia po obsłudze do stanu wcześniejszego niż stan przed obsługą.

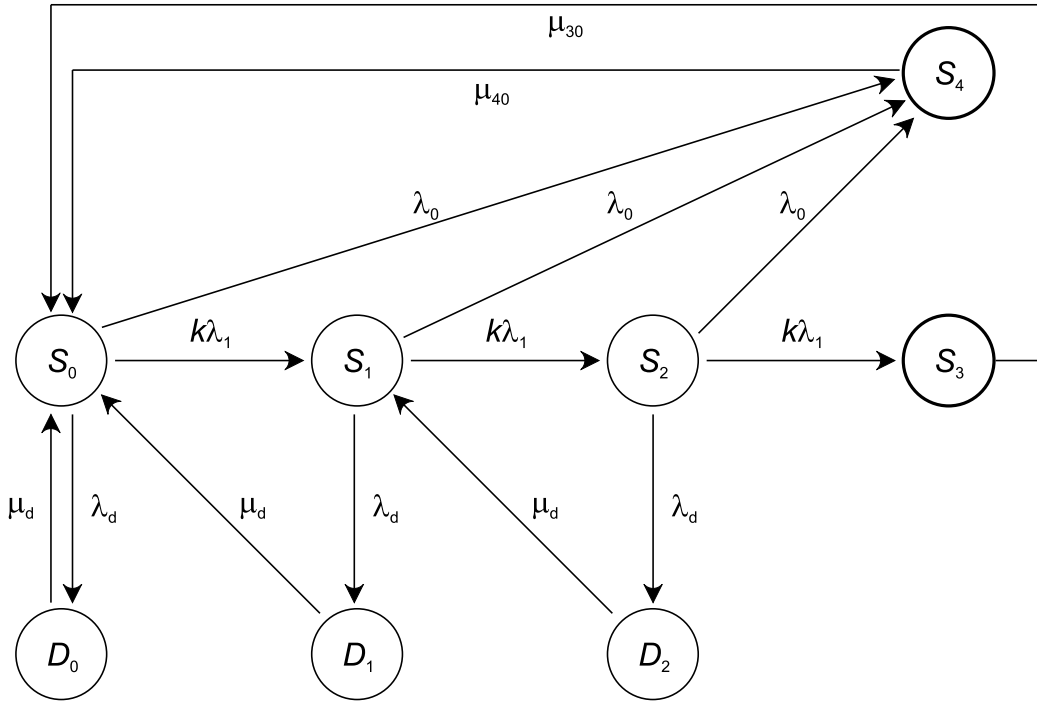
### 10.5. Analiza okresów badań diagnostycznych z uwzględnieniem odnowy po obsłudze

W wyniku całościowej procedury diagnostycznej podejmowana jest decyzja o dalszej eksploatacji urządzenia, w tym o jego regeneracji bądź wymianie. Założenie o podjęciu decyzji dotyczące regeneracji badanego układu izolacyjnego w ramach procedury diagnostycznej pozwala na opracowanie modelu,

w którym następuje częściowa odnowa stanu. Proponowany model jest modyfikacją prezentowanego w podrozdziale 10.4.

Graf procesu eksploatacji dla tego modelu (rys. 10.6) obejmuje zbiór stanów tożsamy z przykładem w podrozdziale 10.4:

- dopuszczalne stany układu izolacyjnego ( $S_0, S_1, S_2$ ),
- stany uszkodzenia i awarii ( $S_3, S_4$ ),
- stany obsługi diagnostycznej wraz z konserwacją bieżącą ( $D_0, D_1, D_2$ ).



**Rys. 10.6.** Graf procesu eksploatacji układu izolacyjnego opartego na dielektryku stałym z uwzględnieniem obsługi diagnostycznej oraz odnowy;  $S_0, S_1, S_2$  - stany dopuszczalne układu,  $S_3$  - stan awarii,  $S_4$  - stan awarii w wyniku uszkodzenia katastrofalnego,  $D_0, D_1, D_2$  - stany obsługi diagnostycznej wraz z konserwacją bieżącą

Uwzględniając w modelu wyraźne efekty decyzji diagnostycznych (w postaci obsługi odnowy i regeneracji) i obsługi bieżącej można wykazać, że istnieje optymalny okres obsług ze względu na dyspozycyjność obiektu, dla znanych parametrów intensywności przejść lub przebywania urządzenia w danym stanie.

Dane przyjęte do obliczeń są analogiczne jak w przykładzie wcześniejszymi, w celu uwidocznienia wyników symulacji.

- średni statystyczny czas do uszkodzenia katastroficznego:  $\lambda_0^{-1} = 500$  dni,
- średni statystyczny czas życia układu izolacyjnego:  $\lambda_1^{-1} = 1000$  dni,
- czas pełnego usunięcia awarii  $\mu_{40}^{-1} = 2$  dni,
- czas pełnej wymiany jednostki na nową  $\mu_{30}^{-1} = 7$  dni,
- czas obsługi diagnostycznej z odnową  $\mu_d^{-1} = 0,5$  dnia,

- liczba stanów pośrednich  $k = 3$ ,
- optymalny czasookres badań  $t_{d.opt} = \lambda_d^{-1} = \text{const.}$

Korzystając ze zależności (10.15) oraz warunku normalizującego (10.17) można wyznaczyć funkcje prawdopodobieństw przebywania obiektu w danym stanie, uwzględniając macierz przejść pomiędzy stanami zgodną, z grafem przedstawionym na rysunku 10.6:

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} z & k\lambda_1 & 0 & \lambda_d & 0 & 0 & \lambda_0 & 0 \\ 0 & z & k\lambda_1 & 0 & \lambda_d & 0 & \lambda_0 & 0 \\ 0 & 0 & z & 0 & 0 & \lambda_d & \lambda_0 & k\lambda_1 \\ \mu_d & 0 & 0 & -\mu_d & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_d & 0 & 0 & 0 & -\mu_d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_d & 0 & 0 & 0 & -\mu_d & 0 & 0 \\ \mu_{40} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_{40} & 0 \\ \mu_{30} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_{30} \end{bmatrix} \quad (10.27)$$

gdzie:

$$z = -k\lambda_1 - \lambda_d - \lambda_0.$$

Podstawiając macierz (10.27) do równania (10.15) otrzymuje się rozwiązanie w postaci prawdopodobieństw w funkcji intensywności przejść  $\lambda_d$ :

$$p_1 = \frac{5000(1 + 280\lambda_d + 4 \cdot 10^4 \lambda_d^2)}{9877 + 20,129 \cdot 10^5 \lambda_d + 2,018 \cdot 10^8 \lambda_d^2 + 10^8 \lambda_d^3} \quad (10.28)$$

$$p_2 = \frac{3000(1 + 200\lambda_d)}{9877 + 20,129 \cdot 10^5 \lambda_d + 2,018 \cdot 10^8 \lambda_d^2 + 10^8 \lambda_d^3} \quad (10.29)$$

$$p_3 = \frac{1800}{9877 + 20,129 \cdot 10^5 \lambda_d + 2,018 \cdot 10^8 \lambda_d^2 + 10^8 \lambda_d^3} \quad (10.30)$$

$$p_4 = \frac{2500\lambda_d(1 + 280\lambda_d + 4 \cdot 10^4 \lambda_d^2)}{9877 + 20,129 \cdot 10^5 \lambda_d + 2,018 \cdot 10^8 \lambda_d^2 + 10^8 \lambda_d^3} \quad (10.31)$$

$$p_5 = \frac{1500\lambda_d(1 + 200\lambda_d)}{9877 + 20,129 \cdot 10^5 \lambda_d + 2,018 \cdot 10^8 \lambda_d^2 + 10^8 \lambda_d^3} \quad (10.32)$$

$$p_6 = \frac{900\lambda_d}{9877 + 20,129 \cdot 10^5 \lambda_d + 2,018 \cdot 10^8 \lambda_d^2 + 10^8 \lambda_d^3} \quad (10.33)$$

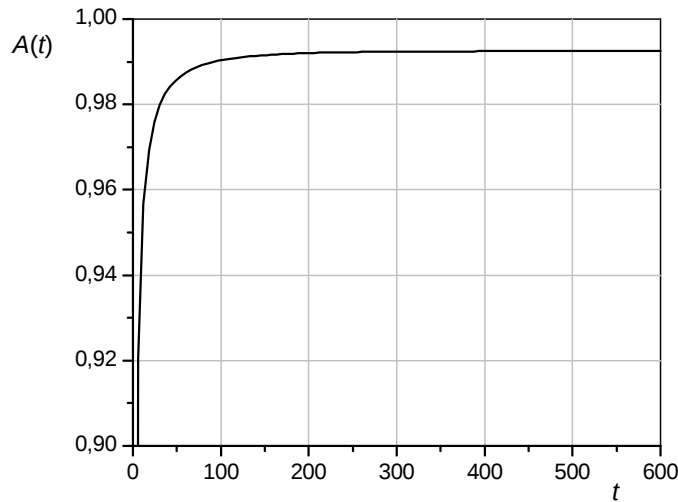
$$p_7 = \frac{4(49 + 10^4 \lambda_d + 10^6 \lambda_d^2)}{5(9877 + 20,129 \cdot 10^5 \lambda_d + 2,018 \cdot 10^8 \lambda_d^2 + 10^8 \lambda_d^3)} \quad (10.34)$$

$$p_8 = \frac{189}{5(9877 + 20,129 \cdot 10^5 \lambda_d + 2,018 \cdot 10^8 \lambda_d^2 + 10^8 \lambda_d^3)} \quad (10.35)$$

Dyspozycyjność urządzenia dla rozpatrywanego modelu jest również sumą prawdopodobieństw przebywania w stanach  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  i wynosi:

$$A(t) = \frac{200(49 + 10^4 \lambda_d + 10^6 \lambda_d^2)}{9877 + 20,129 \cdot 10^5 \lambda_d + 20,18 \cdot 10^8 \lambda_d^2 + 10^8 \lambda_d^3} \quad (10.36)$$

Przebieg funkcji dyspozycyjności (10.36) w zależności od intensywności obsługi został przedstawiony na rysunku 10.7.

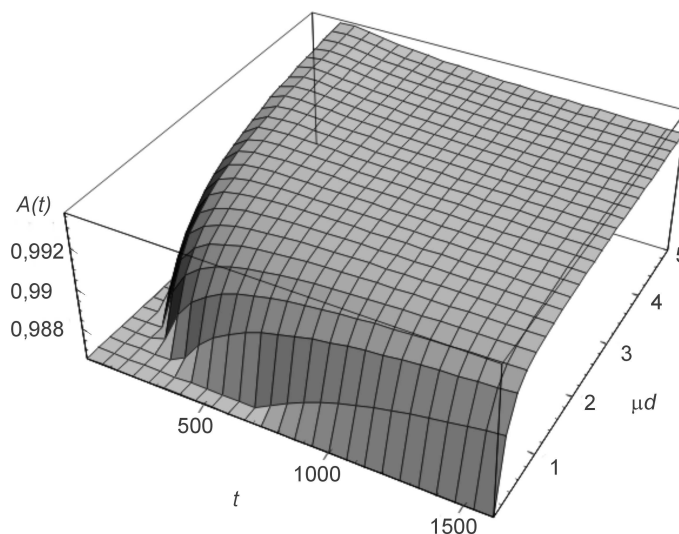


**Rys. 10.7.** Przebieg funkcji dyspozycyjności urządzenia  $A(t)$  (10.36) w zależności od okresu obsługi diagnostycznej  $t$  od 0 do 600 dni

Funkcja dyspozycyjności osiąga swoje maksimum dla wartość  $A(t) = 99,25\%$  odpowiadającej okresowi obsługi równemu 507,3 dnia. Dla zwyczajowo przyjętego okresu badań rocznych  $\lambda_d = 1/365$  [doba<sup>-1</sup>], dyspozycyjność znajduje się na podobnym poziomie 99,24%.

Otrzymane wyniki są jedynie słuszne dla przyjętych danych obliczeniowych, które mogą być modyfikowane w zależności od parametrów badanego urządzenia oraz strategii jego obsługi.

Na rysunku 10.8 przedstawiono wpływ czasu obsługi  $\mu_d = 1/t$  na dyspozycyjność urządzenia. Z obliczeń wynika, że dla przyjętych danych, widoczny wpływ na otrzymane wartości ma obsługa trwająca poniżej 1 dnia.



**Rys. 10.8.** Wpływ intensywności odnowy  $\mu_d$  [doba] $^{-1}$  oraz okresu obsługi  $t$  [doba] na dyspozycyjność  $A$  urządzenia z układem izolacyjnym opartym na dielektryku stałym

Dla czasu obsługi równego  $t = 8$  godzin, dyspozycyjność osiąga swoje maksimum dla okresu kontroli równego 272 dni. Natomiast dla czasu obsługi równego 12 godzin wartość maksymalna funkcji  $A(t)$  jest osiągana dla około  $t = 507$  dni, z czego wynika, iż zmniejszając czas pojedynczej obsługi zaledwie o  $1/3$  można zwiększyć intensywność badań prawie dwukrotnie dla podobnego poziomu dyspozycyjności obiektu.

Przy organizacji harmonogramu prac diagnostycznych, oprócz optymalizacji dyspozycyjności obiektu, należy uwzględnić również koszty intensyfikacji obsługi. Konsekwencją takiej intensyfikacji może okazać się konieczność zwiększenia liczby ekip remontowych, w celu zachowania czasu obsługi.

Podstawą ustalenia kryteriów czasów obsługi urządzeń może być wynik symulacji jak przedstawiona powyżej. Przyjmując średni czas obsługi można znaleźć optymalną liczbę ekip remontowych dla danej grupy urządzeń. Analiza doboru odpowiedniej liczby ekip remontowych przy spodziewanej intensywności uszkodzeń może być przeprowadzona na podstawie obliczeń przedstawionych w kolejnym podrozdziale. Proces obsługi urządzeń został opisany modelem systemu kolejkowego uwzględniającego strategię obsługi urządzeń oraz ich liczbę.

## 10.6. Optymalizacja nakładów na obsługę diagnostyczną

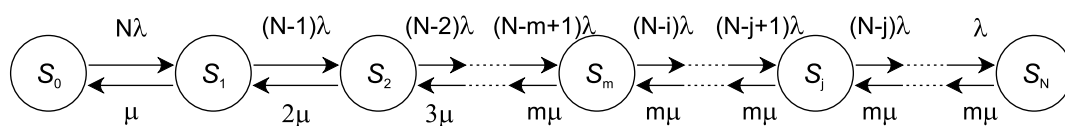
Jednym z istotnych czynników wpływających na koszty diagnostyki są nakłady na utrzymanie odpowiedniej liczby ekip remontowych, zapewniających

żądaną intensywność obsług oraz czas ich trwania. Uwzględniając sytuację społeczno- ekonomiczną, istotnym czynnikiem jest wyznaczenie optymalnej liczby ekip remontowych, która z jednej strony będzie w stanie wystarczająco szybko wykonywać wszelkie usługi diagnostyczne (począwszy od badań aż do przywrócenia stanu zdatności) urządzeń ze względu na koszty przestoju w pracy urządzenia, a z drugiej strony nie będzie konieczna redukcja zatrudnienia przy nadmiernej liczbie ekip.

Analizę procesu obsługi danej grupy urządzeń można przeprowadzić z wykorzystaniem teorii kolejek i modelu systemu ze stałą intensywnością zgłoszeń urządzeń lub obiektów do obsługi i stałym średnim czasem obsługi. Ponieważ w ramach jednego przedsiębiorstwa energetycznego można wydzielić wiele różnych grup urządzeń o różnych czasach pomiędzy obsługami, symulację można przeprowadzić dla każdego takiego zbioru oddzielnie. W celu wyznaczenia liczebności grupy do obsługi, urządzenia takie jak linie elektroenergetyczne napowietrzne i kablowe można traktować jako grupę urządzeń, przyjmując jako element jednostkowy 1 kilometr linii. Wówczas, przykładowo linia o długości 124 km może być modelowana jako system 124 elementowy z intensywnością zgłoszeń do obsługi z każdego poszczególnego elementu.

W celu przeprowadzenia obliczeń przyjmuje się stałą liczbę (w rozpatrywanym okresie czasu) urządzeń podlegających obsłudze. Wielkością poszukiwaną ze względu na całkowite koszty obsługi jest liczba ekip. Ponadto analizując sposób realizacji badań i napraw, jak również system zgłaszania do obsługi urządzeń, można przyjąć dla rozpatrywanego procesu model systemu kolejowego typu  $M/M/m/FIFO/N/F$  [18, 19].

System tego typu jest systemem zamkniętym (o stałej liczbie elementów) i charakteryzuje się wykładniczym rozkładem czasów obsługi oraz intensywności zgłoszeń, czyli uszkodzeń. Realizacja zgłoszeń do obsługi odbywa się zgodnie z kolejnością zgłoszeń, według dyscypliny kolejki typu – FIFO<sup>2</sup> „pierwsze przyszło, pierwsze wychodzi”.



**Rys. 10.9.** Graf stanów systemu kolejowego obsługi urządzeń elektroenergetycznych;  $\lambda$  – intensywność zgłoszeń,  $\mu$  – intensywność obsługi,  $N$  – liczba elementów systemu,  $m$  – liczba ekip obsługujących

Zgodnie z grafem stanów dla rozpatrywanego modelu przedstawionym na rysunku 10.9 przejście ze stanu  $S_0$  (brak urządzeń w obsłudze) do stanu  $S_1$  może nastąpić z intensywnością będącą iloczynem liczby elementów systemu  $N$  i intensywności zgłoszeń dla każdego z nich ( $\lambda$ ). Wszystkie zgłoszenia do

---

<sup>2</sup> ang. *First In First Out*

stanu  $S_m$  odpowiadającego liczbie zgłoszeń równej liczbie ekip mogących dokonać obsługi są obsługiwane na bieżąco. Wszystkie stany dla  $m < j \leq N$  odpowiadają oczekiwaniu na obsługę.

Prawdopodobieństwo znalezienia się w stanie z obsługą bieżącą ( $p_i$ ) dla przyjętego modelu:

$$p_i = \frac{N!}{i!(N-i)!} \rho^i p_0 \quad \text{dla } i = 1, \dots, m \quad (10.37)$$

gdzie:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}.$$

Natomiast prawdopodobieństwo przebywania w stanie  $S_j$  odpowiadającym oczekiwaniu na obsługę:

$$p_j = \frac{N!}{m!m^{j-m}(N-j)!} \rho^j p_0 \quad \text{dla } j = m+1, \dots, N \quad (10.38)$$

Oba prawdopodobieństwa wyrażone funkcjami (10.37) i (10.38) są zależne od wartości prawdopodobieństwa  $p_0$  przebywania systemu w stanie  $S_0$ . Prawdopodobieństwo  $p_0$  można wyznaczyć uwzględniając powyższe zależności oraz warunek normalizujący:

$$\sum_{k=0}^{k=N} p_k(t) = 1 \quad (10.39)$$

wówczas:

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^m C_N^k \rho^k + \sum_{k=m}^N C_N^k \frac{\rho^k j!}{m!m^{j-m}}} \quad (10.40)$$

Proces optymalizacji liczby ekip remontowych przedstawiono poniżej na przykładzie czysto teoretycznym, dla którego przyjęto założenia, że liczebność grupy urządzeń (np. transformatorów) jest stała dla przyjętych obliczeń i wynosi  $N = 100$ . Zakłada się, że poza okresami obsługi przeglądów diagnostycznych i eksploatacyjnych wszystkie urządzenia są w ruchu. Wszystkie prace związane z obsługą diagnostyczną są wykonywane przez jedną z  $m$  ekip. Poniższe obliczenia zostały wykonane tylko dla przykładowych założeń i wielkości, które mogą być takie same dla różnych grup urządzeń.

Ponadto:

- każdy urządzenie może być wyłączone z ruchu z prawdopodobieństwem o rozkładzie Poissona, dla którego wartość oczekiwana równa jest  $\lambda$ ,
- dla uproszczenia wszystkie urządzenia są traktowane jako identyczne,
- czasy wyłączenia z ruchu pojedynczego urządzenia ze względu na obsługę i odnowę, są zmiennymi losowymi niezależnymi od siebie i podlegają

rozkładowi wykładniczemu o wartości średniej  $\mu^{-1} = t_o$  równej średniemu czasowi potrzebnemu na odnowę stanu urządzenia,

- koszt pracy jednej ekipy w jednostce czasu wynosi  $c_1$ ,
- koszt wyłączenia z ruchu danego transformatora wynosi  $c_2$ ,
- $i$  jest liczbą ekip wykonujących prace obsługowe,
- $j$  jest liczbą zgłoszeń do obsługi.

Rozwiązaniem optymalnym dla rozpatrywanego przypadku jest znalezienie liczby ekip  $m$ , dla której funkcja celu osiągnie minimum, przy założeniu, że w danej chwili  $t$  jest wyłączone z ruchu  $n_t$  urządzeń. Ponieważ poszukiwaną wartością minimalną są koszty ponoszone na obsługę uszkodzonych urządzeń przyjęta funkcja celu uwzględnia zarówno koszty obsługi jak również koszty wyłączenia z pracy urządzenia:

$$f(m) = c_1 m + c_2 \bar{n} \quad (10.41)$$

gdzie:

- $m$  – liczba ekip remontowych,
- $\bar{n}$  – średnia liczba uszkodzonych obiektów.

Dla przyjętego modelu systemu kolejkowego średnia liczba uszkodzonych obiektów jest zależna od średniej ilości obsług wykonywanych przez ekipy remontowe  $\bar{m}$  oraz stosunku intensywności uszkodzeń do intensywności obsług, zgodnie ze wzorem:

$$\bar{n} = N - \frac{\bar{m}}{\rho} = \sum_{n=0}^{\infty} n p_n \quad (10.42)$$

natomiast średnią liczbę obsług wyznacza się dla przyjętego modelu z zależności [19]:

$$\bar{m} = \sum_{i=0}^{m-1} i p_i + m \sum_{k=m}^N p_k = \sum_{i=0}^{m-1} i p_i + m \left( 1 - \sum_{i=0}^{m-1} p_i \right) \quad (10.43)$$

Zgodnie z powyższym oraz zależnościami przedstawionymi w [18], funkcja celu przyjmuje końcową postać:

$$f(m) = c_1 m + \frac{c_2}{1 + \rho} \left[ \rho N + \frac{m \sum_{j=m+1}^N C_N^j \frac{j! \rho^j}{m! m^{j-m}}}{\sum_{j=1}^{m-1} C_N^j \rho^j + \sum_{j=m}^N C_N^j \frac{j! \rho^j}{m! m^{j-m}}} \right] \quad (10.44)$$

Wyniki obliczeń funkcji celu w zależności od liczby ekip na  $m$  oraz średniej liczby obsług  $\bar{n}$  (będącej funkcją  $m$ ) przy stałych wartościach  $\lambda = 0,03$  [doba<sup>-1</sup>],  $\mu^{-1} = 1$  [doba],  $c_1 = 1$ ,  $c_2 = 20$  oraz  $N = 100$  przedstawione zostały

w tabeli 10.1 oraz na wykresie 10.10. Najmniejsze wartości całkowitych kosztów obsługi dla powyższych danych są dla liczby ekip  $m = 6$  oraz 7. Na tej podstawie można przyjąć, że dla badanego przykładu najbardziej korzystną liczbą ekip remontowych, ze względu na koszty jest sześć.

**Tabela 10.1**

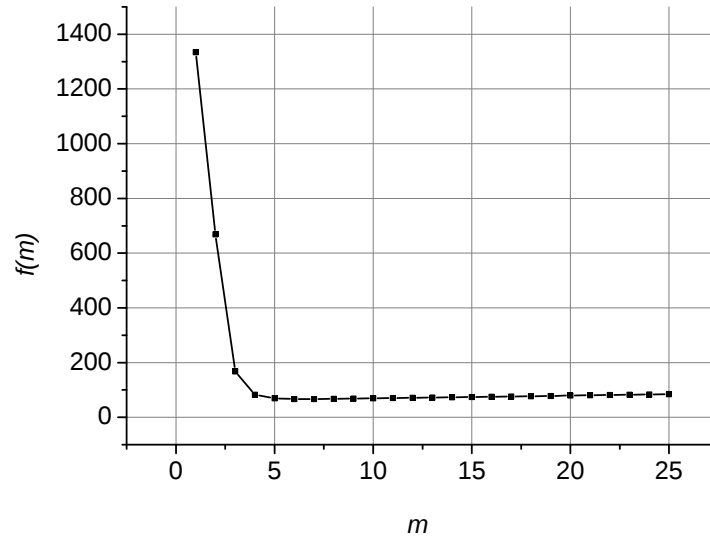
Wyniki symulacji wartości funkcji celu  $f(m)$  w zależności od liczby ekip  $m$  i średniej liczby obsług  $\bar{n}$ , przy stałych wartościach  $\lambda = 0,03$ ,  $\mu^{-1} = 1$  [doba],  $c_1 = 1$ ,  $c_2 = 20$  oraz  $N = 100$

| $m$ | $f(m)$  | $\bar{n}$ | $m$ | $f(m)$ | $\bar{n}$ |
|-----|---------|-----------|-----|--------|-----------|
| 1   | 1334,33 | 66,7      | 11  | 70,29  | 2,96      |
| 2   | 668,72  | 33,3      | 12  | 71,29  | 2,96      |
| 3   | 168,12  | 8,25      | 13  | 72,29  | 2,96      |
| 4   | 82,66   | 3,93      | 14  | 73,29  | 2,96      |
| 5   | 69,27   | 3,21      | 15  | 74,29  | 2,96      |
| 6   | 66,67   | 3,03      | 16  | 75,29  | 2,96      |
| 7   | 66,67   | 2,98      | 17  | 76,29  | 2,96      |
| 8   | 67,39   | 2,97      | 18  | 77,29  | 2,96      |
| 9   | 68,32   | 2,96      | 19  | 78,29  | 2,96      |
| 10  | 69,30   | 2,96      | 20  | 79,29  | 2,96      |

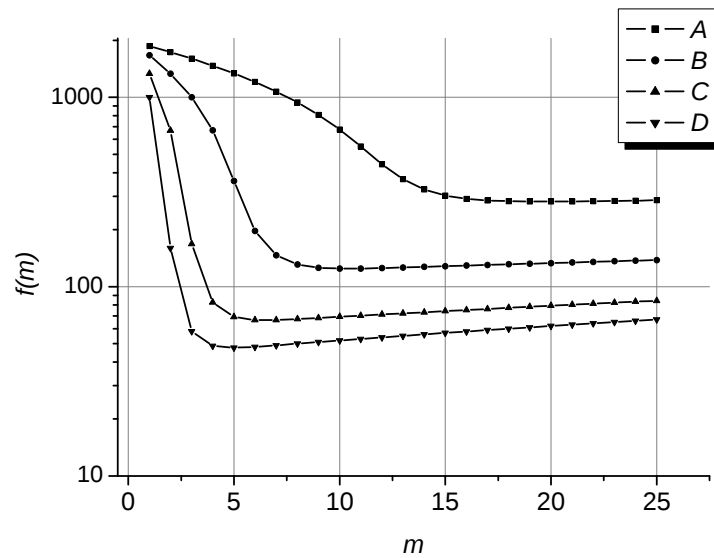
Dodatkowo, analizując otrzymane wyniki można zauważyć, iż dużo bardziej znaczący wpływ na sumaryczne koszty obsługi ma brak dostatecznej liczby ekip niż ich nadmiar. Małe zmiany wartości funkcji celu po osiągnięciu minimum wynikają również ze stosunku kosztów wyłączenia urządzenia z ruchu  $c_2$  oraz kosztu pracy pojedynczej ekipy  $c_1$ . Zależność (10.44) jest funkcją wielu zmiennych, które można modelować. W celu wyznaczenia wpływu intensywności zgłoszeń oraz napraw, jak również kosztów przestoju urządzeń i liczebności systemu na przebieg funkcji celu, przeprowadzono dodatkowe obliczenia, których wyniki zostały przedstawione na wykresach 10.11, 10.12, 10.13, 10.14.

Analiza wpływu intensywności obsług (czasu obsługi) urządzeń  $\mu$ , a więc czasu wykonania obsługi, przedstawiona na wykresie 10.11 wskazuje, iż wzrost intensywności  $\mu$  nie tylko wpływa na przesunięcie residuum funkcji w lewo, wraz ze zmniejszaniem się wartości  $m$ , ale jednocześnie zdecydowanie obniża koszty obsługi diagnostycznej. Z ekonomicznego punktu widzenia korzystniej jest utrzymywać mniejszą liczbę ekip o wysokiej wydajności, niż proporcjonalną większą liczbę o mniejszej wydajności obsług. Zależność pomiędzy wartościami funkcji celu i intensywnością obsług nie jest liniowa.

Podobny wpływ na przebieg funkcji celu ma intensywność zgłoszeń do obsługi. Dla tej samej grupy urządzeń i tych samych współczynników kosztów oraz stałej intensywności obsług, wyznaczono przebiegi funkcji celu dla różnych wartości  $\lambda$  (rys. 10.12). Wraz ze zmniejszaniem się intensywności zgłoszeń moż-

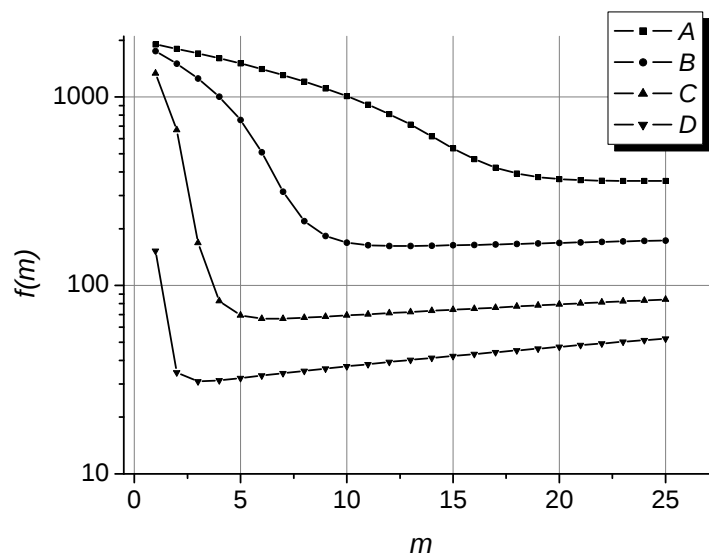


**Rys. 10.10.** Wykres całkowitych kosztów obsługi grupy urządzeń w zależności od liczby ekip remontowych  $f(m)$ , dla wartości  $\lambda = 0,03$  [doba<sup>-1</sup>],  $\mu^{-1} = 1$  [doba],  $c_1 = 1$ ,  $c_2 = 20$  oraz  $N = 100$



**Rys. 10.11.** Analiza wpływu intensywności obsługi (czasu naprawy urządzenia); dane obliczeniowe –  $N = 100$ ,  $\lambda = 0,03$  [doba<sup>-1</sup>],  $c_1 = 1$ ,  $c_2 = 20$  oraz  $A : \mu = 0,2$  [doba<sup>-1</sup>],  $B : \mu = 0,5$  [doba<sup>-1</sup>],  $C : \mu = 1$  [doba<sup>-1</sup>],  $D : \mu = 1,5$  [doba<sup>-1</sup>]

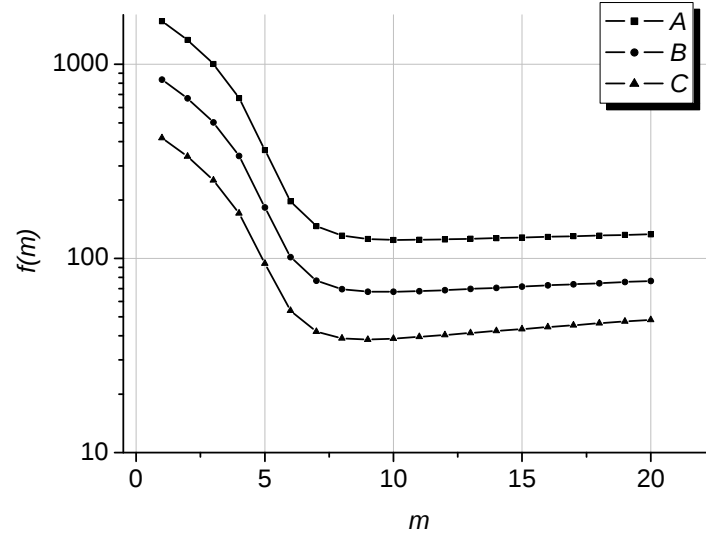
na zaobserwować zmniejszenie się kosztów obsługi oraz liczby ekip wymaganej do realizacji obsługi bez przestojów.



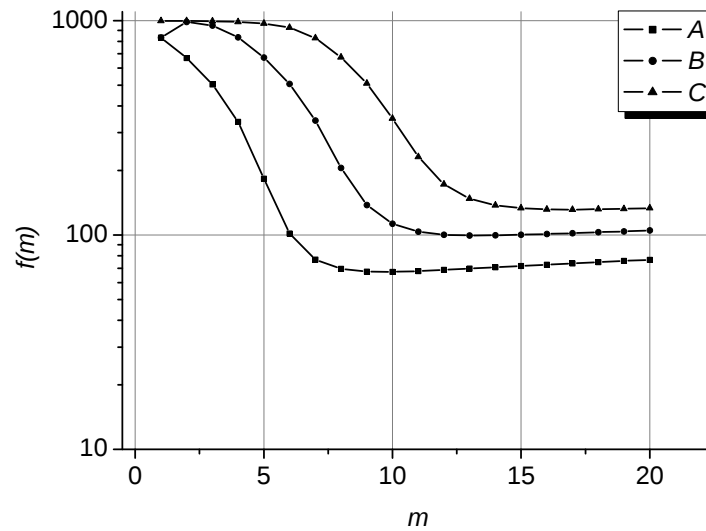
**Rys. 10.12.** Analiza wpływu intensywności zgłoszeń (uszkodzeń) do obsługi; dane obliczeniowe –  $N = 100$ ,  $\mu^{-1} = 1$  [doba],  $c_1 = 1$ ,  $c_2 = 20$  oraz  $A : \lambda = 0,2$  [doba $^{-1}$ ],  $B : \lambda = 0,08$  [doba $^{-1}$ ],  $C : \lambda = 0,03$  [doba $^{-1}$ ],  $D : \lambda = 0,01$  [doba $^{-1}$ ]

Zmiana wartości współczynnika  $c_2$  kosztów wyłączenia urządzenia z ruchu wpływa jedynie na wysokość podnoszonych kosztów obsługi (rys. 10.13). Zgodnie z oczekiwaniami tendencja zmian jest proporcjonalna do zmian wartości współczynnika  $c_2$  – mniejsze koszty przestoju, mniejsze koszty obsługi. Podobna zależność jest również zauważalna przy zmianie stosunku  $c_1$  do  $c_2$ .

Analiza wpływu liczebności obsługiwanego systemu na koszty obsługi wskazuje największy wpływ na funkcję celu (rys. 10.14). Oprócz wzrostu kosztów wraz ze wzrostem liczby obiektów w systemie, jak również wzrostu wymaganej liczby ekip potrzebnych do obsługi urządzeń bez oczekiwania na obsługę, widać również największy wzrost wartości funkcji celu w przypadku mniejszej liczby ekip niż optymalna.



**Rys. 10.13.** Analiza wpływu kosztów obsługi i napraw na przebieg funkcji celu; dane obliczeniowe –  $N = 100$ ,  $\lambda = 0,03$  [doba<sup>-1</sup>],  $\mu^{-1} = 1$  [doba],  $c_1 = 1$  oraz  $A : c_2 = 20$ ,  $B : c_2 = 10$ ,  $C : c_2 = 5$



**Rys. 10.14.** Zależność optymalnej liczby ekip remontowych od liczebności systemu; dane obliczeniowe –  $\lambda = 0,03$  [doba<sup>-1</sup>],  $\mu^{-1} = 1$  [doba],  $c_1 = 1$ ,  $c_2 = 20$  dla  $A : N = 100$ ,  $B : N = 150$ ,  $C : N = 200$

## 11. Wnioski

Problematyka optymalizacji w diagnostyce urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia została przedstawiona w oparciu o umiejscowienie obsługi diagnostycznej w procesie eksploatacji urządzeń oraz jej wpływ na jakość zasilania energią elektryczną. Główny cel diagnostyki ze względu na jakość zasilania to zwiększenie dyspozycyjności urządzeń elektroenergetycznych biorących udział w przesyłach i rozdziale energii elektrycznej, z której można uzyskać określone korzyści ekonomiczne. Skuteczność oraz poziom technicznych badań diagnostycznych wpływają na osiągnięte efekty ekonomiczne w eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych.

Głównymi kryteriami optymalizacyjnymi prowadzonych rozważań w pracy były:

- minimalizacja kosztów diagnostyki (rozdziały 8, 9, 10),
- minimalny czas trwania badania diagnostycznego (rozdziały 9, 10),
- maksymalna efektywność wykorzystania danych diagnostycznych (rozdziały 6, 7, 9, 10),
- wyznaczenie maksymalnego prawdopodobieństwa wykrycia uszkodzenia przy ograniczonych kosztach obsługi diagnostycznej (rozdziały 6, 7, 8, 9),
- minimalizacja liczby obsług diagnostycznych (rozdział 10).

Powyższe kryteria były rozważane oddzielnie ze względu na problematykę optymalizacji wielokryterialnej dla ogólnej grupy urządzeń. Poprawne sformułowanie funkcji celu dla polioptymalizacji wymaga dopasowania wartości skalarnych do poszczególnych kryteriów i opisanie ich za pomocą wyrażeń matematycznych, co przy ograniczonym dostępie do rzeczywistych i pełnych danych eksploatacyjnych urządzeń elektroenergetycznych stanowi duży problem. Ograniczając rozważania tylko do jednego typu urządzeń można wyznaczyć funkcję celu obsługi diagnostycznej dla optymalizacji uwzględniającej jednocześnie kilka kryteriów, której rozwiązanie byłoby akceptowalne z punktu widzenia każdego kryterium.

Mając na uwadze różnorodność konstrukcji oraz warunków eksploatacyjnych urządzeń elektroenergetycznych, w celu optymalizacji obsług diagnostycznych, z uwzględnieniem wymienionych powyżej kryteriów, główny nacisk położono na analizę diagnostyczną oraz ogólną procedurę diagnostyczną. Do analizy diagnostycznej zaproponowano metody matematyczne opracowywania i analizy

danych pomiarowych, procesów zmian stanów technicznych urządzeń jak również procesów eksploatacji urządzeń.

W pracy starano się usystematyzować pojęcie procedury diagnostycznej ze szczególnym uwzględnieniem analizy diagnostycznej oraz częstotliwości obsług diagnostycznych. W oparciu o dotychczasowe metody niezawodnościowe wykorzystywane w diagnostyce technicznej zaproponowano zastosowanie nowych rozwiązań i narzędzi (w tym szersze zastosowanie teorii procesów Markowa i modeli wielostanowych). W rozprawie wskazano na optymalizację procedur diagnostycznych poprzez ich systematykę i zwiększenie efektywności poprzez zastosowanie modeli matematycznych, co pozwala na ograniczenie czasu i kosztów obsługi diagnostycznej.

W przypadku diagnostyki poawaryjnej przedstawiono kilka algorytmów detekcji uszkodzeń w zbiorach wieloelementowych, w tym przypadku jako urządzeń o skomplikowanej budowie lub systemów i ich części.

W efektywniejszym zastosowaniu diagnostyki urządzeń energetycznych znaczącą rolę odgrywa analiza niezawodnościowa badanego obiektu, zwłaszcza ze względu na dynamiczny rozwój:

- modelowania diagnostycznego (energetycznego, strukturalnego, symptomowego),
- metod diagnozowania, genezowania, prognozowania i podatności diagnostycznej (przyjazne metody i obiekty),
- nowoczesnych, ekonomicznych i dokładnych środków diagnozy,
- metod oceny efektywności zastosowań diagnostyki,
- komputerowych metod obliczeniowych i informatyzacji w diagnostyce.

Jako dodatkowe źródło informacji zaproponowano modelowanie matematyczne z wykorzystaniem danych diagnostycznych i eksploatacyjnych. Ze względu na losowy charakter uszkodzeń urządzeń elektroenergetycznych, procesu starzenia urządzeń, jak również procesu eksploatacji, w pracy przedstawiono możliwości aplikacji teorii procesów losowych Markowa dla oceny stanu, wyznaczenia prawdopodobieństwa uszkodzenia lub awarii w czasie oraz optymalizacji częstotliwości obsług diagnostycznych i eksploatacyjnych.

Z przedstawionych metod opracowywania procedur diagnostycznych oraz przetwarzania i analizowania danych diagnostycznych wynika, że nie wszystkie możliwe do wykonania operacje diagnostyczne muszą być wykonane dla pełnej identyfikacji stanu badanego urządzenia. Wykazano również, że dla tego samego obiektu można wyznaczyć różne modele strategii obsługi diagnostycznej, wykonywanych w różnych okresach i z różną intensywnością.

Ponadto wykorzystując zastosowanie teorii procesów losowych Markowa i teorii systemów kolejkowych wskazano na możliwość optymalizacji liczby ekip diagnostycznych ze względu na czas obsługi i statystyczną awaryjność urządzeń.

Diagnostyka bazująca na modelu pozwalająca na określenie prawdopodobieństwa uszkodzenia i awarii, a w konsekwencji na podjęcie działań prewencyj-

nych (odnowa stanu urządzenia) stanowią podstawę do działań zwiększających jakości zasilania ze względu na ograniczenie awarii – MUT i jej kosztów oraz minimalizacji czasu przestoju na obsługę diagnostyczną MDT.

Ze względu na brak możliwości przeprowadzenia eksperymentalnych czynności obsługowych na rzeczywistych obiektach elektroenergetycznych oraz zbyt długi czas trwania takich badań, konieczne i celowe jest konstruowanie i stosowanie modeli do badań symulacyjnych.

Wynika stąd konieczność optymalizacji diagnostyki urządzeń elektroenergetycznych poprzez wybór najkorzystniejszej obsługi diagnostycznej dla danego obiektu oraz ustalenia harmonogramu obsług według przyjętych kryteriów.

Bardzo szeroki zakres problematyki optymalizacji, z jaką zetknął się autor w trakcie przygotowywania rozprawy, skłaniają do dalszych prac w tym kierunku, z uszczegółowieniem badań tylko dla wybranej grupy urządzeń, co pozwoliłoby na sprecyzowanie formułowanych funkcji celu oraz zastosowanie optymalizacji wielokryterialnej. Duże możliwości zastosowań teorii procesów Markowa w zakresie badań operacyjnych pozwalają również na dalsze wykorzystanie narzędzi matematycznych opartych na tej teorii dla potrzeb zarządzania majątkiem sieciowym oraz opracowania strategii obsług urządzeń elektroenergetycznych.

## Bibliografia

- [1] Arbusov R.S., Ovsyannikov A.G. UV-Inspection of HV Equipment. *Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering*, strony G-029, Beijing, China, 25-29 August 2005.
- [2] Argasińska H. Linie napowietrzne. *Elektroenergetyka*, (7 (565)):379 – 386, lipiec 2001.
- [3] Bargiel J., Goc W., Sowa P., Paska J., Momot A. Ocena i propozycje zmian obecnych uregulowań prawnych w zakresie niezawodności systemu elektroenergetycznego. *APE '03 Present-day Problems of Power Engineering*, strony 151 – 156, Jurata, Hel Peninsula, 11-13 czerwca 2003.
- [4] Bisci D., Gallanti M., Mazzetti A. e-Maintenance and Business Intelligence for High Voltage Power Network Components. *KES 2002*, Crema, Italy, September 2002.
- [5] Bobrowski D. *Probabilistyka w zastosowaniach technicznych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1986.
- [6] Bogdanienko J. *Odnawialne źródła energii. Biblioteka problemów, t.29*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1989.
- [7] Cempel Cz., Tomaszewski F. *Diagnostyka maszyn: zasady ogólne, przykłady zastosowań*. Międzyresortowe Centrum Naukowe Eksploatacji Majątku Trwałego, Radom, 1992.
- [8] Cempel Cz., Żółtowski B. *Inżynieria diagnostyki maszyn*. Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Bydgoszcz; Radom, 2004.
- [9] Chantler M.J., Leitch R.R., Shen Q., Coghill G.M. A methodology for the development of model-based diagnostic systems. *Real-Time Knowledge Based Systems, IEE Colloquium on*, strony 5/1 – 5/3, London, 31 January 1995.
- [10] Cimbala R. Behavior of remica materials during accelerated thermal stress. *Proceedings of VIII Symposium Problems of High Voltage Insulation Systems Exploitation*, strony 77 – 82, 2001.
- [11] Ciszewski W., Mikołajczyk K. *Ramowa instrukcja eksploatacji elektroenergetycznych linii napowietrznych*. Instytut Energetyki – Ośrodek Normalizacji, Warszawa, 1991.
- [12] Ciura Sz., Kocot H. Wpływ niezawodności elementów sieci na wartość krótkookresowych kosztów krańcowych w węzłach tej sieci. *APE '03 Present-day Problems of Power Engineering*, strony 167 – 174, Jurata, Hel Peninsula, 11-13 czerwca 2003.
- [13] Dakin T.W. Electrical insulation deterioration. *Electrical Technology*, strony 123 – 130, December 1960.
- [14] Davis M.H.A. *Markov Models and Optimization*. Chapman & Hall, London, 1993.

- [15] Domżański T. Kierunki współczesnej diagnostyki transformatorów. *Elektroenergetyka*, (4 (562)):172 – 178, kwiecień 2001.
- [16] Duda D., Gacek Z., Przygodzki M. Optymalizacja terminów reinwestycji wybranych urządzeń elektroenergetycznych. *Przegląd Elektrotechniczny Konferencje*, (1):69 – 72, 2005.
- [17] Dudzik J. Eksploatacja i sterowanie systemu elektroenergetycznego. *Elektroenergetyka*, (7 (565)):420 – 422, lipiec 2001.
- [18] Filipowicz B. *Modelowanie i optymalizacja systemów kolejkowych. Część I Systemy markowskie*. Przedsiębiorstwo Poligraficzne T. Rudkowski, Kraków, 1995.
- [19] Filipowicz B. *Modele stochastyczne w badaniach operacyjnych, analiza i synteza systemów obsługi i sieci kolejkowych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1996.
- [20] Filipowicz B. *Badania operacyjne. Wybrane metody obliczeniowe i algorytmy. Część I*. F.H.U. Poldex, Kraków, 1997.
- [21] Fleszyński J., redaktor. *Laboratorium wysokonapięciowe w dydaktyce i elektroenergetyce*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Warszawa, 1999.
- [22] Florkowska B. *Wyładowania niezupełne w układach izolacyjnych wysokiego napięcia – analiza mechanizmów, form i obrazów*. Wydawnictwo IPPT PAN, Warszawa, 1997.
- [23] Florkowska B., Moskwa Sz., Nowak W., Włodek R., Zydrón P. *Modelowanie procedur diagnostycznych w eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo - Dydaktyczne, Kraków, 2006.
- [24] Frijmersum G.J., Quak B., Gulski E., Smit J.J. Asset Management Decision Support Model for Distribution Power Cable. *Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering*, strony F-13, Beijing, China, 25-29 August 2005.
- [25] Gacek Z. *Kształtowanie wysokonapięciowych układów izolacyjnych stosowanych w elektroenergetyce*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2002.
- [26] Gacek Z. *Wysokonapięciowa technika izolacyjna*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2006.
- [27] Gacek Z., Duda D. Analiza wybranych procesów uszkodzalności elektroenergetycznych kabli średniego napięcia. *VII Sympozjum Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia - EUI'01*, strony 59 – 64, Zakopane, 21-23 października 1999.
- [28] Gacek Z., Duda D. Próba modelowania strumieni uszkodzeń i odnowień wybranych układów izolacyjnych. *VIII Sympozjum Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia - EUI'01*, strony 99 – 104, Zakopane, 18-20 października 2001.
- [29] Gacek Z., Duda D. Model strategii odnowień profilaktycznych linii kablowych SN przy okresowych kontrolach diagnostycznych. *Przegląd Elektrotechniczny Konferencje*, (1):89 – 92, 9-11 października 2003.
- [30] Gajda J.B. *Prognozowanie i symulacja a decyzje gospodarcze*. Wydawnictwo C.H. Beck, Warszawa, 2001.
- [31] Garcia F.G. Design procedures for high-voltage, direct-current transmission cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*, (3(2)):425 – 433, April 1988.

- [32] Goodwin P., Wright G. *Decision Analysis for Management Judgment*. Wiley, Chichester, 2004.
- [33] Gouda O.E., El-Tamaly H.H., Thabet A.M. A new mathematical model for water treeing in solid insulations. *Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering*, strony A-48, Beijing, China, 25-29 August 2005.
- [34] Gould E. Modeling it both ways: hybrid diagnostic modeling and its application to hierarchical system designs. *AUTOTESTCON 2004. Proceedings*, strony 576 – 582, 20-23 September 2004.
- [35] Galski E., Smit J.J., Schomper R., Slangen J., Schikarski P. Condition Assessment Model for Power Transformers. *Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering*, strony F-07, Beijing, China, 25-29 August 2005.
- [36] Jaglarz, A., Gniadek Z. Wybrane zagadnienia eksploatacyjne w zakresie izolacji SN w ZET S.A. *VIII Sympozjum Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia - EUI'01*, strony 219 – 224, Zakopane, 18-20 października 2001.
- [37] Kalinowski K. *Podstawy dynamiki układów elektromechanicznych*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1999.
- [38] Kaźmierski M., Pewca W., Pinkiewicz I., Sobocki R. Transformatory. *Elektroenergetyka*, (7 (565)):353 – 356, lipiec 2001.
- [39] Karpiński J., Firkowicz S. *Zasady profilaktyki obiektów technicznych*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1981.
- [40] Katsigiannis J.A., Georgilakis P.S., Souflaris A.T., Valavanis, K.P. Diagnosing Transformer Faults with Petri Nets. *3rd Hellenic Conference on Artificial Intelligence*, strony 420 – 431, Pythagorion, Samos, 5-8 May 2004.
- [41] Kim, J.B., Kim M.S., Kim T.W., Youn S.H., Song W.P., Park W.Z. Development of smart diagnostic algorithm for 800 kV gas insulated switchgear. *Solid Dielectrics, 2001. ICSD '01. Proceedings of the 2001 IEEE 7th International Conference*, strony 351 – 354, Eindhoven, 25-29 June 2001.
- [42] Konieczny J. *Wstęp do teorii eksploatacji urządzeń*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1971.
- [43] Korniluk W. *Probabilistyczne metody oceny skuteczności ochrony przeciwporażeniowej w urządzeniach elektrycznych niskiego napięcia*. Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok, 1993.
- [44] Kowalski Z., Stępień J.C. Ocena skutków awarii linii kablowych 15 kV. *APE '03 Present-day Problems of Power Engineering*, strony 245 – 250, Jurata, Hel Peninsula, 11-13 czerwca 2003.
- [45] Kupras K., redaktor. *Pomiary w elektroenergetyce*. Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictw SEP, Warszawa, Kraków, 2004.
- [46] Kwaśniewski J. *Analiza struktur inteligentnych systemów do diagnostyki maszyn*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 1997.
- [47] Laskowski J. *Poradnik elektroenergetyka przemysłowego*. COSiW SEP, Warszawa, 1987.
- [48] Laudyn D., Maksymiuk J. *Jakość i niezawodność w elektroenergetyce*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1996.

- [49] Lesiński S. *Wzory i tablice do obliczania niezawodności urządzeń elektrycznych*. Politechnika Łódzka, Łódź, 1994.
- [50] Linzey W.G., Bruning A. Report on 2000 CEIDP workshop on multifactor insulation aging. *IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Magazine*, (18(5)):33 – 35, September/October 2002.
- [51] Maciak R. Raport Energetyka. *Miesięcznik Gospodarczy Nowy Przemysł*, (4(72)):32, kwiecień 2004.
- [52] Maksymiuk J., Pochanke Z. *Obliczenia i badania diagnostyczne aparatury rozdzielczej*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2001.
- [53] Malewski R., Subocz J., Szrot M., Płowucha J., Zaleski R. Podstawy oceny opłacalności modernizacji transformatorów. *Elektroenergetyka*, (nr 12(630)):884 – 891, grudzień 2006.
- [54] Marketz M., Polster J., Muhr M. Maintenance strategies for distribution networks. *Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering*, strony F–55, Beijing, China, 25-29 August 2005.
- [55] Markusson K., Ziomek W., Kuffel E. Optimization of High Voltage Power Transformer Design Using Genetic Algorithms. *Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering*, strony A–05, Beijing, China, 25-29 August 2005.
- [56] Migdalski J., praca zbiorowa. *Poradnik niezawodności – podstawy matematyczne*. Wydawnictwa przemysłu Maszynowego „WEMA”, Warszawa, 1982.
- [57] Molski P. Wybrane zagadnienia dotyczące eksploatacji sieci elektroenergetycznych na sesji CIGRE 2000 (SC-23/39). *Biuletyn Energoprojekt – Kraków SA*, (2/2000):105–111, 2000.
- [58] Montgomery D.C., Runger G.C. *Applied statistic and probability for engineers*. John Wiley & Sons, Inc., New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1999.
- [59] Mosiński F., Piotrowski T. Zastosowanie metod testowania hipotez statystycznych do wspomagania diagnostyki transformatora. *VIII Sympozjum Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia - EUI'01*, strony 333 – 340, Zakopane, 18-20 października 2001.
- [60] Moskwa Sz., Włodek R. Analysis of diagnostic procedures as a part of high voltage devices operation. *48. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Technische Universität Ilmenau*, Ilmenau, 22-25 September 2003.
- [61] Moskwa Sz., Włodek R. Model procedury diagnostycznej w eksploatacji urządzeń WN. *Przegląd Elektrotechniczny Konferencje*, (1):228 – 231, 2003.
- [62] Moskwa Sz., Włodek R. Probabilistic Approach to High Voltage Diagnostic. *5th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2003*, strony 35 – 40, Ostrawa, 28-29 January 2003.
- [63] Moskwa Sz., Włodek R. Zastosowanie procedur probabilistycznych w eksploatacji elektroenergetycznych linii napowietrznych i kablowych. *Przegląd Elektrotechniczny*, (4):30 – 33, 2005.
- [64] Nawarecki E., Filipowicz B. *Wprowadzenie do badań operacyjnych. Część 1. Środki formalne i modele*. Skrypty Uczelniane AGH Nr 819, Kraków, 1981.
- [65] Niziński S., Żółtowski B. *Modelowanie procesów eksploatacji maszyn*. MARKAR, Bydgoszcz – Sulejówek, 2002.
- [66] Nowak W. *Identyfikacja narażeń przepięciowych układów elektroenergetycznych*.

- nych wysokich napięć przy wyładowaniach atmosferycznych*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo - Dydaktyczne AGH, Kraków, 2005.
- [67] Partyga S. Produkcja i eksploatacja transformatorów. Historia, dzień dzisiejszy i przyszłość. *Elektroenergetyka*, (4 (562)):167 – 170, kwiecień 2001.
- [68] Paska J. Jakość dostaw energii elektrycznej, niezawodność zasilania i systemu elektroenergetycznego, bezpieczeństwo energetyczne. *APE '03 Present-day Problems of Power Engineering*, strony 157 – 165, Jurata, Hel Peninsula, 11-13 czerwca 2003.
- [69] Paska J. *Niezawodność systemów elektroenergetycznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005.
- [70] PN-77/E-05118. *Przemysłowe zakłócenia radioelektryczne. Elektroenergetyczne linie i stacje wysokiego napięcia. Dopuszczalny poziom zakłóceń. Ogólne wymagania i badania terenowe*, 1977.
- [71] PN-79/N-04031. *Niezawodność w technice. Estymacja wskaźników niezawodności*, 1979.
- [72] PN-84/N-04041.05. *Niezawodność w technice. Zapewnienie niezawodności obiektów technicznych. Ogólne zasady badań*, 1984.
- [73] PN-87/N-04030. *Niezawodność w technice. Metody wnioskowania statystycznego. Graficzne testowanie hipotez o rozkładach zmiennych losowych*, 1987.
- [74] PN-87/N-04041.07. *Niezawodność w technice. Zapewnienie niezawodności obiektów technicznych. Plany kontroli wskaźników niezawodności dla rozkładu Weibulla*, 1997.
- [75] PN-EN 50110-1:2001. *Eksploatacja urządzeń elektrycznych*, 2001.
- [76] PN-EN 50160:2002. *Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych*, 2002.
- [77] PN-EN 61000. *Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC)*.
- [78] PN-EN 62309:2005. *Niezawodność wyrobów zawierających części używane wielokrotnie. Wymagania dotyczące funkcjonalności i badań*, czerwiec 2005.
- [79] PN-IEC 1165. *Zastosowanie procesów Markowa*, marzec 1998.
- [80] PN-IEC 60364-6-61:2000. *Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Sprawdzanie. Sprawdzanie odbiorcze*, 2000.
- [81] PN-IEC 706-5. *Przewodnik dotyczący obsługiwalności urządzeń – Badania diagnostyczne*, październik 1996.
- [82] PN-IEC 706-6. *Przewodnik dotyczący obsługiwalności urządzeń – Metody statystyczne w ocenie obsługiwalności*, sierpień 1997.
- [83] PNf-90/N-04041.06. *Niezawodność w technice. Zapewnienie niezawodności obiektów technicznych. Weryfikowanie hipotez o rozkładach zmiennych losowych w badaniach niezawodności*, 1990.
- [84] Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. *Instrukcja ruchu i eksploatacji sieci przesyłowej*, 1999.
- [85] Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. Raport UCTE w sprawie blackoutu we Włoszech. *Biuletyn Energetyki Światowej EPC SA*, (12 (21)), czerwiec 2004.
- [86] Praca zbiorowa. *Poradnik Inżyniera Elektryka Tom 1*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1996.
- [87] Pukite P., Pukite J. *Modeling for Reliability Analysis: Markov Modeling for Reliability, Maintainability, Safety, and Supportability*. Wiley-IEEE Press, 1998.

- [88] Rakowska A. *Kryteria oceny weryfikujące jakość polietylenu usieciowanego stosowanego jako izolacja kabli elektroenergetycznych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2000.
- [89] Rakowska A., Grzybowski A. Analiza porównawcza awaryjności linii kablowych i napowietrznych średniego napięcia na przykładzie wybranych spółek dystrybucyjnych. *VIII Sympozjum „Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia - EUI'01”*, strony 377 – 382, Zakopane, 18-20 października 2001.
- [90] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 14 grudnia 2000 r. w sprawie szczegółowych zasad kształtowania i kalkulacji taryf oraz zasad rozliczeń w obrocie energią elektryczną. *Dziennik Ustaw*, (nr 1, poz. 7), 30 stycznia 2001.
- [91] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 25.09.2000 r. w sprawie szczegółowych warunków przyłączania podmiotów do sieci elektroenergetycznych, obrotu energią elektryczną, świadczenia usług przesyłowych, ruchu sieciowego i eksploatacji sieci oraz standardów jakościowych obsługi odbiorców. *Dziennik Ustaw*, (nr 85, poz. 957), 28 września 2000.
- [92] Saha K.T. Review of Modern Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformer. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, (vol. 10, No.5):903 – 917, October 2003.
- [93] Siwik A. *Wielokryterialne metodyki wyznaczania wielonarażeniowych modeli życia układów izolacyjnych*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 1997.
- [94] Sozański J. *Niezawodność zasilania energią elektryczną*. Wydawnictwa Naukowo - Techniczne, Warszawa, 1982.
- [95] Stępień J.C. Ocena optymalnego czasu eksploatacji linii kablowych 15 kV z uwzględnieniem ich zawodności. *Przegląd Elektrotechniczny Konferencje*, (1):242 – 244.
- [96] Stępień J.C. Analiza kosztów strat spowodowanych zawodnością systemów energetycznych. *I Sympozjum Instytutu Ekonomii i Zarządzania*, strony 263 – 270, Kielce, 10 stycznia 2000.
- [97] Stępień J.C. Metody oceny kosztów strat spowodowanych zawodnością systemów zaopatrzenia w energię. *I Sympozjum Instytutu Ekonomii i Zarządzania*, strony 271 – 278, Kielce, 10 stycznia 2000.
- [98] Stępień J.C. Intensywność awarii w funkcji czasu eksploatacji linii kablowych 15 kV wykonanych w izolacji z papieru i polietylenu. *Przegląd Elektrotechniczny Konferencje*, (1):250 – 252, 2005.
- [99] Stępień J.C. Modele probabilistyczne wielkości niezawodnościowych linii kablowych 15 kV. *Przegląd Elektrotechniczny Konferencje*, (1):245 – 249, 2005.
- [100] Subgroup „Quality Aspects” within Working Group „Network Issues”. *Quality Aspects*. EURELECTRIC, Brussels, Belgium, 2000.
- [101] Szostek R. *Analiza procesów niemarkowskich i ich aproksymacja wybranymi procesami markowskimi*. Praca doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, 2002.
- [102] Tijms H.C. *A First Course in Stochastic Models*. John Wiley & Sons Ltd, England, 2003.
- [103] Tomtronix. Pomiary rezystancji izolacji w teorii i w praktyce. *Elektro-Info*, (9):62, 2004.
- [104] Tylicki H., Żółtowski B. Niezawodnościowe — diagnostyczne aspekty wyzna-

- czania terminów kolejnego obsługiwanie. *Materiały XXVII Zimowej Szkoły Niezawodności*, strony 437 – 449, Szczyrk, 1999.
- [105] Ulman I. Implementation of monitoring systems in remote control stations for maintenance optimisation and lifetime assessment of electric equipment. *6th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2005*, Ostrawa, 30 May - 1 June 2005.
- [106] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. – Prawo energetyczne. *Dziennik Ustaw*, (nr 54, poz. 348), 10 kwiecień 1997.
- [107] van Bolhuis J.P., Gulski E., Smit J.J. Monitoring and diagnostic of transformer solid insulation. *IEEE Transaction on Power Delivery*, (17(2)):528 – 536, April 2002.
- [108] Wang Z., Tang L. A Perspective on the Future of Power Equipment Condition Monitoring and Asset Management. *Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering*, strony F-01, Beijing, China, 25-29 August 2005.
- [109] Wasilenko E. *Model degradacji izolacji polimerowej w układach wysokiego napięcia*. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1991.
- [110] Wasserberg V., Borsi H., Gockenbach E., Schmidt O., Hogrefe P., Werle P., Wolfarth J. Increasing the Operation Reliability of Power Transformers by Continuous Desiccation without Affecting the DGA. *Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering*, strony F-36, Beijing, China, 25-29 August 2005.
- [111] Wnęk M. Efficient use of process and diagnostic data for lifecycle management. *Euromaintenance 2006 Worldcongress On Maintenance 18th European Maintenance Congress and 3rd World Congress on Maintenance, 10th Maintenance and Facility Management Exhibition*, Congress Center Basel, Switzerland, 20-22 June 2006.
- [112] Wodziński J. *Wysokonapięciowa technika prób i pomiarów*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1997.
- [113] Yongqiang W., Fangcheng L., Heming, L. Fault Diagnosis Method for Power Transformer Based on Bayesian Network and Dissolved Gas Analysis. *Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering*, strony F-34, Beijing, China, 25-29 August 2005.
- [114] Youping F., Yunping Ch., Wansheng S., Yongguang Ch., Xiyue H. System description and Petri nets model for reconfiguration of fault diagnosis multi-immune agent. *Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation, WCICA*, strony 195 – 199 Vol.1, 15-19 June 2004.
- [115] Zakład Energetyczny Kraków S.A. *Instrukcja szczegółowa eksploatacji elektroenergetycznych linii napowietrznych w Zakładzie Energetycznym Kraków S.A.*, lipiec 2000.
- [116] Zakład Energetyczny Kraków S.A. *Instrukcja szczegółowa eksploatacji linii kablowych SN i nn w Zakładzie Energetycznym Kraków S.A.*, czerwiec 2000.
- [117] Zhenyuan W., Yilu L., Nien-Chung W., Tzong-Yih G., Huang F.T.C., Griffin P.J. Artificial intelligence in power equipment fault diagnosis. *Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000. International Conference*, strony 247 – 252, vol.1, Perth, WA, 4-7 December 2000.
- [118] Zhijian Y., Xiaojia H., Hong L. The Application of Grey Clustering

Decision-Making Method to the State Assessment of Power Transformer. *Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering*, strongy F-50, Beijing, China, 25-29 August 2005.