

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
WARSZAWA · MIEDZESZYN

BIULETYN

INFORMACYJNY

5(217)

1983

MINISTERSTWO ŁĄCZNOŚCI

BIULETYN INFORMACYJNY

Rok 23

WARSZAWA 1983

NR 5/217/

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

Branżowy Ośrodek

Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej

Redakcja Biuletynu Informacyjnego

Redaktor Naczelny - prof. mgr inż. Lesław Kędzierski
Z-ca Redaktora Naczelnego - doc. dr inż. Krystyn Plewko

Redaktorzy działów:

doc. mgr inż. Władysław Cetner, doc. mgr inż. Adam Moniuszko

Adres Redakcji:

Instytut Łączności

Branżowy Ośrodek

Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej

Warszawa - Miedzeszyn, ul. Szachowa 1

ISSN 0209-1046

Redaktor: mgr K. Juszkiewicz

Montaż tekstu: E. Czerwińska

Dział Wydawniczy Instytutu Łączności
Format B5. Nakład 625. Wpłynęło do
Działu Wydawniczego 6.IX.1983 r.
Druk ukończono w październiku 1983 r.

Sławoj Walaszek

CZĘSTOŚĆ BADAŃ EKSPLOATACYJNYCH
/W ZASTOSOWANIU DO URZĄDZEŃ KOMUTACYJNYCH/

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Określenie problemu częstości badań eksploatacyjnych	1
1.1. Znaczenie częstości badań eksploatacyjnych i jej wpływ na jakość usług	1
1.2. Analiza powstawania i wykrywania uszkodzeń	3
1.3. Eksploatacyjne czynności utrzymania	5
1.4. Procedury i model obsługi	6
2. Charakterystyka modeli procesów obsługi urządzeń	7
2.1. Klasyfikacja modeli procesów obsługi	7
2.2. Zdeterminowane i stochastyczne procesy obsługi urządzeń	10
2.3. Omówienie niektórych dotychczasowych wyników badań procesów obsługi urządzeń	11
3. Przykłady modeli obsługi urządzeń	23
3.1. Procedura wymiany zapobiegawczej ze znaną funkcją kosztów eksploatacji	23
3.2. Inspekcyjna procedura obsługi urządzeń technicznych	30
3.3. Wymiana zapobiegawcza z uwzględnieniem wieku urządzenia	39
3.4. Model procedury obsługi dla urządzeń komutacyjnych	47
4. Zakończenie	50
Wykaz literatury	50

CZĘSTOŚĆ BADAŃ EKSPLOATACYJNYCH
/W ZASTOSOWANIU DO URZĄDZEŃ KOMUTACYJNYCH/

1. OKREŚLENIE PROBLEMU CZĘSTOŚCI BADAŃ
EKSPLOATACYJNYCH

1.1. Znaczenie częstości badań eksploatacyjnych
i jej wpływ na jakość usług

Dla zwiększenia eksploatacyjnej niezawodności urządzeń i systemów ważne i aktualne jest zagadnienie optymalizacji procedur obsługi technicznej urządzeń. Zadaniem do rozwiązania w tym zagadnieniu jest opracowanie i zastosowanie metod optymalnego planowania obsługi, metod umożliwiających jej dynamiczne sterowanie w procesie eksploatacji technicznej.

Metody te najczęściej mają na celu określenie częstości badań eksploatacyjnych. Z technicznego punktu widzenia, poprawna realizacja procesu obsługi może zapewnić wymagane z góry określone sprawności techniczne i usługowe urządzeń, natomiast z ekonomicznego punktu widzenia można uzyskać zmniejszenie do pewnego minimum /optimum/ ogólnych kosztów eksploatacji. Biorąc pod uwagę, że czas eksploatacji urządzeń jest długi, np. w telekomunikacji wynosi 20-40 lat oraz duża część dochodu narodowego przeznaczona jest na koszty eksploatacji urządzeń, wspomniane oszczędności mogą być znaczne.

Znaczenie optymalizacji procedur obsługi, w sensie określenia właściwej częstości badań /czynności obsługi/ i podejmowania na tej podstawie decyzji eksploatacyjnych, wzrosło szczególnie w ostatnim czasie na skutek wprowadzania do eksploatacji wielu coraz bardziej złożonych technicznie urządzeń. Wynikające stąd zainteresowanie tą tematyką potwierdza bardzo

duża liczba publikacji, wzrastająca z roku na rok [1, 6 11]. Jednak mimo dużej liczby prac na temat optymalizacji obsługi technicznej, wiele ważnych dla praktyki zagadnień pozostaje nadal nierozwiązanych lub rozwiązanych tylko częściowo. Do takich zagadnień należy również zaliczyć kompleksowe badanie metod optymalnego sterowania procedurami obsługi, z uwzględnieniem trzech podstawowych czynników występujących w praktyce: technicznego, ekonomicznego i organizacyjnego. Konieczność kompleksowego badania wynika z faktu, że często złożone systemy wykorzystuje się nieefektywnie, nie tylko z powodu zbyt małej niezawodności, ale w znacznej mierze z niedostatków w organizacji i kierowaniu eksploatacją techniczną.

W urządzeniach technicznych większość czynności obsługi jest wykonywana zgodnie z wymaganiami podanymi w odpowiednich przepisach, zwanych instrukcjami obsługi lub eksploatacji technicznej. Ciąg czynności wykonywanych na podstawie tych instrukcji nazywany jest procedurą obsługi lub eksploatacji technicznej. Każda procedura, oparta na pewnym modelu matematycznym procesu obsługi, jest fragmentem procesu eksploatacji technicznej urządzenia i musi być odpowiednio zaprojektowana.

Najważniejszym parametrem procesu obsługi jest odstęp pomiędzy kolejnymi czynnościami obsługi. Z doświadczenia wiadomo, że czynności obsługi powodują również skutki negatywne, takie jak wyłączenie urządzenia z pracy na czas obsługi oraz że po czynnościach obsługi obserwuje się zwykle okres zwiększonej intensywności uszkodzeń.

Z drugiej strony, celem dostatecznie częstych czynności obsługi jest utrzymanie urządzenia w ruchu. Dlatego bardzo ważne jest zagadnienie ustalenia właściwego odstępu czasu pomiędzy kolejnymi czynnościami obsługi, takiego odstępu, który maksymalizuje skutki pozytywne i minimalizuje skutki negatywne. Istnieje cały zbiór różnych modeli procedur obsługi, z których interesujące są te, które spełniają dodatkowe kryteria optymalizacyjne maksymalizujące lub minimalizujące określony parametr procesu, taki jak np.: całkowity koszt, koszt na jednostkę czasu, gotowość, zysk itp. Również dla

zwiększenia eksploatacyjnej niezawodności i gotowości, ważne i aktualne jest zagadnienie optymalizacji procedur obsługi urządzeń telekomunikacyjnych, m.in. poprzez określenie optymalnych częstości badań eksploatacyjnych.

Eksploatacja techniczna urządzeń komutacyjnych, rozumiana jako suma procesów użytkowania i utrzymania, czyli obsługi technicznej, występująca w ciągu całego okresu wykorzystywania urządzenia od momentu wyprodukowania aż do całkowitego zużycia, jest typowym przykładem. Ponieważ w procesie eksploatacji technicznej tych urządzeń, złożonych z dużych grup jednorodnych zespołów, występują zdarzenia przypadkowe w postaci zgłoszeń do obsługi i uszkodzeń, proces ich eksploatacji jest ogólnie procesem stochastycznym lub pewnym zbiorem procesów stochastycznych. W części dotyczącej utrzymania procesy te są opisywane modelami procesów obsługi technicznej. W pewnych szczególnych przypadkach można również wyróżnić modele zdeterminowanych procesów obsługi.

Ilościowe badanie procedur obsługi w celu ich optymalizacji względem pewnego wybranego kryterium przynosi niewątpliwie korzyści - w postaci zwiększenia jakości i ilości usług, a więc i zysków z eksploatacji urządzenia - wymaga jednak zastosowania mniej lub więcej złożonych środków matematycznych oraz często danych zebranych podczas eksploatacji rzeczywistych urządzeń. Opracowane modele teoretyczne powinny być zweryfikowane w eksploatacji, gdyż przed szerszym zastosowaniem każda teoria musi być sprawdzona w praktyce. Podobnie każdy wniosek z eksploatacji wynikający z doświadczenia powinien być uogólniony i potwierdzony teoretycznie. W dziedzinie eksploatacji technicznej takie postępowanie, polegające na współpracy teorii i praktyki, powinno pomóc w rozwiązaniu szeregu trudnych problemów.

1.2. Analiza powstawania i wykrywania uszkodzeń

Głównymi parametrami charakteryzującymi procesy powstawania i wykrywania uszkodzeń są intensywności uszkodzeń i od-

nowy. Przez proces wykrywania uszkodzeń rozumiemy proces odnowy obejmujący lokalizację i naprawę uszkodzenia. Intensywność uszkodzeń może być zmienna lub stała w czasie, co zależy od technologii wykonania urządzeń i elementów. Można to zilustrować na przykładzie urządzeń komutacyjnych.

Rozwój urządzeń komutacyjnych, z punktu widzenia stosowanych elementów i rozwiązań strukturalnych, dzieli się na trzy etapy. W ramach tych etapów opracowano trzy podstawowe rodziny systemów komutacyjnych, a mianowicie: systemy biegowe, krzyżowe i elektroniczne. Wszystkie te systemy są stosowane w sieci telekomunikacyjnej w Polsce, w postaci systemów Strowger'a, Pentaconta i K-66 oraz E-10.

W systemach biegowych występuje duża liczba zużywających się elementów mechanicznych, a więc intensywność uszkodzeń jest funkcją rosnącą. Dla central telefonicznych systemu krzyżowego, takich jak centrale Pentaconta i K-66, w porównaniu do central systemu biegowego, elementy ruchome i tarcie ograniczono do minimum. Dzięki temu uzyskano rozwiązania o zwiększonej niezawodności i charakter uszkodzeń zbliżony do przypadkowego. Wynika stąd, że intensywność uszkodzeń jest w tym przypadku bliska wartości stałej. W urządzeniach nie posiadających elementów zużywających się fizycznie, do których zalicza się centrale elektroniczne, uszkodzenia mają charakter przypadkowy i funkcja intensywności uszkodzeń pozostaje stała. W rezultacie można powiedzieć, że funkcje intensywności uszkodzeń dla central biegowych i elektronicznych wyznaczają pewne linie graniczne, a pomiędzy nimi znajduje się funkcja intensywności uszkodzeń dla central krzyżowych, blisko funkcji dla central elektronicznych. Dlatego, ze względu na zmieniający się charakter intensywności uszkodzeń dla różnych rodzajów central telefonicznych, należy dla urządzeń komutacyjnych stosować różne procedury w zależności od potrzeby. Podobnie dla innych urządzeń należy dobierać odpowiednie procedury, zgodnie z charakterem zmian intensywności uszkodzeń.

Istnieje szereg metod wyznaczania /lokalizacji/ uszkodzo-

nego urządzenia /zespołu/ w grupie jednorodnych urządzeń, a mianowicie:

- metoda ciągłego nadzoru stanu urządzenia,
- metoda badania okresowego,
- metoda badania losowego, przy której urządzenie do badania jest wyznaczane w sposób losowy.

Najczęściej stosowana jest metoda badania okresowego charakteryzowana częstotliwością badań i głównie tej metody dotyczą modele obsługi rozważane w tym artykule.

Naprawa polega na lokalizacji uszkodzonego elementu w urządzeniu i wymianie na sprawny. Intensywność napraw jest na ogół stała i traktowana jako sterowany parametr, gdyż istnieje w praktyce możliwość zmiany tego parametru, np. poprzez zwiększenie nakładów na naprawy.

1.3. Eksploatacyjne czynności utrzymania

Eksploatacyjne czynności utrzymania, z punktu widzenia skutków jakie powodują, można podzielić na kilka grup, a mianowicie czynności:

- wymiany,
- odnowy,
- doraźne,
- jakościowe.

Czynność wymiany polega na zamianie uszkodzonego urządzenia na nowe rezerwowe, natomiast czynność odnowy polega na pełnej naprawie urządzenia, po której urządzenie jest "jak nowe". Czynność doraźna polega na "częściowej naprawie" urządzenia, tzn. naprawia się tylko bezpośrednią przyczynę uszkodzenia. Czynność jakościowa polega na określeniu stanu urządzenia bez zmiany jego stanu; nazwa pochodzi stąd, że na podstawie danych zebranych z czynności jakościowych można oszacować wybrane wskaźniki jakości pracy urządzenia.

Czynności doraźne i jakościowe nie wpływają na aktualną wartość i charakter intensywności uszkodzeń, natomiast czyn-

ności wymiany i odnowy powodują powrót wartości intensywności uszkodzeń do wartości początkowej jak dla nowego urządzenia. W omawianych tu modelach w każdym przypadku zaznaczono, jak wpływają czynności utrzymania na charakter intensywności uszkodzeń.

1.4. Procedury i model obsługi

Do podstawowych pojęć eksploatacji technicznej można zaliczyć procedury eksploatacji technicznej, z których tutaj można wyróżnić procedurę:

- zapobiegawczą /profilaktyczną/,
- korekcyjną,
- jakościową,
- inspekcyjną.

Procedura zapobiegawcza stosowana jest w urządzeniach, w których występują elementy zużywające się fizycznie i intensywność uszkodzeń jest funkcją rosnącą. Ze względu na to, że stosowanie procedury zapobiegawczej polega na wykonaniu zbioru określonych czynności przed uszkodzeniem w określonych odstępach czasu, należy uwzględnić dodatkowy warunek, który formułuje się następująco: jeżeli koszt lub czas profilaktyki przed uszkodzeniem jest mniejszy od kosztu lub czasu naprawy uszkodzenia, to jest celowe stosowanie tej procedury. Do czynności procedury zapobiegawczej zalicza się zwykle: wymianę, badanie, regulację, smarowanie i czyszczenie. Opracowano wiele modeli różnych procedur zapobiegawczych, z których kilka podano w dalszej części artykułu.

Procedura korekcyjna polega na interwencji w wyposażeniu technicznym tylko w przypadku uszkodzenia i obejmuje wymianę lub naprawę.

Obecnie szeroko jest stosowana procedura jakościowa, która opiera się na ciągłej obserwacji wyników pracy urządzenia i reagowaniu tylko w przypadku pogorszenia się określonych wskaźników jakości poniżej dopuszczalnego poziomu. Np. w

przypadku central telefonicznych obserwacji podlegają wskaźniki jakości usług, tzn. jakości technicznej oraz jakości złatwiania ruchu i ich aktualne wartości decydują o reakcji personelu technicznego.

Procedura inspekcyjna, często zaliczana do grupy procedur zapobiegawczych, polega na badaniu urządzenia w pewnych odstępach czasu w celu ustalenia stanu urządzenia. Można powiedzieć, że w procedurze inspekcyjnej określony jest tylko zakres pomiarów niezbędnych do określenia stanu, natomiast w procedurze zapobiegawczej określony jest szereg konkretnych czynności obsługi takich, jak: regulacja, smarowanie, czyszczenie itp. W wyniku czynności inspekcyjnych pewne potencjalne usterki powinny być w porę wykryte, zanim doprowadzą do całkowitego uszkodzenia urządzenia. A więc w tej procedurze wyróżnia się dodatkowe stany, pomiędzy dwoma podstawowymi, sprawny i uszkodzony. Uważa się, że intensywność uszkodzeń urządzenia będzie funkcją zmian częstości prowadzonych inspekcji. W dalszej części artykułu został podany przykład takiej procedury.

Model obsługi jest matematycznym sformułowaniem procesu obsługi urządzenia, umożliwiającym formalne określenie częstości czynności obsługi optymalnej z punktu widzenia przyjętego kryterium optymalizacji /koszt, zysk, gotowość itp./.

2. CHARAKTERYSTYKA MODELI PROCESÓW OBSŁUGI URZĄDZEŃ

2.1. Klasyfikacja modeli procesów obsługi

Na razie nie została opracowana jednoznaczna klasyfikacja modeli procedur obsługi. Klasyfikacja taka jest bardzo trudna i złożona ze względu na dużą liczbę zmiennych, które mogą występować w modelach, dając w efekcie ogromną liczbę możliwych kombinacji. Dla ilustracji można podać kilka ważniejszych sposobów klasyfikacji.

Jeden z nich polega na podziale modeli z uwzględnieniem

charakteru rzeczywistego modelu i zastosowanych środków matematycznych.

Zgodnie z tym można wyróżnić modele:

- deterministyczne, dotyczące rzeczywistych procesów deterministycznych,
- quasi-deterministyczne, dotyczące rzeczywistych procesów stochastycznych opisanych za pomocą modeli deterministycznych,
- stochastyczne, dotyczące rzeczywistych modeli stochastycznych.

Inny sposób klasyfikacji wynika z cech charakteryzujących procedurę obsługi, np.:

- z punktu widzenia liczby stanów urządzenia;
 - a/ dwa stany /dobry, zły: zdatny, niezdatny/;
 - b/ więcej niż dwa stany /oprócz dwóch wyżej wymienionych jeszcze dalsze stany pośrednie/;
- z punktu widzenia zakresu znanych danych wyjściowych:
 - a/ znany jest rozkład czasu do uszkodzenia;
 - b/ nieznan jest rozkład czasu do uszkodzenia /stosuje się procedury minimaksowe/;
- z punktu widzenia odstępu między badaniami:
 - a/ stały odstęp;
 - b/ losowy odstęp;
 - c/ adaptacyjny odstęp /obliczany po każdym sprawdzeniu/;
- z punktu widzenia stanu urządzenia po wykonaniu czynności obsługi /wymiana, naprawa, remont, inspekcja/:
 - a/ po obsłudze jak nowy /pełny zakres czynności obsługi lub wymiana/;
 - b/ po obsłudze taki sam jak przed momentem przypadkowego uszkodzenia /usuwa się tylko bezpośrednią przyczynę uszkodzenia/;
 - c/ po obsłudze nieco lepszy niż przed momentem uszkodzenia.

Jeszcze inna możliwość klasyfikacji, to podział wg zasad

postępowania /strategii/ w czasie realizacji procesu obsługi. Można tu wyróżnić dla przykładu kilka zasad postępowania.

1. Urządzenia wymienia się na nowe, gdy upływie technicznie lub ekonomicznie uzasadniony czas od momentu włączenia urządzenia do eksploatacji, lub od momentu ostatniej wymiany. Tutaj zasadniczym problemem jest odpowiedni wybór czasu między wymianami.
2. Urządzenie wymienia się na nowe po pierwszym poważniejszym uszkodzeniu lub po upływie z góry ustalonego czasu. Zasadę tę można wykorzystywać w przypadkach, gdy po uszkodzeniu urządzenie traci prawie całkowicie swoje własności użytkowe, a koszt naprawy jest większy od kosztu nowego urządzenia.
3. Urządzenie poddaje się naprawie po pierwszym uszkodzeniu, ale po drugim uszkodzeniu i po osiągnięciu określonego wieku wymienia się go na nowe. Takie postępowanie może być słuszne w przypadku, gdy urządzenie nie jest zbyt drogie i dwie naprawy kosztują prawie tyle co nowe urządzenie.
4. Urządzenie naprawia się aż do $n-1$ uszkodzenia, natomiast po n -tym uszkodzeniu lub po osiągnięciu określonego wieku wymienia się go na nowe.
5. Urządzenie naprawia się aż do $n-1$ uszkodzenia, natomiast wymienia się na nowe po n -tym uszkodzeniu, po całkowitym zużyciu lub po osiągnięciu z góry określonego wieku. Jest to odmiana zasady podanej w pkt. 4.
6. Urządzenie naprawia się po każdym uszkodzeniu tak długo, dopóki koszt wszystkich napraw nie przekroczy odpowiedniej sumy /np. ceny nowego urządzenia/.
7. Urządzenie naprawia się po każdym uszkodzeniu tak długo, dopóki nie zużyje się całkowicie, a więc aż do momentu gdy nie ma możliwości dalszej naprawy. Zasadę tę stosuje się, np. gdy w sprzedaży brakuje tego rodzaju urządzeń, gdy nie ma środków na zakup nowych urządzeń oraz gdy dane przedsiębiorstwo nie stosuje rachunku ekonomicznego.

Byłoby celowe opracowanie pełnej klasyfikacji i wykazu opracowanych procedur obsługi, co znacznie zwiększyłoby zakres ich zastosowań.

2.2. Zdeterminowane i stochastyczne procesy obsługi urządzeń

Do zdeterminowanych procesów obsługi urządzeń zaliczamy takie procesy, które są określone za pomocą funkcji nielosowych, tzn. stan procesu w przyszłości jest znany /zdeterminowany/. Przykład modelu takiego procesu podany jest w p. 3.1, gdzie koszt eksploatacji w czasie jest określony znaną funkcją.

Klasa stochastycznych modeli obsługi jest najliczniejsza, zatem celowe jest bliżej scharakteryzować stochastyczny proces obsługi.

Stochastyczne techniki analizy stosowane przy badaniu procesów obsługi należą do metod związanych z podejmowaniem decyzji przy istnieniu niepewności. Ogólna struktura tych problemów zawiera cechy, które są scharakteryzowane dla teoretycznych modeli decyzyjnych. Rozważane urządzenie może znajdować się w jednym z kilku stanów, przy czym dwa graniczne stany możemy nazwać "nowy" i "uszkodzony". Stany pośrednie opisują różny stopień pogorszenia własności. Ruch od stanu do stanu podlega mechanizmowi probabilistycznemu, którego prawa dla podejmującego decyzję mogą być znane, częściowo znane lub całkowicie nieznanne. Jeżeli urządzenie nie jest nadzorowane i obsługiwane, wówczas przemieszcza się stochastycznie do stanu w naturalny sposób aż do osiągnięcia stanu pochłaniającego w postaci uszkodzenia. Zachowanie się wyposażenia może być jednak regulowane przez zastosowanie określonego działania w każdym punkcie decyzyjnym. Te działania obejmują takie czynności, jak np.: wymianę, inspekcję, naprawę lub remont. Różnica między regulowanym i swobodnym zachowaniem się urządzenia jest miarą wpływu procedury obsługi.

"Wydażność" /skuteczność, efektywność/ procedury może być

mierzona kosztami przez wyznaczenie kosztu przejścia do każdego stanu i kosztu interwencji dla każdej czynności. Należy również uwzględnić straty wynikające z przerwy w pracy urzędnika. Jak już wspomniano, zadaniem podejmującego decyzję jest wybranie i wykonanie czynności obsługi w ten sposób, aby koszt na jednostkę czasu pracy urzędnika był jak najmniejszy.

Każda procedura mająca złożoną postać jest niekorzystna, tak z teoretycznego jak i z praktycznego punktu widzenia. Dlatego chociaż badania w dziedzinie projektowania procedur obsługi objęły swym zakresem procedury od prostych do bardzo złożonych, praktyczne znaczenie osiągnęły głównie te strategie, które wymagają mało informacji i mają prostą postać.

Niezależnie od tego, większość opracowanych procedur obsługi - z praktycznego punktu widzenia - jest daleka od optymalnych, ze względu na zastosowanie uproszczenia.

2.3. Omówienie niektórych dotychczasowych wyników badań procesów obsługi urzędzeń

Tematyka optymalizacji procedur obsługi w zakresie częstości badań eksploatacyjnych jest związana z tematyką niezawodności, jakości i eksploatacji technicznej urzędzeń. Do rozwiązywania zagadnień w ramach tej tematyki stosuje się: rachunek prawdopodobieństwa, statystykę matematyczną, teorię niezawodności, teorię masowej obsługi, teorię eksploatacji technicznej, badania operacyjne i w mniejszym zakresie inne dziedziny teorii /np. prakseologię, ergonomię/. Na temat optymalizacji procedur obsługi opublikowano wiele prac szczególnie autorów radzieckich i amerykańskich. Opracowano kilka częściowych rozwiązań problemu, przy czym niektóre z nich były realizowane przy użyciu EMC.

Mimo wielkiej liczby publikacji zagadnienie optymalizacji procedur obsługi nie jest do końca rozwiązane. Dokładne rozpatrzenie dotychczasowych wniosków w tym zakresie przekracza ramy tego artykułu i zostało podane w różnych publikacjach.

Tutaj zostaną omówione ogólnie niektóre ważniejsze wyniki, dotyczące omawianego zagadnienia.

Przy rozwiązywaniu zagadnień z dziedziny optymalizacji procedur obsługi konieczne jest określić lub mieć dany cel i kryteria optymalizacji. Cele i kryteria wybiera się zwykle w zależności od konkretnych wymagań i istniejących warunków, wychodząc zwykle od wymagań systemu nadrzędnego.

Kryteria optymalizacji przyjmowane przez różnych autorów są bardzo różnorodne - np. mogą nimi być: prawdopodobieństwo poprawnej pracy, gotowość, współczynnik technicznego wykorzystania, efektywność użytkowania, współczynnik skuteczności badań, koszty obsługi, intensywność uszkodzeń, parametr strumienia uszkodzeń i inne. Są to równocześnie miary wydajności /skuteczności/ opracowanej, optymalnej z pewnego punktu widzenia, procedury obsługi.

Jak wyżej podano, miarą wydajności procedury obsługi może być gotowość. Ma to miejsce np. w przypadku gdy obiekt powinien długi czas nieprzerwanie pracować, ale na skutek uszkodzeń czasami ma przymusowe przerwy w pracy. Jednak gotowość pozwala ocenić tylko część eksploatacyjnych korzyści, takich jak niezawodność obiektu i jego odnawialność. Gotowość nie uwzględnia np. podatności na obsługę. Dlatego lepszym kryterium wydajności procedury jest współczynnik technicznego wykorzystania K_{tw} , który jednak w niepełny sposób uwzględnia pomyłki operatorów sprzętu.

Przy określaniu wydajności procedury za pomocą K_{tw} napotyka się na następujące trudności:

- niemożliwe jest uwzględnienie wpływu procedury na niezawodność obiektów na skutek zmian warunków ich eksploatacji /temperatury, wilgotności itp./;
- w czasie realizacji obsługi trudno jest /a czasami jest to niemożliwe/ dokładnie określić liczbę wykrytych uszkodzeń i jeżeli do obsługi odda się dobry obiekt to K_{tw} traci sens;
- K_{tw} nie można stosować, jeżeli rozkład czasu do uszkodzenia jest różny od wykładniczego;

- nie uwzględnia się wartości niezawodności zadanej przy projektowaniu i osiągniętej przy produkcji obiektów.

Wydaje się, że lepszym wskaźnikiem wydajności jest wielkość:

$$K_{ef} = T_{pr}/T_o$$

gdzie T_{pr} - rzeczywisty średni czas pracy do uszkodzenia po wykonaniu obsługi, T_o - czas do uszkodzenia, zapewniony przy projektowaniu i produkcji obiektu.

Jednym z najbardziej ogólnych niezawodnościowych kryteriów wydajności systemów odnawialnych jest parametr strumienia uszkodzeń. Natomiast stosowanym ekonomicznym kryterium wydajności są nakłady pracy na obsługę. Oprócz tego można wymienić organizacyjne kryteria wydajności, takie jak np. wskaźniki jakości technicznej obsługi itp. Przy formułowaniu uogólnionego kryterium wydajności procedury konieczne jest uwzględnienie wpływu na to kryterium cząstkowych kryteriów.

Istnieje kilka sposobów łączenia kryteriów:

- wykonuje się sumowanie kryteriów, przy którym celem łączenia jest maksymalizacja sumarycznego kryterium o postaci

$$K_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n d_i \cdot k_i$$

gdzie d_i - współczynnik wagi kryterium K_i ;

- kryteria dzieli się na zadowalające i niezadowalające, przy czym za zadowalające uważa się kryterium o postaci $K_i \geq K_i^x$, $1 \leq i \leq n$ i wówczas łączne kryterium ma postać $K_o = 1$; gdy wymagane warunki nie są wypełnione, to $K_o = 0$ lub $K_o = -\infty$;
- łączenie kryteriów dokonuje się poprzez kolejne osiągnięcie częściowych celów; przy tym uogólnione kryterium określa się po osiągnięciu maksymalnych wartości przez częściowe kryteria;
- dokonuje się logicznego łączenia kryteriów /dodawanie, koniunkcja lub dyzjunkcja/;

- dokonuje się uogólnionego logicznego łączenia kryteriów, które są bezpośrednim uogólnieniem działań wg poprzedniego sposobu.

Można uważać, że ogólne kryterium procedury powinno mieć postać:

$$K_{ef} = K_1 \cup K_2 \cup K_3$$

gdzie $K_1 = \{K_1'\}$ - zbiór kryteriów charakteryzujących techniczne użytkowanie systemu;

$K_2 = \{K_j''\}$ - zbiór ekonomicznych kryteriów,

$K_3 = \{K_1'''\}$ - zbiór organizacyjnych kryteriów.

Do liczby podstawowych kryteriów należą np.

K_1' - wskaźnik niezawodności działania,

K_2'' - nakłady pracy na obsługę techniczną,

K_1''' - wskaźnik jakości wykonania prac podczas obsługi itp.

W praktyce można stosować dwa sposoby wykorzystania kryteriów. Zgodnie z pierwszym, dążyć do osiągnięcia maksimum /minimum/ jednego kryterium, a na pozostałe nałożyć ograniczenia. A więc w tym przypadku zadanie sprowadza się do zadania z jednym kryterium. Wg drugiego sposobu możliwa jest droga kompromisowego rozwiązania, nazywana metodą "kolejnych kroków".

Przy badaniu optymalnej obsługi /procedury/ można określić szereg optymalnych cech, charakterystyk, wskaźników, takich jak: okresowość obsługi /najczęściej/, początkowe wartości parametrów, czas prowadzenia obsługi, głębokość kontroli, liczbę specjalistów, koszt obsługi i inne. Obsługa optymalna z punktu widzenia jednej z tych cech, może okazać się niewygodna z punktu widzenia drugiej cechy. Wydaje się, że obsługę optymalną wg wielu cech można znaleźć tylko po zbadaniu fizycznych, ekonomicznych i psychofizjologicznych procesów obsługi.

Najbardziej typowe zagadnienie rozpatrywane w różnych publikacjach można sformułować w następujący sposób: czas pracy do uszkodzenia T pewnego urządzenia na dystrybuantę $F /X/;$

urządzenie zachowuje pełną zdolność do pracy aż do uszkodzenia, a po naprawie odzyskuje całkowicie swoje własności. Koszt naprawy po uszkodzeniu jest równy C_1 , a koszt przeglądu profilaktycznego C_2 , przy czym $C_2 < C_1$. Celem badania jest określenie takiego stałego odstępu czasu t_{pr} między przeglądami profilaktycznymi, aby ogólne nakłady na obsługę techniczną urządzenia w ciągu długiego okresu czasu były jak najmniejsze. Zakłada się, że przegląd profilaktyczny wykonuje się po upływie czasu t_{pr} od ostatniej dowolnej obsługi, natomiast po uszkodzeniu obsługę wykonuje się natychmiast.

Optymalizacja kosztów podczas obsługi rozpatrywana jest w wielu pracach. Większość autorów pod terminem optymalna obsługa rozumie zagadnienie określenia optymalnego odstępu czasu między przeglądami profilaktycznymi. Rozwiązania uzyskuje się zwykle przy wykorzystaniu teorii odnowy. Optymalizacji gotowości podczas obsługi poświęcono również znaczną liczbę prac. Jeżeli przegląd profilaktyczny wykonuje się zamiast co stały odstęp czasu w losowych odstępach czasu o rozkładzie σ/X , to punkt optymalny osiąga się dla wartości funkcji σ/X równej t_{pr} . A więc w podanych pracach wyjaśniło się, że w tych warunkach celowe jest prowadzenie prac profilaktycznych tylko w jednakowych odstępach czasu.

Wybór stałego odstępu między przeglądami profilaktycznymi zapewnia większą gotowość w porównaniu z losowym odstępem o dowolnym rozkładzie i wartością średnią t_0 . Wielkość t_0 określa się z równania:

$$t_0 \lambda / t_0 - \int_0^{t_0} \lambda / U / d U = \frac{T_p}{T_w}$$

gdzie T_p , T_w - odpowiednio średnie wartości czasu przeglądu profilaktycznego i odnowy, natomiast λ/U - funkcje intensywności uszkodzeń.

Bardzo często system można rozpatrywać jako zbiór podsystemów, a strumień uszkodzeń odpowiadający systemowi, jako sumę strumieni uszkodzeń podsystemów. Taki podział złożonego systemu może być uzasadniony np. tym, że poszczególne pod-

systemy wykonują różne czynności i ich obsługa jest realizowana przy pomocy specjalistów różnych dziedzin. Wykazano, że przy odpowiednim podejściu do obsługi systemu i optymalnych dla każdego z podsystemów odstępach czasu między badaniami i odnowami, gotowość jest większa niż przy obsłudze systemu jako jednej całości. Jeżeli złożoność podsystemów określa się liczbą jednakowo niezawodnych zespołów, to omówione wyżej podejście do obsługi nie daje zwiększenia gotowości.

Przy rozwiązywaniu różnych częściowych zagadnień optymalizacji obsługi, zwykle przyjmuje się następujące upraszczające założenia:

- a/ niezależność strumieni uszkodzeń składowych części systemu;
- b/ niezawodność elementów w zadanym czasie jest bardzo duża;
- c/ odnowa systemu zajmuje minimalny czas w porównaniu z czasem bezusterkowej pracy;
- d/ pełna zdadność do pracy systemu przed włączeniem go do pracy;
- e/ w czasie całego czasu pracy intensywność uszkodzeń i odnowy systemu są stałe;
- f/ system po przeglądzie profilaktycznym i naprawie działa jak nowy;
- g/ stany systemu są znane tylko w momencie kontroli /inspekcji/, tj. w dyskretnych momentach czasu;
- h/ uszkodzenia nie pojawiają się i nie są uwzględniane, tak w czasie kontroli, jak i w czasie odnowy;
- i/ kontrola jest wiarygodna /bez błędów/;
- j/ badanie niesprawnego zespołu rozpoczyna się od razu po pojawieniu się uszkodzenia, tj. nie ma kolejki;
- k/ system pracuje w sposób ciągły.

Duża część powyższych założeń nie zawsze odpowiada rzeczywistym warunkom eksploatacji. Np. założenie /f/ praktycznie może okazać się słuszne tylko dla strukturalnie prostych systemów, a założenie /e/ jest prawdziwe tylko dla systemów eksploatowanych w warunkach, które nie ulegają zmia-

nie. Podane założenia świadczą o oderwaniu od rzeczywistości wielu teoretycznych prac. Drugim ogólnym niedostatkim tych prac jest brak w nich dowodów warunków istnienia jedynego rozwiązania.

Mozna wyróżnić dwie postacie charakterystyk obiektu, regulowaną i nieregulowaną, które określają dwa różne sposoby oddziaływania czynności obsługi na obiekt w procesie eksploatacji:

- czynności obsługi mają na celu zwiększenie niezawodności urządzeń; w związku z tym bada się stan urządzeń i reguluje się ich charakterystyki;
- czynności obsługi mają na celu określenie prognozy dalszego zachowania się obiektu; powinna być podawana informacja o stanie urządzeń i o oczekiwanej zmianie ich nieregulowanych charakterystyk.

Liczne badania w zakresie procedur obsługi można podzielić na dwa zasadnicze kierunki. Zgodnie z pierwszym, zadanie zostaje rozwiązane po określeniu optymalnego punktu /w różnym sensie/ z uwzględnieniem szeregu założeń. Tutaj główną uwagę kieruje się na sposób uzyskania rozwiązania, strukturę rozwiązania i ogólne wartości algorytmów rozwiązania, a nie zawartość treści rozwiązania. Kryteria optymalizacji mogą być bardzo różne. Prawie wszystkie prace tego kierunku operują wtórnymi faktami nie wnikając w fizykę uszkodzeń i nie zawierają określenia własności, które stymulują zakres czynności obsługi.

Zgodnie z drugim kierunkiem, problemy rozwiązuje się z uwzględnieniem aspektów fizycznych uszkodzeń, rodzajów uszkodzeń oraz rodzajów i własności struktur technicznych urządzeń. Dla tego kierunku charakterystyczne jest powiązanie z prognozowaniem uszkodzeń. Jednak na tematy związane z tym kierunkiem opublikowano dotychczas niewiele prac.

W procesie eksploatacji urządzeń odbywa się systematyczny okresowy powrót wartości zmieniających się parametrów do wartości nominalnych lub bliskich nominalnych, tzn. zachodzi

sterowanie procesem stochastycznym. Teoria sterowanych procesów tego rodzaju jest intensywnie rozwijana w ostatnich latach, przy czym najwięcej prac z tego zakresu poświęcono procesom Markowa.

Każde zadanie dotyczące znalezienia optymalnej procedury obsługi charakteryzuje się początkową określoną informacją o systemie, na podstawie której można uzyskać rozwiązanie. W szeregu prac zakłada się, że informacja a priori o systemie sprowadza się do znajomości funkcji rozkładu czasu poprawnej pracy i że w procesie eksploatacji nie uzyskuje się żadnej innej informacji o stanie systemu oprócz sygnałów o uszkodzeniach. W tym przypadku stawia się zadanie polegające na określeniu wieku systemu, po osiągnięciu którego konieczne jest przeprowadzenie obsługi.

Jak wynika z innych prac, można mieć większy zakres informacji o urządzeniu, tj. można wiedzieć, że stan urządzenia określa się zachowaniem losowo zmieniającego się w czasie parametru β/t , dostępnego do okresowej kontroli. Osiągnięcie przez ten parametr wartości na poziomie α [$\beta/t \geq \alpha$], uważa się za uszkodzenie systemu. Wówczas do instrukcji obsługi urządzenia zostają włączone badania, w czasie których ustala się wartość parametru β/t . Na podstawie tej informacji podejmuje się decyzję o celowości obsługi urządzenia. Do tej klasy zadań można zaliczyć wszystkie zagadnienia obsługi z prognozującym parametrem. Perspektywnymi modelami procesów obsługi są półmarkowskie procesy i włożone /wymuszone/ łańcuchy Markowa. Jednak ich wadą jest znaczna złożoność obliczeń potrzebnych do określenia optymalnej procedury obsługi.

Przy wyborze procedury obsługi podstawowe znaczenie ma planowany odcinek czasu użytkowania systemu. Zwykle w pracach poświęconych wyszukiwaniu optymalnych procedur obsługi rozpatruje się nieskończony odcinek czasu i szuka się takich zasad wymuszonej obsługi elementów, które minimalizują średnie nakłady przypadające na jednostkę czasu eksploatacji.

Założenie, że proces eksploatacji trwa nieograniczony czas

proceedzi do stacjonarnych optymalnych procedur, których rozwiązanie zasadniczo nie zależy od chwilowych wartości procesu. Takie podejście jest wygodne z punktu widzenia analizy, gdyż znacznie upraszcza wszystkie rozwiązania, jednak mało dokładne w praktycznych zastosowaniach. W praktyce bardzo często wyznaczony okres eksploatacji obiektów zostaje zrównany ze średnim czasem bezusterkowej pracy. A więc przyjęcie procedury dla dość długiego przedziału czasu może okazać się mało dokładne. Dlatego jeżeli system jest przeznaczony do eksploatacji w skończonym przedziale czasu, określonym moralnym starzeniem lub technologicznymi wskaźnikami, to zasadę planowej obsługi należy wybierać w klasie strategii sekwencyjnych na podstawie informacji, ile czasu zostało jeszcze do końca planowanego okresu.

W innych pracach zakłada się, że na skutek stopniowych pogorszeń w procesie pracy intensywność uszkodzeń zwiększa się. Celem obsługi jest usunięcie pogorszeń zgromadzonych w systemie przed rozpoczęciem kolejnego cyklu pracy urządzenia, tj. należy odnowić system do stanu początkowego. Takie jest założenie, na skutek trudności uwzględnienia wszystkich pogorszeń występujących w praktyce. Praktyczne zastosowanie tej metody trudne jest także ze względu na brak metodyki określania danych wyjściowych.

Perspektywną wydaje się metoda wyznaczania optymalnych okresów obsługi oparta na badaniach danych o uszkodzeniach. Można ją stosować tylko dla takich urządzeń, w których podstawowa część uszkodzeń występuje stopniowo. Jednak dla wielu urządzeń potrzebna jest również metoda uwzględniająca przeważający wpływ na procedurę obsługi uszkodzeń nagłych.

Metoda modelowania procesów obsługi za pomocą EMC dobrze uzupełnia analityczne metody badań, nie zastępując ich. Podstawowym zagadnieniem, wynikającym przy realizacji algorytmów procesu obsługi za pomocą EMC, jest przygotowanie wyjściowych i przejściowych danych, takich jak np.: prawdopodobieństwo wystąpienia stopniowych uszkodzeń, prawdopodobieństwo znalezienia uszkodzenia itp.

Badając systemy obsługi nie należy zapominać o uwzględnieniu wpływu personelu na obsługę. Dowolna obsługa prowadzi nie tylko do tego, że odnawia się początkowe charakterystyki urządzenia, ale wynikają z niej również dodatkowe uszkodzenia. Np. w jednej ze szczegółowych analiz rzeczywistych urządzeń podano, że ludzie byli przyczyną 53% uszkodzeń. Czym bardziej złożone urządzenie i niskie kwalifikacje obsługującego personelu, tym większy procent uszkodzeń powodowanych przez ludzi.

W pewnych przypadkach, zależność intensywności uszkodzeń w czasie bezpośrednio po wykonaniu obsługi można wyrazić następującą liniową zależnością:

$$\lambda = \lambda_0 \left[1 + \frac{t - t_0}{t_0} \right]^2$$

gdzie λ_0 - minimalna intensywność uszkodzeń odpowiadająca chwili t_0 ; t - czas liczony od chwili zakończenia obsługi; t_0 - moment, w którym następstwa obsługi nie występują, a intensywność uszkodzeń jest minimalna.

W podanym przykładzie podaje się jeden z możliwych sposobów uwzględniania wpływu człowieka na niezawodność urządzeń. Niestety na razie badaniu tego wpływu poświęca się zbyt mało uwagi.

Na zakończenie można przeprowadzić inną niż w pkt. 2.1 próbę klasyfikacji zagadnień i modeli optymalnej obsługi. Można wydzielić dwa główne kierunki opracowań:

- 1/ badanie konkretnych obiektów obsługi;
- 2/ budowa i badanie odpowiednich matematycznych modeli obsługi.

Kierunki te różnią się bezpośrednim przedmiotem badania i stosowanymi metodami.

Zgodnie z pierwszym kierunkiem, rozpatruje się metody rozwiązywania i określa następujące zagadnienia:

- badanie procedury obsługi,
- badanie normalnego działania systemu,

- wydzielenie elementów systemu i powiązań między nimi,
- wydzielenie możliwych stanów systemu,
- analiza technicznych możliwości kontroli cech, charakteryzujących stan systemu,
- zbieranie i analiza statystycznych danych, dających możliwość korygowania procedur obsługi konkretnych urządzeń,
- zbieranie doświadczalnych danych o nakładach związanych z wykonywaniem czynności obsługi.

Do rozwiązywania wymienionych zagadnień konieczne jest empiryczne badanie konkretnych technicznych urządzeń.

Zgodnie z drugim kierunkiem prac dotyczących obsługi, buduje się matematyczne modele procesów obsługi i analizuje się następujące zagadnienia:

- opracowanie podstaw procedur obsługi,
- wybór kryteriów wydajności obsługi,
- znalezienie optymalnych charakterystyk procedur obsługi i sterowanie tymi charakterystykami.

Podane wyżej kierunki badania procesów obsługi są wzajemnie powiązane. Z jednej strony, empiryczny materiał uzyskany podczas badania konkretnych urządzeń jest konieczny do budowy matematycznych modeli i do oceny zgodności tych modeli z taką lub inną klasą urządzeń. Z drugiej strony, teoretyczne rozwiązanie zagadnienia pozwala prowadzić empiryczne badania urządzeń w określonych kierunkach i umożliwia określenie programu takiego badania. Drugi kierunek cechuje jednak pewna samodzielnosc. Mianowicie zagadnienia optymalnej obsługi nie można ograniczyć do już istniejących i funkcjonujących urządzeń. Z teoretycznego punktu widzenia konieczne jest budowanie i badanie wszystkich możliwych modeli z danego zbioru, niezależnie od ich praktycznego zastosowania. Jest to potrzebne do opracowania matematycznych sposobów rozwiązania różnych zagadnień z wykorzystaniem prostych modeli, mających czasami ograniczone praktyczne znaczenie na skutek dużej idealizacji. Oprócz tego takie podejście pozwala opracować ogólne

metody i gromadzić arsenał środków, w różnym stopniu spełniających praktyczne wymagania.

Obecnie znana jest pewna liczba modeli procedur obsługi, która jest niewystarczająca do obsłużenia wszystkich istniejących urządzeń i systemów. Nie ma opracowanych ogólnych matematycznych modeli, opisujących szerokie klasy obiektów obsługiwanych, takich jak np.: skończone automaty, obiekty eksploatowane w zmieniających się warunkach itp. Dlatego na razie nie można podać jasnej klasyfikacji modeli optymalnej obsługi. Jednak wszystkie modele można podzielić na kilka grup w zależności od stopnia ich abstrakcyjności.

Pierwsza grupa najprostszych matematycznych modeli nie uwzględnia struktury urządzenia, tzn. zakłada się, że urządzenie składa się z pewnej liczby nie związanych między sobą elementów. W niektórych modelach zbiór tych elementów dzieli się na szereg podzbiorów - zespołów i określa się procedury obsługi oddzielnie dla każdego podzbioru.

Druga grupa modeli to modele uwzględniające strukturę systemu. Można je następnie podzielić na modele, w których struktura przejawia się w jawny i niejawny sposób.

Obecnie rozpatrując metody optymalizacji procedur obsługi urządzeń i systemów, oprócz ogólnych wymagań /możliwość kontroli fizycznych procesów dyskretnych i ciągłych, prostota wyników, mała pracochłonność itp./, podaje się do uwzględnienia szereg specjalnych wymagań, takich jak:

- uwzględnienie rzeczywistej struktury urządzeń, wzajemnego oddziaływania i charakteru pracy;
- ogólny wpływ różnych rodzajów uszkodzeń, niesprawności i pogorszeń;
- wpływ warunków eksploatacji, czynności obsługującego personelu i operatorów;
- możliwość operatywnego korygowania procedur obsługi;
- uwzględnienie ujemnych następstw profilaktyki;
- systemowe podejście /techniczne, ekonomiczne i organizacyjne/ przy określaniu optymalnych procedur obsługi i sterowaniu tymi procedurami;

- możliwość opracowywania różnych przedsięwzięć w celu zwiększenia niezawodności, skuteczności i jakości wykonywanych prac obsługi, na podstawie uzyskanych wyników;
- ocena produkcyjnych i eksploatacyjnych kosztów w celu oszacowania możliwości ich zmniejszenia;
- użycie do obliczeń minimalnej liczby wyjściowych statystycznych danych.

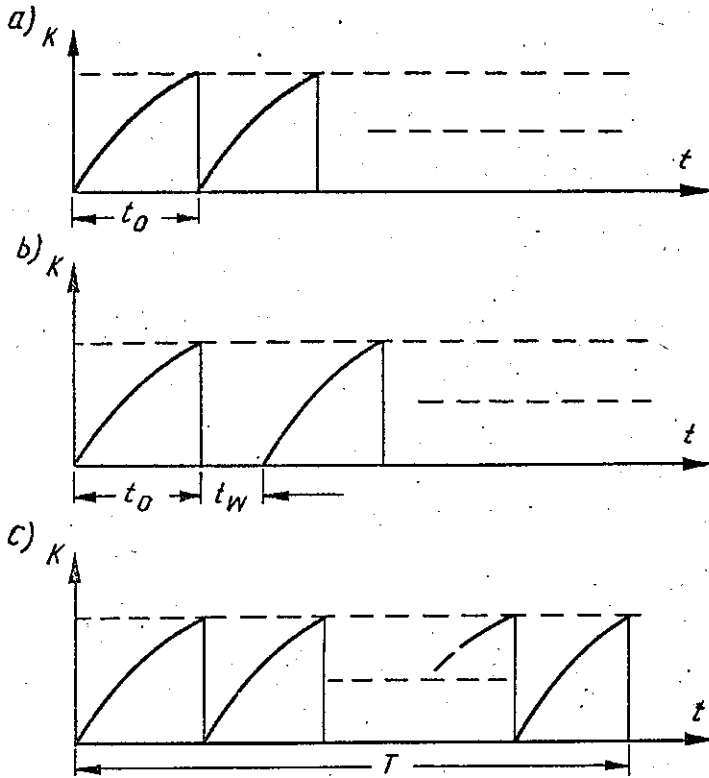
Dotychczasowe prace z dziedziny optymalizacji procedur obsługi nie uwzględniają wielu wyliczonych wymagań. Dlatego głównym zadaniem dalszych prac powinny być kompleksowe opracowania, uwzględniające równocześnie czynniki techniczne, ekonomiczne i organizacyjne. Dla ilustracji omówionych zagadnień podano w następnym rozdziale kilka przykładów elementarnych modeli procesów obsługi. Mają one zaznajomić czytelnika z praktycznymi sposobami budowania modeli.

Jak wspomniano poprzednio, do budowy spotykanych w literaturze modeli procesów obsługi stosuje się szeroki zakres środków matematycznych, takich jak: teoria masowej obsługi, łańcuchy Markowa, procesy Markowa, procesy semimarkowskie, włożone łańcuchy Markowa i inne. Dlatego podane przykłady modeli procesów obsługi należy zaliczyć do modeli względnie prostych.

3. PRZYKŁADY MODELI OBSŁUGI URZĄDZEN

3.1. Procedura wymiany zapobiegawczej ze znaną funkcją kosztów eksploatacji

Zakładamy, że mamy do czynienia z systemem eksploatacji urządzenia, w którym czynności obsługi polegają na wymianie całego urządzenia lub pewnych jego elementów przed uszkodzeniem. Po wymianie urządzenie powraca do stanu wyjściowego /rys. 1a/.



Rys. 1. Graficzna ilustracja trzech modeli procedury wymiany

a/ czas wymiany $t_w = 0$; b/ czas wymiany $t_w > 0$; c/ remont przy $t_w = 0$;

t_0 - odstęp wymiany, K - koszty całkowite, t_w - czas wymiany, T - odstęp między dwoma remontami

Proces rozpoczynający się po każdej wymianie jest identyczny i zmiany jego parametrów w czasie są określone znanymi funkcjami. Stąd wynika, że odstępy między wymianami będą stałe i dlatego procedury mające tę cechę nazywamy procedurami okresowymi. Omówiony proces wymian jest nieograniczony w czasie, a przyjętym kryterium optymalizacji jest koszt eksplo-

atacji technicznej na jednostkę czasu. Przyjmuje się, że jest znana funkcja kosztu, tzn. zależność kosztu eksploatacji od czasu po wymianie.

Celem analizy jest określenie optymalnego odstępu między wymianami, tzn. takiego odstępu, aby łączne koszty eksploatacji technicznej obejmujące koszty operacyjne i koszty wymiany były minimalne. Przez koszty operacyjne rozumiemy tutaj koszty zużytych materiałów i wszystkich czynności realizowanych między wymianami, np. koszty drobnych napraw bieżących niezbędných do utrzymania wymaganych parametrów urządzenia podczas jego pracy.

Można dodatkowo wyjaśnić, że w miarę zwiększenia częstości wymian koszty wymian będą rosły, a koszty operacyjne będą malały. Wobec tego należy się spodziewać, że istnieje pewna minimalna, a więc optymalna, wartość funkcji kosztów całkowitych dla pewnej określonej częstości wymian. Celem naszym jest więc znalezienie odstępu wymiany odpowiadającego tej optymalnej częstości wymian.

Przyjęto następujące oznaczenia:

- $k/t/$ - koszty operacyjne na jednostkę czasu w chwili t po wymianie;
- t_0 - odstęp wymiany; procedura obsługi polega na wykonywaniu wymian w odstępach czasu o długości t_0 ;
- K_w - koszt wymiany;
- $K/t_0/$ - całkowite koszty na jednostkę czasu w przedziale czasu między wymianami.

Całkowity koszt w przedziale czasu między sąsiednimi czynnościami obsługi będzie sumą kosztu wymiany i kosztów operacyjnych tego przedziału, czyli

$$K_w + \int_0^{t_0} k/t/ dt. \quad /1/$$

Natomiast całkowity koszt na jednostkę czasu $K/t_0/$ będzie ilorazem $/1/$ i długości przedziału, a więc

$$K/t_0/ = \frac{1}{t_0} \left[K_w + \int_0^{t_0} k/t/ dt \right]. \quad /2/$$

Jest to ogólny model matematyczny problemu, który można rozwiązać z punktu widzenia wyznaczonego celu, jeżeli mamy daną postać funkcji $k/t/$.

Koszty operacyjne $k/t/$ są pewną funkcją czasu, którą dla rozważanego konkretnego przypadku przyjmujemy np. w postaci

$$k/t/ = a - b \exp /-kt/ \quad /3/$$

gdzie a i b są pewnymi stałymi, a k jest współczynnikiem kształtu krzywej. Po podstawieniu tej funkcji do /2/ i wykonaniu całkowania otrzymamy

$$K/t_0/ = a + \frac{K_w}{t_0} - \frac{b}{kt_0} \left[1 - \exp /-kt_0/ \right]. \quad /4/$$

Ponieważ chcemy znaleźć wartość minimalną tej funkcji kosztów, różniczkujemy $K/t_0/$ względem t_0 i wynik porównujemy do zera.

A więc:

$$\frac{dK/t_0/}{dt_0} = \frac{b}{kt_0^2} - \frac{K_w}{t_0^2} - \frac{b}{kt_0^2} \exp /-kt_0/ - \frac{b}{t_0} \exp /-kt_0/ \quad /5/$$

i następnie

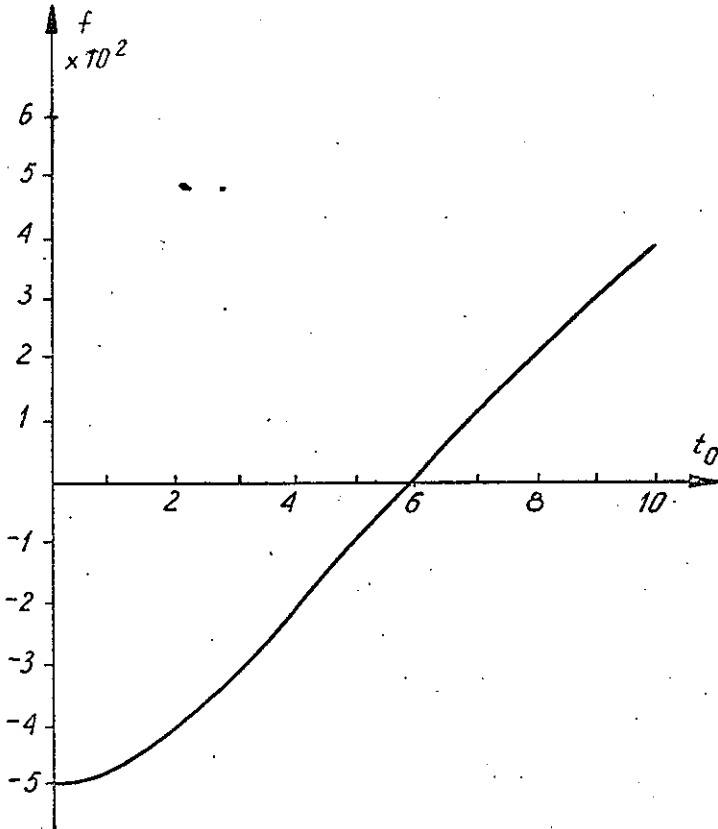
$$\frac{1}{t_0} \left[\frac{b}{kt_0} - \frac{K_w}{t_0} - \frac{b}{kt_0} \exp /-kt_0/ - b \exp /-kt_0/ \right] = 0. \quad /6/$$

Ze względu na to, że b/t_0 jest na pewno różne od zera, więc wyrażenie w nawiasach powinno być porównane do zera i rozwiązane, czyli po przekształceniu:

$$\frac{b}{k} - K_w - \frac{b}{k} \exp /-kt_0/ - bt_0 \exp /-kt_0/ = 0. \quad /7/$$

Równanie to może być rozwiązane różnymi metodami numerycznymi lub graficznymi, które tutaj nie będą rozważane. Po rozwiązaniu otrzymujemy wartość t_0 , dla której koszt całkowity

jest minimalny. Dla tej procedury wymiany, po podstawieniu konkretnych wartości do /4/ otrzymamy koszt całkowity.

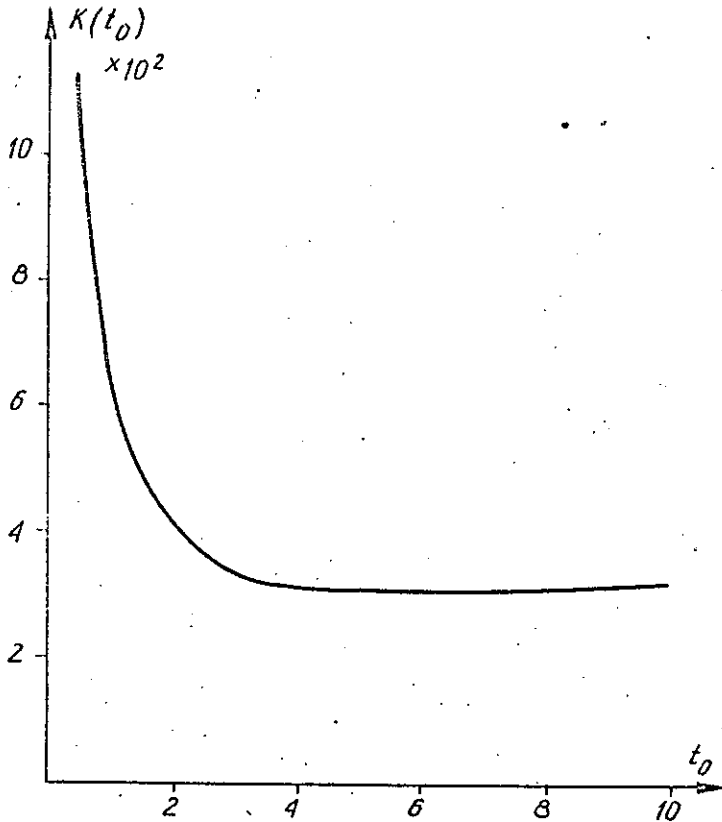


Rys. 2. Funkcja /3.1-7/ określająca optymalną wartość t_0 .
 f - funkcja /3.1-7/, t_0 - odstęp wymiany

Dla ilustracji zostaną podane wykresy zależności /7/ i /4/ dla konkretnego przypadku, dla którego $K_w = 500$ zł, $a = 400$, $b = 300$ i $k = 0,2$. Optymalna wartość t_0 dla tych wartości, obliczona z równania /7/, jest równa $t_0 = 5,9$ tygodni.

Wykres równania /7/ przedstawiono na rys. 2, natomiast wykres funkcji kosztów wg równania /4/ podano na rys. 3. Ry-

sunek ten ilustruje tendencję i szybkość zmian całkowitego kosztu dla różnych odstępów wymiany. Można wyraźnie zobaczyć wpływ różnych procedur wymiany na całkowity koszt.



Rys. 3. Funkcja kosztów całkowitych K/t_0 w zależności od czasu poprawnej pracy w cyklu bez uszkodzeń

Analizując rozwiązanie podane za pomocą krzywej na rys.3, można zwrócić uwagę na korzyści z takiego wykresu w procesie podejmowania decyzji. Po pierwsze, krzywa nie tylko wskazuje optymalną wartość t_0 z punktu widzenia kosztów, ale również ilustruje zachowanie się funkcji kosztów w pobliżu tej war-

tości. Po drugie, jeżeli osoba podejmująca decyzję stwierdzi, że istnieje obszar, w którym krzywa kosztów jest wystarczająco płaska po jednej lub po obu stronach punktu optymalnego, wówczas istnieje pewna swoboda planowania odstępów czynności obsługi. Na podanym rys. 3 widać wyraźnie, że odstęp obsługi zawarte w przedziale od 4 do 8 tygodni różnią się nieznacznie pod względem całkowitych kosztów.

Można się spotkać z sytuacją, w której pewne parametry analizowanej funkcji nie są dostatecznie znane. Wówczas wykonujemy badanie oddziaływania danego parametru na zachowanie się funkcji kosztów. Daje nam to wskazówkę, jaka informacja jest ważna z punktu widzenia decyzji, tzn. jaka informacja powoduje duże zmiany wyniku i dlatego powinna być dokładniej określona. Jest to czasami długa i żmudna droga do decyzji, w postaci przyjęcia danej procedury do zastosowania w rzeczywistej eksploatacji. Badany model może być również stosowany w przypadku potrzeby uwzględnienia czasu trwania czynności wymiany /rys. 1b/.

Dotychczas zakładaliśmy, że czas wymiany jest krótki w porównaniu do czasu operacyjnego między czynnościami obsługi i może być pominięty. Jeżeli jednak z pewnych względów należy czas ten uwzględnić, wystarczy na miejsce t_0 wprowadzić $t_0 + t_w$, a więc równanie /2/ przyjmie postać

$$K/t_0 = \frac{1}{t_0 + t_w} \left[K_w + \int_0^{t_0} k/t/ dt \right] \quad /8/$$

gdzie t_w - czas trwania czynności wymiany jest wartością stałą

Inne zagadnienie, które można rozwiązać za pomocą omówionego modelu zostało sformułowane w następujący sposób /rys. 1c/. Należy określić optymalny odstęp między czynnościami wymiany, aby zminimalizować sumę kosztów operacyjnych i wymiany między dwoma remontami. A więc między remontami będzie zrealizowana pewna liczba wymian, zależna od ustalonego optymalnego odstępu, który trzeba ustalić. Należy więc określić całkowity koszt między remontami i następnie poddać go iden-

tycznej analizie co w omówionym modelu. Dodatkowo należy zaznaczyć, że tutaj proces jest ograniczony w czasie do odstępu między dwoma remontami. Całkowity koszt między remontami równa się w tym przypadku sumie kosztów wymian oraz kosztów operacyjnych między remontami. Koszty wymiany między remontami równają się iloczynowi liczby wymian między remontami i kosztu jednej wymiany, czyli $n K_w$. Natomiast koszty operacyjne między remontami równają się iloczynowi liczby odstępów pomiędzy wymianami w przedziale między remontami i kosztów operacyjnych dla jednego odstępu między wymianami, czyli

$$/n + 1/ \int_0^{t_0} k/t/ dt.$$

Ponieważ n nie obejmuje remontów, więc liczba odstępów jest większa o jeden od liczby wymian. Wartość n można wyrazić za pomocą t_0 wprowadzając zależność $n + 1/ t_0 = T$ i obliczając z niej n . Tutaj T oznacza okres między remontami. Ostateczna postać funkcji kosztu całkowitego ma postać

$$K/t_0/ = K_w / \frac{T}{t_0} - 1/ + \frac{T}{t_0} \int_0^{t_0} k/t/ dt. \quad /9/$$

Równanie to można analizować w podobny sposób jak równanie/2/.

Na rys. 1 zilustrowano graficznie trzy modele rozpatrywane w tym punkcie. Rys. 1a przedstawia model podstawowy, zaś rys. 1b i c przedstawiają modele wspomniane wyżej.

3.2. Inspekcyjna procedura obsługi urządzeń technicznych

Podstawowym celem inspekcji jest określenie stanu urządzeń. Aby określić stan należy wykonać odpowiednie badania i pomiary, których zakres należy wcześniej dokładnie ustalić. Na podstawie porównania pomierzonych wskaźników z wartościami wymaganymi, podejmuje się decyzję o zakresie dalszych

czynności obsługi, takich jak: skorygowanie mniejszych usterek, naprawa względnie wymiana.

Na skutek prowadzenia inspekcji pewne potencjalne usterki będą w porę wykryte, nim doprowadzą do całkowitego uszkodzenia urządzenia. W zależności od częstości prowadzonych inspekcji, intensywność uszkodzeń urządzenia będzie się zmieniać. Natomiast dla danej konkretnej częstości inspekcji, intensywność uszkodzeń będzie stała. Dlatego problematyka inspekcji obejmuje zagadnienia ustalenia wymaganego wskaźnika intensywności uszkodzeń dla danego procesu eksploatacji technicznej urządzenia, a następnie utrzymania go na poziomie nie gorszym od wymaganego za pomocą inspekcji o odpowiedniej częstości.

Należy również zwrócić uwagę na pojęcie "głębokości" inspekcji. Przez pojęcie to rozumiemy ustalony z góry większy lub mniejszy zestaw pomiarów i badań przewidzianych dla danego urządzenia do wykonania w czasie inspekcji. Oczywiście im większa głębokość inspekcji, tzn. im więcej wykonuje się badań i pomiarów, tym większy będzie koszt inspekcji. Z drugiej strony, im większa głębokość inspekcji, tym większe jest prawdopodobieństwo wykrycia usterki, która może spowodować poważniejsze uszkodzenie. Dlatego dobór niezbędnego zestawu pomiarów i badań jest zagadnieniem bardzo ważnym podczas planowania inspekcji i polega na kompromisie między sprzecznymi wymaganiami.

Koszty inspekcji i straty na wyjściu urządzenia z powodu inspekcji /np. straty produkcji/ będą rosły w miarę wzrostu częstości inspekcji. Zdarzają się przypadki, że można przeprowadzić inspekcję bez zatrzymania pracy urządzenia. Wówczas straty z powodu przerw w produkcji nie będą występować. Odwrotny przebieg będą miały funkcje kosztów napraw i strat na wyjściu. Dlatego należy się spodziewać, że istnieje optymalna częstość inspekcji, przy której łączne koszty i straty są minimalne.

Opracowano szereg modeli matematycznych procedur inspekcyjnych, z których dwie zostaną tutaj omówione.

Będą to procedury, których celem jest:

- minimalizacja czasu przerw w pracy,
- maksymalizacja korzyści.

Dla rozpatrywanych modeli przyjęto, że:

- uszkodzenia urządzenia pojawiają się w odstępach czasu zgodnych z rozkładem wykładniczym o średnim czasie do uszkodzenia równym $1/\lambda$;
- czasy naprawy są zgodne z rozkładem wykładniczym o średniej $1/\mu$;
- czasy inspekcji są zgodne z rozkładem wykładniczym o średnim czasie inspekcji równym $1/d$.

Przyjęto następujące oznaczenia:

- f_i - częstość inspekcji,
- λ - intensywność uszkodzeń,
- λ/f_i - intensywność uszkodzeń jako funkcja częstości inspekcji,
- $\lambda/0$ - intensywność uszkodzeń, jeżeli nie wykonuje się inspekcji,
- W - wartość korzyści na jednostkę czasu: np. cena sprzedaży produkcji pomniejszona o koszty materiałów i produkcji,
- P - wartość produkcji na jednostkę czasu,
- K_i - koszt inspekcji na jednostkę czasu,
- K_n - koszt naprawy na jednostkę czasu,
- R/f_i - funkcja czasu przerwy na jednostkę czasu.

Problem minimalizacji czasu przerwy w pracy urządzenia polega na określeniu procedury inspekcji, która będzie minimalizować całkowity czas przerw na jednostkę czasu powodowanych przez różne przyczyny.

Całkowity czas przerwy na jednostkę czasu będzie funkcją f_i , częstości inspekcji. Funkcja ta zostanie oznaczona symbolem R/f_i . Należy znaleźć takie f_i , które minimalizuje funkcję R/f_i . Szukana funkcja R/f_i będzie sumą przerw powodowanych przez naprawy na jednostkę czasu oraz przerw występujących na skutek wykonywania inspekcji w ciągu jednostki czasu.

Przerwy powodowane przez naprawy wyraża się iloczynem intensywności uszkodzeń λ/f_i i średniego czasu naprawy $1/\mu$. Przerwy wynikające z inspekcji są równe liczbie inspekcji pomnożonej przez średni czas trwania inspekcji $1/\alpha$. A więc szukana funkcja wyraża się zależnością:

$$R/f_i/ = \frac{\lambda/f_i/}{\mu} + \frac{f_i}{\alpha} \quad /1/$$

Jest to matematyczny model problemu, z którego można otrzymać rozwiązanie szczegółowe, jeżeli znana jest postać funkcji $\lambda/f_i/$.

Jako przykład można obliczyć częstość f_i dla zmian $\lambda/f_i/$ zgodnych z funkcją wykładniczą malejącą o postaci:

$$\lambda_1/f_i/ = m e^{-f_i} \quad /2/$$

Aby otrzymać minimum funkcji /1/ należy /2/ podstawić do /1/, obliczyć pochodną funkcji /1/ względem f_i i prawą stronę wyniku przyrównać do zera. A więc kolejno otrzymamy:

$$R'/f_i/ = \frac{-m e^{-f_i}}{\mu} + \frac{1}{\alpha}, \quad /3/$$

$$\frac{-m e^{-f_i}}{\mu} + \frac{1}{\alpha} = 0.$$

Po dokonaniu odpowiednich przekształceń otrzymujemy szukaną postać wyrażenia na f_i :

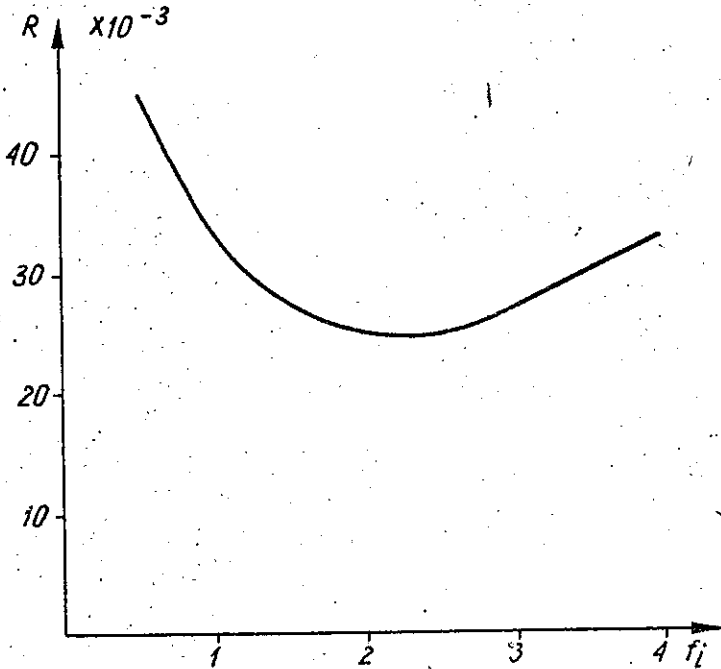
$$f_i = -\ln \frac{\mu}{m\alpha} \quad /4/$$

Niech $1/\mu = 12 \text{ h} = 0,017$ miesiąca, $1/\alpha = 6 \text{ h} = 0,008$ miesiąca oraz $m = 4$ /średnia liczba przerw na miesiąc/.

Wówczas:

$$f_i = -\ln \frac{0,008}{4 \times 0,017} \approx 2,14 \quad /5/$$

Stąd najlepszą liczbą inspekcji minimalizujących czasy przerw są dwie inspekcje na miesiąc. Dla ilustracji na rys. 4 podano wykres $R/f_i/$.



Rys. 4. Funkcja łącznych przerw w pracy R_0 w zależności od zmiany częstości inspekcji f_1

Dla dwóch inspekcji na miesiąc czas przerw w pracy, zgodnie z równaniem /1/, jest równy:

$$R/2/ = 4 \times e^{-2} \times 0,017 + 2 \times 0,008 = 0,025 \text{ miesięcy.}$$

Minimalizowanie czasu przerwy w pracy jest równoważne maksymalizowaniu gotowości. Ponieważ gotowość na jednostkę czasu jest równa jedności pomniejszonej o czas przerwy na jednostkę czasu, wobec tego w rozważanym przypadku gotowość jest równa:

$$k_g = 1 - 0,025 = 0,975 \text{ miesięcy} = 97,5\%.$$

Drugi rozpatrywany tutaj model ma na celu maksymalizację korzyści z pracującego urządzenia jako funkcji częstości inspekcji. Funkcję tę oznaczoną tutaj symbolem $W/f_1/$ można

wyrazić przez odjęcie od wartości produkcji na wyjściu na jednostkę czasu $/P/$ czterech składników wyrażających:

- wartość produkcji straconą z powodu inspekcji na jednostkę czasu,
- wartość produkcji straconą z powodu napraw na jednostkę czasu,
- koszt inspekcji na jednostkę czasu,
- koszt napraw na jednostkę czasu.

Wartość produkcji lub korzyści stracone z powodu wykonywanych inspekcji w jednostce czasu wyraża się jako iloczyn trzech składników:

- P oznaczającego wartość produkcji na jednostkę czasu,
- f_i podającego liczbę inspekcji na jednostkę czasu,
- $1/d$ określającego średni czas trwania jednej inspekcji.

Wartość korzyści straconych z powodu napraw na jednostkę czasu wyraża się również w postaci iloczynu:

- P , którego znaczenie wyrażono powyżej,
- λ/f_i podającego liczbę napraw na jednostkę czasu /zmiana intensywności uszkodzeń na skutek inspekcji/,
- $1/\mu$ określającego średni czas naprawy.

Koszt inspekcji na jednostkę czasu jest iloczynem $K_i \times f_i \times 1/d$, gdzie K_i oznacza koszt inspekcji trwającej przez całą jednostkę czasu bez przerwy.

Koszt naprawy na jednostkę czasu wyraża się iloczynem $K_n \times \lambda/f_i \times 1/\mu$, gdzie K_n oznacza koszt naprawy trwającej całą jednostkę czasu bez przerwy.

Ostatecznie szukany model matematyczny ma postać:

$$W/f_i = P - P f_i / d - P \lambda / f_i / \times 1/\mu - K_i f_i / d - K_n \lambda / f_i / \times 1/\mu. \quad /5/$$

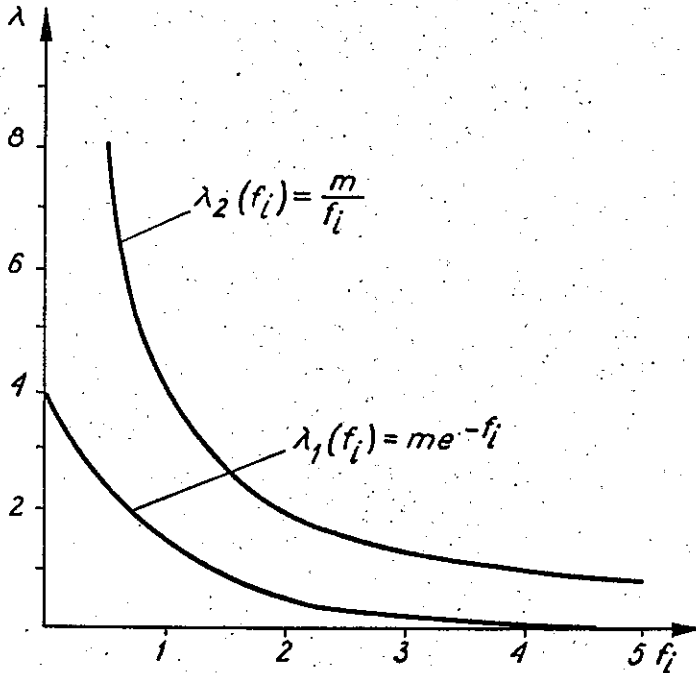
W celu uzyskania rozwiązania zakładamy, że W/f_i jest funkcją ciągłą, tak że istnieje pochodna:

$$\frac{dW/f_i/}{d f_i} = \frac{P}{\alpha} - \frac{P \lambda' / f_i /}{\mu} - \frac{K_i}{\alpha} - \frac{K_n \lambda' / f_i /}{\mu} \quad /6/$$

Po porównaniu prawej strony do zera i dokonaniu odpowiednich przekształceń otrzymamy:

$$\lambda' / f_i / = - \frac{\mu}{\alpha} \frac{P + K_i}{P + K_n} \quad /7/$$

Optymalną częstotliwością będzie taka częstota f_i , która spełnia to równanie.



Rys. 5. Zmiany intensywności uszkodzeń λ w zależności od zmian częstoty inspekcji f_i .

Ponieważ wszystkie wielkości występujące w powyższej zależności są dla konkretnego przypadku znane z wyjątkiem f_i ,

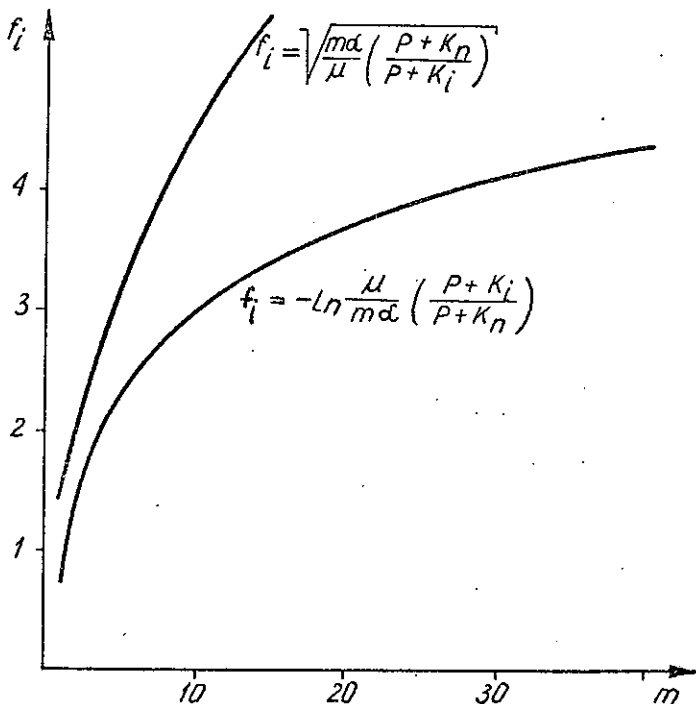
należy obliczyć λ'/f_i i podstawić wszystkie wartości do wzoru. Dla przykładu założmy, że zmiany intensywności uszkodzeń na skutek inspekcji mają postać zgodną z rozkładem wykładniczym.

Wówczas /zob. rys. 5/:

$$\lambda_1/f_i = me^{-f_i}, \quad /8/$$

$$\lambda'_1/f_i = -me^{-f_i}.$$

Po podstawieniu i po odpowiednich przekształceniach ostatecznie otrzymujemy /rys. 6/:



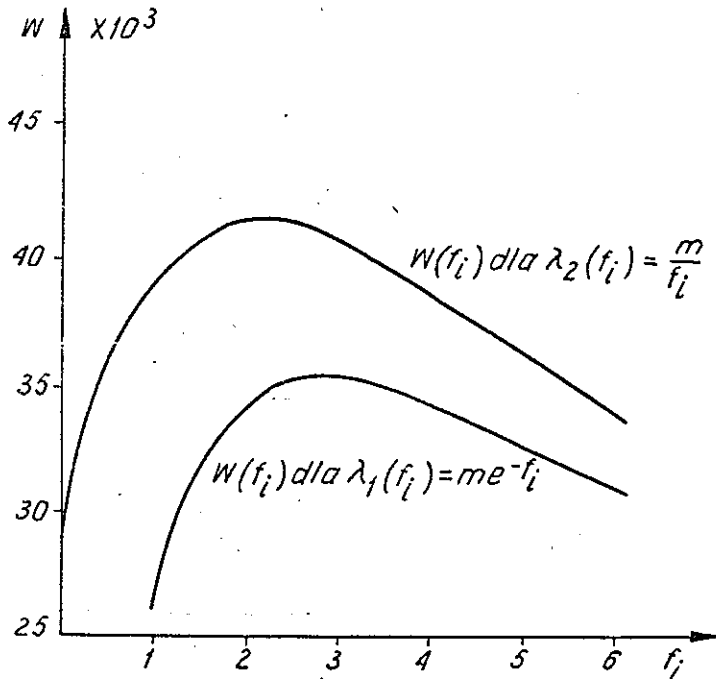
Rys. 6. Zmiany częstości inspekcji f_i w zależności od m /średnia liczba przerw na jednostkę czasu/

$$f_i = -\ln \frac{\mu}{m\alpha} \frac{P + K_i}{P + K_n} \quad /9/$$

Jeżeli: $1/\mu = 0,1$; $1/\alpha = 0,05$; $m = 4$; $P = 50\ 000$;
 $K_i = 1000$; $K_n = 2000$, to $f_i = 2,09$.

A więc w tym przypadku, przy stosowaniu dwóch inspekcji na miesiąc otrzymuje się największe korzyści W/f_i . Analizując otrzymaną funkcję można stwierdzić, że f_i rośnie, jeżeli m, α i $/P + K_n/$ rosną oraz μ i $/P + K_i/$ maleją. Jako ilustrację charakteru tych zmian, na rys. 6 przedstawiono f_i , jako funkcję m .

Jako drugi przykład można rozważyć funkcję zmiany intensywności uszkodzeń o postaci /zob. rys. 5/:



Rys. 7. Funkcje łącznych korzyści W w zależności od częstości inspekcji f_i

$$\lambda_2/f_i/ = m/f_i. \quad /10/$$

Po podobnych przekształceniach jak w poprzednim przykładzie otrzymamy:

$$f_i = \sqrt{\frac{m c}{\mu} \frac{P + K_n}{P + K_i}}$$

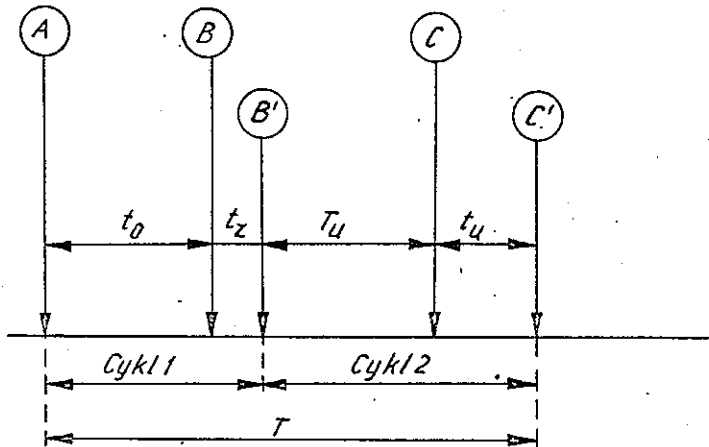
Rys. 6 jest ilustracją tego rozwiązania.

Zależność $W/f_i/$ dla obu przykładów ilustruje rys. 7. Zależności te można analizować w podobny sposób, jak to opisano dla wymiany zapobiegawczej. Jeżeli w pewnym obszarze zmian f_i zmiany W są nieznaczące, wówczas istnieje swoboda manewru i dobieramy najwygodniejszą częstość inspekcji, zwykle wynikającą z łączenia inspekcji z innymi pracami eksploatacji technicznej wykonywanymi w tym samym czasie.

Procedura inspekcyjna jest jednym z ważniejszych środków analizy ilościowej procesu eksploatacji technicznej i w każdym przypadku w praktyce należy rozważyć ewentualne korzyści, jakie może przynieść jej zastosowanie.

3.3. Wymiana zapobiegawcza z uwzględnieniem wieku urządzenia

Obecnie zostanie zbadany proces eksploatacji technicznej, w którym zastosowano wymianę zapobiegawczą uwzględniającą wiek urządzenia oraz dodatkowo wprowadzono do modelu czasu trwania wymian zapobiegawczej i na skutek uszkodzeń. W przypadku uszkodzenia wymianę rozpoczyna się natychmiast, przy czym uwzględnia się czas $/t_u/$ potrzebny na wymianę. Natomiast wymiana zapobiegawcza zależy od osiągnięcia określonego wieku urządzenia, czyli od ostatniej wymiany musi upłynąć określony czas poprawnej pracy równy t_0 , niezależnie od tego czy to była wymiana zapobiegawcza, czy na skutek uszkodzenia. Uwzględnia się również w modelu czas $/t_z/$ trwania wymiany zapobiegawczej. Omawiany proces eksploatacji ilustruje rys. 8.



Rys. 8. Cykl pracy /T/ występujący w procedurze wymiany zapobiegawczej uwzględniającej wiek urządzenia

A - moment włączenia do pracy nowego urządzenia, B - moment rozpoczęcia wymiany zapobiegawczej, B' - moment zakończenia cyklu 1 z wymianą zapobiegawczą i rozpoczęcia cyklu 2 z uszkodzeniem, C - moment wystąpienia uszkodzenia, C' - moment zakończenia cyklu 2, t_0 - czas poprawnej pracy, t_z - czas wymiany w cyklu 1 bez uszkodzenia, T_u - czas poprawnej pracy, t_u - czas wymiany w cyklu 2 z uszkodzeniem

Przyjmuje się, że koszt wymiany uszkodzonego urządzenia jest większy niż koszt wymiany zapobiegawczej, dzięki czemu można określić optymalny odstęp wymiany zapobiegawczej, dla którego łączne koszty wymian są minimalne. Przyjęcie takiego założenia jest uzasadnione, gdyż zaplanowana wymiana będzie kosztować mniej dzięki, np. skróceniu czasu trwania wymiany wynikającego z uprzedniego przygotowania potrzebnych środków w postaci ludzi, części zamiennych, podzespołów oraz ewentualnie całego urządzenia do wymiany.

Celem budowy i analizy modelu matematycznego, omówionej

wyżej procedury postępowania eksploatacyjnego, jest określenie optymalnego wieku t_0 pomiędzy wymianami w przypadku, gdy do chwili t_0 nie wystąpiło uszkodzenie. Gdy wystąpi uszkodzenie, wymianę rozpoczyna się natychmiast. Odstęp/wiek/ t_0 powinien być tak dobrany, aby całkowite /oczekiwane/ koszty wymian urządzenia na jednostkę czasu były minimalne.

Przyjęto następujące oznaczenia:

- t_0 - odstęp bezawaryjnej pracy, po którym następuje wymiana zapobiegawcza,
- t_z - czas trwania wymiany zapobiegawczej,
- t_u - czas trwania wymiany na skutek uszkodzenia,
- K_z - koszt wymiany zapobiegawczej,
- K_u - koszt wymiany uszkodzonego urządzenia,
- f/t - funkcja gęstości prawdopodobieństwa uszkodzenia urządzenia,
- K_w - całkowity oczekiwany koszt obsługi /wymiany/ urządzenia na cykl,
- K/t_0 - całkowity oczekiwany koszt obsługi urządzenia na jednostkę czasu,
- R/t_0 - prawdopodobieństwo pojawienia się cyklu zapobiegawczego.

Rozpatrując rys. 8 można stwierdzić, że w badanym procesie eksploatacji występują dwa różne cykle zdarzeń. Pierwszy cykl zapobiegawczy, w którym czas t_0 upływa bez uszkodzenia urządzenia i następnie przystępuje się do wymiany zapobiegawczej, która trwa przez czas t_z oraz drugi cykl wynikający z uszkodzenia, w którym uszkodzenie pojawia się przed upływem czasu t_0 i na skutek uszkodzenia dokonuje się wymiany, która trwa przez czas t_u . A więc w przypadku gdy urządzenie przerwie pracę na skutek uszkodzenia, wymianę rozpoczyna się natychmiast.

Całkowity oczekiwany koszt obsługi na jednostkę czasu wyraża się zależnością:

$$K/t_0 = \frac{K_w}{T}$$

/1/

gdzie K_w oznacza całkowity oczekiwany koszt obsługi urządzenia na cykl pracy, a T oznacza oczekiwaną długość cyklu.

W rozważanym przypadku cykl składa się z dwóch części: z cyklu zapobiegawczego i z cyklu wynikającego z uszkodzenia. Każdy z tych cykli może się pojawić z określonym prawdopodobieństwem; R/t_o dla cyklu zapobiegawczego i $1-R/t_o$ dla cyklu wynikającego z uszkodzenia, gdyż suma tych dwóch wielkości musi być równa jedności. Wymienione prawdopodobieństwa wynikają z funkcji gęstości prawdopodobieństwa uszkodzenia i pierwsze z nich R/t_o jest równe prawdopodobieństwu pojawienia się uszkodzenia po czasie t_o , a drugie $1-R/t_o$ jest równe prawdopodobieństwu pojawienia się uszkodzenia przed upływem czasu t_o . Wobec tego można napisać, że:

$$K_w = K_z \cdot R/t_o + K_u \left[1 - R/t_o \right] \quad /2/$$

czyli całkowity oczekiwany koszt obsługi na cykl równa się sumie kosztu wymiany zapobiegawczej pomnożonej przez prawdopodobieństwo pojawienia się cyklu wymiany zapobiegawczej oraz kosztu wymiany uszkodzonego urządzenia pomnożonej przez prawdopodobieństwo pojawienia się cyklu wynikającego z uszkodzenia.

W podobny sposób należy określić oczekiwaną długość cyklu T . A więc możemy napisać:

$$T = /t_o + t_z/ \cdot R/t_o + /T_u + t_u/ \cdot \left[1 - R/t_o \right] \quad /3/$$

gdzie T_u oznacza oczekiwany czas poprawnej pracy w cyklu z uszkodzeniem. A więc oczekiwana długość cyklu T jest równa sumie długości cyklu zapobiegawczego $/t_o + t_z/$ pomnożonej przez prawdopodobieństwo pojawienia się cyklu zapobiegawczego oraz oczekiwanej długości cyklu z uszkodzeniem, czyli $/T_u + t_u/$ pomnożonej przez prawdopodobieństwo cyklu z uszkodzeniem.

Należy określić bliżej wartość T_u występującą we wzorze /3/. Średni czas do uszkodzenia pełnego rozkładu jest równy

$$\int_{-\infty}^{\infty} t f(t) dt.$$

Jeżeli wymiana zapobiegawcza występuje w chwili t_0 , więc czas do uszkodzenia może się znajdować w przedziale $[0, t_0]$, ponieważ obszar powyżej t_0 jest niedostępny dla uszkodzeń. Wobec tego należy zastosować wzór na wartość średnią dla rozkładu uciętego, który ma postać dla rozważanego przypadku:

$$T_u = \frac{\int_{-\infty}^{t_0} t f(t) dt}{1 - R(t_0)} \quad /4/$$

Podstawiając zależności /2/, /3/ i /4/ do wzoru /1/ ostatecznie otrzymamy:

$$\begin{aligned} K/t_0 &= \frac{K_z R(t_0) + K_u [1 - R(t_0)]}{t_0 + t_z R(t_0) + T_u + t_u [1 - R(t_0)]} = \\ &= \frac{K_z R(t_0) + K_u [1 - R(t_0)]}{t_0 + t_z R(t_0) + \int_{-\infty}^{t_0} t f(t) dt + t_u [1 - R(t_0)]} \end{aligned} \quad /5/$$

Jeżeli przyjmiemy $t_z = t_u = 0$, to wzór powyższy uprości się do postaci:

$$K/t_0 = \frac{K_z R(t_0) + K_u [1 - R(t_0)]}{t_0 R(t_0) + \int_{-\infty}^{t_0} t f(t) dt} \quad /6/$$

Wzór /6/ stosujemy, gdy czas poprawnej pracy jest znacznie dłuższy od czasów wymiany, które dzięki temu można w modelu pominąć.

Jako przykład obliczymy teraz według wzoru /5/ optymalny wiek t_0 , po osiągnięciu którego dokonuje się wymiany urządzenia i który minimalizuje całkowicie oczekiwane koszty wymiany na jednostkę czasu. W rozważanym przypadku uszkodzenia

występują zgodnie z rozkładem normalnym o średniej $m = 4$ tygodnie i odchyleniu standardowym $s = 1$ tydzień. Koszt wymiany zapobiegawczej wynosi 40 tysięcy złotych, a koszt wymiany z powodu uszkodzenia - 70 tysięcy złotych. Czas trwania wymiany zapobiegawczej $t_z = 0,25$ tygodnia, a czas trwania wymiany z powodu uszkodzenia $t_u = 0,5$ tygodnia.

Funkcja gęstości prawdopodobieństwa dla rozkładu normalnego, w rozważanym przypadku $m = 4$, $s = 1$ ma postać:

$$f/t/ = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t - 4)^2}{2} \right]; \quad /7/$$

a dystrybuanta:

$$F/t/ = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t - 4)^2}{2} \right] dt. \quad /8/$$

Dla rozkładu normalnego o zmiennej standaryzowanej mamy:

$$F/z/ = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{z^2}{2} \right] dz \quad /9/$$

gdzie $z = t - 4$.

Po podstawieniu wymienionych powyżej danych do wzoru /5/ otrzymamy:

$$K/t_o = \frac{40 R/t_o/ + 70 [1 - R/t_o/]}{/t_o + 0,25/ R/t_o/ \int_{-\infty}^{t_o} t f/t/ dt + 0,5 [1 - R/t_o/]} \quad /10/$$

Obliczamy najpierw $R/t_o/$. Ponieważ $R/t_o/$ jest równe prawdopodobieństwu pojawienia się uszkodzenia po czasie t_o , więc należy przyjąć odpowiednie granice całkowania dla dystrybuanty rozkładu uszkodzeń. Wobec tego mamy:

$$R/t_o/ = \int_{t_o}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t - 4)^2}{2} \right] dt.$$

Po przejściu do rozkładu standardowego /9/ otrzymujemy

$$R/t_0/ = F/z = t - 4/$$

przy zachowaniu odpowiednich granic całkowania.

Potrzebne dane można odczytać z tablic rozkładu standardowego i dla rozważanego przykładu otrzymamy:

$$R/1/ = F/-3/ = 0,9987$$

$$R/2/ = F/-2/ = 0,9773$$

$$R/3/ = F/-1/ = 0,8413$$

$$R/4/ = F/0/ = 0,5000$$

$$R/5/ = F/1/ = 0,1587$$

$$R/6/ = F/2/ = 0,0227$$

/11/

Drugie wyrażenie, które należy obliczyć to:

$$\int_{-\infty}^{t_0} t f/t/dt = \int_{-\infty}^{t_0} t \frac{1}{s \sqrt{2\pi}} \exp \left[- \frac{t - m/2}{2s^2} \right] dt.$$

Prawą stronę można wyrazić za pomocą funkcji /7/ i dystrybuanty /8/ rozkładu normalnego. W tym celu dokonujemy następujących przekształceń:

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{t_0} t \frac{1}{s \sqrt{2\pi}} \exp \left[- \frac{t - m/2}{2s^2} \right] dt = \\ & = \int_{-\infty}^{t_0} \frac{1}{s \sqrt{2\pi}} /t-m/ \exp \left[- \frac{t - m/2}{2s^2} \right] dt + \\ & + \int_{-\infty}^{t_0} m \frac{1}{s \sqrt{2\pi}} \exp \left[- \frac{t - m/2}{2s^2} \right] dt = \\ & = \frac{-s}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{t_0} \frac{\exp \left[\frac{t - m/2}{-2s^2} \right]}{dt} dt + m F / \frac{t-m}{s} / = \end{aligned}$$

$$= \frac{-s}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{t_0 - m/2}{2s^2} \right] + m F \left/ \frac{t-m}{s} \right/ =$$

$$= -s f/z/ + m F /z/$$

gdzie $f/z/$ i $F/z/$ są gęstością i dystrybuantą standardowego rozkładu normalnego.

Korzystając z tablic normalnego rozkładu standardowego otrzymujemy:

dla $t_0 = 1$	maamy	$-f/-3/ + 4F/-3/ = 0,0034$	
$t_0 = 2$		$-f/-2/ + 4F/-2/ = 0,0692$	
$t_0 = 3$		$-f/-1/ + 4F/-1/ = 0,5382$	
$t_0 = 4$		$-f/0/ + 4F/0/ = 1,8408$	/12/
$t_0 = 5$		$-f/1/ + 4F/1/ = 3,2686$	
$t_0 = 6$		$-f/2/ + 4F/2/ = 3,8876$	

Podstawiając obliczone wartości /11/ i /12/ do wzoru /10/ obliczamy kolejne wartości $K/t_0/$:

$K/1/ = 31,9673$	
$K/2/ = 17,8457$	
$K/3/ = 13,3543$	
$K/4/ = 13,0462$	/minimum/
$K/5/ = 14,4254$	
$K/6/ = 15,3425$	

A więc jeżeli urządzenie osiągnie wiek /czas poprawnej pracy/ równej 4 tygodnie od ostatniej wymiany, należy dokonać wymiany zapobiegawczej, niezależnie od powodu ostatniej wymiany. Przyjęcie takiej procedury postępowania umożliwia osiągnięcie minimalnego całkowitego oczekiwanego kosztu wymian na jednostkę czasu.

Przedstawiony model eksploatacji technicznej urządzenia, ze względu na dość szeroki zakres uwzględnionych parametrów procesu, może mieć duże znaczenie w praktyce eksploatacyjnej. Dlatego w omówionym powyżej przykładzie podano szczegółowo metodę obliczania.

3.4. Model procedury obsługi dla urządzeń komutacyjnych

W pracy [5] przedstawiono złożony model procedury wymiany dla urządzeń komutacyjnych, który zostanie teraz omówiony w znacznym skróceniu.

Procedura wymiany ma zapewnić zdatność do pracy urządzeń komutacyjnych pracujących bez stałego personelu obsługi, której odnowa jest realizowana ruchomymi brygadami naprawczymi. Dzięki temu zwiększa się współczynnik wykorzystania czasu pracy personelu technicznego oraz obniża się koszt jednostki czasu obsługi systemu.

Urządzenia komutacyjne to złożone rezerwowane systemy przeznaczone do długiej ciągłej eksploatacji, w czasie której urządzenia systemu wielokrotnie ulegają uszkodzeniom i są odnawiane. Uszkodzenia pojedynczych urządzeń /zespołów/ nie powodują przerwania działania systemu komutacyjnego, a prowadzą jedynie do pewnego obniżania jakości ich pracy, w postaci zwiększenia strat.

Podstawowe wymaganie związane z eksploatacją urządzeń komutacyjnych, to zapewnienie określonej jakości obsługi abonentów przy jak najmniejszych nakładach. Wybór procedury obsługi polega na ustaleniu kompromisu między jakością pracy systemu i kosztami zapewniającymi tę jakość.

Jako kryterium optymalizacji procedury obsługi urządzeń komutacyjnych przyjmuje się w rozpatrywanym modelu wielkość łącznych kosztów /nakładów, strat/. A więc optymalizacja procedury obsługi sprowadza się do minimalizacji funkcji łącznych kosztów, określonej zależnością:

$$u/T/ = \frac{MO / \text{kosztów na cykl} /}{MO / \text{długości cyklu} /} \quad /1/$$

gdzie: MO - wartość oczekiwana wielkości losowej, a cykl pracy urządzenia to czas pomiędzy zakończeniami dwóch kolejnych odnow /zapobiegawczych lub na skutek uszkodzenia/.

Nich badany system składa się z n jednakowych zespołów

tworzących pełnodostępną grupę i jest realizowane losowe wyszukiwanie wolnego organu. Czas poprawnej pracy i czas odnowy organów mają rozkłady wykładnicze o parametrach λ i μ . Organy uszkodzone blokuje się i nie uczestniczą one w dalszej pracy systemu. W przypadku uszkodzenia lub po zakończeniu odnowy jednego z organów poziom kosztów /strat/ zmienia się w sposób dyskretny i system przechodzi do nowego stanu.

Uszkodzenia każdego organu są równoważne z punktu widzenia wpływu na wielkość strat, zatem zbiór możliwych stanów urządzenia jest to zbiór kombinacji stanów różniących się tylko liczbą uszkodzonych organów. Oznaczmy symbolem E_i element tego zbioru oznaczający stan charakteryzujący się obecnością i uszkodzonych organów i stratami p_i . Wartość p_i oblicza się wg wzoru Erlanga, który w rozpatrywanym przypadku ma postać:

$$p_i = \frac{1}{n-i} \frac{Z^{n-i}}{\sum_{j=0}^{n-i} \frac{1}{j!} Z^j} \quad /2/$$

gdzie: Z - ruch oferowany w erlangach.

Strategię obsługi profilaktycznej określa się tutaj w następujący sposób. Wybieramy przedział czasu $0, T$. Jeżeli w tym czasie system nie ulegnie uszkodzeniu, to w chwili T rozpoczyna się czynności zapobiegawcze trwające przez losowy czas t_{pr} i kończąco się, gdy wszystkie organy są sprawne. Jeżeli w losowym momencie czasu $T_{otk} < T$ system uległ uszkodzeniu, to rozpoczyna się naprawę awaryjną. Naprawa ta rozpoczyna się w chwili $T_{otk} + t'_a$ /gdzie t'_a - czas wyjazdu brygady remontowej na obiekt/, trwa przez losowy odcinek czasu t_a - i także kończy się pełną odnową systemu.

System jest obsługiwany przez ruchomą brygadę remontową. W czasie obsługi system pracuje nadal, a naprawione organy natychmiast włącza się do pracy. Liczenie czasu pracy syste-

mu rozpoczyna się od chwili zakończenia kolejnej odnowy /profilaktycznej lub awaryjnej/.

Wszystkie sposoby obsługiwaniania urządzeń komutacyjnych, a także ich praca, związane są z określonymi materialnymi kosztami /nakładami, stratami finansowymi/. Oznaczmy nakłady na wyjazd brygady na profilaktykę przez C_{pr} ; na naprawę awaryjną przez C_a ; na jednostkę czasu obsługi systemu przez C_w ; na jednostkę czasu pracy systemu przez C_r . Oczywiście organizacja nieplanowanych prac związana jest z dodatkowymi kosztami, dlatego C_a jest większa od C_{pr} .

Należy znaleźć taki przedział czasu $/0, T/$, dla którego uzyskuje się minimalną wartość oczekiwaną $/MO/$ sumarycznych kosztów, odniesionych do jednostki czasu eksploatacji systemu.

Zależność $/1/$ można przedstawić w postaci

$$u/T/ = \frac{C/T/ + H_T}{A/T/ + B_T} \quad /3/$$

gdzie: $C/T/$ - MO kosztów za okres pracy, H_T - MO kosztów za okres obsługi, $A/T/$ - MO okresu pracy, B_T - okres obsługi.

Należy teraz określić wszystkie wielkości występujące w $/3/$.

Przy przyjętych założeniach zmianę stanów urządzenia komutacyjnego w roboczym okresie opisuje się jednorodnym markowskim procesem "śmierci", kończącym się albo w chwili T , gdy system znajduje się w stanie E_i $/i < m/$, albo w chwili $T_{otk} + t'_a$, w której system znajduje się w stanie

$$E_{m+g} \quad /g = 0, 1, \dots, n - m/$$

gdzie g oznacza liczbę zespołów, które uległy uszkodzeniu w ciągu czasu t'_a .

Prawdopodobieństwa stanów E_i w tym procesie określa się wzorem

$$r_i/t/ = C_n^i e^{-n-i/\lambda t} /1 - e^{-\lambda t/}^i,$$

a prawdopodobieństwa poprawnej pracy $P/t/$ i uszkodzenia $Q/t/$ urządzenia komutacyjnego zależnościami

$$P/t/ = \sum_{i=0}^{m-1} r_i/t/,$$

$$Q/t/ = 1 - P/t/.$$

Wyprowadzenie szczegółowej postaci wzoru /3/ przy podanych założeniach jest złożone i znajduje się w pracy [5]. Ze względu na brak miejsca nie będzie tutaj podane.

Szczególną cechą tego modelu jest uwzględnienie faktu, że zespoły komutacyjne nie pracują przez cały czas bieżący, tylko w miarę napływu zgłoszeń i w związku z tym straty na skutek niewykonania przewidzianych zadań są mniejsze niż to sugerują inne modele, w których za czas pracy przyjmuje się czas zdatności do pracy obiektu.

4. ZAKOŃCZENIE

Celem tej pracy jest zainteresowanie czytelnika problemami poszukiwania odpowiedzi na pytanie, jak często należy badać dane urządzenie w określonych warunkach eksploatacji. Na to pytanie w wielu ważnych praktycznie problemach eksploatacji urządzeń, już dzisiaj, można odpowiedzieć w sposób ilościowy. W tym celu niezbędne jest badanie przydatności dla praktyki powstających modeli matematycznych i wdrożenie ich do wykorzystania tam, gdzie przynosi to konkretne korzyści.

WYKAZ LITERATURY

1. Barlow R.E., Proschan F.: *Mathematical Theory of Reliability*. Wiley 1965.
2. Barlow R.E., Proschan F.: *Statistical Theory of Reliability and Life Testing*. New York 1975.

3. Borys T.: Elementy teorii jakości. PWN, Warszawa 1980.
4. Gercbach I.B.: Modeli profilaktiki. Moskwa 1969.
5. Gercbach I.B., Priłuckij M.S.: Optymalnyj reglament awaryjno-profilaktičeskowo obsłuziwania komutacjonnoj sistemy. Elektroswjaz, 1973, No 8.
6. Karpiński J., Firkowicz S.: Zasady profilaktyki obiektów technicznych. PWN, Warszawa 1981.
7. Konieczny J.: Sterowanie eksploatacją urządzeń. PWN, Warszawa 1975.
8. Kopociński B.: Zarys teorii odnowy i niezawodności. PWN, Warszawa 1973.
9. Koźniewska I.: Teoria odnowienia. PWE, Warszawa 1965.
10. Manszin G.G.: Uprawlenie reżimami profilaktik složnych sistem. Mińsk 1976.
11. Sztarski M.: Niezawodność i eksploatacja urządzeń elektro-
nicznych. WKiŁ, Warszawa 1972.
12. Walaszek S.: Kierunki rozwoju eksploatacji technicznej
urządzeń telekomunikacyjnych. Materiały konferencji nau-
kowej pt. "Eksploatacja Maszyn i Urządzeń". 1983.
13. Walaszek S.: Modele procedur obsługi. Eksploatacja Maszyn
nr 7/76, nr 3, 9, 10/77, nr 3/78.
14. Walaszek S.: Modele procedur obsługi systemów komutacyj-
nych. Materiały "II Konferencji Naukowej, Systemy i Sieci
Telekomunikacyjne". Warszawa 1981.

ISSN 0209-1046

