

INSTYTUT ENERGGOELEKTRYKI POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Rozprawa doktorska

PROGNOZOWANIE TRWAŁOŚCI ZESTYKÓW STYCZNIKÓW ELEKTROMAGNETYCZNYCH Z BIEŻĄCEJ PRODUKCJI

Mgr inż. Mirosław Kornatka
Instytut Elektrotechniki
Politechnika Częstochowska

Promotor:

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Wróblewski

Wrocław 2000

Spis treści

1. Wstęp	5
1.1. Wyjaśnienia ogólne	5
1.2. Teza i zakres pracy	9
2. Analiza wybranych zjawisk fizykochemicznych warunkujących trwałość układu zestykowego	12
3. Podstawy opisu niezawodności zestyków styczników	30
3.1. Podstawowe pojęcia dotyczące niezawodności zestyków styczników	30
3.2. Trwałość zestyków styczników	33
4. Zagadnienia związane z modelami niezawodności zestyków styczników	38
4.1. Metodyka opracowywania modelu	38
4.2. Przyczyny uszkodzeń zestyków styczników	39
4.3. Modele niezawodności zestyków styczników	41
5. Przegląd stanu wiedzy oraz tendencji rozwojowych w dziedzinie prognozowania trwałości zestyków głównych styczników elektromagnetycznych	43
5.1. Metoda uproszczonego wyznaczania charakterystyk trwałości łączeniowej niskonapięciowych styczników elektromagnetycznych prądu przemiennego	43
5.2. Matematyczno-fizyczne modele niezawodności styków styczników niskonapięciowych	45
5.3. Matematyczno-fizyczne modele niezawodności zestyków głównych styczników	49
5.4. Symulacyjny, jednoparametrowy model niezawodności zestyków głównych styczników	57
6. Wyniki badań trwałości zestyków styczników	60
6.1. Dane statystyczne dotyczące trwałości eksploatacyjnej zestyków styczników	60
6.2. Wyniki laboratoryjnych badań trwałości zestyków styczników	62
6.3. Badania laboratoryjne zmian parametrów prognozujących trwałość łączeniową zestyków styczników	73
6.3.1. Wprowadzenie	73
6.3.2. Metoda badań, opis stanowiska	74
6.3.3. Wyniki badań oraz ich analiza	79

7. Wieloparametrowy symulacyjny model niezawodności zestyków styczników elektromagnetycznych	85
7.1. Uwagi ogólne	85
7.2. Parametry prognozujące niezawodność zestyków styczników	87
7.3. Metody wyznaczania przedziałów ufności dla estymowanych parametrów modelu	91
7.4. Symulacyjny wieloparametrowy model niezawodności zestyków głównych styczników elektromagnetycznych	96
7.4.1 Podstawowe wyjaśnienia	96
7.4.2. Estymacja parametrów prostych regresji rozkładów empirycznych zmian przechyłu styków w funkcji liczby cykli łączeniowych	97
7.4.3. Estymacja parametrów prostych regresji rozkładów empirycznych zmian siły docisku zestykowego w funkcji liczby cykli łączeniowych	100
7.4.4. Wyznaczanie prawdopodobieństwa szczepienia styków w funkcji liczby cykli łączeniowych	102
7.4.5. Estymacja parametrów prostych regresji rozkładów empirycznych zmian czasu niejednoczesności zamykania zestyków w funkcji liczby cykli łączeniowych	103
7.4.6. Prawdopodobieństwo poprawnej pracy zestyków	105
7.5. Dokładność prognozowania niezawodności zestyków za pomocą modelu symulacyjnego	106
8. Opis programu komputerowego do prognozowania niezawodności zestyków styczników	109
9. Metoda prognozowania trwałości zestyków styczników z bieżącej produkcji oraz jej weryfikacja	117
9.1. Procedura wyznaczania trwałości zestyków styczników	117
9.2. Weryfikacja opracowanej metody z danymi pomiarowymi	118
10. Podsumowanie i wnioski końcowe	121
11. Literatura	124
12. Załączniki	128
12.1. Wybrane wyniki badań trwałościowych styczników serii SLA	128
12.2. Wybrane wyniki badań zmian parametrów prognozujących niezawodność układu zestykowego styczników serii LS w funkcji liczby cykli łączeniowych	136
12.3. Program komputerowy PROZESTYK do prognozowania niezawodności zestyków styczników	153

WAŻNIEJSZE OZNACZENIA

a, b, c, d	- liczba prostych regresji parametrów prognozujących,
c_m	- współczynnik materiałowo-konstrukcyjny uwzględniający kinematykę napędu ze względu na szczipienia styków,
c_s	- współczynnik sprężystości sprężyn stykowych,
$CONF(x)$	- przedział ufności zmiennej losowej x ,
$D(x)$	- odchylenie standardowe zmiennej losowej x ,
$E(x)$	- wartość oczekiwana, przeciętna, nadzieja matematyczna zmiennej losowej x ,
$E(T)$	- czas poprawnej pracy obiektu,
$f(x)$	- funkcja gęstości prawdopodobieństwa danego rozkładu zmiennej losowej x ,
$F(x)$	- dystrybuanta zmiennej losowej x ,
$F(0), F(N)$	- docisk zestykowy początkowy oraz roboczy po wykonaniu N cykli łączeniowych,
i_u	- szczytowa wartość prądu załączeniowego,
$i_{sg}(N)$	- graniczny prąd szczipieniowy po wykonaniu przez łącznik N cykli łączeniowych,
$l(N), l_{\min}$	- przechył styków po N cykli łączeniowych, oraz przechył minimalny,
l_a	- długość łuku,
N	- liczba cykli łączeniowych wykonanych przez łącznik,
NOR	- symbol rozkładu normalnego,
n	- liczba badanych obiektów w próbie,
m	- liczba łączników uszkodzonych w przedziale czasu $\langle 0, t_m \rangle$,
$P(x)$	- prawdopodobieństwo zdarzenia x ,
r_{ij}	- współczynnik korelacji,
$R(x)$	- funkcja niezawodności,
UNI	- symbol rozkładu jednostajnego,
α_p	- cieplny współczynnik rezystywności,
α, β	- poziom istotności i ufności,
χ^2	- funkcja rozkładu chi-kwadrat,
$\chi^2_{\vartheta, p}$	- kwantyl rozkładu chi-kwadrat,
σ	- odchylenie standardowe populacji generalnej rozkładu normalnego,

Γ	- rozkład gama,
γ	- populacja zbioru obiektów,
φ	- kąt przesunięcia fazowego,
$\lambda(t)$	- intensywność uszkodzeń,
μ	- wartość oczekiwana populacji generalnej rozkładu normalnego,
λ_0	- przewodność cieplna materiału stykowego,
θ_t	- temperatura topnienia materiału stykowego,
ρ_0	- rezystywność materiału stykowego w temperaturze 0°C,
$\Phi(x)$	- całką Laplace'a zmiennej losowej x .

1. Wstęp

1.1. Wyjaśnienia ogólne

Styczniki elektromagnetyczne prądu przemiennego należą do jednych z podstawowych aparatów łączeniowych wchodzących w skład układów sterowania i automatyki elektroenergetycznej. Cechują się prostą budową, dużą trwałością, możliwością zdalnego sterowania, brakiem potrzeby stosowania zabezpieczeń pod napięciowych. Poprawne funkcjonowanie styczników warunkuje niejednokrotnie niezawodność całego układu czy ciągu produkcyjnego, który na ogół ma szeregową strukturę niezawodności. Wymagania stawiane stycznikom stale rosną i to nie tylko co do ich jakości, ale także, co do niezawodności ich funkcjonowania.

Jak prognozować niezawodność produkowanych łączników? – To jedno z podstawowych pytań zadawanych przez konstruktorów i producentów styczników. Na przedwczesne lub zbyt szybkie uszkodzanie styczników może mieć wpływ zarówno niewłaściwa konstrukcja łącznika, nieprawidłowe wytwarzanie jak i niewłaściwa eksploatacja. Ponieważ styczniki elektromagnetyczne w zakładach produkcyjnych traktowane są na ogół jako materiały eksploatacyjne, brak jest dostępnych danych statystycznych pozwalających na rzetelną ocenę ich trwałości. Powszechnie znany brak służb niezawodnościowych dodatkowo utrudnia analizę przyczyn powstawania awarii urządzeń elektrycznych, w skład których wchodzi styczniki.

Podstawowym elementem decydującym o niezawodności styczników elektromagnetycznych są zestyki łączeniowe. W praktyce niezawodność zestyków styczników określa się na podstawie laboratoryjnych badań sprawdzających trwałość łączeniową całego łącznika, podczas których układ zestykowy stycznika łączy w określonych warunkach probierczych prąd łączeniowy. Niniejsza rozprawa dotyczyć więc będzie w głównej mierze trwałości łączeniowej styczników oraz metod jej wyznaczania.

Jak wynika z analizy danych eksploatacyjnych [55] oraz badań laboratoryjnych sprawdzających trwałość łączeniową różnych typów styczników (szczegółowe opracowanie wyników badań przedstawiono w rozdziale 6 rozprawy), udział uszkodzeń zestyków w awaryjności całego stycznika jest decydujący i stanowił od 87% do 97% wszystkich uszkodzeń.

Rosnące wymagania stawiane co do jakości i niezawodności zestyków styczników, zmuszają producentów do systematycznego doskonalenia metod projektowania, badania i bieżącej kontroli niezawodności produkowanych zestyków [21,22,50,56,58]. Zwiększenie niezawodności zestyków wymaga przede wszystkim postępu w technologii ich wytwarzania oraz w dziedzinie materiałów stosowanych do ich produkcji.

Dotychczasowe najbardziej dokładne modele probabilistyczne niezawodności zestyków styczników, spotykane w literaturze przedmiotowej [21,22,50,56,58,59], opierają się na zmianach tylko jednego parametru prognozującego, nie uwzględniając wszystkich źródeł powstawania uszkodzeń. Ponadto przyjęto w nich szereg założeń upraszczających, które znacząco zmniejszają wiarygodność wyników obliczeń. Wielkoseryjna produkcja styczników wymaga od producentów okresowej kontroli ich jakości oraz weryfikacji trwałości (łączeniowej i mechanicznej) podawanej w kartach katalogowych. Należy podkreślić, że ze względu na zbyt duże koszty produkcji, zwroty gwarancyjne uszkodzonych styczników nie mogą przekroczyć około 1% całkowitej produkcji. Istnieje tu jednak paradoks polegający na fakcie, że im stycznik ma większą rzeczywistą trwałość, tym trudniej to zweryfikować (wymaga długiego okresu badań reprezentatywnej populacji styczników oraz dużych nakładów finansowych).

Możemy wyróżnić trzy podstawowe metody wyznaczania niezawodności zestyków styczników elektromagnetycznych:

1. metoda deterministyczna oparta na sprawdzeniu na próbce kilku łączników, czy ich zestyki spełniają zakładaną niezawodność,
2. metoda statystyczna polegająca na przyjęciu za model niezawodności zestyków styczników teoretycznego rozkładu statystycznego i estymacji parametrów tego rozkładu, który wykazuje, na określonym poziomie istotności, zgodność z rozkładem empirycznym trwałości badanych zestyków,
3. metoda wykorzystująca modele probabilistyczne, które uwzględniając zmiany parametrów istotnych dla trwałości zestyków, umożliwiają wyznaczenie prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia losowego polegającego na przekroczeniu wartości kryterialnych tych parametrów, warunkujących poprawne funkcjonowanie układu zestykowego stycznika.

Metoda deterministyczna oraz statystyczna wyznaczania niezawodności zestyków wymaga wykonania pełnych badań i sprawdzenia zakładanej trwałości łączeniowej zestyków podawanej przez producenta. Badania trwałości łączeniowej styczników, ze względu na ich długi czas trwania i wysokie koszty, prowadzi się na bardzo małych

próbkach. Powyższe metody badań weryfikujące jakość produkowanych styczników dostarczają danych o ich trwałości, gdy te już dawno zostały sprzedane i zainstalowane u odbiorców w różnych urządzeniach. Podawana przez producentów w kartach katalogowych trwałość łączeniowa obecnie produkowanych styczników, która określa w głównej mierze niezawodność układu zestykowego, jest rzędu 10^6 łączy w kategorii użytkowania AC-3. Sprawdzenie jej w warunkach laboratoryjnych, podczas badań weryfikujących trwałość łączeniową produkowanych łączników, wymaga kilkumiesięcznych badań.

Obowiązujące normy PN-90/E-06150/10, PN-92/E-06150/41 nie nakładają na producenta konieczności sprawdzania trwałości łączeniowej i mechanicznej styczników. Producenci jednak potrzebę taką uznają, do czego zmuszają ich warunki konkurencji. Badania trwałościowe wchodzą w zakres badań specjalnych, które są przedmiotem uzgodnień pomiędzy wytwórcą a użytkownikiem. Interpretacja statystyczna badań specjalnych wykonanych zgodnie z wymaganiami powyższych norm, ze względu na małą liczebność badanej próbki, jest niezadowalająca dla odbiorców, którzy świadomie chcą koordynować niezawodność zestyków styczników [21].

Modele statystyczne pozwalają stwierdzić na określonym poziomie istotności zgodność rozkładów teoretycznych trwałości zestyków z rozkładem empirycznym otrzymanym podczas eksploatacji lub laboratoryjnych badań. Jest to warunek konieczny, lecz niewystarczający, aby przyjąć dany rozkład jako model niezawodności zestyków styczników - na ogół trwałość zestyków styczników możemy na zadanym poziomie ufności opisać kilkoma rozkładami [55]. Wybór i uzasadnienie modelu powinno być oparte na analizie zjawisk fizykochemicznych warunkujących ich trwałość.

W literaturze przedmiotowej [56,58] znaleźć można probabilistyczne modele niezawodności zestyków głównych, cewki napędu elektromagnetycznego, jak również całego stycznika opracowane na podstawie zmian parametrów prognozujących trwałość danego układu stycznika oraz analizy zachodzących w nim zjawisk fizycznych. Przedstawione modele oparte są na ogół na procesie relaksacyjnym oddziaływań obciążeń, w którym prawdopodobieństwo uszkodzenia występuje od początku eksploatacji i rośnie wraz ze zmniejszaniem się wartości parametru prognozującego (dla układu zestykowego przechyłu styków).

Uproszczenie algorytmu obliczeń, jak również uzyskanie większej dokładności można osiągnąć, wprowadzając w modelach niezawodnościowych symulację cyfrową procesów powstawania uszkodzeń [59]. Zgodnie z empirycznie wyznaczonymi rozkładami

zmiennych losowych modelu generowane są liczby pseudolosowe. W wyniku wielokrotnej symulacji można wyznaczyć rozkład czasów poprawnej pracy urządzenia.

Każdy model probabilistyczny opisujący niezawodność danego elementu lub urządzenia, tworzony jest na pewnym poziomie uproszczeń, z uwzględnieniem dostępności danych i możliwych do pomiaru parametrów występujących w modelu. Jeżeli w modelu zostają pominięte istotne szczegóły, różnice pomiędzy wartościami otrzymanymi z modelu a wielkościami rzeczywistymi będą znaczne. Z kolei, jeżeli model jest bardzo skomplikowany, pojawiają się problemy z dostępnością występujących w nim parametrów i danych, komplikuje się proces obliczeniowy wydłużając czas przygotowania danych i otrzymania wyniku.

Wskazane jest również, aby model niezawodności zestyków pozwalał zarówno na ocenę ilościową, jak i jakościową stanu zestyków styczników w funkcji liczby cykli łączeniowych.

1.2. Teza i zakres pracy

W oparciu o powyższą analizę zagadnień związanych z metodami wyznaczania niezawodności zestyków styczników, na podstawie przeglądu literatury przedmiotowej, a także wstępnych badań rozpoznawczych przeprowadzonych przez autora pracy w Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Aparatury Manewrowej ORAM w Łodzi sformułowano następującą tezę:

Możliwe jest opracowanie wieloparametrowej metody prognozowania trwałości gamma-beta zestyków styczników elektromagnetycznych na podstawie wyników skróconych badań laboratoryjnych wybranych parametrów zestyków, wykonywanych w znormalizowanych warunkach probierczych na losowych próbkach styczników pobranych z bieżącej produkcji.

Udowodnienie tej tezy wymagało realizacji następujących zadań:

- przeprowadzenia analizy fizyki pogarszania się właściwości zestyków styczników,
- przeprowadzenia badań laboratoryjnych procesów pogarszania się właściwości zestyków i powstawania ich uszkodzeń w funkcji parametrów komutowanego obwodu probierczego,
- wyznaczenia parametrów prognozujących trwałość zestyków styczników,
- opracowania stochastycznego wieloparametrowego modelu trwałości zestyków oraz metod estymacji jego parametrów na podstawie wyników badań skróconych losowej próbki styczników, z bieżącej produkcji,
- opracowania metody prognozowania trwałości zestyków gwarantowanej z zadaniem poziomem ufności dla zadanej części populacji rozpatrywanego typu styczników,
- opracowania programów komputerowych wspomagających obliczenia trwałości zestyków,
- wykonania badań weryfikujących przydatność opracowanej metody i programów komputerowych.

W rozdziale 2 rozprawy opisano podstawowe zjawiska fizykochemiczne warunkujące trwałość łączeniową zestyków styczników. Przedstawiono wpływ między innymi prądu

łączeniowego, erozji styków, odskoków sprężystych zestyków, szepiania się styków na trwałość łączeniową zestyków głównych styczników.

Rozdział 3 rozprawy zawiera podstawowe pojęcia z zakresu niezawodności zestyków styczników oraz opisuje podstawowe jej wskaźniki. W podrozdziale 3.2 przedstawiono wymogi norm dotyczące ich trwałości łączeniowej, jak również wybrane wymogi norm zakładowych.

W *rozdziale 4* rozprawy przedstawiono podstawy tworzenia modeli niezawodności zestyków styczników. Podrozdział 4.2 zawiera klasyfikacje przyczyn ich uszkodzenia. W podrozdziale 4.3 przedstawiono podział z uwzględnieniem zalet i wad znanych dotychczas modeli niezawodności zestyków styczników.

Rozdział 5 rozprawy zawiera przegląd stanu wiedzy w dziedzinie prognozowania trwałości zestyków styczników. Przedstawiono w nim znane z literatury metody uproszczonego wyznaczania charakterystyk trwałości łączeniowej, modele matematyczne, matematyczno - fizyczne oraz model symulacyjny jednoparametrowy wyznaczania niezawodności zestyków głównych styczników.

W *rozdziale 6* rozprawy przedstawiono wyniki badań trwałościowych zestyków styczników oraz ich analizę. Opisano dane statystyczne dotyczące trwałości eksploatacyjnej zestyków głównych styczników (podrozdział 6.1) oraz obszerne badania laboratoryjne trwałości łączeniowej różnych typów zestyków styczników (podrozdział 6.2). Dokonano klasyfikacji przyczyny uszkodzenia badanych zestyków styczników oraz analizy statystycznej otrzymanych wyników. W podrozdziale 6.3 przedstawiono wyniki własnych badań oraz analizę zależności wybranych parametrów prognozujących trwałość łączeniową zestyków od liczby cykli łączeniowych.

W podrozdziale 7.4 rozprawy przedstawiono symulacyjny wieloparametrowy model niezawodności zestyków głównych styczników, oparty na estymacji przedziałowej zmian parametrów prognozujących w funkcji liczby cykli łączeniowych. Metody wyznaczania przedziałów ufności dla estymowanych parametrów modelu oraz dla prostych regresji ich zmian podano w podrozdziale 7.3.

Na podstawie wieloparametrowego symulacyjnego modelu opisanego w rozdziale 7 rozprawy przedstawiono program komputerowy PROZESTYK służący do prognozowania trwałości zestyków głównych styczników na podstawie wyników skróconych badań laboratoryjnych trwałości łączeniowej. Strukturę programu oraz jego możliwości obliczeniowe przedstawiono w *rozdziale 8*.

W *rozdziale 9* przedstawiono ogólną procedurę wyznaczania charakterystyki trwałości gamma-beta - $T_{\gamma\beta}$ zestyków styczników. Przedstawiono także weryfikację opracowanego modelu z danymi pomiarowymi.

Rozdział 10 rozprawy zawiera końcowe wnioski prezentowanej pracy.

W *rozdziale 11* zamieszczono wykaz literatury przedmiotowej, na której oparto się przy pisaniu niniejszej pracy.

Rozdział 12 zawiera wybrane wyniki badań trwałościowych styczników typu SLA i LS, zmiany wartości średnich mierzonych parametrów układu zestykowego w funkcji liczby cykli łączeniowych, jak również wydruk programu PROZESTYK.

Przedstawiony model wieloparametrowy niezawodności zestyków styczników pozwoli zarówno na sprawdzanie niezawodności produkowanych styczników, jak również na szybką weryfikację wpływu zmian konstrukcyjnych, materiałowych i technologicznych na trwałość zestyków, a w konsekwencji na świadome kształtowanie niezawodności produkowanych układów zestykowych styczników.

2. Analiza wybranych zjawisk fizykochemicznych warunkujących trwałość układu zestykowego

Zestykiem elektrycznym nazywamy część toru prądowego stycznika, umożliwiającego przepływ prądu przez jego styki, które mogą być otwierane i zamykane pod działaniem sił układu napędowego.

Zestyk składa się z dwóch styków: ruchomego - przemieszczanego siłami układu napędowego i nieruchomego - umocowanego na korpusie stycznika. Na stykach znajdują się nakładki wykonane ze specjalnych stopów lub kompozytów. Styk ruchomy i nieruchomy tworzą zestyk łączeniowy. Jeden ze styków jest zawsze usprężynowany; sprężyna służy do wywierania docisku wstępnego (bezpośrednio po zetknięciu się styków) i roboczego (w stanie ustalonym po zamknięciu).

W procesie załączania na zestyki elektryczne działa złożony zespół narażeń, z którego praktycznie niemożliwe jest wyodrębnienie tych narażeń, które należałoby uznać za główną przyczynę szepień i erozji styków. Każde uszkodzenie styków powoduje uszkodzenie układu zestykowego.

Na podstawie przeprowadzonych badań trwałości łączeniowej styczników SLA w kategorii AC-3 i AC-4 (część wyników badań trwałościowych przedstawiono w załączniku 12.1 rozprawy) oraz analizy literatury przedmiotowej wynika, że uszkodzenie układu zestykowego może wystąpić w wyniku:

- osiągnięcia dopuszczalnego zużycia styków,
- odpadnięcia nakładek stykowych,
- szepienia styków,
- upalenia mostka,
- zbyt dużej rezystancji zestyku łączeniowego,
- osiągnięcia dopuszczalnego docisku zestykowego,
- mechanicznego zniszczenia lub zablokowania układu styków uniemożliwiającego załączanie, przewodzenie i wyłączanie prądu.

Powierzchnia styków

Istotnym zagadnieniem ze względu na trwałość zestyków styczników jest analiza zjawisk zachodzących na powierzchni styków. Złożone zjawiska fizykochemiczne zachodzą na powierzchni styków zarówno w stanie otwarcia i zamknięcia, przede wszystkim jednak podczas załączania i wyłączania prądu łączeniowego [9]. Powierzchnia styków stycznika charakteryzuje się mikrochropowatościami i obecnością cienkich korozyjnych warstw tlenków. Mikrowystępy powierzchni stykowych ulegają zgniataniu siłą dociskającą jeden styk do drugiego. Punkty przylegania tworzą rzeczywistą powierzchnię styku metalicznego, a punkty przewodzące - powierzchnię styku elektrycznego. W przybliżeniu powierzchnię styku elektrycznego można wyznaczyć z zależności [25,50]

$$S = \frac{F}{\xi \cdot H_B}, \quad (2.1)$$

w której: F - siła dociskowa styków,

H_B - twardość według skali Brinella,

ξ - współczynnik uwzględniający odkształcenie sprężyste materiału styków (dla zestyków punktowych równe 1, dla zestyków płaskich - 0,4÷0,6).

Powierzchnie styków w miarę upływu czasu pokrywają się warstwą tlenków metali oraz różnych związków chemicznych. Proces tworzenia się warstw korozyjnych występuje podczas całej eksploatacji stycznika i zależy głównie od wilgotności powietrza, obecności w środowisku agresywnych związków chemicznych (przede wszystkim siarczków i chlorków), jak również od działania na styk wysokich temperatur. Nagrzewanie styków występuje między innymi w wyniku działania łuku łączeniowego oraz nagrzewania podczas pracy przepustowej przy przewodzeniu przez styki dużego prądu. Działanie łuku jest w tym przypadku zarówno negatywne jak i pozytywne; w wyniku energii wydzielającej się w łuku następuje silne nagrzewanie się styków, a jednocześnie łuk działa niszcząco na warstwy tlenków powodując samooczyszczanie się styków.

Wciąż niedostateczny jest stan wiedzy z zakresu wpływu stanu powierzchni styków (warstw tlenków, zanieczyszczeń) oraz chropowatości powierzchni na szepianie się styków.

Rezystancja zestyku łączeniowego

Ważnym zagadnieniem decydującym o doborze materiału stykowego jest rezystancja zestyku łączeniowego R_z . Całkowita rezystancja zestyku składa się z rezystancji przejścia R_p spowodowanej zagęszczeniem linii prądu w miejscach rzeczywistej styczności powierzchni styków, rezystancji litego zespołu przewodników R_w wynikającej z wymiarów styków i rezystywności materiału stykowego oraz rezystancji R_n zewnętrznych warstw absorpcyjnych i nalotowych pokrywających stykające się powierzchnie styków [25], czyli

$$R_z = R_p + R_w + R_n. \quad (2.2)$$

Rezystancję przejścia w warunkach ustalonych można obliczyć tworząc wyidealizowany model zestyku sferoidalnego lub elipsoidalnego [9,25]. W pierwszym modelu zgniecione siłami dociskowymi mikrowystępy zastępuje się kulą o małym promieniu r . W modelu elipsoidalnym, wchodzące w styczność powierzchnie tworzą mikropoletka w kształcie koła o bardzo małym promieniu r_1 . Oba modele są równoważne gdy $2 \cdot \pi \cdot r = 4 \cdot r_1$.

Dla powyższego warunku rezystancję przejścia dla zestyku punktowego można wyznaczyć ze wzoru Holma [50]

$$R_p = \frac{\rho}{2 \cdot r} = \frac{\rho}{2 \cdot \sqrt{\frac{F}{\xi \cdot H_B \cdot \pi}}}, \quad (2.3)$$

w którym: ρ - rezystywność materiału stykowego.

Znaczne trudności występują przy obliczaniu rezystancji warstw absorpcyjnych i nalotowych - R_n . Obecność warstw nalotowych spowodowana jest utlenianiem się powierzchni styków. Po przekroczeniu pewnego napięcia cienkie warstewki ulegają częściowemu niszczeniu, a rezystancja warstw nalotowych gwałtownie maleje. Procesy powstawania warstw nieprzewodzących na stykach oraz czynniki istotne podczas ich powstawania są jeszcze nie w pełni poznane [9]. Tworzeniu się warstw o małej przewodności sprzyja ciągła praca przepustowa łącznika (bez przełączeń ruchowych), niewielkie siły dociskowe układu zestykowego, jak również stosowanie styczników w obwodach o małym napięciu pracy ($U \leq 24V$) i niewielkich prądach łączeniowych. W praktyce rezystancję zestyku łączeniowego możemy obliczyć na podstawie empirycznej zależności [9].

$$R_z = \frac{k}{F^n}, \quad (2.4)$$

w której: k – współczynnik charakteryzujący materiał stykowy i stan powierzchni styków, (wartość współczynnika k odpowiada w przybliżeniu rezystancji przejścia obliczonej wg zależności (2.3)),
 n – współczynnik zależny od kształtu styków o wartościach zawierających się w przedziale $0,5 \div 1$.

Zmiany właściwości powierzchni zestyków w trakcie kolejnych cykli łączeniowych stycznika wynikające z działania łuku łączeniowego, przepływu przez styki prądu, powstawania i likwidowania warstw korozyjnych, powodują trudne do ustalenia zmiany rezystancji zestykowej. Ze względu na wielość czynników mających wpływ na zmiany rezystancji zestykowej w funkcji kolejnych cykli łączeniowych występują istotne trudności w analitycznym ujęciu powyższego zjawiska. Zmiany rezystancji zestykowej można zatem uznać za niestacjonarny proces stochastyczny o zmiennym trendzie [24]. W praktyce, zgodnie z wymogami norm, zmiany rezystancji zestykowej ocenia się na podstawie przyrostu temperatury styków, która nie może przekroczyć dopuszczalnej wartości podawanej w przepisach.

Nagrzewanie się styków

Przebieg nagrzewania się styków podczas pracy łączeniowej jest trudny do analitycznego ujęcia i rozważania prowadzone są przy znacznych uproszczeniach. Przepływ prądu przez zamknięty zestyk może powodować jego nadmierne nagrzewanie, a w konsekwencji jego szepienie. Najwyższa temperatura występuje w miejscu styczności styków na rezystancji przejścia R_p . W stanie ustalonym, dla wyidealizowanego modelu zestyku sferoidalnego, przyrost temperatury może być wyrażony zależnością [9]

$$\Delta \vartheta = \frac{1}{8} \frac{\Delta U^2}{\rho \cdot \lambda_0}, \quad (2.5)$$

w której: ΔU - spadek napięcia wskutek przepływu prądu przez rezystancję przejścia R_p obliczoną ze wzoru (2.3),
 ρ, λ_0 - rezystywność i przewodność cieplna materiału stykowego, przyjmowane w szerokim zakresie temperatur jako stałe.

Powyższa zależność nie uwzględnia zmian rezystancji przejścia spowodowanych zmianami temperatury w wyniku palenia się łuku elektrycznego pomiędzy stykami, jak również oddawaniem ciepła do otoczenia styków.

Nagrzewanie się styków podczas procesów łączeniowych następuje w wyniku oddawania energii wydzielającej się w łuku zarówno podczas zamykania jak i otwierania styków (w przypadku występowania odskoków styków).

Ze względu na złożoność zachodzących zjawisk podczas pracy przepustowej i łączeniowej obciążalność prądowa zestyków styczników ustalana jest na podstawie odpowiednich badań laboratoryjnych.

Erozja styków

Bardzo ważną przyczyną degradacji styków jest ich erozja. Możemy wyróżnić erozję mechaniczną i elektrotermiczną. Erozja mechaniczna występuje bez udziału obciążenia elektrycznego styków. Ma ona niewielkie praktyczne znaczenie, powoduje niewielkie odkształcenia mechaniczne styków i rozwarstwianie ich powierzchni wywołane siłami wzajemnego docisku styków. Degradacja styków spowodowana erozją mechaniczną stanowi zaledwie kilka procent degradacji spowodowanej erozją elektrotermiczną [28].

Erozja elektrotermiczna to wszelkie przenoszenie materiału stykowego, z jednego styku na drugi, jak również poza obszar styków do otoczenia, zachodzące podczas zamykania i otwierania styków pod obciążeniem elektrycznym. Wówczas na ściankach układu gaszeniowego tworzą się warstwy pyłu tlenków lub siarczków, które powodują pogarszanie izolacji stycznika. W wyniku wędrówki materiału stykowego na nakładkach stykowych obserwuje się ubytek lub przyrost materiału, który może przyjmować bardzo różne kształty i wymiary.

Skutki erozyjnego ubytku materiału są szkodliwe dla pracy styku. W wyniku erozji następuje ubytek wagowy nakładek, maleje docisk styków, zwiększa się rezystancja zestyku łączeniowego, zwiększa się prawdopodobieństwo szczepienia na skutek większej chropowatości powierzchni styków, zmianie ulega odległość styków. Ze względu na różnorodność zjawisk inaczej przebiega erozja podczas otwierania oraz zamykania styków. Podczas otwierania się zestyków maleje docisk styku ruchomego do styku stałego, powodując zmniejszanie się rzeczywistej powierzchni przewodzenia prądu. Powierzchnia styków nagrzewa się. W punktach styczności styków temperatura osiąga wartość topnienia materiału stykowego, część materiału stykowego przechodzi w stan ciekły a nawet gazowy, tworzy się płynny mostek metaliczny między stykami. W miarę wzajemnego

oddalania się styków mostek się wydłuża i w końcowym stadium, po miejscowym przekroczeniu temperatury wrzenia, następuje jego przerwanie. Część materiału stykowego może zostać wyrzucona w postaci kropel ciekłego metalu poza powierzchnię styków. W obwodach prądu przemiennego przemieszanie się materiału stykowego nie ma określonego kierunku. Jeżeli jeden ze styków pracuje w wyższej temperaturze, przechodzenie materiału stykowego zachodzi w kierunku zimniejszego styku. W obwodach prądu stałego następuje przenoszenie materiału od anody do katody.

Erozja podczas zamykania układu zestykowego przy obciążeniu prądowym styków związana jest z zapłonem łuku podczas odskoków sprężystych styków. Stan występowania odskoków sprężystych podczas załączania stycznika trwa stosunkowo krótko (około kilku milisekund). Długość przerwy międzystykowej, przy której następuje zapłon łuku zależy od napięcia pomiędzy stykami i wytrzymałości elektrycznej środowiska układu gaszeniowo-zestykowego. Duża różnorodność zjawisk zachodzących pomiędzy stykami podczas ich zamykania się związana jest ze zmiennością wraz z prądem łączeniowym postaci odskoków, ich czasu trwania, czasu występowania, amplitudy, oraz liczby [46]. Podane w literaturze zależności dotyczą z reguły badań różnych materiałów oraz wąskiego zakresu parametrów układów stykowych (przy często niezdefiniowanych warunkach badawczych), co utrudnia ich praktyczne zastosowanie.

Szczepianie się styków

Istotny wpływ na niezawodność zestyków ma zjawisko szczepiania się styków. Pod pojęciem szczepienia styków rozumie się zjawisko metalicznego zespolenia się styków stycznika bez udziału środka wiążącego, do rozdzielenia których potrzeba siły większej niż siła dociskowa zestyku [46]. Nawet podczas normalnej pracy stycznika, w trakcie przepływu dużego prądu przez zestyki może wystąpić rekrytalizacja materiału stykowego. Powstająca spoina jest na tyle słaba, że zostaje łatwo rozerwana przez mechanizm napędowy. Występujące nietrwałe szczepianie się styków jest niezauważalne podczas pracy stycznika. Uszkodzeniem limitującym trwałość stycznika jest trwałe szczepienie styków.

Dotychczasowy stan wiedzy jest niewystarczający do pełnego analitycznego ujęcia problemu zjawiska szczepiania styków. Fakt ten można tłumaczyć dużą przypadkowością zjawisk, szczególnie istotną podczas odskoków sprężystych styków oraz kosztownością i czasochłonnością badań. Otrzymane na drodze eksperymentu zależności są na ogół słuszne dla wąskiego zakresu styczników przy określonych parametrach probierczych.

Ze względu na różnorodność zjawisk zachodzący między stykami powyższe zagadnienie można podzielić na:

- szepianie się zestyku zamkniętego (szepienie statyczne),
- szepianie się zestyku zamykanego (szepienie dynamiczne).

W pierwszym przypadku następuje nagrzewanie się styków na rezystancji zestykowej, powodując roztopianie się materiału stykowego. W miarę zużywania się styków maleje docisk zestykowy wskutek zmniejszania się ich przechyłu. Duża szorstkość powierzchni nakładek spowodowana wyładowaniami łukowymi, sprzyja powstawaniu odskoków elektrodynamicznych. Wskutek przewężenia linii prądowych w miejscach styczności styków, już przy stosunkowo niedużych prądach, oddziaływanie elektrodynamiczne może spowodować odskoki doprowadzające do szepienia trwałego styków. W miarę zużywania się styków zwiększa się prawdopodobieństwo szepienia styków zamkniętych.

Podstawowe znaczenie w procesie szepiania się styku zamykanego ma zjawisko zapalania się łuku elektrycznego powstającego podczas odskoków sprężystych styków, który jest źródłem energii cieplnej. Duże znaczenie ma amplituda odskoków, czas ich trwania i czas występowania. W praktyce szepienie styków następuje zwykle pod wpływem prądu łączeniowego (zwarciovego), gdyż istotne dla procesu szepienia zjawiska zachodzą w czasie nieprzekraczającym paru setnych sekundy.

Analiza literatury przedmiotowej pozwala stwierdzić, że prawdopodobieństwo szepienia styków przy załączaniu rośnie wykładniczo wraz ze wzrostem wartości prądu, a wartość początkowa prądu szepienia zależy istotnie od materiału stykowego, zarówno od składu chemicznego, struktury jak i od procesu produkcji.

Badania szepienia styków [46] wykazały, że początkowy prąd szepienia styków zależy od:

- temperatury rzeczywistej powierzchni styczności,
- zastosowanych materiałów stykowych, (składu chemicznego, technologii ich wytwarzania, sposobu montażu nakładek),
- właściwości kinetyczno-konstrukcyjnych układu zestykowego i napędowego,
- docisku zestykowego.

Przy założeniu [46], że pierwsze ślady szepiania się styków występują przy temperaturze powierzchni styczności równej temperaturze topnienia materiału stykowego θ_t , można obliczyć wartość początkową prądu szepienia i_p :

$$i_p = \sqrt{\frac{32,72 \cdot m_0 \cdot \lambda_0 \cdot \theta_t}{\pi \cdot \zeta \cdot H_B \cdot \rho_0 \left(1 + \frac{2}{3} \alpha_p \cdot \theta_t\right)}}, \quad (2.6)$$

gdzie: m_0, ζ - współczynniki uwzględniające wzrost rzeczywistej powierzchni szepienia styków pod wpływem prądu oraz odkształcenia sprężystego styków,
 λ_0 - przewodność cieplna materiału stykowego,
 θ_t - temperatura topnienia materiału stykowego,
 H_B - twardość materiału stykowego w skali Brinella,
 ρ_0 - rezystywność materiału stykowego w temperaturze 0°C,
 α_p - cieplny współczynnik rezystywności.

Obliczony na podstawie wzoru (2.6) początkowy prąd szepiania styków nie różni się więcej niż 5% od wartości uzyskanych z pomiarów [24].

Wartość graniczna prądu, przy którym następuje trwałe szepienie styków wyznaczana jest na podstawie empirycznej zależności

$$i_{sg}(N) = c_m \cdot \sqrt{F(N)}, \quad (2.7)$$

w której:

$$c_m = \sqrt{\frac{32,72 \cdot m_0 \cdot \lambda_0 \cdot \theta_t}{\pi \cdot \zeta \cdot H_B \cdot \rho_0 \left(1 + \frac{2}{3} \alpha_t \cdot \theta_t\right)}} + \frac{k_z \cdot F_{zwr}^w}{\sqrt{F_r(0)}}, \quad (2.8)$$

$F(N)$ – docisk zestykowy roboczy styków po N cyklach łączeniowych,

k_z, w - współczynniki zależne od budowy układu zestykowego i kinematyki,

F_{zwr} - siła zwrotna w miejscu styczności styków,

$F_r(0)$ - początkowy docisk styków przy zerowym zużyciu.

Jak dotychczas nie ma dostatecznie dokładnej metody wyznaczania występujących w tym wzorze współczynników konstrukcyjnych w , k_z . Można je w sposób przybliżony oszacować na podstawie badań empirycznych z zależności [24]:

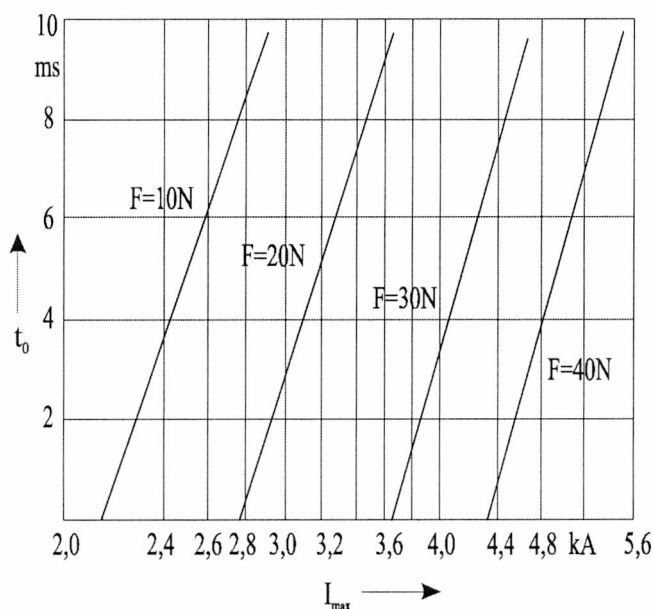
$$\sqrt{\frac{32,72 \cdot m_0 \cdot \lambda_0 \cdot \theta_t}{\pi \cdot \zeta \cdot H_B \cdot \rho_0 \left(1 + \frac{2}{3} \alpha_t \cdot \theta_t\right)}} \approx (20 \div 30\%) \frac{k_z \cdot F_{zwr}^w}{\sqrt{F_r(0)}}, \quad (2.9)$$

słusznej dla zestyków zamkniętych w przypadku, gdy nie występują odskoki elektrodynamiczne styków.

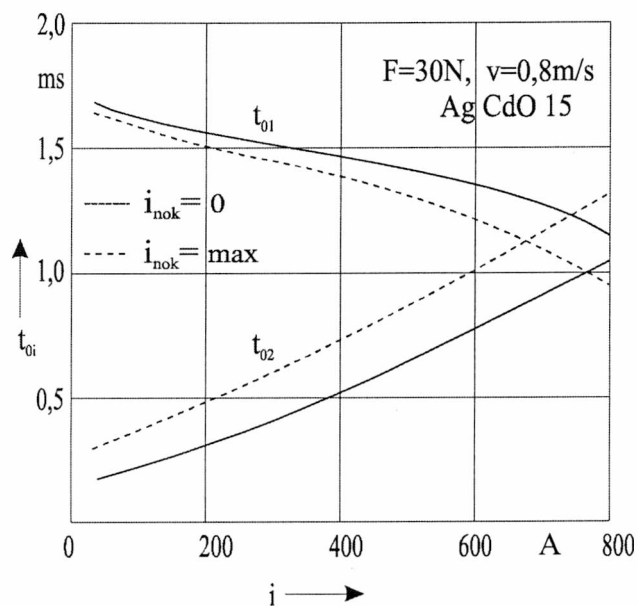
W pracach [50,56] wykazano, że prawdopodobieństwo szepienia styków może być, z dostateczną do celów praktycznych dokładnością, wyznaczone z zależności

$$P_s = P\{\dot{i}_z \geq i_{sg}\} = \begin{cases} 0 & \text{przy } i_{sg} > i_z \\ 1 - \frac{i_{sg}^2}{i_z^2} & \text{przy } 0 \leq i_{sg} \leq i_z, \end{cases} \quad (2.10)$$

w której i_z - maksymalna wartość prądu załączeniowego styków.



Rys. 2.1. Zależność czasu trwania modelowanego odskoku t_0 od szczytowego prądu obwodu i_{max} przy dużej składowej nieokresowej, dla różnych wartości F docisku zestyków [46]



Rys. 2.2. Zależność czasu trwania pierwszego odskoku t_{01} , i drugiego odskoku t_{02} styków, dla dwóch przypadków załączania obwodu prądowego: i_{nok} - bez składowej nieokresowej i o maksymalnej wartości [46]

W pracy [46] zbadano wpływ odskoków sprężystych na szepianie się zestyków łącznika. Badania przeprowadzono w urządzeniu, w którym modelowano pojedynczy odskok wywołany oddziaływaniem elektrodynamicznym prądu płynącego w dwóch równoległych szynach. Zjawisko szepiania się styków przeprowadzono w powyższym układzie przy prądzie szczytowym zmienianym w zakresie 0,1÷4 kA oraz docisku zestykowym zmienianym w zakresie od 5 do 60 N, dla styków wykonanych z Cu, Ag, Ag/Cu 2, AgCdO 15, Ag/Ni 0,3 (rys. 2.1 - 2.2). Badano zestyki praktycznie płaskie i nieutlenione, a powierzchnię roboczą styków polerowano każdorazowo przed próbą. W urządzeniu modelowano pojedynczy odskok o czasie trwania nieprzekraczającym 5 ms. Na podstawie badań wysunięto wniosek, że jeżeli czas występowania odskoków sprężystych mierzony w warunkach bezprądowych jest mały (nie przekracza około 2,5 ms), wówczas przy analizie zjawiska szepiania styków, przypadek zamykania

zestyków można zastąpić przypadkiem łącznika zamkniętego [46]. Wnioski wysunięte na podstawie powyższych modelowych badań mają istotne znaczenie przy analizie zjawisk szepiania się styków w rzeczywistych układach zestykowych styczników. Ze względu jednak na różnorodność materiałową, konstrukcyjną oraz zakres stosowanych wielkości wejściowych modelu (siła docisku, prąd łączeniowy, czas trwania odskoku), wartości liczbowe słuszne są dla wąskiego grona łączników o zbliżonych parametrach.

Przypadkowość chwili załączania obwodu prądowego powoduje dużą różnorodność przebiegu zjawisk zachodzących podczas odskoków sprężystych styków. Energia wydzielona w łuku podczas trwania odskoków sprężystych w całości jest pochłonięta przez styki (mała odległość pomiędzy stykami). Zależność siły szepiania F_s od energii łuku – W , może być zapisana za pomocą wzoru [46]

$$F_s = k \cdot W^a, \quad (2.11)$$

w którym: współczynniki k , a zależą od energii łuku i materiału stykowego.

Przy znajomości pozornej powierzchni szepiania A_s , można wyznaczyć wytrzymałość mechaniczną spoiny

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_s}. \quad (2.12)$$

Brak znajomości wartości współczynników z równania (2.11) dla typowych układów zestykowych nie pozwala na praktyczne wykorzystanie powyższych zależności.

W miarę zużywania się styków maleje grubość nakładek stykowych, w wyniku czego maleje docisk zestykowy, powodując zmniejszanie się wartości prądu, przy której występują szepienia styków.

Na szepienia styków mają wpływ również warstwy korozyjne powstające na ich powierzchni. Wraz ze wzrostem grubości warstw nalotowych wzrasta graniczna wartość siły dociskowej zestyków, przy której nie powstaje jeszcze szepienie styków [9].

Inną przyczyną szepiania się styków, występującą głównie w stycznikach przeznaczonych na mniejsze prądy łączeniowe (np. SLA 7), jest zmiana wzajemnej geometrii styku ruchomego i nieruchomego. Niejednokrotnie obserwowane podczas badań trwałościowych wcześniejsze uszkodzenie styczników spowodowane było szepieniem się styków, które nie łączyły całą powierzchnią nakładek stykowych.

Prąd łączeniowy

Intensywność zjawisk erozji i szepiania się styków zależy od wartości i przebiegu prądu załączeniowego. Przebieg prądu załączeniowego zależy z kolei od parametrów obwodu łączonego oraz od przypadkowej wartości kąta, przy którym następuje załączenie. W większości przypadków styczniki wykorzystywane są do załączania urządzeń o dużej indukcyjności (silników, transformatorów). Prąd załączeniowy dla obciążenia rezystancyjno - indukcyjnego określa zależność:

$$i_z = I_m \left(\sin(\omega \cdot t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \right), \quad (2.13)$$

w której: I_m – maksymalna amplituda prądu jaki popłynie w obwodzie w stanie ustalonym,

ψ - faza prądu w chwili załączenia obwodu,

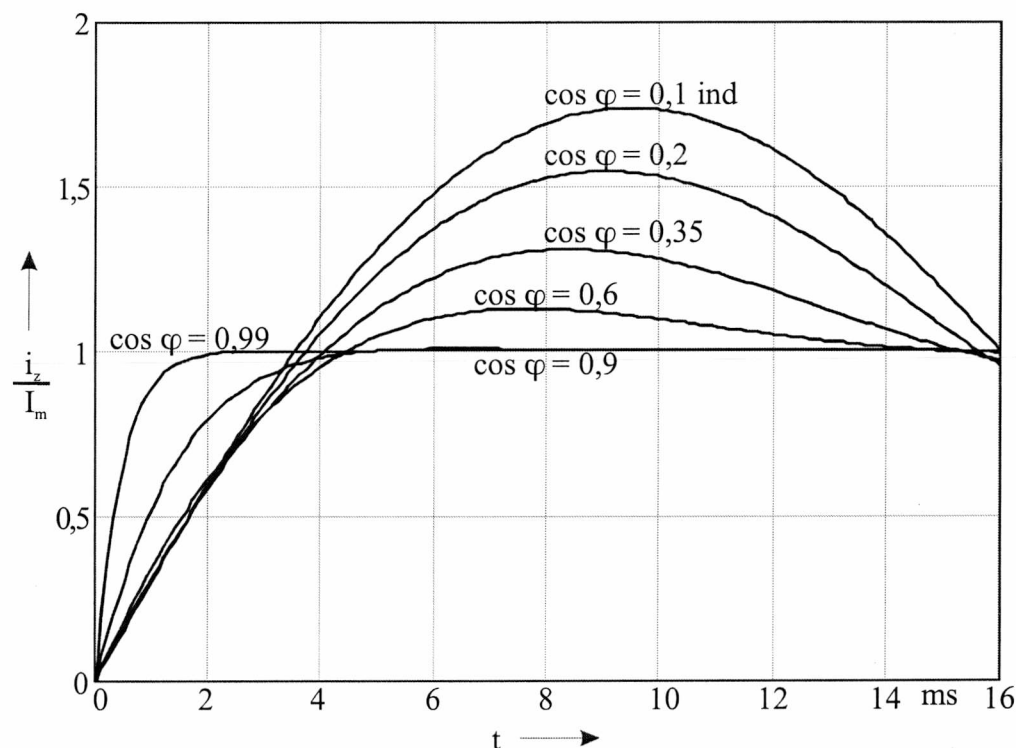
φ - kąt przesunięcia pomiędzy prądem i napięciem wynikającym z charakteru obwodu (obciążenie o rezystancji R i indukcyjności L).

Przy załączeniu obwodu o znanym $\cos \varphi$, w chwili t pojawia się maksymalny prąd, zależny od fazy prądu ψ . Funkcję odpowiadającą obwiedni przebiegów początkowych prądów załączeniowych można przedstawić w postaci zależności

$$\left| \frac{i_z}{I_m} \right| = \sqrt{1 + e^{-\frac{2\omega}{\operatorname{tg} \varphi} t} - 2 \cdot e^{-\frac{\omega}{\operatorname{tg} \varphi} t} \cdot \cos(\omega \cdot t)}, \quad (2.14)$$

w której kąt φ dla obciążeń R, L należy do przedziału $\langle 0, \pi/2 \rangle$.

Przebiegi początkowe prądu załączeniowego są procesami stochastycznymi, zależnymi w dużym stopniu od chwili, w której został zamknięty obwód. Maksymalna wartość początkowego prądu załączeniowego w zależności od parametrów obwodu, przyjmuje wartości bliskie prądowi maksymalnemu dla czasów rzędu milisekund. Przy ocenie wpływu prądu załączeniowego na prawdopodobieństwo szepienia styków należy uwzględnić jego chwilową wartość oraz czas trwania odskoków sprężystych. Im czas trwania odskoków jest dłuższy i im większa wartość amplitudy prądu załączeniowego w chwili komutacji, tym większe prawdopodobieństwo szepienia trwałego styków. Wartość chwilowa prądu załączeniowego jest zmienną losową niezależną, przyjmującą wartości w określonym zakresie (od 0 do i_z).



Rys. 2.3. Przebiegi obwiedni początkowych prądów załączeniowych wg równania 2.14 dla różnych wartości $\cos \varphi$

Początkowa wartość chwilowa prądu załączeniowego stycznika, dla typowych czasów trwania odskoków styków jest, ze względu na dużą stromość przebiegów chwilowych prądu łączeniowego, wysoce asymetryczna i ma tendencje do przyjmowania wartości bliskich prądowi szczytowemu I_m [50].

Z dostateczną dla praktycznych zastosowań dokładnością można przyjąć, że dystrybuenta rozkładu prawdopodobieństwa wystąpienia prądu łączeniowego i_z jest określona zależnością [50]

$$F(i) = \begin{cases} \frac{i^2}{i_z^2} & \text{przy } 0 \leq i \leq i_z \\ 1 & \text{przy } i > i_z. \end{cases} \quad (2.15)$$

Wystąpienie prądu załączeniowego o wartości większej od wartości granicznego prądu szczytowania, powoduje trwałe szczytowanie styków.

Na prąd szczytowania ma również wpływ charakter łączonego obwodu. Szczególnie duże wartości początkowego prądu załączeniowego mogą wystąpić w przypadku załączania kondensatora do pracującej baterii kondensatorów. Wartość szczytowa prądu załączeniowego może wówczas osiągnąć wartość kilkukrotnie większą od wartości prądu ustalonego.

Odszuki sprężyste

Odszuki sprężyste, ich liczba i czas trwania mają bezpośredni wpływ na poprawną pracę stycznika [9,41,46]. Podczas odszuki sprężystych powstaje bowiem łuk elektryczny działający niszcząco na styki. Odszuki sprężyste mogą decydować o trwałości łączeniowej stycznika [9], a rzeczywista liczba łączeń zestyku z uwzględnieniem łączeń spowodowanych odszuki sprężystymi może być zdecydowanie większa od liczby łączeń użytecznych (makrołączeń). Złożoność i losowy charakter zjawisk występujących podczas odszuki styków powodują, że pomimo szeregu przyjętych uproszczeń, teoretyczny opis jest bardzo skomplikowany i mało dokładny [54]. Analiza wyników przeprowadzonych badań [40] wykazała, że liczba odszuki sprężystych styków głównych nowych styczników typoszerokości SLA, w warunkach bezprądowych, w kategorii użytkowania AC-3, zawierała się w przedziale od 4 do 14 (średnio 7) odszuki zanim nastąpiło ostateczne zamknięcie styków.

Mechanizm powodujący powstawanie odszuki jest dość złożony. Odszuki mogą powstać zarówno podczas załączania stycznika, jak i podczas pracy przepustowej (odszuki elektrodynamiczne styków). Odszuki styków podczas załączania łącznika ze względu na przyczynę ich powstawania można podzielić na:

- odszuki sprężyste pierwotne, wywołane przez zderzenie dwóch mas sprężystych: styku ruchomego ze stykiem nieruchomym,
- odszuki sprężyste wtórne, powstałe w wyniku zderzenia się elementów stycznika innych niż styki łącznika, np. zwory elektromagnesu napędowego z rdzeniem.

Na odszuki podczas załączania stycznika ma wpływ prędkość poruszania się styków i trawersy. Prędkość ta zależy od konstrukcji łącznika, a dla styczników o napędzie elektromagnetycznym prądu przemiennego - również od kąta załączania napięcia. Zapewnienie stałej prędkości trawersy przy załączeniu stycznika, niezależnie od wahań napięcia sterującego (w granicach $0,85 \pm 1,1$ napięcia znamionowego), eliminuje do minimum odszuki, zwiększając tym samym trwałość stycznika [62]. W stycznikach LS 147, LS 207, LS 307 zastosowano układ elektroniczny sterowania cewką (ELSA), zapewniający stałą prędkość zwory przy załączaniu stycznika, a przez to zwiększenie trwałości łączeniowej.

Ograniczenie odszuki wtórnych styków można osiągnąć między innymi poprzez:

- ograniczenie energii uderzenia zwory o rdzeń elektromagnesu napędowego, dzięki zastosowaniu tłumików drgań lub amortyzatorów,

- selekcję charakterystyk sprężyn, zapewniając jednocześnie zamykanie styków torów głównych (równomierna siła docisku we wszystkich torach),
- zastosowanie elektronicznego systemu zasilania cewki stycznika zapewniającego optymalną charakterystykę załączania (zwiększając trwałość stycznika nawet przy mniej dokładnej selekcji sprężyn) [62].

Analityczne wyznaczenie przebiegu odskoków (czasu ich trwania, amplitudy oraz drogi styków) w postaci jednej funkcji jest trudne ze względu na punkty nieciągłości przy kolejnych zderzeniach styków. Podane w pracy [46] zależności określające amplitudę i czas trwania kolejnych odskoków wyznaczono, czyniąc następujące założenia upraszczające:

- w sprężynie zestykowej i styku nieruchomym nie powstają drgania i nie zachodzi strata energii,
- odkształcenia plastyczne powierzchni styków są pomijalne w stosunku do drogi styków podczas odskoków,
- układ ruchomy wraz z konstrukcją wsporczą zatrzymuje się w chwili zetknięcia się styków,
- styk ruchomy wraz z konstrukcją jest mechanicznie odizolowany od mechanizmu napędowego i porusza się z prędkością v , która może być stała lub zmienna, zależna od siły mechanizmu napędowego.

Przy wymienionych założeniach amplitudę odskoków styku ruchomego określa zależność:

$$A_n = \frac{F}{c_s} \cdot \left[\sqrt{1 + \left(\frac{v_n \cdot c_s}{F \cdot \omega} \right)^2} - 1 \right], \quad (2.16)$$

w której : $\omega = \sqrt{\frac{c_s}{m}}$ - pulsacja drgań własnych układu styk ruchomy - sprężyna zestykowa,

c_s - stała sprężyny,

m - masa części ruchomych, którą przyjmuje się jako równą masie styku ruchomego i połowy masy sprężyny,

F - docisk zestykowy wstępny,

v_n - prędkość styku ruchomego w chwili powstania n - tego odskoku (kończenia się odskoku $n-1$).

Czas trwania n - tego odskoku wyznacza się z zależności

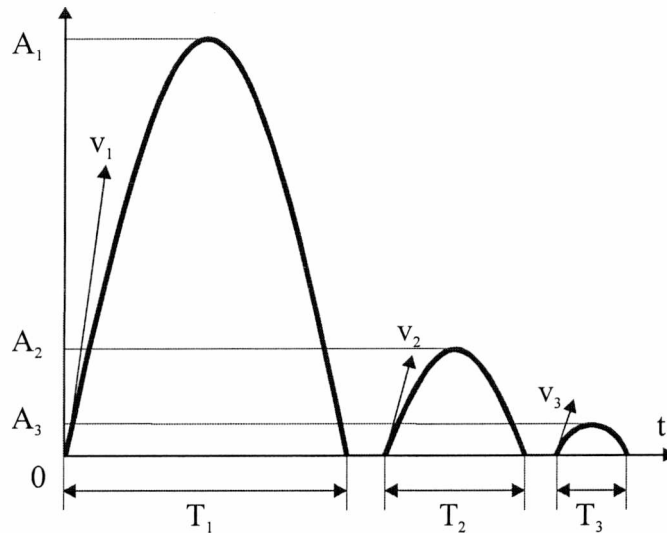
$$T_n = \frac{2}{\omega} \cdot \left(\arctg \frac{v_n \cdot c_s}{F \cdot \omega} \right). \quad (2.17)$$

Znając prędkość pierwszego zderzenia styków v , można obliczyć prędkość styku ruchomego w czasie kolejnych odskoków ze wzoru:

$$v_n = k^n \cdot v, \quad (2.18)$$

w którym k jest współczynnikiem restytucji, a n - numerem odskoku.

Jak wykazały badania, współczynnik restytucji zależny jest od kształtu zderzających się powierzchni i prędkości zderzenia styków - wartość współczynnika zmniejsza się przy kolejnych zderzeniach.



Rys. 2.4. Wykres względnego ruchu styku podczas odskoków sprężystych obliczony na podstawie zależności 2.16 i 2.17, przy współczynniku restytucji $k = 0,5$

W pracy [41] przedstawiono analityczno-graficzną metodę określania parametrów odskoków styków układu stykowego o zestykach czołowych. W powyższej pracy wyznaczono równanie przebiegu pierwszego odskoku dla typowego układu stykowego

$$x_1 = \frac{V_0(k+1)}{k_1 \cdot \omega} \cdot e^{-\alpha \cdot \omega \cdot t} \sin(k_1 \cdot \omega \cdot t) - l + l \cdot e^{-\alpha \cdot \omega \cdot t} \left[\cos(k_1 \cdot \omega \cdot t) + \frac{\alpha}{k_1} \sin(k_1 \cdot \omega \cdot t) \right] - \int_0^{t_1} v_M dt, \quad (2.19)$$

w którym: V_0 - prędkość pierwszego zderzenia styków,

k - współczynnik restytucji,

v_M - prędkość masy zastępczej elementów ruchomych układu stykowego podczas trwania odskoków,

$l = \frac{F}{c_s}$ - ugięcie wstępne styku ruchomego dla danej siły dociskowej F oraz

stałej sprężyn c_s ,

$\omega = \sqrt{\frac{c_s}{m}}$ - pulsacja drgań własnych nietłumionych styku ruchomego o masie m ,

$\alpha = \frac{\Theta}{\sqrt{c_s \cdot m}}$ - współczynnik tłumienia obliczony dla współczynnika tarcia

równego Θ ,

t_1 – czas trwania pierwszego odskoku oraz $k_1 = \sqrt{1 - \alpha}$.

Równanie to zostało wyprowadzone przy następujących założeniach:

- czas trwania zderzenia styków jest nieskończenie krótki,
- współczynnik restytucji jest wielkością niezależną od prędkości zderzenia styków, zależny jedynie od rodzaju materiału stykowego,
- współczynnik tłumienia α jest wielkością niezależną od prędkości styku ruchomego względem ruchomych elementów układu ruchomego,
- masa sprężyn i własne jej drgania są pomijalne,
- ciężar styku ruchomego jest pomijalny.

Przedstawione zależności analityczne gwarantują dostateczną dokładność otrzymanych wyników dla współczynnika restytucji mniejszego od 0,3. Dla współczynników większych należy korzystać tylko z rozwiązań graficznych [41].

Analiza porównawcza obu powyższych modeli dla typowego układu stykowego dała rozbieżne wyniki. Różnorodność zjawisk zachodzących dla różnych układów zestykowych i stosowanych w nich materiałów oraz konstrukcji utrudnia w znacznym stopniu opracowanie wiarygodnego modelu odskoków styków.

Klasyfikację odskoków występujących w warunkach prądowych przedstawia tabela 2.1. O postaci odskoków w warunkach prądowych decyduje amplituda odskoków, wartość chwilowa prądu oraz materiał stykowy. Odskokom o charakterze mostkowym sprzyja duża wartość prądu i mała amplituda odskoków. Typowy przebieg odskoków sprężystych zawiera odskoki łukowe jak i mostkowe.

Jak wykazały badania własne oraz wyniki innych prac [46,50], złożone zjawiska zachodzące w układzie zestykowym oraz układzie kinematycznym łącznika podczas jego załączania, powodują duże zróżnicowanie przebiegów odskoków, ich czasu trwania, amplitudy i liczby.

W pracach [43,54] zbadano wpływ zewnętrznych uderzeń mechanicznych na odskoki styków styczników próżniowych podczas załączania. Wykazano, że najkorzystniejszą pozycją pracy styczników w warunkach występowania uderzeń mechanicznych jest pozycja, w której kierunek działania uderzeń jest prostopadły do osi komór łącznika w płaszczyźnie przechodzącej przez te osie.

Tabela 2.1. Klasyfikacja odskoków styków występujących w warunkach prądowych podczas załączania stycznika [46,50]

Przyczyna podziału	Rodzaj odskoków	
Przyczyna powstania odskoków.	Sprężyste – wywołane siłą oddziaływania sprężystego, powstające podczas zderzenia się elementów ruchomych ze stałymi.	Pierwotne – wywołane siłą powstającą przy zderzeniu się styków.
		Wtórne – wywołane siłą powstającą przy zderzeniu elementów innych niż styki.
	Elektrodynamiczne – wywołane siłą oddziaływania elektrodynamicznego.	
Charakter zjawisk zachodzących podczas odskoków w obszarze międzystykowym.	Mostkowe – w przerwie międzystykowej występuje płynny mostek metaliczny.	
	Łukowe – płynny mostek zostaje przerwany, a między stykami zapala się łuk.	
	Odszuki bez łuku – napięcie źródła jest niedostateczne do zapłonu i utrzymania łuku po zerwaniu mostka.	
Charakter przebiegu odskoków.	Odszuki pierwotne – łukowe, wtórne – łukowe.	
	Odszuki pierwotne – mostkowe, wtórne – łukowe.	
	Odszuki pierwotne – łukowe, wtórne – mostkowe.	
	Odszuki pierwotne – mostkowe, wtórne – mostkowe.	
	Odszuki pierwotne – łukowe →sczepienie się zestyków.	
	Odszuki pierwotne – mostkowe →sczepienie się zestyków.	

Materiały stosowane na styki

Materiały stykowe stosowane w stycznikach powinny charakteryzować się następującymi cechami:

- odpornością na szepienia,
- odpornością na erozję pod wpływem działania łuku elektrycznego,
- bardzo dobrą przewodnością elektryczną,
- dobrą przewodnością cieplną,
- odpornością na utlenianie materiału,
- możliwością trwałego łączenia nakładek stykowych z innymi metalami,
- odpornością na przemieszczanie się materiału stykowego podczas pracy szczególnie w obwodach prądu stałego,
- zdolnością zachowania wymaganych właściwości przewodzących w czasie ich eksploatacji.

Istotnym problem przy wprowadzaniu zmian materiału stykowego, który może rzutować na wyniki badań, jest sposób połączenia nakładki stykowej z materiałem nośnym (podstawą styku). Jakość połączenia może w sposób znaczny wpływać na trwałość łączeniową układu zestykowego stycznika. Typowe technologie wykorzystywane przy łączeniu styków z podstawą to: zgrzewanie, spawanie, lutowanie, połączenie mechaniczne (nity stykowe) i inne (wytlaczanie, napawanie profili). Przy doborze techniki łączenia należy zwrócić uwagę na narażenia cieplne, szczególnie istotne w przypadku lutowania.

Do najczęściej stosowanych materiałów używanych do produkcji nakładek stykowych w stycznikach powietrznych należy zaliczyć: srebro – tlenek cyny (Ag SnO_2 – otrzymane metodami proszkowymi), srebro – tlenek kadmu (Ag CdO 10 - zawartość CdO około 10%). Optymalne właściwości styków uzyskuje się przez stosowanie kompozytów, tworzyw sztucznych wytwarzanych technikami proszkowymi [44]. Istniejąca technologia pozwala modyfikować twardość siatki wolframowej czy też odpowiednio domieszkować składniki materiałów stykowych w celu zwiększenia przewodności nakładek.

W Polsce istnieje kilku producentów materiałów stykowych. Obecnie trwają badania nad materiałami kompozytowymi typu srebro-metal (Ag-Ni , Ag-W), srebro-tlenek metalu (Ag CdO , Ag SnO_2 , Ag ZnO) o różnej strukturze z różnymi domieszkami.

W obligatoryjnych badaniach styczników [16] przydatność materiału stykowego do danego typu stycznika weryfikuje się sprawdzając:

- trwałość łączeniową,
- zdolność łączeniową torów głównych (sprawdzenie zwarciowej zdolności łączenia).

3. Podstawy opisu niezawodności zestyków styczników

3.1. Podstawowe pojęcia dotyczące niezawodności zestyków styczników

Termin „niezawodność” w technice ma bardzo bogatą treść. Definicji niezawodności może być tyle, ile jest wartościujących sposobów oceny niezawodności oraz normatywnych założeń [6,17,34-39]. Poradnik niezawodności [38] podaje następującą definicję: „niezawodność obiektu jest prawdopodobieństwem, że wartości parametrów określających istotne właściwości obiektu nie przekroczą w ciągu okresu (t_1, t_2) bądź $(0, t)$ dopuszczalnych granic w określonych warunkach życia obiektu”.

Nieco inaczej ujmuje to norma PN-93/N-50191, która niezawodność (dependability) definiuje jako: „zespół właściwości, które opisują gotowość obiektu i wpływają na nią: nieuszkodzalność, obsługiwalność i zapewnienie środków obsługi”. We wspomnianej normie termin niezawodność jest używany tylko do ogólnego nie liczbowego opisu.

Z definicji tych wynika, że niezawodność jest cechą obiektywnie istniejącą, lecz jednocześnie cechą względną - zależy od zbioru warunków eksploatacyjnych, od czasu trwania eksploatacji jak również od rodzaju postawionych obiektowi zadań.

Dla celów tej pracy najbardziej przydatna wydaje się być następująca definicja niezawodności [21]:

„niezawodność urządzenia elektrotechnicznego jest to jego zdolność do zachowania w ciągu zadanego czasu i w ustalonych warunkach eksploatacyjnych:

- gotowości (dyspozycyjności – zdolności do utrzymania się w stanie umożliwiającym wypełnienie wymaganych funkcji w danych warunkach, w danej chwili lub w danym przedziale czasu, przy założeniu, że są dostarczone wymagane środki zewnętrzne),
- nieuszkodzalności (zdatności – zdolności do wypełnienia wymaganych funkcji w danych warunkach w danym przedziale czasu),
- obsługiwalności (zdolności do utrzymania lub odtwarzania w danych warunkach eksploatacyjnych stanu, w którym może on wypełniać wymagane funkcje przy założeniu, że obsługa jest przeprowadzana w ustalonych warunkach z zachowaniem ustalonych procedur i środków).”

Powszechnie używaną cechą niezawodności jest nieuszkodzalność. Dla urządzeń nienaprawialnych za jakie przyjmuje się układy zestykowe styczników, stan zdatności można opisać między innymi za pomocą następujących wskaźników nieuszkodzalności:

a. prawdopodobieństwo poprawnej pracy do uszkodzenia zestyków stycznika

$$R(t) = P(T > t) = \int_t^{\infty} f(t)dt = 1 - F(t). \quad (3.1)$$

Empiryczną postać estymatora prawdopodobieństwa poprawnej pracy do uszkodzenia zestyków stycznika $\hat{R}(t_m)$ można wyznaczyć z zależności

$$\hat{R}(t_m) = \frac{n - m + 1}{n + 1}, \quad (3.2)$$

gdzie: n - liczba badanych zestyków łączników, m - liczba zestyków łączników uszkodzonych w przedziale czasu $\langle 0, t_m \rangle$.

b. prawdopodobieństwo uszkodzeń zestyków stycznika (dystrybuanta uszkodzeń)

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(t)dt = 1 - R(t). \quad (3.3)$$

c. intensywności uszkodzeń zestyków stycznika (funkcja ryzyka)

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}. \quad (3.4)$$

d. średniej intensywności uszkodzeń w przedziale czasu $(0, t)$

$$\overline{\lambda(t)} = \frac{1}{t} \int_0^t \lambda(t)dt = -\frac{\ln R(t)}{t}. \quad (3.5)$$

Innym, często stosowanym wskaźnikiem niezawodności, jest czas poprawnej pracy zestyków stycznika T , liczony w godzinach czasu pracy, do uszkodzenia powodującego stan niezdatności zestyków łącznika. Czas ten nazywany jest też trwałością lub czasem zdatności zestyków stycznika. Jest on zmienną losową ciągłą, opisywaną funkcją gęstości prawdopodobieństwa $f(t)$. Korzystając z funkcji $f(t)$ można określić wartość oczekiwaną czasu poprawnej pracy zestyków stycznika

$$E(T) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t)dt. \quad (3.6)$$

W praktyce stan niezawodności określany jest na podstawie skończonej liczby realizacji zmiennych losowych. Jeżeli dysponujemy wynikami badań trwałości

łączeniowej n zestyków styczników, wówczas średni czas ich działania możemy określić z zależności

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i, \quad (3.7)$$

gdzie: t_i - czas poprawnej pracy i - tego zestyku stycznika.

Tabela 3.1. Charakterystyki funkcyjne niezawodności i ich współzależności [56]

$R(t)=$	$R(t)$	$1 - F(t)$	$\int_t^{\infty} f(s)ds$	$e^{-\int_0^t \lambda(s)ds}$	$e^{-\Lambda(t)}$
$F(t)=$	$1 - R(t)$	$F(t)$	$\int_0^t f(s)ds$	$1 - e^{-\int_0^t \lambda(s)ds}$	$1 - e^{-\Lambda(t)}$
$f(t)=$	$-\frac{d}{dt}[R(t)]$	$\frac{d}{dt}[F(t)]$	$f(t)$	$\lambda(t)e^{-\int_0^t \lambda(s)ds}$	$\frac{d}{dt}e^{-\Lambda(t)}$
$\lambda(t)=$	$-\frac{d}{dt}[\ln R(t)]$	$\frac{d}{dt}[\ln[1 - F(t)]]$	$\frac{f(t)}{\int_0^t f(s)ds}$	$\lambda(t)$	$\frac{d}{dt}[\Lambda(t)]$
$\Lambda(t)^{1)}=$	$\ln \frac{R(0)}{R(t)}$	$\ln \frac{1 - F(0)}{1 - F(t)}$	$\frac{\int_0^t f(s)ds}{\int_0^t f(u)du}$	$\int_0^t \lambda(s)ds$	$\Lambda(t)$

¹⁾ $\Lambda(t)$ - skumulowana intensywność uszkodzeń.

Trwałość zestyków łączników elektroenergetycznych wyrażona jest zwykle czasem poprawnej pracy łączeniowej lub liczbą wykonanych cykli łączeniowych do momentu ich niezdatności. Przekroczenie przez układ zestykowy stycznika stanu granicznego, określonego dopuszczalnymi parametrami podawanymi przez producenta, jest równoważne jego uszkodzeniu. Prawdopodobieństwo $P(T \geq T_{max})$, że czas poprawnej pracy T będzie większy niż wymagany czas pracy zestyków stycznika (trwałość łączeniowa) T_{max} , nazywa się funkcyjnością i jest miarą niezawodności. Stąd w innych pozycjach literatury wielkość tę nazywa się niekiedy wprost niezawodnością urządzenia i oznacza jako R .

W przypadku, gdy argumentem jest liczba cykli łączeniowych, zamiast funkcyjności używa się pojęcia operacyjności.

Wyznaczenie jednego wskaźnika niezawodności umożliwia wyznaczenie pozostałych funkcjonalnych i liczbowych wskaźników (tabela 3.1).

Informacje o trwałości urządzeń elektrycznych mogą pochodzić zarówno z badań specjalnie organizowanych i programowanych oraz z obserwacji zachowania się urządzeń w eksploatacji. Informacje powinny obejmować opis warunków w jakich badane urządzenia pracują oraz dokładne dane o uszkodzeniach.

3.2. Trwałość zestyków styczników

Jak wynika z analizy badań laboratoryjnych sprawdzających trwałość łączeniową różnych typów styczników (szczegółowe opracowanie badań przedstawiono w rozdziale 6 niniejszej pracy), udział uszkodzeń zestyków w awaryjności całego stycznika jest decydujący i stanowi do 97% wszystkich uszkodzeń łącznika. Ponieważ w praktyce trwałość zestyków styczników wyznacza się na podstawie laboratoryjnych badań sprawdzających trwałość łączeniową całego łącznika, dlatego w dalszym ciągu rozprawy często używanym terminem będzie trwałość łączeniowa stycznika, która jest jednocześnie miarą trwałości zestyków stycznika.

Zgodnie z normą PN-93/N-50191 „trwałość” (durability) to zdolność stycznika do wypełnienia wymaganych funkcji w danych warunkach użytkowania i obsługi, aż do osiągnięcia stanu granicznego. Wyrażana jest liczbą cykli łączeniowych jakie poprawnie wykonał stycznik do momentu jego niezdatności.

Zgodnie z obowiązującymi normami [30,31] zdolność stycznika do załączania i wyłączania prądów bez uszkodzenia w zwykłych warunkach roboczych jest charakteryzowana trwałością łączeniową. Miarą trwałości łączeniowej stycznika jest liczba cykli łączeniowych prądowych wykonanych w warunkach odpowiadających różnym kategoriom użytkowania podanym w normie [31], które mogą być wykonane bez naprawy lub wymiany styków. Trwałość łączeniową stycznika sprawdza się podczas badań specjalnie prowadzonych według uznania producenta (częstość łączeń określa wytwórca). Trwałość łączeniowa styczników traktowana jest w powyższych normach jako wielkość zdeterminowana, podczas gdy jest to wielkość stochastyczna.

Norma dla styczników prądu przemiennego określa cztery podstawowe kategorie użytkowania AC-1÷AC-4, jak również inne dodatkowe kategorie istotne przy łączeniu, np. żarówek, baterii kondensatorów, transformatorów oraz kilka kategorii dla prądu stałego (tabela 3.2).

Tabela 3.2. Wybrane kategorie użytkowania oraz odpowiadające im warunki załączania i wyłączania podczas sprawdzania trwałości łączeniowej

Kategorie użytkowania		Załączenie			Wyłączenie			Uwagi
		I/I_e	U/U_e	$\cos\varphi^{1)}$	I/I_e	U/U_e	$\cos\varphi^{1)}$	
Prąd przemieniczny	AC-1	1	1	0,95	1	1	0,95	Łączenie obciążeń bezindukcyjnych lub o małej indukcyjności, np. pieców oporowych
	AC-2	2,5	1	0,65	2,5	1	0,65	Łączenie silników pierścieniowych: rozruch, wyłączenie w pełnym biegu
	AC-3	6	1	0,65 0,35 dla $I_e > 17A$	1	0,17	0,65 0,35 dla $I_e > 17A$	Łączenie silników klatkowych: rozruch, wyłączenie w pełnym biegu
	AC-4	6	1	0,65 0,35 dla $I_e > 17A$	6	1	0,65 0,35 dla $I_e > 17A$	Łączenie silników klatkowych: rozruch, praca rewersyjna (hamowanie przeciwwprądem), impulsowanie
Prąd stały	DC-1	I/I_e	U/U_e	$L/R^{2)}$	I/I_e	U/U_e	$L/R^{2)}$	
		1	1	1 ms	1	1	1 ms	Łączenie obciążeń bezindukcyjnych lub o małej indukcyjności, np. pieców oporowych
	DC-3	2,5	1	2 ms	2,5	1	2 ms	Łączenie silników bocznikowych: rozruch, hamowanie przeciwwprądem, impulsowanie, wyłączenie w pełnym biegu
	DC-5	2,5	1	7,5 ms	2,5	1	7,5 ms	Łączenie silników szeregowych: rozruch, hamowanie przeciwwprądem, impulsowanie, wyłączenie w pełnym biegu

gdzie: I_e - znamionowy prąd łączeniowy,

I - prąd załączniowy i wyłączniowy,

U_e - znamionowe napięcie łączeniowe,

U - napięcie załączniowe, przy wyłączaniu napięcie powrotne o częstotliwości sieci,

¹⁾ - tolerancja dla $\cos\varphi$: $\pm 0,05$,

²⁾ - tolerancja dla L/R : $\pm 15\%$.

Wiele zagadnień pozostawiono do uzgodnienia między wytwórcą a użytkownikiem. Podstawowa norma PN-90/E-06150/10 zawiera załącznik J zatytułowany: „Punkty, które są przedmiotem uzgodnień między wytwórcą a użytkownikiem”. Słowo „uzgodnienia” użyte jest w bardzo szerokim pojęciu i przyjmuje się, że takim uzgodnieniem może być podanie określonych informacji w karcie katalogowej wytwórcy. Jeżeli stycznik ma być

stosowany w warunkach odbiegających od warunków pracy normalnej, określonej w danej normie, należy przywołać odpowiednie próby środowiskowe opisane w normach serii PN-.../E-04600. Jak już wspomniano stosowanie powyższych norm, bez uściśleń dokonywanych przez wytwórcę, jest często utrudnione lub wręcz niemożliwe [11,61,62].

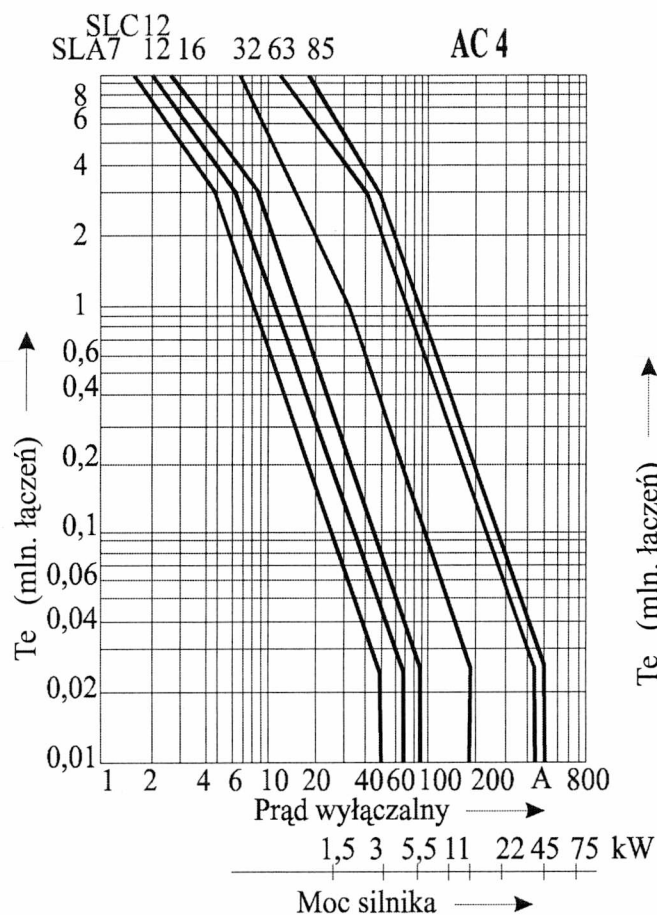
Producenci styczników między innymi w wyniku występującej konkurencji oraz gospodarki rynkowej, uznają potrzebę podawania w kartach katalogowych dla produkowanych przez siebie łączników trwałości mechanicznej i łączeniowej, dopuszczalnych parametrów poprawnej pracy łącznika, jak również sposobów ich eksploatacji. Trwałość łączeniowa styczników najczęściej podawana jest w postaci wykresów w kategorii użytkowania AC-3 i AC-4. I tak na przykład norma zakładowa dla styczników elektromagnetycznych serii SLA, SLC, LS produkowanych przez Zakłady Aparatury Elektrycznej „ELESTER” S.A. [61,62] określa znamionowe i graniczne parametry obwodów głównych, warunki pracy normalnej, montażu, transportu, jak również sposobu i rodzaju badań. W powyższej normie zakładowej podano w postaci wykresów trwałość łączeniową w kategorii AC-3 i AC-4 (rys. 3.1 - 3.3).

W karcie katalogowej K-95/A2-305 podane są dane techniczne poszczególnych typów styczników, między innymi minimalny (eksploatacyjny) przechył styków, częstość łączeń i dopuszczalna obciążalność w zależności od kategorii oraz dopuszczalna obciążalność w zależności od trwałości łączeniowej.

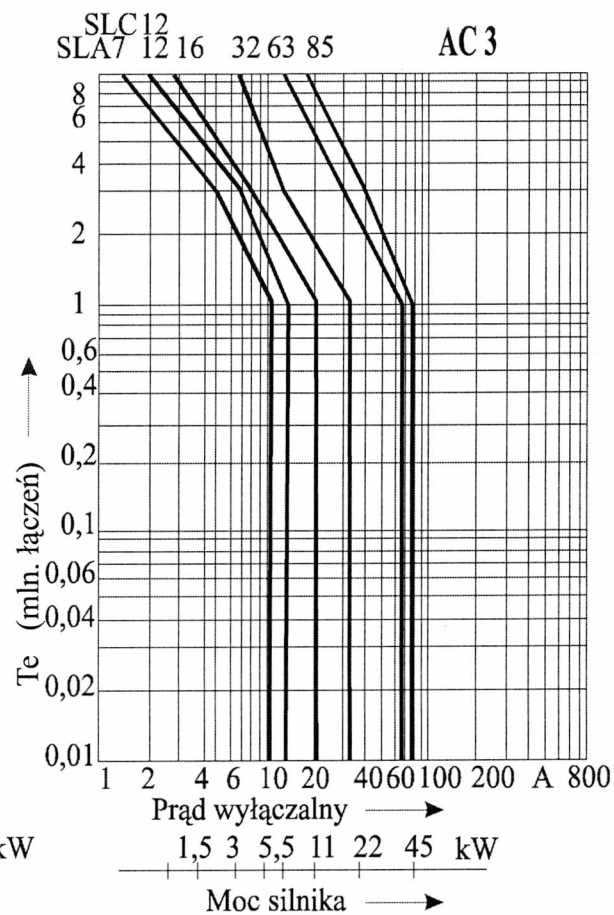
W pracy [15] przedstawiono wyniki badań mających na celu wyznaczenie minimalnej, dopuszczalnej w eksploatacji wartości przechyłu i docisku roboczego zestyków dla wszystkich typów styczników SLA. W oparciu o badania nagrzewania, wytrzymałości zwarciowej oraz odporności na drgania i wstrząsy wyznaczono wartości kryterialne (minimalne) tych parametrów (tabela 3.3).

Tabela 3.3. Minimalne wartości przechyłu styków i siły docisku roboczego styczników serii SLA [15]

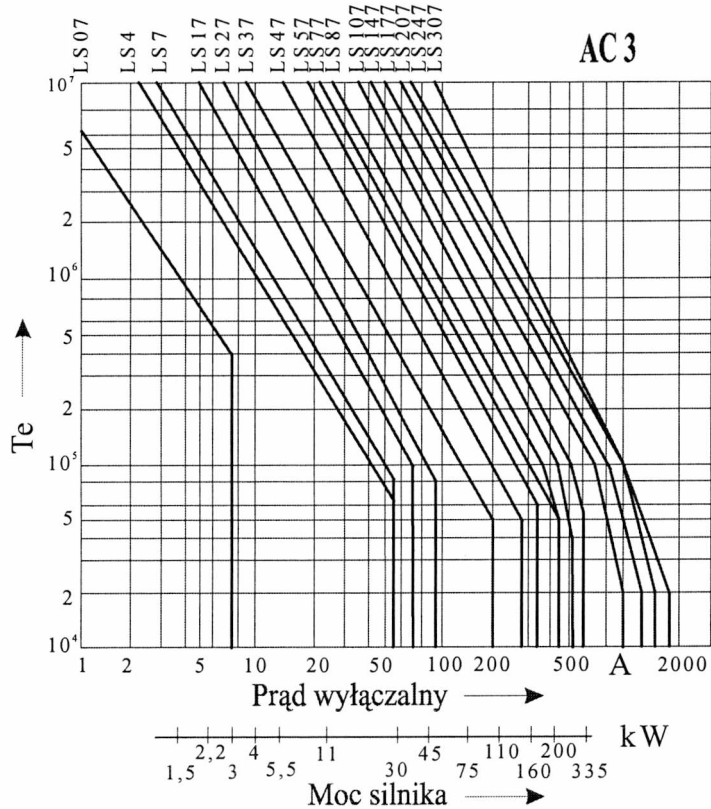
Typ stycznika	Minimalny przechył (mm) - l_{min}	Minimalny docisk roboczy (N) - F_{min}
SLA 7	0,35	-
SLA 12	0,4	-
SLA 16	0,5	-
SLA 32	0,4	2
SLA 63	1,0	7
SLA 85	1,0	7



Rys. 3.1. Charakterystyki trwałości łączeniowej styczników SLA i SLC w kategorii użytkowania AC-4 [61]



Rys. 3.2. Charakterystyki trwałości łączeniowej styczników SLA i SLC w kategorii użytkowania AC-3 [61]



Rys. 3.3. Charakterystyki trwałości łączeniowej styczników serii LS w kategorii użytkowania AC-3 [61]

Wartości minimalne przechyłu i docisku roboczego zestyków, dopuszczalne w eksploatacji powinny być umieszczone w instrukcji instalowania, obsługi i konserwacji styczników z adnotacją, że w przypadku zmian tych parametrów poniżej podanych dalsze użytkowanie stycznika należy przerwać i wymienić na nowy [15].

W procesie produkcji przeprowadza się, zgodnie z wymaganiami WTO (Warunki Techniczne Odbioru), badania następujących parametrów elektrycznych i mechanicznych łączników:

- przechyłu styków,
- napięcia przyciągania i odpadania,
- czasu przyciągania,
- czasu odpadania,
- czasu drgań odskoków (prellzeit),
- poziomu hałasu – brzęczenia,
- spadku napięcia na stykach głównych,
- wytrzymałości izolacji (sprawdzenie),
- poboru prądu przez elektromagnes.

4. Zagadnienia związane z modelami niezawodności zestyków styczników

4.1. *Metodyka opracowywania modelu*

Pojęcie „model” jest niejednoznaczne i bardzo ogólne. Zazwyczaj oznacza prezentację badanego zjawiska lub obiektu w postaci innej niż postać, w jakiej występuje w rzeczywistości. Zasadniczym kryterium przydatności modelu opisującego dane zjawisko lub obiekt jest jego zgodność z rzeczywistością. Modele wyznaczane są między innymi w celu prognozowania badanych zjawisk w warunkach innych, niż aktualnie istniejące, sprawdzenia przydatności obiektu do realizacji określonych zadań lub znalezienia optymalnego zestawu zmiennych mających wpływ na dany obiekt [3].

Zgodnie z [38,39], procedura badań podczas opracowywania modelu powinna polegać na:

- przygotowaniu badań - organizacyjnym i metodologicznym opracowaniu programu badań, określeniu liczebności próby statystycznej i sposobu doboru obiektów z całej populacji,
- modelowaniu - doborze optymalnego modelu,
- eksperymencie - zarejestrowaniu informacji dotyczących funkcjonowania obiektu wraz z identyfikacją numeru obiektu, opisem dotyczącym uszkodzeń,
- opracowaniu wyników badań - przygotowaniu uzyskanych danych z badań do dalszej numerycznej analizy, statystycznym opracowaniu wyników i ich zapisie do określonych baz danych obiektu,
- wnioskowaniu o obiekcie na podstawie wyników eksperymentalnych - dokonanie obliczeń zgodnie z modelem i przedstawienie ich wyników w dogodnej dla użytkownika formie.

Niezmiernie ważną sprawą jest gromadzenie i przechowywanie w dogodnej formie informacji o uszkodzeniach rejestrowanych w czasie badań eksperymentalnych. Jest to uzasadnione z wielu względów:

- analiza wyników badań pozwala na głębszą analizę przyczyn powstawania uszkodzeń i procesów zużywania się badanych elementów,
- informacje te mogą być wykorzystane do doskonalenia metod projektowania, technologii wytwarzania oraz bezpośrednio przy projektowaniu nowych obiektów,

- uzyskanie takich informacji w większości przypadków nie byłoby możliwe na drodze eksploatacji, stanowiąc możliwie pełną bazę danych dotyczących zachowania się obiektu.

Za gromadzeniem i przechowywaniem danych rejestrowanych podczas badań eksperymentalnych przemawia również fakt, że niezawodność jest wprawdzie właściwością eksploatacyjną obiektu, jednakże decydujący wpływ mają na nią czynności podejmowane w fazie projektowania i w szeroko rozumianym procesie produkcji.

Niezawodność zakładana przez projektantów i konstruktorów czy producenta możemy określić mianem niezawodności projektowanej (a priori).

Proces eksploatacji dostarcza dane o zachowaniu się obiektu w czasie realizacji przewidzianych dla niego funkcji, jest również okresem, kiedy weryfikowane są założenia konstrukcyjno-projektowe. Niezawodność obiektu wyznaczoną na podstawie obserwacji w toku procesu eksploatacyjnego, możemy nazwać niezawodnością eksploatacyjną (a posteriori). Interesujące ze względów praktycznych jest porównanie niezawodności zakładanej i uzyskanej (a priori i a posteriori). Porównanie danych, uzyskanych z badań laboratoryjnych, z danymi uzyskanymi z rzeczywistego zachowania obiektu w środowisku nie do końca jednoznacznie opisanym, pozwala wysunąć wnioski, które mogą mieć bardzo duże znaczenie praktyczne. Niestety, ze względu na ogólnie znany problem braku służb niezawodnościowych, niewiele obiektów ma dostępne dane historyczne o zaistniałych awariach, wraz z dokładnym opisem uszkodzenia.

4.2. Przyczyny uszkodzeń zestyków styczników

Niezawodność stycznika zależy od niezawodności jego elementów składowych. Analiza awaryjności różnych typów styczników pracujących w różnych warunkach środowiskowych [55], jak również rozważania teoretyczne przeprowadzone między innymi w pracach [21,56], uzasadniają wniosek, że stycznik można traktować jako urządzenie o szeregowej strukturze niezawodności złożonej z następujących funkcjonalnych zespołów:

- układu zestykowego,
- cewki elektromagnesu układu napędowego,
- układu izolacyjno-konstrukcyjnego.

Pozostałe elementy stycznika mają znikomy wpływ na jego niezawodność.

Podstawowym elementem decydującym o niezawodności całego stycznika jest układ zestykowy łącznika [58]. Jak już wspomniano w poprzednim rozdziale pracy, udział uszkodzeń zestyków w awaryjności całego stycznika jest decydujący i stanowi do 97% wszystkich uszkodzeń łącznika.

Istotnym zagadnieniem ze względu na temat poniższej rozprawy jest zdefiniowanie pojęcia uszkodzenia zestyków stycznika. Uszkodzenia zestyków oceniane są niejednokrotnie zbyt subiektywnie. Za kryterium uszkodzenia zestyków przyjmuje się:

- osiągnięcie dopuszczalnego zużycia styków mierzonego spadkiem przechyłu styków, bądź ubytkiem materiału stykowego,
- szczenie styków podczas sprężystych odskoków styków w trakcie załączania stycznika lub podczas odskoków elektrodynamicznych przy pracy przepustowej,
- zbyt dużą rezystancją zestykową, uniemożliwiającą przewodzenie (przy niewielkich prądach łączeniowych) lub powodującą nadmierne nagrzewanie zestyków podczas pracy przepustowej,
- zbyt mały docisk zestykowy,
- mechaniczne uszkodzenie elementów układu stykowego (odpadnięcie nakładek, upalenie mostka styku ruchomego lub nieruchomego).

Ze względu na procesy fizyczne zachodzące w układzie zestykowym stycznika możemy rozróżnić następujące rodzaje uszkodzeń [21]:

- uszkodzenia spowodowane impulsowym działaniem obciążeń,
- uszkodzenia spowodowane kumulacyjnym działaniem obciążeń,
- uszkodzenia spowodowane relaksacyjnym działaniem obciążeń.

W znacznej części opisanych w literaturze modeli niezawodnościowych styków styczników, jako kryterium uszkodzenia przyjmuje się osiągnięcie dopuszczalnego (granicznego) zużycia styków mierzonego ubytkiem materiału stykowego, bądź spadkiem przechyłu styków [21]. Nie uwzględniono w nich wielu występujących zjawisk, między innymi: zbyt małej siły dociskowej styków, odskoków sprężystych styków czy zmian rezystancji zestykowej.

4.3. Modele niezawodności zestyków styczników

W literaturze przedmiotowej możemy znaleźć trzy podstawowe grupy modeli niezawodności zestyków styczników elektromagnetycznych:

- modele matematyczne,
- modele matematyczno-fizyczne,
- modele probabilistyczne.

Wyznaczenie przewidywanej wartości niezawodności zestyków na podstawie modelu może być zrealizowane między innymi na podstawie rozwiązania:

- analitycznego,
- statystycznego,
- symulacyjnego.

Przedstawione w pracach [21,22,24,45,51,53,56,57,58,60] modele niezawodności zestyków styczników prądu przemiennego oparte są na ogół na modelach matematyczno-fizycznych, w których trwałość wyznaczana jest na drodze rozwiązania analitycznego, uwzględniając zmiany tylko jednego parametru prognozującego - najczęściej przechyłu styków. Należy zwrócić uwagę, że w powyższych pracach przedstawiono zarówno analityczne modele niezawodności zestyków głównych opracowane dla uszkodzeń spowodowanych kumulacyjnym działaniem obciążeń, jak i relaksacyjnym działaniem obciążeń (uogólniony analityczny model dyskretny, uogólniony analityczny model ciągły).

W przypadku metody statystycznej wyznaczania niezawodności zestyków, podstawowym zagadnieniem jest znalezienie takiego rozkładu prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy styczników, którego przebieg funkcji intensywności uszkodzeń ma charakter najbardziej zbliżony do oszacowanego na podstawie wyników uzyskanych z doświadczenia. Najczęściej, empiryczne rozkłady trwałości łączeniowej zestyków styczników aproksymuje się znanymi rozkładami teoretycznymi. Ze względu na długotrwałość i kosztowność pełnych badań trwałościowych łączników, aproksymacji dokonuje się zwykle na podstawie wyników niewielkiej liczby styczników. Korzystając z tych samych danych eksperymentalnych można dojść do różnych wniosków i zależności [56].

Obecny postęp, jaki dokonał się w dziedzinie rozwoju informatyki i możliwości komputerów, pozwolił na eksperymenty symulacyjne. Modele symulacyjne pozwalają na analizę trwałości zestyków, dla których mamy niewiele danych eksperymentalnych lub ich uzyskanie jest kosztowne i długotrwałe. Również, gdy należy uwzględnić losową

zmiennosc niektórych, lub wszystkich wielkości modelu, celowym jest zastosowanie symulacji komputerowej (symulacja Monte Carlo) [24]. Oczywiście opracowanie dokładnego modelu niezawodności zestyków styczników, wymaga również szczegółowej analizy zjawisk fizykochemicznych występujących podczas ich eksploatacji. Poprawność modelu niezawodności układu zestykowego stycznika zależy od właściwego wyboru „parametrów prognozujących”, opisujących proces pogarszania trwałości zestyków oraz od poprawnej analizy ich wpływu na niezawodność [56].

Symulacyjne modele niezawodności zestyków, w których wielokrotnie generowane są zmienne losowe, wymagają wyznaczenia funkcji gęstości prawdopodobieństwa rozkładu dla poszczególnych parametrów, przyjętych jako prognozujące oraz wyznaczenia realizacji zmian tych parametrów prognozujących w funkcji liczby cykli łączeniowych. Wielokrotna symulacja procesów losowych zgodnie z algorytmem modelu pozwala na wyznaczenie niezawodności zestyków styczników. Przeprowadzenie w rzeczywistości tak dużej liczby eksperymentów bardzo często nie byłoby możliwe ze względów ekonomicznych i czasowych.

Symulacyjne modele niezawodności zestyków styczników pozwalają na szybką analizę procesu pogarszania ich właściwości, jak również na opracowanie nowych bardziej niezawodnych łączników.

5. Przegląd stanu wiedzy oraz tendencji rozwojowych w dziedzinie prognozowania trwałości zestyków głównych styczników elektromagnetycznych

5.1. Metoda uproszczonego wyznaczania charakterystyk trwałości łączeniowej niskonapięciowych styczników elektromagnetycznych prądu przemiennego

Charakterystyka trwałości łączeniowej całego stycznika określa w głównej mierze trwałość jego zestyków. W pracy [2] przedstawiono propozycję dotyczącą metody uproszczonego wyznaczania charakterystyk trwałości łączeniowej styczników elektromagnetycznych prądu przemiennego. Autorzy metody zbadali zależność trwałości łączeniowej styczników w określonych, znormalizowanych warunkach środowiskowych od podstawowych parametrów probierczych: wartości prądu łączeniowego, kategorii użytkowania, wartości napięcia łączeniowego, częstości łączeń, względnego czasu pracy.

W powyższej pracy trwałość łączeniową stycznika szacuje się na podstawie współzależność prądu łączeniowego i trwałości łączeniowej stycznika określonej za pomocą zależności:

$$T_e = \left(\frac{a}{I_e} \right)^{\frac{1}{b}}, \quad (5.1)$$

w której: T_e - trwałość łączeniowa (10^6 cykli łączeniowych), I_e - prąd łączeniowy (A), a - współczynnik zawarty w przedziale 4÷400 (odpowiada wartości prądu łączeniowego przy $T_e=10^6$), b - wykładnik potęgowy zawarty w granicach 0,25÷1,1, zależny od rodzaju konstrukcji stycznika określający współczynnik nachylenia prostej AB przedstawionej na rys. 5.1.

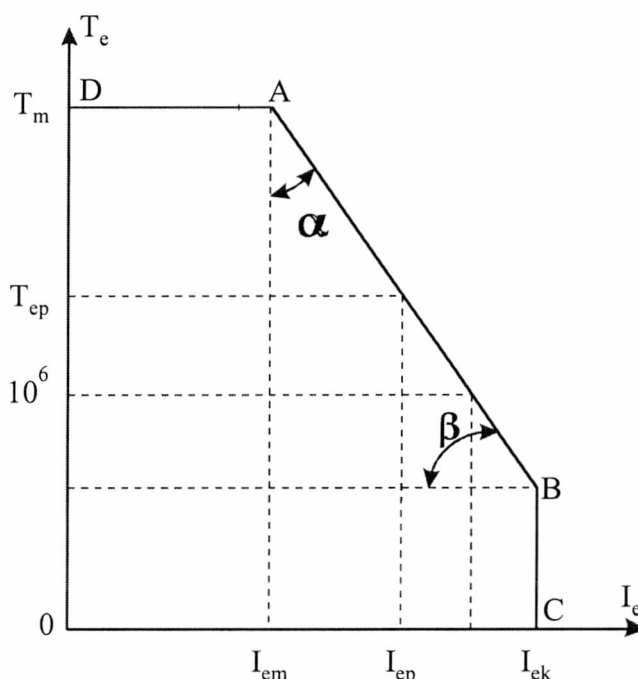
Po obustronnym zlogarytmowaniu równania (5.1) otrzymano:

$$\lg I_e = -b \lg T_e + \lg a. \quad (5.2)$$

Przedstawiając powyższe wyrażenie graficznie w skali podwójnie logarytmicznej o jednakowej podziałce, otrzymano zależność prostoliniową (rys. 5.1), przy czym b przedstawia nachylenie prostej, a znak "-" wskazuje na malejący charakter T_e ze wzrostem I_e . Na podstawie badań statystycznych trwałości styczników powietrznych

stwierdzono, że wartość $b = \tan \alpha$ jest w przybliżeniu stała dla styczników o podobnej konstrukcji i z pewnym uproszczeniem można przyjąć, że $b_{sr} = 0,81 \pm 0,09$ [2].

Analizując charakterystyki trwałości łączeniowej, prezentowane przez różne firmy, stwierdzono niemal jednakowe nachylenie charakterystyk, całych rodzin styczników, przy czym $\alpha = 28^\circ \pm 32^\circ$, średnio 29° . Jest to podstawą hipotezy o możliwości wyznaczenia charakterystyki $T_e = f(I_e)$ przy założeniu znanej wartości b i przy znajomości jednego punktu tej charakterystyki.



Rys. 5.1. Wykreślanie charakterystyki $T_e = f(I_e)$ [2] gdzie: I_{em} - prąd łączeniowy, przy którym zużycie układu stykowo-gaszeniowego jest na tyle małe, że o trwałości łączeniowej decyduje jego trwałość mechaniczna, I_{ek} - prąd łączeniowy, który spełnia warunki:

1. podczas badania dorywczej zdolności łączeniowej przy $I_e = I_{ek}$ wynik jest dodatni ,
2. badanie nagrzewania wykonane podczas pracy stycznika przy określonych kategoriach użytkowania, wartościach napięcia łączeniowego, częstości łączeń, względnego czasu pracy - wykazuje przyrost temperatury w dopuszczalnych granicach.

Przeprowadzone w pracy [2] badania wykazały, że odchylenie kątowe pomiędzy charakterystykami spodziewanymi a rzeczywistymi (średnie wartości trwałości łączeniowej z kilku próbek przy poszczególnych wartościach prądu probierczego) były niewielkie i w tym przypadku wynosiły $1 \pm 3^\circ$.

Powyższa metoda pozwala wyznaczyć rodzinę charakterystyk trwałości styczników dla danego napięcia, częstości łączeń przy minimalnej liczebności próbki 15 styczników [21]. Wyznaczane wartości trwałości są wielkościami średnimi, przy założeniu stałego nachylenia charakterystyki trwałości styczników w funkcji prądu łączeniowego.

Na podstawie charakterystyk trwałości styczników serii SLA i LS podanych przez producenta (rys. 3.1+3.3), nie można wnioskować o stałym nachyleniu charakterystyk trwałości łączeniowej dla każdego typu styczników. Ponadto opisana metoda wymaga wykonania długotrwałych badań trwałości mechanicznej stycznika na próbce o liczebności większej niż 5 sztuk. Dla kategorii AC-3 wymagane jest wyznaczenie granicznego prądu łączeniowego ze względu na dopuszczalny przyrost temperatury (dla 3 sztuk styczników) i dorywczej zdolności łączeniowej stycznika (dla 4 sztuk styczników).

Oczywiście liczebności próbek styczników, na których proponuje się przeprowadzenie poszczególnych badań w celu wyznaczenia określonych punktów charakterystyki $T_e = f(I_e)$ są zbyt małe, aby były to wyniki istotne statystycznie.

Z powyższych przyczyn praktyczne znaczenie tej metody do prognozowania niezawodności zestyków styczników jest znikome.

5.2. Matematyczno-fizyczne modele niezawodności styków styczników niskonapięciowych

Model trwałości styków oparty na statystycznej analizie uszkodzeń spowodowanych kumulacyjnym oddziaływaniem obciążeń przedstawiono w pracy [21].

Przy opracowywaniu modelu przyjęto następujące założenia:

- styki w chwili początkowej są całkowicie jednorodne,
- średnia szybkość zużycia styków jest stała, jej poszczególne realizacje podlegają jedynie zmianom przypadkowym,
- trwałość styków jest warunkowana zmniejszaniem przechyłu styków poniżej określonej granicznej wartości podawanej w dokumentacji technicznej lub zużyciem materiału styków do określonej granicznej wartości,
- podczas pracy łączeniowej stycznika w określonym obwodzie nie występują szczypania styków,
- zużywanie się materiału stykowego jest spowodowane energią wydzielaną w stykach w wyniku procesów łukowych oraz przez prąd płynący podczas pracy łączeniowej.

Wyprowadzono wyrażenie określające funkcję gęstości rozkładu prawdopodobieństwa trwałości styków odpowiadającego rozkładowi gamma, określonego zależnością

$$f(t) = \frac{(t\psi)^{p-1}}{(p-1)!} \psi e^{-\psi t}, \quad (5.3)$$

przy czym

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{M}{\Delta m} & \text{lub} & \quad p = \frac{L}{\Delta l} \\ \psi &= \frac{d}{dt} E[m(t)] & \text{lub} & \quad \psi = \frac{d}{dt} E[l(t)] \end{aligned} \right\}, \quad (5.4)$$

gdzie: ψ, p - parametry rozkładu gamma, $\Delta l, \Delta m$ - elementarny ubytek materiału styków i spadek przechyłu styków, M, L - dopuszczalny ze względu na zużycie zapas materiału styków i przechyłu styków.

Przy założeniu liniowego zmniejszania się przechyłu styków oraz zużycia materiału stykowego w zależności od liczby cykli łączeniowych, można oszacować parametry ψ, p bezpośrednio na podstawie badań skróconych. Nieznane parametry rozkładu gamma można wyznaczyć na podstawie otrzymanych podczas badań zmian przechyłu lub ubytku masy styku z zależności

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{ME[m(t)]}{D^2[m(t)]} & \text{lub} & \quad p = \frac{LE[l(t)]}{D^2[l(t)]} \\ \psi &= \frac{E^2[m(t)]}{\Delta T D^2[m(t)]} & \text{lub} & \quad \psi = \frac{E^2[l(t)]}{\Delta T D^2[l(t)]} \end{aligned} \right\}, \quad (5.5)$$

gdzie: ΔT - czas trwania badań skróconych trwałości styków.

Autorowi nie jest znane praktyczne wykorzystanie tej metody do prognozowania niezawodności styków. Powyższy model nie uwzględnia zjawiska szczepiania styków podczas pracy stycznika, co na pewno ma wpływ na dokładność wyników uzyskanych za pomocą tego modelu.

Inną metodę wyznaczania trwałości styków przedstawiono w pracy [24]. Funkcyjna zależność pomiędzy szukaną wielkością trwałości styków stycznika, a prądem łączeniowym określona jest wzorem

$$\bar{t} = \left(\frac{\bar{I}_1}{I} \right)^{\bar{k}}, \quad (5.6)$$

w której: $\bar{t}$ - średnia trwałość styków (w milionach łączy), $\bar{I}_1$ - średni prąd łączeniowy, przy którym średnia trwałość styków jest równa 1 milion łączy, I - prąd łączeniowy, $\bar{k}$ - średnia wartość współczynnika zależnego od konstrukcji układu stykowego stycznika.

Po zapisaniu zależności (5.6) w konwencji probabilistycznej i porównaniu ze wzorem rozkładu gamma uzyskano zależność pozwalającą wyznaczyć prawdopodobieństwo działania styków stycznika

$$R(t) = 1 - \frac{\Gamma\left(p, \frac{t}{b}\right)}{\Gamma(p)} = 1 - \frac{\Gamma\left(p, t \frac{p}{A} I^{E(k)}\right)}{\Gamma(p)}, \quad (5.7)$$

gdzie: p - parametr rozkładu gamma, A - współczynnik określony zależnością $A = E[I_1]^{E(k)}$. Aby zastosować powyższą zależność do obliczania prawdopodobieństwa poprawnej pracy styków, konieczna jest znajomość oczekiwanej wartości prądu łączeniowego przy trwałości 1 miliona łączy oraz wartości oczekiwanej współczynnika k , które można uzyskać na podstawie wcześniejszych badań dla reprezentatywnej próbki rozpatrywanego typu styczników.

W pracy [45] przedstawiono kumulacyjny model niezawodności styków. Model oparto na założeniu, że dla celów praktycznych zmiany przechyłu styków w zależności od liczby łączy można wyrazić zależnością liniową

$$l(N) = l(0) - \vartheta N, \quad (5.8)$$

w której $l(0), l(N)$ wartość przechyłu styków początkowa i po wykonaniu N łączy, $\vartheta = \frac{dl(N)}{dN}$ - prędkość spadku przechyłu styków. Założono również, że $l(0), \vartheta$ są zmiennymi losowymi niezależnymi od siebie i mają rozkład normalny.

Przy tych założeniach przebieg procesu zużycia styków odpowiada procesowi Gaussa, a prawdopodobieństwo poprawnej pracy styków może być wyznaczone wg zależności, która jest wariancyjnym rozkładem Bernsteina

$$\begin{aligned} R[l(N)] &= P[l(N) > l_{\min}] = 1 - P[l(N) \leq l_{\min}] = \\ &= 0,5 - \Phi\left[\frac{l_{\min} - E[l(N)]}{D(\vartheta)}\right] = 0,5 - \Phi\left[\frac{N - c}{\sqrt{a + bN^2}}\right], \end{aligned} \quad (5.9)$$

przy czym

$$a = \frac{D(\vartheta)}{E^2(\vartheta)}, \quad b = \frac{D[l(0)]}{E^2(\vartheta)}, \quad c = \frac{E[l(0)] - l_{\min}}{E(\vartheta)}, \quad (5.10)$$

w której: $\Phi(x)$ - całka Laplace'a, $E[l(N)]$ - wartość oczekiwana rozkładu przechyłu styków, $D(\vartheta)$ - odchylenie standardowe rozkładu szybkości zmian przechyłu styków, $l_{\min}$ - minimalna wartość przechyłu styków, której osiągnięcie jest równoważne uszkodzeniu styków.

Parametry a, b, c można oszacować zastępując wartość oczekiwaną i wariancję ich estymatorami punktowymi. W pracy [12] podano metodę szacowania parametrów a, b, c rozkładu Bernsteina bezpośrednio na podstawie wartości zużycia uzyskanego podczas badań. Założenia tego modelu nie uwzględniają zjawiska szepiania się styków po przekroczeniu przechyłu granicznego dla danej wartości prądu łączeniowego.

W wyniku analizy badań spadku przechyłu styków i ubytku materiału stykowego stycznych prądu stałego, w pracy [18] przedstawiono metodę prognozowania trwałości styków. Założono, że prędkość zużywania się styków (mierzonego spadkiem przechyłu styków lub ubytkiem materiału stykowego) jest zmienną losową o rozkładzie normalnym. Na podstawie badań stwierdzono, że zależność zużycia styków od liczby cykli łączeniowych jest liniowa.

Przy stałej prędkości zużycia styków trwałość styków można wyznaczyć z zależności

$$N = N_s + \frac{M - E[m(N_s)]}{E(\vartheta_m)} = \frac{N_s M}{E[m(N_s)]}, \quad (5.11)$$

przy czym

$$E(\vartheta_m) = \frac{E[m(N_s)]}{N_s}. \quad (5.12)$$

Z prawdopodobieństwem β można wyznaczyć górną granicę jednostronnego przedziału ufności dla $E[m(N_s)]$ i wyznaczyć trwałość styków

$$N_\beta = \frac{N_s M}{\overline{m(N_s)} + \frac{t_{n-1;\beta}}{\sqrt{n}} s_m}, \quad (5.13)$$

gdzie: N_β - prognozowana z poziomem ufności β trwałość styków, N_s - liczba łączy próby skróconej, M - zapas masy materiału stykowego, $m(N_s)$, s_m - średnia wartość i odchylenie standardowe ubytku masy styków po wykonaniu N_s łączy, $t_{n-1;\beta}$ - kwantyl rozkładu Studenta, n - liczebność próbek.

W przypadku nieliniowej prędkości zużywania się styków [18]

$$m(N) = a \cdot N^b; \quad l(N) = a_c \cdot N^{b_l}, \quad (5.14)$$

prostymi przekształceniami przyjmując za

$$Z = N^b; \quad Z_s = N_s^b, \quad (5.15)$$

otrzymuje się prognozowaną trwałość styków dla procesu nieliniowego zużycia

$$Z = \frac{Z_s M}{\overline{m(N_s)} + \frac{t_{n-1;\beta}}{\sqrt{n}} S_m}. \quad (5.16)$$

Parametry a , b wyznaczyć można metodą graficzną. Po zlogarytmowaniu wzorów (5.14) i (5.15) otrzymujemy zależność

$$\ln m(N) = \ln a + b \ln N = \ln a + \ln Z, \quad (5.17)$$

która jest równaniem prostej w układzie współrzędnych prostokątnych o podziałce logarytmicznej. Parametr b jest współczynnikiem nachylenia prostej. Po przekształceniu równania (5.16) prognozowaną trwałość styków oblicza się z zależności

$$N = N_s \left[\frac{M}{\overline{m(N_s)} + \frac{t_{n-1;\beta}}{\sqrt{n}} S_m} \right]^{\frac{1}{b}}. \quad (5.18)$$

Model został opracowany przy założeniu kumulacyjnego procesu zużywania styków. Powyższa metoda prognozowania trwałości styków styczników prądu stałego nie uwzględnia zjawiska szepiania się styków.

5.3. Matematyczno-fizyczne modele niezawodności zestyków głównych styczników

W pracach [50,52,56] przedstawiono model niezawodności zestyków głównych, opracowany na podstawie analizy zjawisk fizycznych - głównie zjawisk szepiania styków. Opisany model oparty jest na procesie relaksacyjnym oddziaływań obciążeń, w którym prawdopodobieństwo uszkodzenia polegającego na trwałym szepieniu styków występuje od początku eksploatacji i rośnie wraz ze zmniejszaniem się przechyłu

styków. Założono, że proces zmian przechyłu styków jest procesem losowym ziarnistym i może być opisany zależnością

$$l(t) = l(0) - k(t) \Delta l, \quad (5.19)$$

gdzie: $l(0)$, $l(t)$ - przechył styków początkowy i w chwili t , Δl - elementarny spadek przechyłu styków, $k(t)$ - całkowitoliczbowa zmienna losowa równa skumulowanej ilości bodźców procesu zużycia styków powodujących zmianę przechyłu o wartość Δl , przyjmująca wartości z ograniczonego zakresu $k = 0, 1, 2, 3, \dots, z$.

Prawdopodobieństwo zdarzenia, że w przedziale czas $(t, t + \Delta t)$ wystąpi elementarny spadek Δl przechyłu styków jest równe [52]

$$q_1(t) = \lambda \Delta t + o(\Delta t), \quad (5.20)$$

gdzie: λ - średnia intensywność procesu zużycia materiału stykowego, w której

$$\lambda = \frac{1}{\Delta l} \frac{d}{dt} E[l(t)]. \quad (5.21)$$

Prawdopodobieństwo zdarzenia, że w przedziale czas $(t, t + \Delta t)$ wystąpi szepienie styków jest równe

$$q_2 = \varphi[l(t)] \Delta t + o(\Delta t), \quad (5.22)$$

gdzie φ jest funkcją przechyłu określoną zależnością

$$\varphi[l(t)] = \mu_0 + \mu k(t). \quad (5.23)$$

Współczynniki μ_0, μ , można wyznaczyć z zależności:

- dla styków ze sprężynami śrubowymi

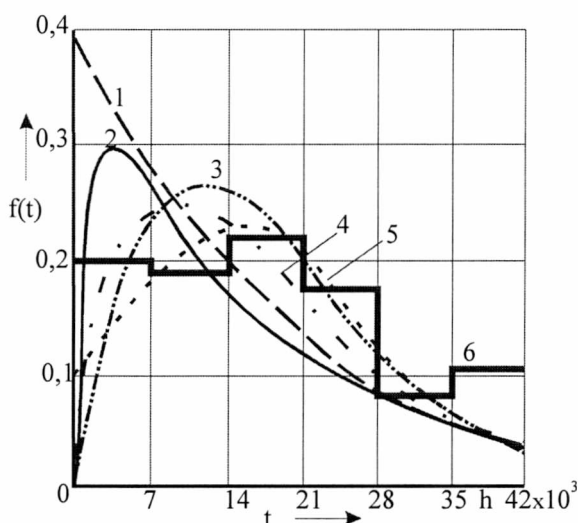
$$\left. \begin{aligned} \mu_0 &= 1 - \frac{c_m^2}{i_u^2} \left[F_w + \frac{c_s l(0)}{z} \right] \\ \mu &= \frac{c_m^2 c_s \Delta l}{z i_u^2} \end{aligned} \right\}, \quad (5.24)$$

- dla styków ze sprężynami płaskimi

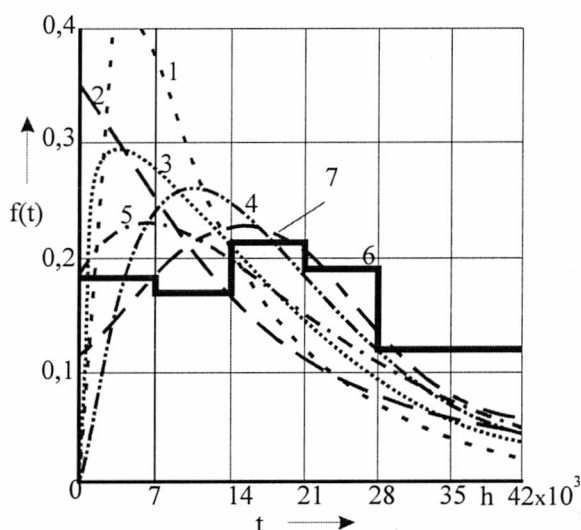
$$\left. \begin{aligned} \mu_0 &= 1 - \frac{c_m^2 c_s' l(0)}{i_u^2} \\ \mu &= \frac{c_m^2 c_s' \Delta l}{i_u^2} \end{aligned} \right\}, \quad (5.25)$$

w których: c_m, c_s, c'_s - współczynniki określone zależnościami podanymi w dalszej części tej pracy, z - liczba zwojów sprężyny śrubowej, i_u - wartość prądu załączeniowego w komutowanym obwodzie elektrycznym zależna od parametrów obwodu probierczego. Oszacowanie nieznanymi parametrów λ, μ, μ_0 można wykonać na podstawie bądź znajomości czasów poprawnej pracy zestyków do uszkodzenia dla próbki n styczników, lub rejestracji spadku względnego przechyłu styków w określonych odstępach czasu i znajomości czasów poprawnej pracy zestyków do uszkodzenia [52].

Na podstawie powyższych zależności opracowano model matematyczno-fizyczny niezawodności stycznika [52] opisany równaniami (5.26) - (5.29) i zweryfikowany danymi eksperymentalnymi [55].



Rys. 5.2. Rozkład empiryczny gęstości uszkodzeń zestyków głównych styczników SV-7 i aproksymujące go rozkłady teoretyczne - [55]
1 - wykładniczy ($r=5,06 \cdot 10^{-5}$); 2 - Weibulla ($a=18000$, $b=1,16$); 3 - gamma ($p=2,19$, $b=9010$); 4 - wg wzoru (5.27) ($\mu_0 = 11,4 \cdot 10^{-6}$, $\mu = 1 \cdot 10^{-4}$, $\lambda = 64,3 \cdot 10^{-6}$); 5 - normalny ($m = 15\,500$, $\sigma = 12\,000$).



Rys. 5.3. Rozkład empiryczny gęstości uszkodzeń zestyków głównych styczników SV-7 wskutek szepienia (6) i aproksymujące go rozkłady teoretyczne - [55]

1 - logarytmonormalny ($m = 9,24$, $\sigma = 0,89$), 2 - wykładniczy ($r = 5,0 \cdot 10^{-5}$); 3 - Weibulla ($a = 18\,000$, $b = 1,19$); 4 - gamma ($p = 2,11$, $b = 9\,401$); 5 - wg wzoru (5.27) ($\mu_0 = 25,3 \cdot 10^{-6}$, $\mu = 1 \cdot 10^{-4}$, $\lambda = 32,6 \cdot 10^{-6}$); 7 - normalny ($m = 15\,800$, $\sigma = 12\,100$)

Dystrybuenta rozkładu trwałości zestyków głównych opisano w tym modelu zależnością

$$F(t) = 1 - \exp \left\{ \frac{\lambda}{\mu} \left[1 - e^{-\mu t} \right] - (\mu_0 + \lambda) t \right\}, \quad (5.26)$$

natomiast jego gęstość zależnością

$$f(t) = \left\{ \mu_0 + \lambda [1 - e^{-\mu t}] \right\} \exp \left\{ \frac{\lambda}{\mu} [1 - e^{-\mu t}] - (\mu_0 + \lambda) t \right\}, \quad (5.27)$$

graficznie przedstawioną na rysunkach od 5.2 do 5.3.

Przedstawiony na rys. 5.2 rozkład empiryczny gęstości uszkodzeń zestyków głównych styczników SV-7 oraz aproksymujące go rozkłady teoretyczne dowodzą, że stwierdzenie statystycznej zgodności rozkładu teoretycznego z rozkładem empirycznym jest warunkiem koniecznym, lecz nie wystarczającym, do przyjęcia danego rozkładu jako modelu niezawodności zestyków styczników [52]. Wybór i uzasadnienie modelu niezawodności zestyków powinno być oparte na analizie uszkodzeń spowodowanych działaniem obciążeń, oraz zachodzących zjawisk w układzie zestykowym występujących podczas eksploatacji stycznika w określonych warunkach (kategorii użytkowania).

W pracy [56] przedstawiono matematyczno-fizyczny model niezawodności zestyków głównych, w którym uwzględniono zjawiska fizyczne zachodzące w układzie zestykowym pod wpływem łączenia prądów. W modelu tym, nazwanym modelem uogólnionym dyskretnym, przyjęto następujące założenia:

- trwałość zestyków jest warunkowana zmniejszaniem się przechyłu styków poniżej minimalnej, dopuszczalnej wartości szepieniem styków, którego prawdopodobieństwo wystąpienia rośnie wraz ze zmniejszaniem się przechyłu styków,
- średnia szybkość zużycia jest stała, poszczególne realizacje podlegają losowym zmianom,
- styczniki w chwili początkowej są całkowicie jednorodne.

Parametrem prognozującym są zmiany przechyłu styków. Zmniejszanie się przechyłu styków w funkcji liczby cykli łączeniowych jest procesem ziarnistym i może być opisany zależnością:

$$l(t) = l(0) - k(t)\Delta l, \quad (5.28)$$

w której: $l(0)$ - przechył początkowy styków, $l(t)$ - przechył w czasie t , Δl - elementarny spadek przechyłu styków, $k=0,1,2,\dots,z$ - liczba bodźców powodujących zmianę przechyłu o Δl . Przy $k=z$ przechył styków osiąga wartość odpowiadającą całkowitemu zużyciu.

Losowe zmiany przechyłu styków $l(t)$ w przedziale czasu Δt są określone prawdopodobieństwem

$$q_l(t) = \lambda \Delta t - o(\Delta t), \quad (5.29)$$

w którym λ jest średnią intensywnością procesu zużycia materiału stykowego.

Wraz ze stopniowym zmniejszaniem się przechyłu styków maleje również wartość siły docisku roboczego układu zestykowego stycznika zgodnie z zależnością

$$F_K(t) = F_0 - c_s[l(0) - l(t)], \quad (5.30)$$

w której: F_0 i $F_K(t)$ są odpowiednio siłą dociskową początkową i po czasie pracy t ,

c_s - stała sprężyn stykowych.

Dla styczników powietrznych, ze sprężynami walcowymi śrubowymi, stała sprężyn stykowych może być wyznaczona z zależności [24]

$$c_s = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D^3 \cdot z} = \frac{F}{f}, \quad (5.31)$$

w której: G - moduł sprężystości postaciowej, d - średnica drutu, D - średnica sprężyny,

z - liczba zwojów sprężyny, F - siła działająca na sprężynę, f - ugięcie sprężyny.

Dla sprężyn w stycznikach powietrznych stała c_s jest rzędu około 2 N/mm.

Dla styczników próżniowych stała sprężyn stykowych określona jest zależnością [56]

$$c'_s = \frac{S_s}{z_s} + \frac{S_m}{z_m}, \quad (5.32)$$

w której: s_s, s_m - stałe sprężyn odciażających i mieszka sprężystego komory próżniowej,

z_s, z_m - liczba zwojów sprężyny odciażającej i mieszka sprężystego.

Stała sprężyn stykowych dla styczników próżniowych ma wartość ponad 10 N/mm.

Jak wykazały badania szepiania styków [41,50,54,56], prąd graniczny, przy którym następuje szepienie styków jest funkcją siły docisku zestykowego, właściwości materiału stykowego, właściwości konstrukcyjno-kinematycznych układu zestykowego i napędowego łącznika. Szepienie styków jest stanem, w którym siła potrzebna do zerwania spoiny styków jest większa od siły zwrotnej w miejscu styczności styków stycznika. Na podstawie empirycznej zależności (5.33) można wyznaczyć wartość graniczną początkowego prądu łączeniowego układu zestykowego, przy którym może wystąpić szepienie styków

$$i_{sg}[l(t)] = c_m \sqrt{F_K(t)}, \quad (5.33)$$

gdzie stałą c_m można wyznaczyć z zależności (2.8).

Na podstawie powyższych związków otrzymano probabilistyczny model niezawodności zestyków określający proces powstawania uszkodzeń zestyków powodowany relaksacyjnym oddziaływaniem obciążeń [60]

$$R_z(t) = \sum_{k=0}^{k_s} \frac{1}{k!} (\lambda t)^k e^{-\lambda t} + \sum_{k=k_s+1}^z \left\{ \frac{\lambda^k}{k_s!} e^{-\lambda t} \left[\sum_{i=0}^{k_s} W_k^i t^i + \sum_{i=1}^{k-k_s} C_k^i e^{-i\mu t} \right] \right\}, \quad (5.34)$$

w której

$$C_k^i = \begin{cases} \frac{C_{k-1}^i}{\mu(k-k_s-i)} & \text{dla } i < k-k_s \\ -W_k^0 - \sum_{j=1}^{k-k_s-1} C_k^j & \text{dla } i = k-k_s \end{cases}, \quad (5.35)$$

$$W_k^i = (-1)^{k_s-1} \frac{k_s!}{i! \mu^{k_s-i+1}}, \quad (5.36)$$

$$k_s = \frac{c_m^2 \cdot F_0 + i_u^2}{c_m^2 \cdot c_s \cdot \Delta l} = \frac{\mu_0}{\mu}, \quad (5.37)$$

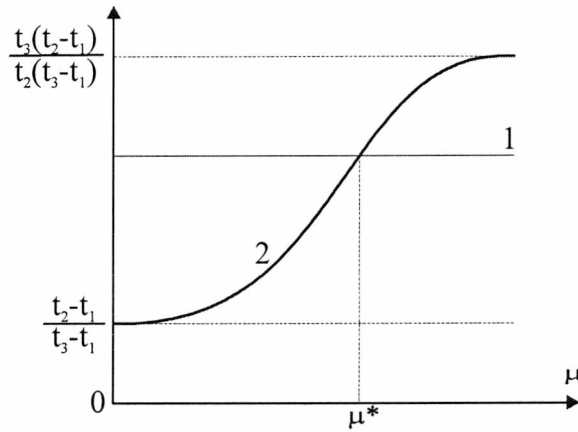
λ, μ, μ_0 - parametry modelu, i_u - wartość szczytowa początkowego prądu łączeniowego w komutowanym obwodzie, k_s - liczba bodźców procesu zużycia styków, od której występuje szepianie styków.

Oszacowanie nieznanych parametrów λ, μ, μ_0 można wykonać na podstawie znajomości czasów poprawnej pracy zestyków do uszkodzenia dla próbki n styczników lub rejestracji spadku względnego przechyłu styków w określonych odstępach czasu i znajomości czasów poprawnej pracy zestyków do uszkodzenia.

W pierwszym przypadku po przekształceniu i zlogarytmowaniu wyrażenia (5.34) otrzymujemy równanie, które pozwala na oszacowanie wartości szukanych parametrów modelu metodą podziału danych empirycznych na grupy [52]. Wyznaczenie estymatora μ^* parametru wymaga numerycznego lub graficznego rozwiązania równania

$$\frac{1 - \exp(\mu^* \tau_1) - \frac{\tau_1}{\tau_2} [1 - \exp(\mu^* \tau_2)]}{1 - \exp(\mu^* \tau_1) - \frac{\tau_1}{\tau_{32}} [1 - \exp(\mu^* \tau_{32})]} = \frac{\ln \frac{n-m_1+1}{n+1} - \frac{\tau_1}{\tau_2} \ln \frac{n-m_2+1}{n+1}}{\ln \frac{n-m_1+1}{n+1} - \frac{\tau_1}{\tau_{32}} \ln \frac{n-m_3+1}{n+1}}, \quad (5.38)$$

gdzie: τ_i - granica górnego i -tego ($i=1,2,3$) przedziału, na które podzielono szereg rozdzielczy $t_{(1)}, t_{(2)}, \dots, t_{(n)}$, m_i - liczba uszkodzonych styczników w i -tym przedziale, n - liczebność próbki badanych styczników. Sposób graficznego rozwiązania równania (5.38) przedstawiono na rys. 5.4. Dla określonych wyników badań prawa strona powyższego równania jest stała (linia oznaczona symbolem 1 na rys. 5.4), lewa strona (krzywa oznaczona symbolem 2) monotonicznie rośnie wraz ze wzrostem μ . Punkt przecięcia prostej z krzywą wyznacza wartość μ^* .



Rys. 5.4. Rozwiązanie graficzne równania 5.38

Po wyznaczeniu wartości μ^* pozostałe parametry modelu oblicza się z następujących wzorów

$$\lambda^* = \mu^* \frac{\ln \frac{n-m_1+1}{n+1} - \frac{\tau_1}{\tau_2} \ln \frac{n-m_2+1}{n+1}}{1 - \exp(\mu^* \tau_1) - \frac{\tau_1}{\tau_2} [1 - \exp(\mu^* \tau_2)]}, \quad (5.39)$$

$$\mu_0^* = \frac{\lambda^*}{\mu^* \tau_1} [1 - \exp(\mu^* \tau_1) - \mu^*] - \frac{1}{\tau_1} \ln \frac{n-m_1+1}{n+1}. \quad (5.40)$$

W drugim przypadku nieznane parametry modelu estymowane są na podstawie rejestracji procesu spadku względnego przechyłu styków [21]. Estymator parametru λ powyższego modelu można wyznaczyć z zależności

$$\lambda^* = \frac{[\overline{\delta(t)}]^p}{\Delta t s_\delta^2}, \quad (5.41)$$

w której

$$\begin{aligned}\overline{\delta(t)} &= \frac{1}{rn} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^r \delta_{ji}(t) \\ s_{\delta}^2 &= \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^r [\delta_{ji}(t) - \overline{\delta(t)}]^2}{n(r-1)},\end{aligned}\quad (5.42)$$

gdzie: $\delta_{ji}(t)$ - względny spadek przechyłu styków j - tego stycznika w i - tym przedziale obserwacji o długości Δt , n - liczba próbki badanych styczników, r - liczba przedziałów obserwacji względnego spadku przechyłu styków. Pozostałe parametry modelu estymowane są zgodnie z zależnościami jak w przypadku pierwszym.

Inny sposób wyznaczenia nieznanymi parametrów rozkładu jest przedstawiony w pracy [56]. Do ich wyznaczenia konieczna jest znajomość stałych materiałowo-konstrukcyjnych układu stykowo-gaszeniowego, początkowej siły docisku stykowego, wartości elementarnego ubytku przechyłu, wartości szczytowej początkowego prądu łączeniowego w komutowanym obwodzie - $c_m; c_s; F_0; \Delta l; i_u$. Następnie zgodnie z zależnościami

$$\lambda = \frac{dE[l(t)]}{\Delta l dt}; \quad \mu = \frac{c_m^2 c_s \Delta l}{i_u^2}; \quad \mu_0 = 1 - \frac{c_m^2 F_0}{i_u^2} \quad (5.43)$$

wyznaczane są parametry λ, μ, μ_0 modelu. Wartości stałych $c_m; c_s; F_0$ wyznacza się jednorazowo dla poszczególnych typów styczników na podstawie badań laboratoryjnych lub danych katalogowych. Wartość szczytową prądu łączeniowego oraz częstość łączeń należy dobrać stosownie do wielkości badanych styczników, odpowiadających określonym znormalizowanym kategoriom użytkowania. Prąd łączeniowy zależy od konfiguracji i parametrów obwodu probierczego.

Estymatory parametrów procesu zużycia zestyków $\Delta l, \lambda$ wyznacza się na podstawie rejestracji zmniejszania się przechyłu styków $l(t)$ mierzonych w odstępach czasu Δt (co określoną liczbę cykli łączeniowych), podczas skróconych badań laboratoryjnych wykonanych na pobranej losowo z bieżącej produkcji próbce styczników.

Jak podano w pracy [56] przy liczbie danych pomiarowych większej od 50, otrzymane wartości estymatorów nie różnią się istotnie od wartości rzeczywistych parametrów niezawodności zestyków.

Powyższe modele niezawodności zestyków głównych uwzględniają zarówno erozyjne zużycie styków, jak również zjawiska szepiania styków. Modele cechują się stosunkowo dużą złożonością i skomplikowanym procesem obliczeniowym, co niewątpliwie utrudnia ich praktyczne zastosowanie. Uproszczenie algorytmu obliczeniowego oraz zwiększenie dokładności modelu można osiągnąć przez wprowadzenie do modelu niezawodności symulacji procesów powstawania uszkodzeń [59].

5.4. Symulacyjny, jednoparametrowy model niezawodności zestyków głównych styczników

Symulacyjny model niezawodności zestyków głównych został opracowany na podstawie analogicznych założeń wejściowych jak uogólniony model dyskretny zestyków [56]. Ponadto przyjęto w nim wynikające z badań laboratoryjnych styczników próżniowych i powietrznych stwierdzenia, że z wystarczającą dla celów praktycznych dokładnością rozkład empiryczny przechyłu styków w danej chwili t można aproksymować rozkładem normalnym o wartości oczekiwanej $E[l(t)]$ i wariancji $D[l(t)]$, których zmiany w funkcji liczby wykonanych łączy można określić za pomocą prostych regresji:

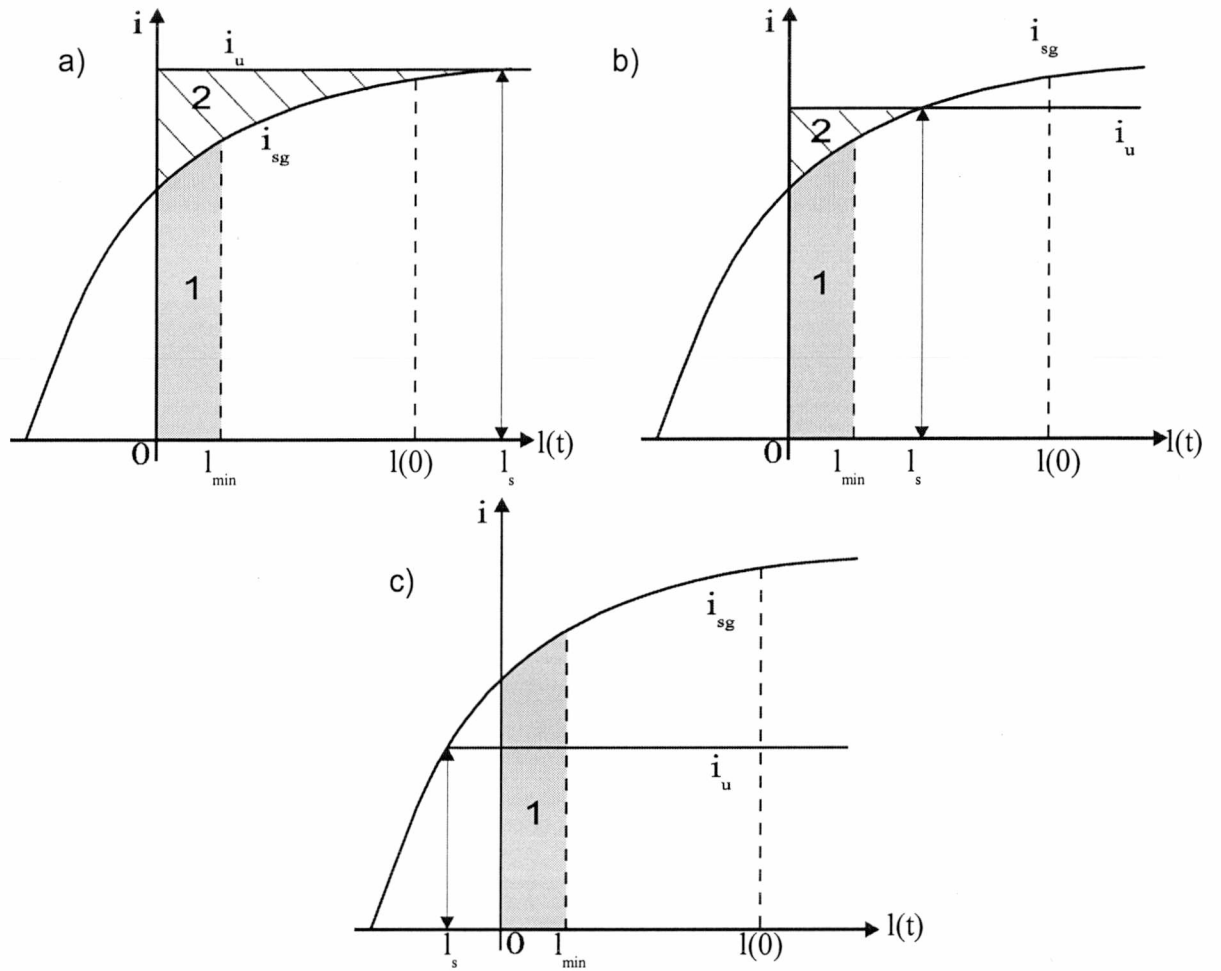
$$\begin{aligned} E[l(t)] &= a_E - b_E \cdot t \\ D[l(t)] &= a_S - b_S \cdot t. \end{aligned} \quad (5.44)$$

Współczynniki prostych regresji wyznaczone są na podstawie skróconych badań laboratoryjnych procesu zużycia styków.

Przy tych założeniach, prawdopodobieństwo procesu powstawania uszkodzeń zestyków powodowane ich zużyciem jest określona zależnością:

$$R(t) = \int_{l_{\min}}^{l(t)_{\max}} f\{l(t), E[l(t)], D[l(t)]\} dl = 1 - \Phi \left\{ \frac{l_{\min} - E[l(t)]}{D[l(t)]} \right\}, \quad (5.45)$$

w której: $f(x)$ jest funkcją gęstości rozkładu normalnego o parametrach $E[l(t)], D[l(t)]$, $\Phi(x)$ - całką Laplace'a, $l(t)_{\max} = E[l(t)] + 3 \cdot D[l(t)]$ jednostronna granica trzysigmowego przedziału ufności dla wartości oczekiwanej przechyłu styków.



Rys. 5.5. Przypadki szczególne powstawania uszkodzeń zestyków głównych stycznika: i_u , i_{sg} - wartość szczytowa początkowego prądu łączeniowego oraz przebieg granicznego prądu szczytowania styków, $l(0)$, l_s , l_{min} - przechył styków początkowy, graniczny i minimalny, 1- zakres występowania nadmiernego zużycia, 2 - obszar występowania niezerowego prawdopodobieństwa szczytowania styków

W modelu tym uwzględnione jest także prawdopodobieństwo powstania uszkodzeń styków w wyniku ich szczytowania się, przy czym wyróżniono trzy charakterystyczne przypadki procesu powstawania tego rodzaju uszkodzeń zestyków [56].

W przypadku przedstawionym na rys. 5.5a niezerowe prawdopodobieństwo trwałego szczytowania styków występuje w całym zakresie eksploatacji stycznika $i_u > i_{sg}$. W drugim przypadku przedstawionym na rys. 5.5c możliwe jest tylko uszkodzenie styków spowodowane zużyciem materiału stykowego $i_u < i_{sg}$. W ogólnym przypadku przedstawionym na rys. 5.5b niezerowe prawdopodobieństwo szczytowania styków występuje przed całkowitym zużyciem styków od chwili zmniejszenia się przechyłu do wartości granicznego przechyłu szczytowania określonej zależnością:

$$l_s = \frac{i_u^2 - c_m^2 [F_0 - c_s l(0)]}{c_s c_m^2}, \quad (5.46)$$

co odpowiada warunkowi $i_u = i_{sg}$.

Trwałość zestyków limitowana jest minimalną wartością spadku przechyłu styków l_{min} , podawaną w dokumentacji technicznej producenta łączników oraz niezerowym prawdopodobieństwem szepienia zestyków, gdy przechył zmniejszy się poniżej wartość graniczną l_s (zależną głównie od wartości szczytowej prądu łączeniowego w komutowanym obwodzie - i_u).

W celu wyznaczenia trwałości zestyków styczników niezbędna jest znajomość:

- szczytowej wartości prądu w komutowanym obwodzie probierczym,
- współczynników prostych regresji wartości średniej oraz odchylenia standardowego zmiany przechyłu styków, wyznaczonych podczas skróconych badań laboratoryjnych,
- stałych konstrukcyjnych i materiałowych układu zestykowego stycznika.

W wyniku n -krotnej symulacji procesu powstawania uszkodzeń otrzymuje się zbiór liczb, odwzorowujących rozkład czasów poprawnej pracy zestyków, na podstawie którego można oszacować wartość wskaźnika niezawodności i ustalić udział zużycia lub szepienia w całkowitej awaryjności badanych zestyków.

Jak wykazują wyniki badań [59] przedstawiony powyżej symulacyjny model zapewnia (spośród wszystkich wówczas dostępnych modeli) najdokładniejsze oszacowanie przebiegu funkcji niezawodności zestyków styczników, a rezultaty obliczeń z zastosowaniem tego modelu proponuje się przyjmować jako bazę odniesienia do oceny wiarygodności innych modeli niezawodności układu zestykowego. Opisany model uwzględnia zmiany tylko jednego parametru prognozującego - przechyłu styków. Dalsze zwiększenie dokładności modelu możliwe jest po uwzględnieniu innych istotnych pod względem niezawodności parametrów układu zestykowego.

6. Wyniki badań trwałości zestyków styczników

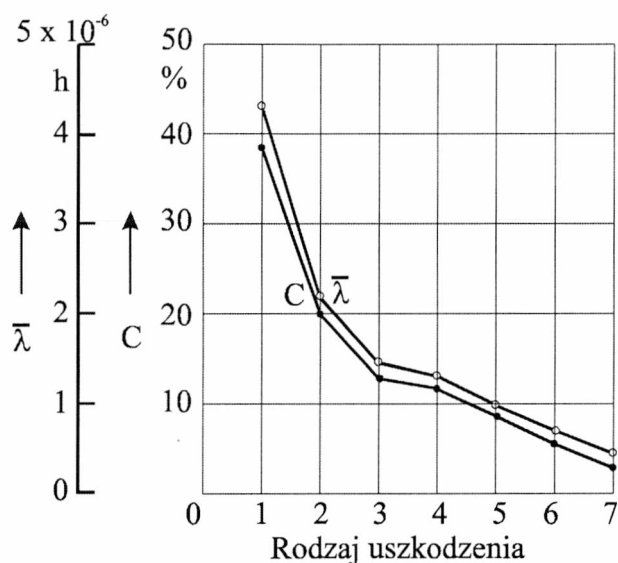
6.1. Dane statystyczne dotyczące trwałości eksploatacyjnej zestyków styczników

W literaturze przedmiotowej można znaleźć tylko nieliczne dane dotyczące eksploatacyjnej niezawodności styczników i ich elementów funkcjonalnych. Spowodowane jest to faktem braku w przemyśle odpowiednich „szużb niezawodnościowych” zajmujących się gromadzeniem danych o trwałości styczników. W większości wypadków styczniki traktowane są jako materiał eksploatacyjny, a nie jako urządzenia. Relatywnie najbardziej obszerne dane statystyczne dotyczą trwałości eksploatacyjnej styczników zainstalowanych w kopalniach rud miedzi i węgla kamiennego.

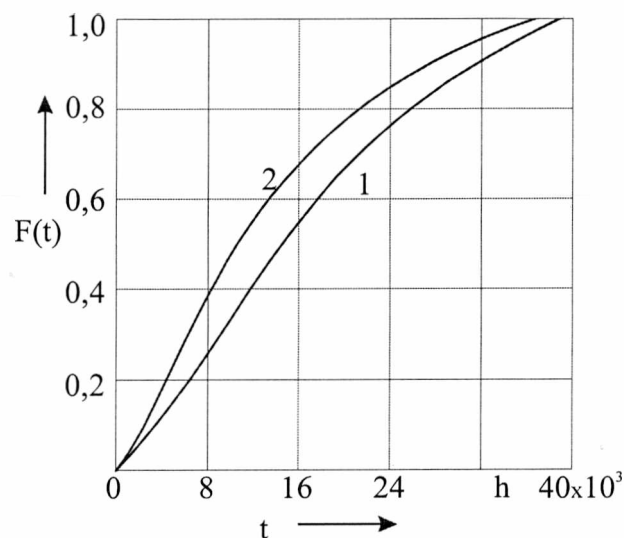
W wyniku badań przeprowadzonych w kopalniach rud miedzi Rudna i Polkowice dla 168 styczników próżniowych typu SV-7 otrzymano dane statystyczne dotyczące rozkładów czasów występowania uszkodzeń dla tych styczników. Badane styczniki były eksploatowane w latach 1978-86 w podziemiach kopalń rud miedzi [55]. Powyższe styczniki sterowały pracą silników elektrycznych typu SzDC 156d o mocy 160 kW, zainstalowanych w układach napędowych przenośników taśmowych i wykonywały przeciętnie 3 łączenia na godzinę, w warunkach ruchowych odpowiadających warunkom mieszanym w kategorii użytkowania AC-3 i AC-4. Każde uszkodzenie stycznika powodowało postój awaryjny przenośnika taśmowego, wymianę uszkodzonego stycznika na nowy i odnotowanie tego faktu w książce raportowej.

Na rys. 6.1 przedstawiono opracowane wyniki badań częstości występowania określonych uszkodzeń zainstalowanych styczników w funkcji ich rodzaju. Z analizy procesu powstawania uszkodzeń styczników oraz zebranych danych statystycznych awaryjności łączników próżniowych typu SV-7 wynika, że 67,2% całkowitej liczby uszkodzeń przypada na układ stykowo-gaszeniowy (uszkodzenia spowodowane szczepieniem styków oraz zużyciem nakładek styków głównych). Uszkodzenie układu napędowego wystąpiło w 18% wszystkich przypadków uszkodzeń, a w 12,1% nastąpiło uszkodzenie układu izolacyjno-konstrukcyjnego. Uszkodzenia pozostałych elementów stycznika nie przekraczają 3% ogólnej liczby uszkodzeń. Dominującym efektem końcowym uszkodzeń układu stykowo-gaszeniowego styczników próżniowych

są przypadki szepienia styków - w ponad 60%. Zużycie nakładek stykowych stanowi około 30% wszystkich awarii wspomnianego układu.



Rys. 6.1. Częstość C oraz intensywność średnia $\bar{\lambda}$ występowania uszkodzenia styczników SV-7 w funkcji rodzaju uszkodzenia: 1 - szepienie styków głównych; 2 - zużycie nakładek styków głównych; 3 - spalenie cewki układu napędowego; 4 - uszkodzenia mechaniczne; 5 - pęknięcie komory próżniowej; 6 - spalenie prostownika; 7 - uszkodzenie styków pomocniczych [55]



Rys. 6.2. Przebiegi empiryczne dystrybucji rozkładu czasów występowania uszkodzeń $F(t)$ zestawów głównych styczników próżniowych SV-7: 1 - szepienie styków; 2 - zużycie nakładek stykowych (opracowano na podstawie [55])

Przedstawiony w pracy [55] empiryczny przebieg dystrybucji rozkładu czasów występowania uszkodzeń $F(t)$ zestawów głównych styczników próżniowych w wyniku szepienia styków (rys. 6.2 krzywa „1”) ma bardzo zbliżony przebieg z dystrybucją uszkodzeń, spowodowanych nadmiernym zużyciem nakładek stykowych stycznika (krzywa „2” na rys. 6.2). Może to być uznane za jeszcze jeden dowód dominującego wpływu uszkodzeń zużyciowych styków na trwałość zarówno styków jak i całego stycznika.

Powyższe fakty pozwalają wysunąć wniosek o konieczności budowy modelu niezawodności zestawów styczników w oparciu o analizę zjawisk fizycznochemicznych zachodzących podczas erozyjnego zużycia nakładek stykowych, jak również mechanizmu powstawania trwałego szepienia styków [55].

6.2. Wyniki laboratoryjnych badań trwałości zestyków styczników

W dostępnej literaturze można znaleźć nieliczne wyniki laboratoryjnych badań trwałości łączeniowej styczników przeprowadzanych w znormalizowanych warunkach probierczych. Fakt ten można wytłumaczyć kosztownością i czasochłonnością badań trwałościowych styczników. W poniższym rozdziale przedstawiono analizę wyników kilkunastoletnich badań układów zestyków styczników (trwałości łączeniowej styczników), zarówno własnych jak i przedstawionych w innych pracach.

W Instytucie Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej wykonano badania parametrów charakteryzujących trwałość próżniowych układów stykowo-gaszeniowych. Badania przeprowadzono na próbce 18 komór próżniowych typu VK-7 i 12 komór typu VK-5 [56]. W obwodzie probierczym odpowiadającym warunkom kategorii użytkowania AC-1 o parametrach przedstawionych w tabeli 6.1 dokonywano serii pomiarów wybranych parametrów kontrolnych co 20 tysięcy cykli łączeniowych.

Tabela 6.1. Parametry obwodu probierczego do badań trwałości styczników [56]

Typ stycznika	SV-5, SV-7
Prąd probierczy, [A]	180
Napięcie probiercze, [V]	380
Współczynnik mocy obwodu	0,95
Częstość łączeń, [łączeń/h]	600

Na podstawie analizy fizyki procesów powstawania uszkodzeń układów zestykowych, wytypowano do badań rozpoznawczych następujące parametry mechaniczne i elektryczne określające stan stycznika: przechyl styków l , rozwarcie styków d , docisk zestykowy F , erozyjny ubytek materiału stykowego Δl , liczbę l_{od} i czas trwania odskoków styków t_{od} , rezystancję zestykową R_z , prąd upływności izolacji I_{up} oraz prądy ucięcia $\bar{I}_{u\max}$, $\bar{I}_{u\min}$.

W wyniku badań całej próbki komór próżniowych prowadzonych przez ponad 5 lat otrzymano w każdej serii pomiarowej od kilkuset do kilku tysięcy danych zapewniając stosunkowo dużą dokładność oszacowania zmian kontrolowanych parametrów.

Z analizy pracy [56] wynikają następujące wnioski:

1. Rozkłady empiryczne kontrolowanych parametrów cechuje znaczny rozrzut losowy wartości, istnieje jednak duża porównywalność wyników badań poszczególnych typów komór próżniowych.
2. Wartości średnie rozpatrywanych parametrów wykazują istotne liniowe zależności korelacyjne z liczbą cykli łączeniowych, z wyjątkiem prądu upływności izolacji międzystykowej I_{up} oraz liczby odskoków styków I_{od} powstających podczas załączania stycznika w stanie bezprądowym. Ponadto prąd I_{up} wykazuje silną nieregularną zależność od temperatury.
3. Spośród kontrolowanych parametrów największą informatywność posiadają parametry typu mechanicznego: liniowy ubytek erozyjny Δl , przechył l oraz odstęp międzystykowy d .
4. Integralna pojemność informatywna liniowego ubytku erozyjnego Δl oraz przechyłu styków l jest duża i porównywalna z kombinacją kontrolowanych parametrów.

Analiza korelacji pomiędzy poszczególnymi parametrami a liczbą cykli łączeniowych dla obu układów zestyków pozwala wyznaczyć te parametry, które najpełniej opisują proces pogarszania się trwałości łączeniowej zestyków styczników w funkcji łączy. Jako główne kryterium przydatności danego parametru opisującego stan stycznika można przyjąć możliwie dużą i stabilną wartość współczynnika korelacji r_{ij} pomiędzy liczbą cykli łączeniowych N a danym parametrem mierzalnym.

W tabeli 6.2 podano współczynniki korelacji r_{ij} pomiędzy wybranymi mierzonymi parametrami dla próżniowych komór typu VK.

Tabela 6.2. Wybrane współczynniki korelacji r_{ij} między kontrolowanymi parametrami układów stykowych próżniowych komór gaszeniowych typu VK-5, VK-7 [56]

Parametr kontrolowany	Liczba cykli łączeniowych N		Przechył styków l		Docisk zestykowy F		Rozwarcie styków d		Czas odskoków t_{od}	
	VK5	VK7	VK5	VK7	VK5	VK7	VK5	VK7	VK5	VK7
l	-0,96	-0,93	-----	-----	0,93	0,87	-0,84	-0,67	0,59	0,71
F	-0,93	-0,89	0,93	0,87	-----	-----	-0,86	-0,52	-0,64	-0,65
d	0,83	0,67	-0,84	-0,67	-0,86	-0,52	-----	-----	0,62	0,31
t_{od}	0,60	0,72	0,59	0,71	-0,64	-0,65	0,62	0,31	-----	-----

W oparciu o uzyskane wyniki badań komór próżniowych typu VK-7 i VK-5, analogicznie do wcześniejszych modeli niezawodności zestyków styczników w dalszym ciągu pracy [56], przyjęto za parametr prognozujący przechyl styków l .

W niepublikowanym opracowaniu [40] podano wyniki przeprowadzonych w OBR ORAM badań trwałościowych okresowych o charakterze statystycznym 242 styczników SLA 7-II, SLA 12-II, SLA 16-II, SLA 32, SLA 63, SLA 85. Badania wymienionych styczników przeprowadzono w roku 1994 zgodnie z wymogami norm PN-92/E-06150/41, PN-92/E-06150/51 z uwzględnieniem parametrów podanych w Karcie Wyrobu KW-77/A2-04-001.

Styczniki poddano badaniom wg programu obejmującego między innymi:

- pomiar przechyłu styków głównych,
- pomiar napięć przyciągania i odpadania zwory elektromagnesu napędowego,
- pomiar docisku zestykowego roboczego,
- pomiar niejednoczesności zamykania styków głównych,
- pomiar czasów trwania odskoków sprężystych styków głównych,
- sprawdzanie trwałości łączeniowej w kategorii AC-3 i AC-4,
- sprawdzanie dorywczej zdolności łączenia.

Badania trwałości łączeniowej torów głównych styczników typoszeregu SLA wykonano zgodnie z normą [32] przy napięciu $U_e=380V$ w kategorii AC-3 i AC-4. Badania trwałości łączeniowej dla kategorii AC-3 prowadzono na próbce o liczebności po 3 łączniki dla każdego typu styczników SLA. W kategorii użytkowania AC-4 badania trwałości łączeniowej prowadzone były na próbce o liczebności 12 styczników z danego typoszeregu SLA. Wszystkie badania trwałości prowadzono do momentu uszkodzenia ostatniego stycznika lub do całkowitego zużycia nakładek stykowych.

W tabeli 6.3 podano zestawienie przyczyn poszczególnych rodzajów uszkodzeń badanych styczników w kategorii AC-4, natomiast w tabeli 6.4 - częstości występowania tych uszkodzeń.

Podczas badań, aż dla 75% wszystkich badanych styczników SLA 7-II, odnotowano przypadki upalenia mostka styku ruchomego, mogące świadczyć o zbyt dużym obciążeniu prądowym zestyków przypisanym przez producenta tego typu stycznikom.

Tabela 6.3. Klasyfikacja przyczyn uszkodzeń badanych styczników w kategorii AC-4

Kod uszkodzenia w kategorii AC-4 użyty w tabeli 6.4	Przyczyny uszkodzeń i → rezultat końcowy dla styczników badanych w kategorii AC-4
1	Całkowite zużycie nakładek styków → szczenie
2	Całkowite zużycie nakładek styków
3	Odpadnięcie nakładki styków → szczenie
4	Szczenie styków
5	Upalenie mostka
6	Zwarcie poprzez zwoję elektromagnesu

Tabela 6.4. Liczba uszkodzeń danego rodzaju styczników typoszeregu SLA w kategorii AC-4

Kody uszkodzeń styczników zgodnie z tab. 6.3	SLA 7-II	SLA 12-II	SLA 16-II	SLA 32	SLA 63	SLA 85	SLA łącznie
1	3	3	4	7	1	0	25,00%
2	0	6	8	5	11	8	52,78%
3	0	1	0	0	0	0	1,39%
4	0	1	0	0	0	1	2,78%
5	9	0	0	0	0	2	15,28%
6	0	1	0	0	0	1	2,78%
Razem	12	12	12	12	12	12	100%

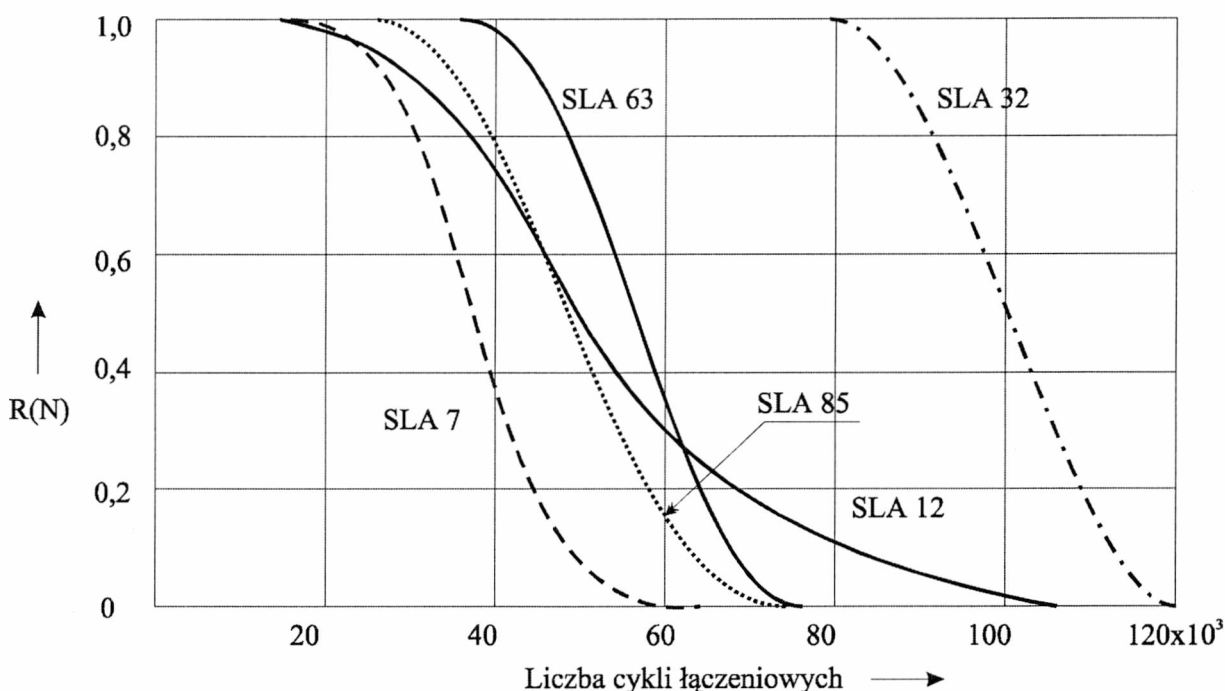
Jak wynika z analizy przeprowadzonych badań, główną przyczyną uszkodzeń badanych styczników w kategorii AC-4 występujących w około 78% wszystkich uszkodzeń było całkowite zużycie nakładek stykowych styków ruchomych, które w konsekwencji w 25% wszystkich przypadków spowodowało szczenie styków.

Przy użyciu programu Statistica for Windows, stosując statystykę d Kołmogorowa-Smirnowa na poziomie ufności $\beta=0,95$ stwierdzono w rozprawie, że trwałość łączeniową styczników w kategorii użytkowania AC-4 można opisać rozkładami teoretycznymi o parametrach przedstawionych w tabeli 6.5. Empiryczny rozkład trwałości łączeniowej badanych styczników SLA aproksymowanych poszczególnymi teoretycznymi rozkładami przedstawiono na rys. 6.4.

Tabela 6.5. Parametry rozkładu gamma, logarytmnormalnego i normalnego, jakimi aproksymowano empiryczne wyniki badań trwałości łączeniowej w kategorii AC-4 dla styczników SLA, przedstawione na rysunku 6.4 (dla rozkładu gamma na rysunku 6.3 przedstawiono również przebiegi prawdopodobieństwa poprawnej pracy łączeniowej)

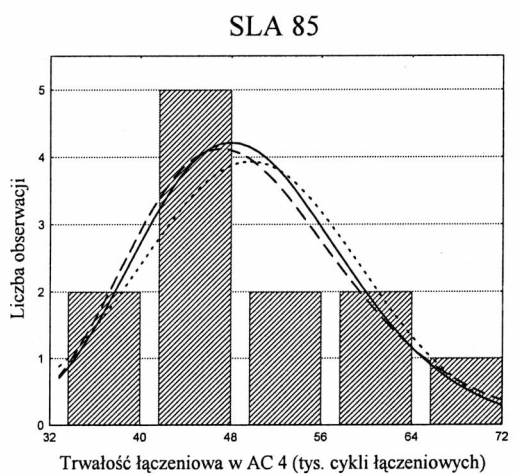
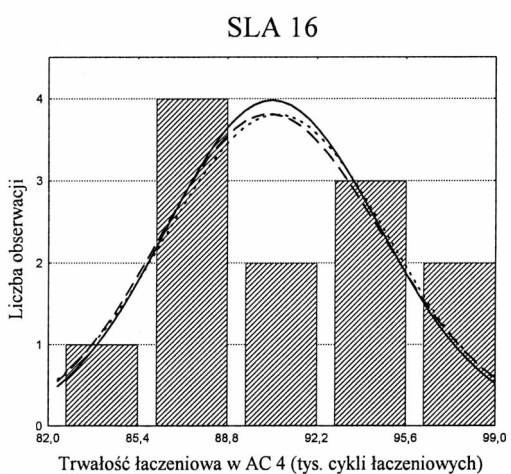
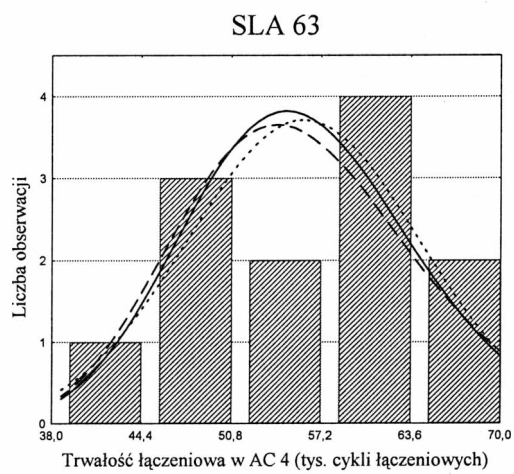
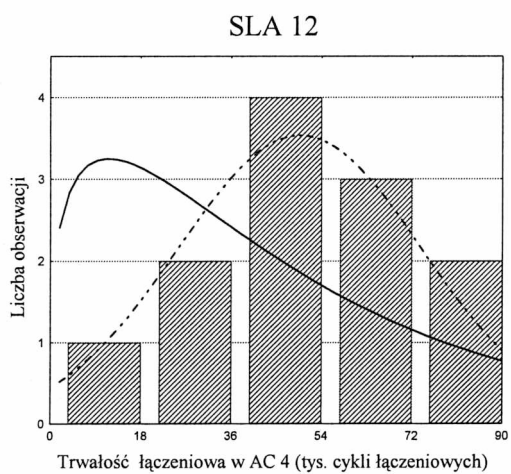
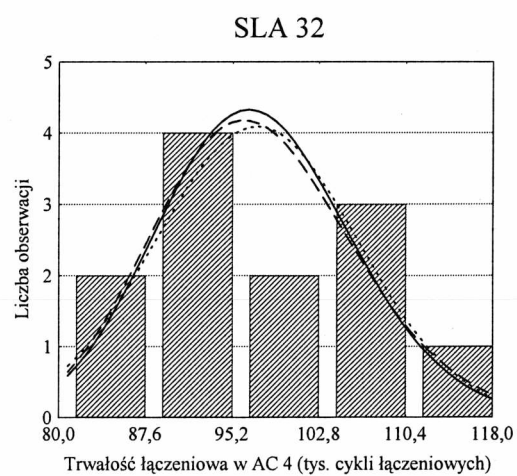
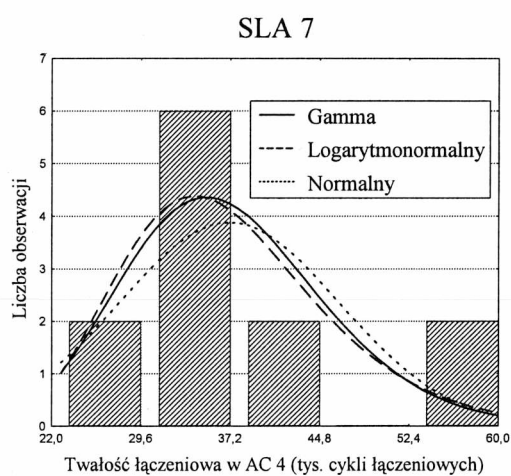
Parametry rozkładu		SLA 7-II	SLA 12-II	SLA 16-II	SLA 32	SLA 63	SLA 85
GAM	kształtu - p	1,96	36,93	0,185	0,73	1,68	1,7
	szczytu - b	18,97	1,35	490,97	133,31	47,89	29,2
LNOR	średnia - μ	3,95	-	4,51	4,57	4,01	3,89
	wariancja - σ	0,056	-	0,002	0,008	0,023	0,037
NOR	średnia - μ	37,07	49,65	90,67	97,33	55,92	49,67
	wariancja - σ	87,92	563,95	18,24	79,15	68,08	94,67

Ponieważ jak wykazuje analiza literatury przedmiotowej [21,24], najczęściej spotykanym modelem statystycznym trwałości łączeniowej jest rozkład gamma, na rys. 6.3 przedstawiono przebiegi prawdopodobieństwa poprawnej pracy łączeniowej dla poszczególnych typów badanych styczników SLA w kategorii użytkowania AC-4, w funkcji liczby cykli łączeniowych, aproksymowanych rozkładami gamma.



Rys. 6.3. Przebiegi prawdopodobieństwa poprawnej pracy łączeniowej styczników serii SLA pracujących w kategorii użytkowania AC-4 (rozkład empiryczny trwałości łączeniowej aproksymowany na poziomie ufności $\beta = 0,95$ rozkładem gamma)

Jak wynika z analizy rys. 6.4 otrzymane wyniki badań trwałości łączeniowej w kategorii AC-4 z zakładanym poziomem ufności można aproksymować za pomocą przynajmniej trzech wyżej wymienionych rozkładów teoretycznych.



Rys. 6.4. Histogramy rozkładu trwałości łączeniowej stycznych SLA w kategorii AC-4 aproksymowanych rozkładami: gamma, logarytmnormalnym, normalnym z poziomem ufności 0,95 o parametrach podanych w tabeli 6.5

Udostępnione autorowi przez OBR ORAM niepublikowane wyniki obszernych, trwających kilka lat badań trwałościowych o charakterze statystycznym, dotyczące kategorii użytkowania AC-3 zostały przedstawione w załączniku niniejszej rozprawy (rozdział 12.1). Badania przeprowadzono na próbce 121 styczników (tabela 6.6) typoszeregu SLA w latach 1991÷1997, zgodnie z wymogami norm z uwzględnieniem parametrów podanych w Karcie Wyrobu KW-77/A2-04-001.

Każdy stycznik poddano badaniom wg programu analogicznego jak dla badań trwałościowych uprzednio omówionych, przedstawionych w opracowaniu [40].

Tabela 6.6. Liczba styczników badanych pod względem trwałości łączeniowej w kategorii AC-3 w poszczególnych latach

Rok produkcji	SLA 7-II	SLA 12-II	SLA 16-II	SLA 32	SLA 63	SLA 85	SLA łącznie
1991	12	8	7	3	3	0	33
1992	3	3	3	3	3	3	18
1993	3	3	3	0	3	3	15
1994	3	3	3	3	3	0	15
1995	3	3	3	3	3	3	18
1996	3	3	3	0	3	3	15
1997	2	3	2	0	0	0	7
Razem	29	26	24	12	18	12	121

Klasyfikację występujących przyczyn i skutków uszkodzeń badanych styczników przedstawiono w tabeli 6.7, natomiast w tabeli 6.8 podano liczbę styczników danego typoszeregu, które uległy poszczególnym z wyodrębnionych uszkodzeń.

Spośród przyczyn mających decydujący wpływ na trwałość układu zestykowego należy wymienić całkowite zużycie nakładek stykowych (kody 1,2 według tabeli 6.7), które wystąpiło w około 64% wszystkich badanych styczników. Dla około 62% styczników, dla których przyczyną uszkodzenia było całkowite zużycie nakładek stykowych skutkiem końcowym stanu niezdatności było definitywne szepienie styków.

Uszkodzenia układu napędowego stycznika i uszkodzenia mechaniczne układu izolacyjno-konstrukcyjnego badanych styczników (kody od 8 do 11 według tabeli 6.7), stanowią około 13% ogólnej liczby uszkodzeń.

Tabela 6.7. Klasyfikacja przyczyn uszkodzeń badanych styczników w kategorii AC-3

Kod uszkodzenia w kat. AC-3 używany w tabeli 6.8	Przyczyny uszkodzeń i → rezultat końcowy dla styczników badanych w kategorii AC-3
1	Całkowite zużycie nakładek styków → szepienie
2	Całkowite zużycie nakładek styków
3	Odpadnięcie nakładki styków → szepienie
4	Odpadnięcie nakładki styków → upalenie mostka, przerwa
5	Szepienie styków
6	Upalenie mostka
7	Upalenie mostka → szepienie
8	Wypadnięcie zwoju zwartego → zablokowanie trawersy
9	Pęknięcie korpusu
10	Przerwa w uzwojeniach cewki, urwanie wyprowadzenia cewki
11	Odkręcenie wkrętu mocującego styk stały

Tabela 6.8. Liczba uszkodzeń danego rodzaju styczników typoszeru SLA badanych w kategorii AC-3

Kody uszkodzeń styczników zgodnie z tabelą 6.7	SLA 7-II	SLA 12-II	SLA 16-II	SLA 32	SLA 63	SLA 85	SLA łącznie
1	11	15	11	1	10	0	39,67%
2	3	2	1	8	5	10	23,97%
3	5	2	7	0	1	0	12,40%
4	2	1	1	0	0	0	3,31%
5	2	1	3	0	0	0	4,96%
6	2	0	0	0	0	0	1,65%
7	1	0	0	0	0	0	0,83%
8, 9, 10, 11	3	5	1	3	2	2	13,22%
Razem	29	26	24	12	18	12	100%

Stosując statystykę d Kołmogorowa-Smirnowa stwierdzono, że trwałość łączeniową styczników w kategorii użytkowania AC-3 można opisać rozkładami teoretycznymi o parametrach przedstawionych w tabeli 6.9. Histogramy rozkładu trwałości łączeniowej oraz aproksymujące je rozkłady teoretyczne przedstawiono na rys. 6.5.

Tabela 6.9. Parametry rozkładów teoretycznych jakimi aproksymowano empiryczne wyniki badań trwałości łączeniowej w kategorii AC-3 dla styczników SLA, przedstawione na rys. 6.5

Parametry rozkładów		SLA 7-II	SLA 12	SLA 16	SLA 32	SLA 63	SLA 85
GAM	kształtu - p	2,37	1,75	1,86	19,60	16,89	21,59
	szczytu - b	0,0051	0,0029	0,0038	0,0144	0,0139	0,0164
EXP	lambda - b	0,00076	0,00083	0,00073	0,00205	0,00163	0,00215
NOR	średnia - μ	465,5	611,6	487,92	1362,9	1211,9	1317,9
	wariancja - σ	90242	153730	110921	816203	76150	98369
LNOR	średnia - μ	5,91	6,10	5,90	7,19	7,07	7,16
	wariancja - σ	0,55	0,97	0,79	0,66	0,71	0,05

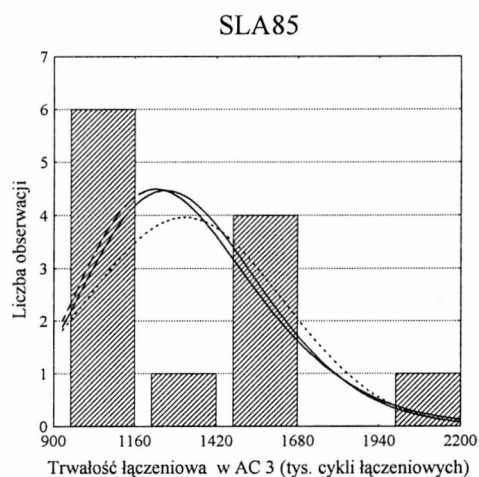
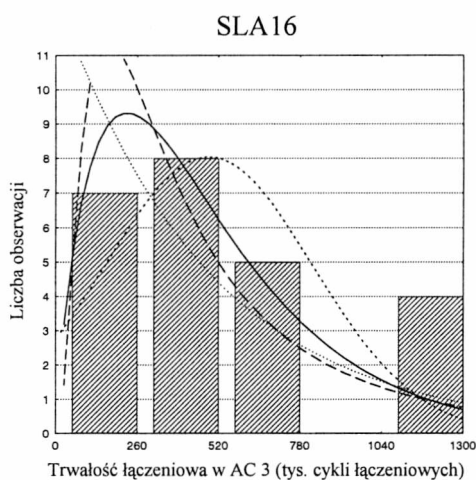
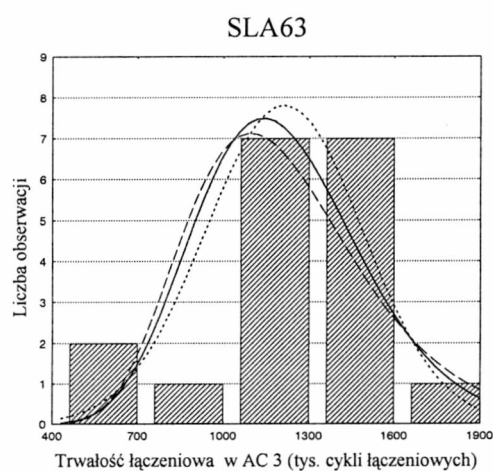
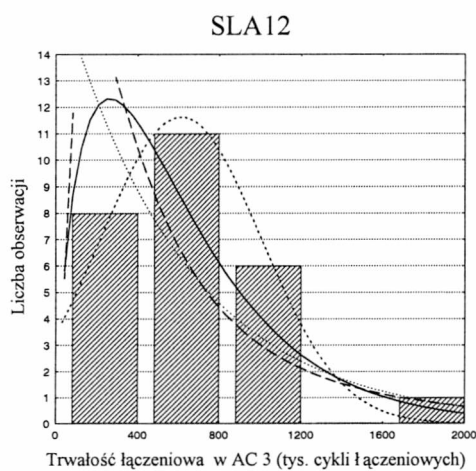
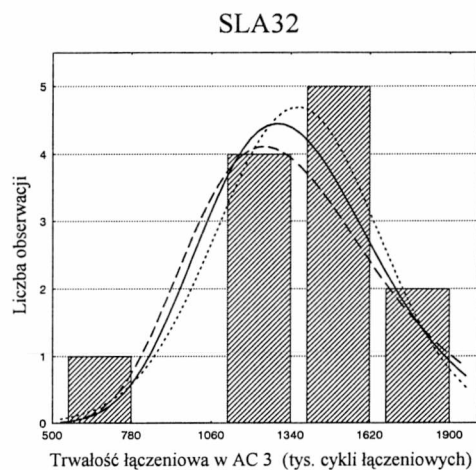
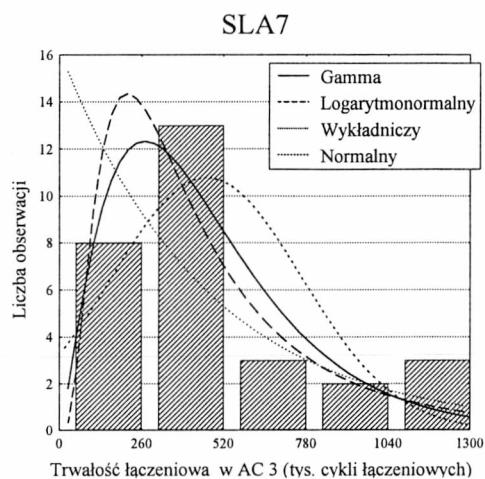
Na podstawie analizy powyższych badań można stwierdzić, że podstawowym zespołem funkcjonalnym warunkującym trwałość łączeniową całego stycznika, niezależnie od rodzaju jego budowy jest układ zestkowo-gaszeniowy.

Wyniki badań uzasadniają celowość budowy modelu niezawodności układu zestkowego stycznika w oparciu o proces zużywania się nakładek stykowych (tabela 6.10).

Tabela 6.10. Łączne zestawienie przyczyn uszkodzeń badanych styczników w kategoriach AC-3 i AC-4 i uzyskanych średnich trwałości badanych styczników

Badania trwałości styczników dla kategorii użytkowania	Średnia trwałość [tyś. cykli łączeniowych]	Przyczyny uszkodzenia badanych styczników przypadające na układ zestkowy spowodowane:				Inne przyczyny uszkodzenia styczników
		zużyciem nakładek stykowych	odpadnięciem nakładki stykowej	szczepieniem styków	upaleniem mostka	
AC-3	909,63	63,64%	15,71%	4,96%	2,48%	13,22%
AC-4	63,39	77,78%	1,39%	2,78%	15,28%	2,78%

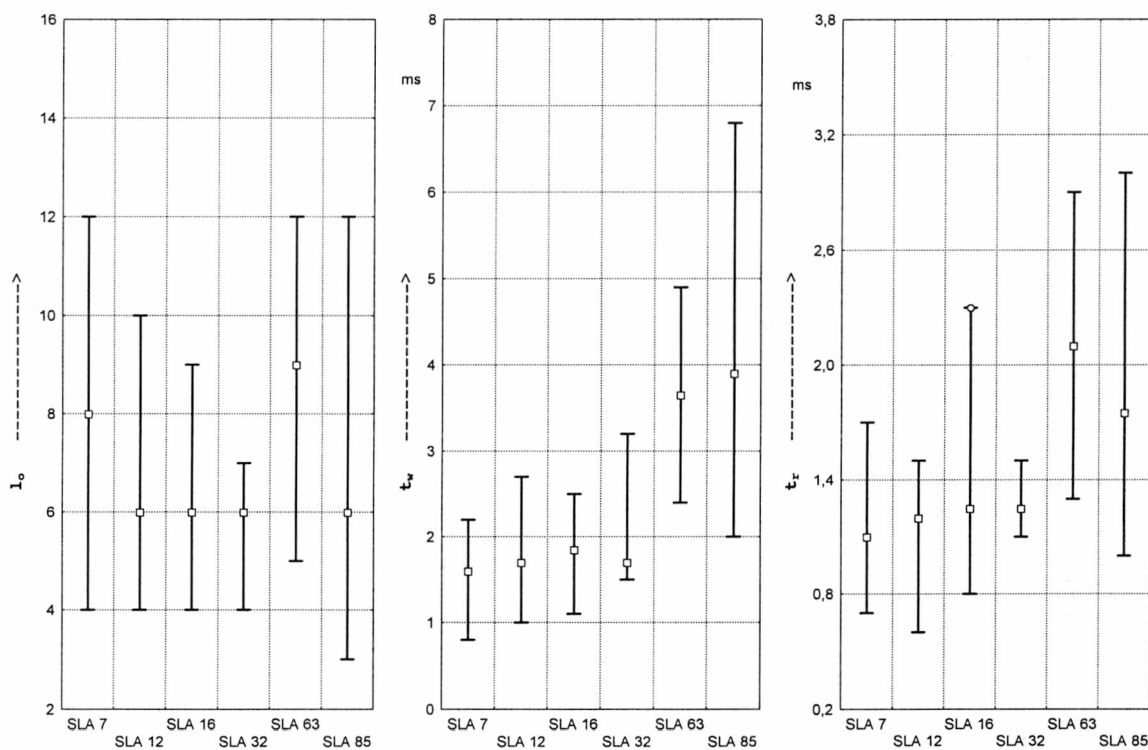
Przedstawione wyniki laboratoryjnych badań trwałości łączeniowej styczników powietrznych zbliżone są do wyników badań eksploatacyjnych styczników próżniowych w kopalniach rud miedzi (rozdział 6.1), gdzie dominującym efektem końcowym uszkodzeń układu stykowo-gaszeniowego styczników próżniowych były przypadki szczepienia styków - w ponad 60%.



Rys. 6.5. Histogramy rozkładu trwałości łączeniowej styczników SLA w kategorii AC-3 aproksymowanych rozkładami: gamma, logarytmonormalnym, wykładniczym, normalnym z poziomem ufności 0,95 o parametrach podanych w tabeli 6.9

Przed badaniami sprawdzającymi trwałość łączeniową styczników, w warunkach bezprądowych przeprowadzono pomiary czasów trwania i występowania odskoków sprężystych oraz ich liczby dla poszczególnych torów prądowych styków głównych badanych łączników. Wartości czasów odskoków sprężystych styków i ich liczby wyznaczono jako średnią z 10 kolejnych pomiarów obliczając ich wartość minimalną, maksymalną i średnią. Maksymalna wartość czasu występowania odskoków sprężystych styków głównych wystąpiła w stycznikach SLA 85 i wynosił 6,8 ms. Obowiązujące normy nie podają dopuszczalnej wartości odnośnie tego parametru.

Na rys. 6.6 przedstawiono liczbę odskoków sprężystych styków (l_o), czasy występowania odskoków styków głównych (t_w) oraz czasy trwania odskoków styków głównych (t_r) dla poszczególnych typów styczników serii SLA badanych w kategorii AC-3. Na wykresach zaznaczono wartość średnią, jak również minimalną i maksymalną dla poszczególnych wielkości.



Rys. 6.6. Liczba odskoków sprężystych (l_o), czas występowania (t_w) oraz czas trwania (t_r) odskoków sprężystych dla poszczególnych typów badanych styczników serii SLA. Na wykresach zaznaczono medianę jak również wartości maksymalne i minimalne poszczególnych wielkości

6.3. *Badania laboratoryjne zmian parametrów prognozujących trwałość łączeniową zestyków styczników*

6.3.1. *Wprowadzenie*

Analiza zjawisk fizykochemicznych oraz badania wstępne wykazały, że wieloparametrowy model niezawodności zestyków styczników można oprzeć na analizie przebiegu wybranych parametrów układu zestykowego w funkcji liczby cykli łączeniowych. Dotychczasowe badania nie obejmowały pomiaru wszystkich parametrów przyjętych jako istotne w opracowanym przez autora modelu. Również fragmentaryczność danych publikowanych w literaturze przedmiotowej dotyczących trwałości łączeniowej układu zestykowego stycznika w funkcji liczby cykli łączeniowych, nie pozwala na ich praktyczne zastosowanie.

Każdy producent styczników zamieszcza w kartach katalogowych charakterystyki trwałości łączeniowej produkowanych łączników. Jednak próby uzyskania danych źródłowych dotyczących trwałości łączeniowej układu zestykowego od producentów styczników kończą się niepowodzeniem. Problem ten wynikać może z faktu, iż:

- ze względu na kosztowność i czasochłonność badań, podmiot posiada niepełne lub nieaktualne dane,
- podmiot nie udostępnia swych danych, gdyż traktuje je jako tajemnicę,
- traktuje swe dane jako dobro handlowe, żądając nierealnych opłat za udostępnienie danych.

W celu udowodnienia tezy rozprawy i weryfikacji opracowanego modelu niezawodności zestyków styczników, przeprowadzono badania wybranych parametrów układu zestykowego w funkcji liczby cykli łączeniowych.

Ponieważ w warunkach laboratoryjnych uczelni nie było możliwe przeprowadzenie badań, autor wykonał je w Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Aparatury Manewrowej w Łodzi, który posiada odpowiednią bazę stanowiskową. Wymagało to przystosowania istniejącego stanowiska badawczego do sprawdzania trwałości łączeniowej styczników do wymogów pomiarów wybranych parametrów układu zestykowego w funkcji liczby cykli łączeniowych.

6.3.2. Metoda badań, opis stanowiska

W OBR ORAM, autor przeprowadził badania laboratoryjne zależności wybranych parametrów prognozujących trwałość łączeniową w funkcji liczby cykli łączeniowych dla pobranych losowo z bieżącej produkcji 14 sztuk styczników typu LS 47.22. Ze względu na możliwości stanowiska probierczego jednocześnie prowadzono badania dla 6 styczników - rys. 6.7. Pomierzono wybrane parametry mechaniczne dla poszczególnych torów prądowych zestyków głównych styczników co 4000 cykli łączeniowych. Odstęp między poszczególnymi seriami pomiarów był podyktowany wymogami metodologicznymi i metrologicznymi. Z jednej strony należało dążyć do jak największej liczby wykonanych pomiarów w celu możliwie wiernego odwzorowania rzeczywistych przebiegów parametrów, z drugiej zaś strony należało zapewnić pomijalność uchybów pomiarowych w porównaniu z występującymi zmianami kontrolowanych parametrów.

Badania - zgodnie z normą PN-92/E-06150/41 (uszczegółowienia w załączniku B powyższej normy) i PN-92/E-06150/51 - wykonano do uszkodzenia pierwszego toru prądowego zestyków głównych w każdym styczniku, bez naprawy lub wymiany części, w warunkach odpowiadających kategorii użytkowania AC-4.

Badania wykonano przy mocy $P_e = 18,5 \text{ kW}$ i napięciu łączeniowym $U_e = 380 \text{ V}$, co odpowiada prądowi $I_e = 37 \text{ A}$.

Parametry obwodu probierczego:

przy załączaniu:

prąd załączania $I_z = 6 I_e = 222 \text{ A } (\pm 5\%)$

napięcie załączania $U_z = 380 \text{ V } (\pm 5\%)$

współczynnik mocy $\cos \varphi = 0,38 (\pm 0,05)$

przy wyłączaniu:

prąd wyłączania $I_w = 6 I_e = 222 \text{ A } (\pm 5\%)$

napięcie wyłączania $U_w = 380 \text{ V } (\pm 5\%)$

współczynnik mocy $\cos \varphi = 0,38 (\pm 0,05)$

Częstość łączy 300 łączy/h

Parametry obwodu probierczego pomierzono amperomierzem klasy 0,2 z przekładnikiem 300/5 oraz napięcie - woltomierzem elektrodynamicznym klasy 0,2. Współczynnik mocy obliczono z pomiarów mocy czynnej i pozornej dla każdej fazy osobno.

Układ RL stanowiący obciążenie badanych styczników przedstawiono na rys. 6.8.

Zakładana trwałość łączeniowa styczników w kategorii AC-4 (według katalogu firmy ELESTER) - około $80 \cdot 10^3$ łączy.

Każdy tor prądowy zestyków głównych styczników, co $4 \cdot 10^3$ łączy poddano badaniom wg programu obejmującego:

- trzykrotny pomiar docisku zestykowego dla każdego toru prądowego,
- trzykrotny pomiar przechyłu styków głównych dla każdego toru prądowego,
- pomiar niejednoczesności zamykania zestyków głównych (na podstawie 10 pomiarów wyznaczono wartość minimalną, średnią i maksymalną),
- pomiar czasów trwania odskoków sprężystych zestyków dla każdego toru prądowego (na podstawie 10 pomiarów wyznaczono wartość minimalną, średnią i maksymalną),
- pomiar czasów występowania odskoków sprężystych zestyków dla każdego toru prądowego (na podstawie 10 pomiarów wyznaczono wartość minimalną, średnią i maksymalną),
- pomiar liczby odskoków sprężystych zestyków głównych dla każdego toru prądowego (na podstawie 10 pomiarów wyznaczono wartość minimalną, średnią i maksymalną),
- sprawdzanie trwałości łączeniowej w kategorii AC-4.

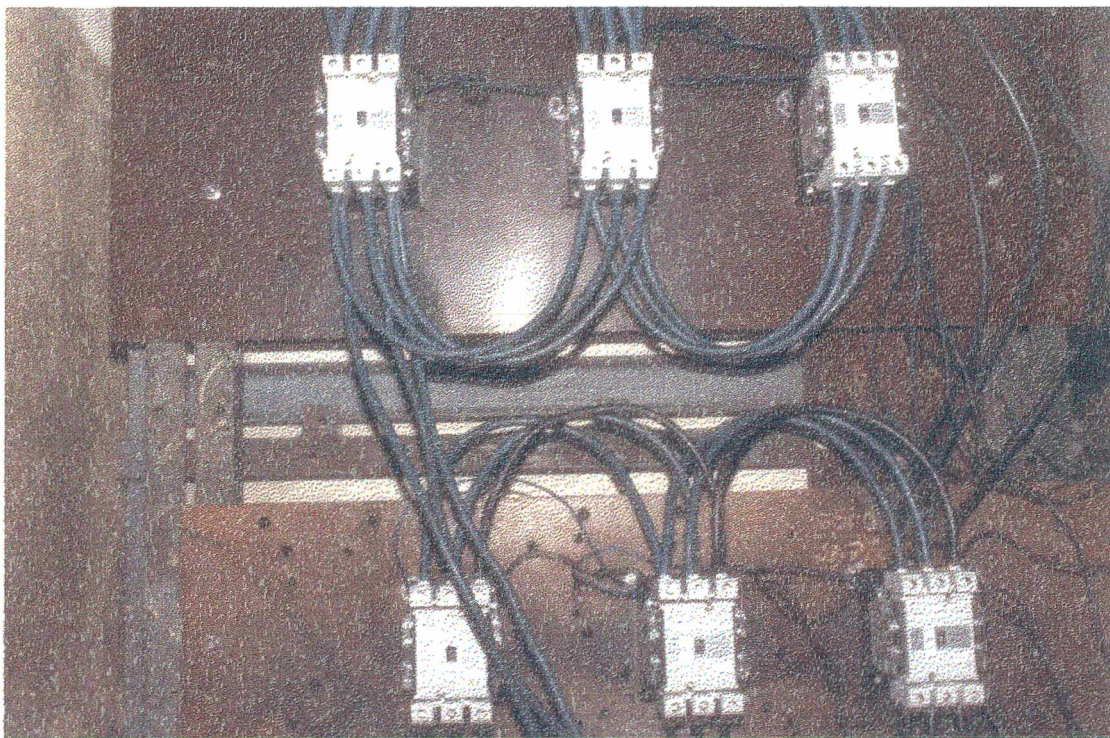
W celu zapewnienia dużej dokładności i powtarzalności pomiarów przechyłu styków, autor opracował nową metodykę pomiaru za pomocą mikrometrycznego wskaźnika zegarowego typu MDA (rys. 6.9). Opracowany sposób pomiaru przechyłu styków zapewnia łatwy i szybki pomiar z dokładnością 0,01 mm. Dotychczas w badaniach laboratoryjnych przechył styków był kontrolowany z dokładnością do 0,1 mm.

Docisk zestyków pomierzono dynamometrem elektronicznym o zakresie pomiarowym 0-5000 g z dokładnością do 1 g, a następnie przeliczano na niutony, co zapewniło dokładność pomiaru 0,01N (rys. 6.10).

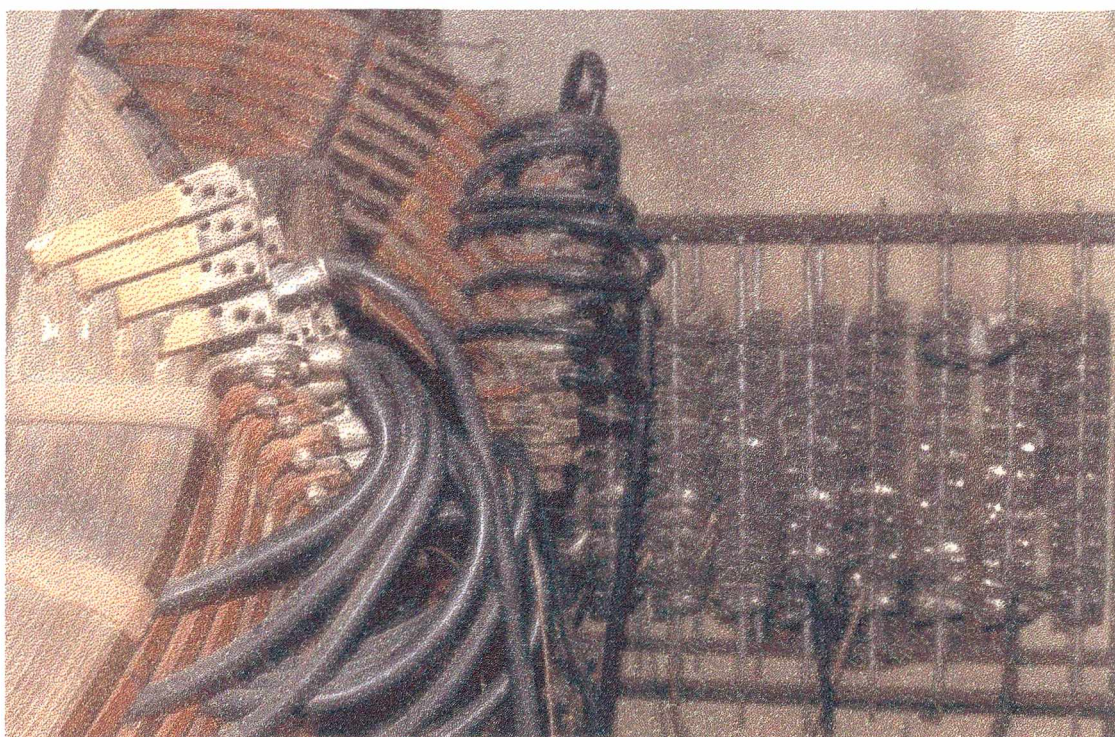
Niejednoczesność zamykania zestyków, czasy trwania, występowania oraz liczbę odskoków sprężystych zestyków pomierzono miernikiem czasów typu MC-02 dla kolejnych 10-ciu przestawień stycznika przy napięciu sterowniczym 220V.

W rezultacie badań całej próbki zestyków styczników otrzymano w każdej serii pomiarowej ponad 1600 pomiarów. Wyliczone wartości średnie dla poszczególnych torów prądowych styczników w funkcji liczby cykli łączeniowych zamieszczono w załączniku 12.2 niniejszej rozprawy.

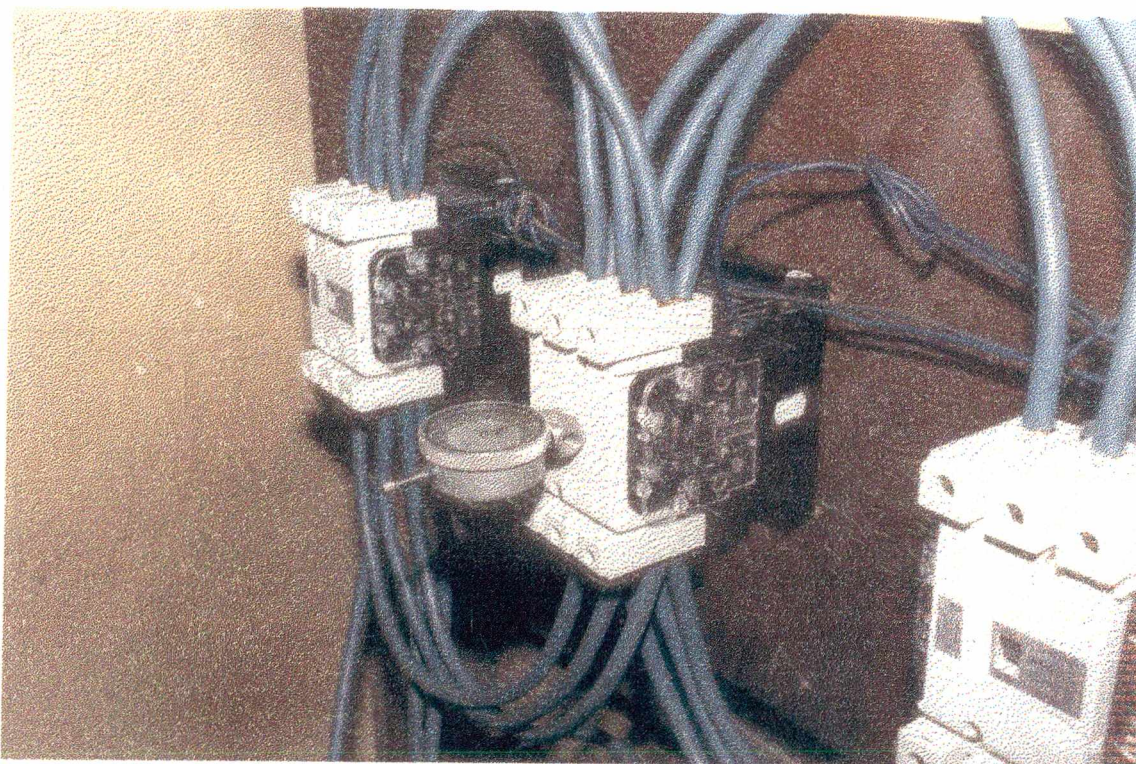
Na rysunkach 6.11 i 6.12 przedstawiono przykładowy wygląd układu zestykowego badanych styczników po zakończeniu badań.



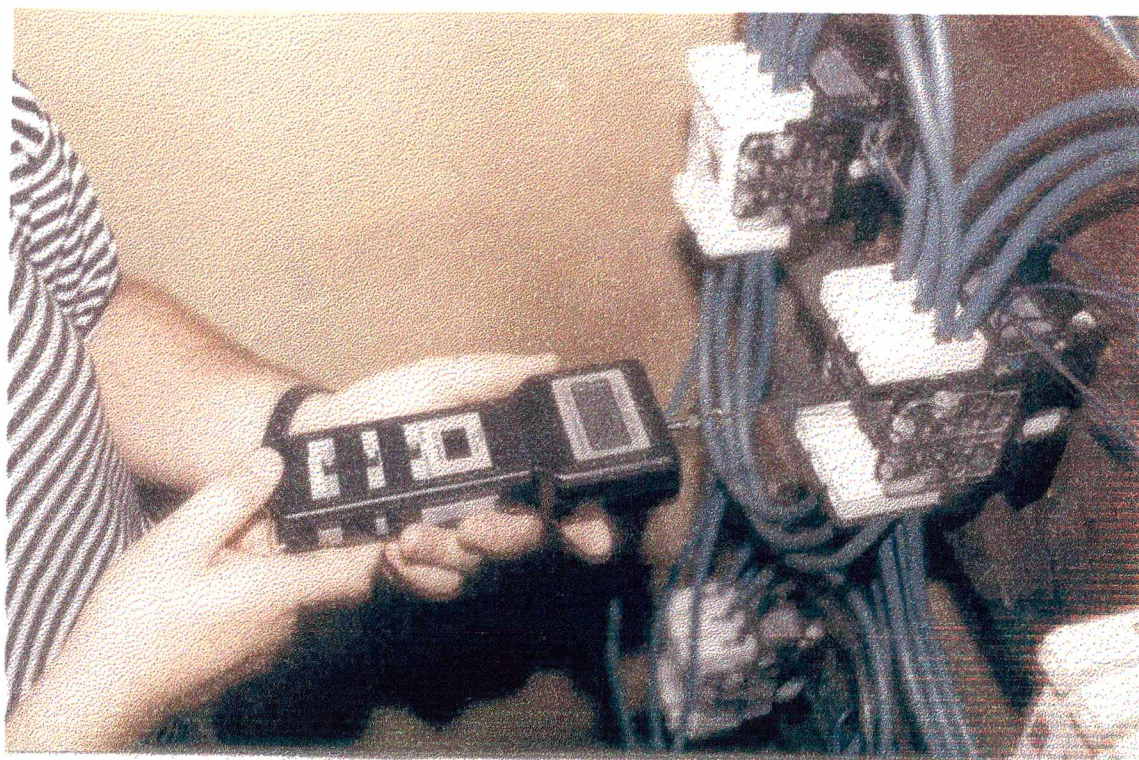
Rys. 6.7. Badane styczniki LS 47 zamontowane na tablicy pomiarowej



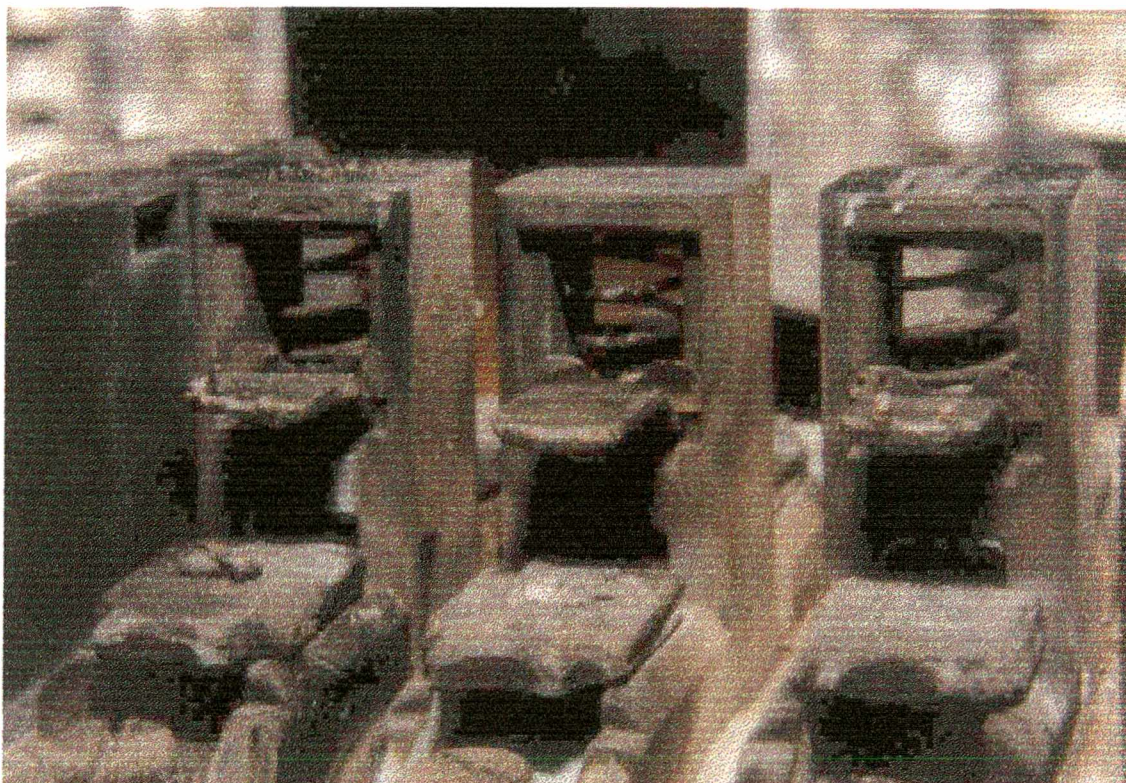
Rys. 6.8. Układ RL stanowiący obciążenie badanych styczników LS 47 (kategoria AC-4, $P = 18,5 \text{ kW}$)



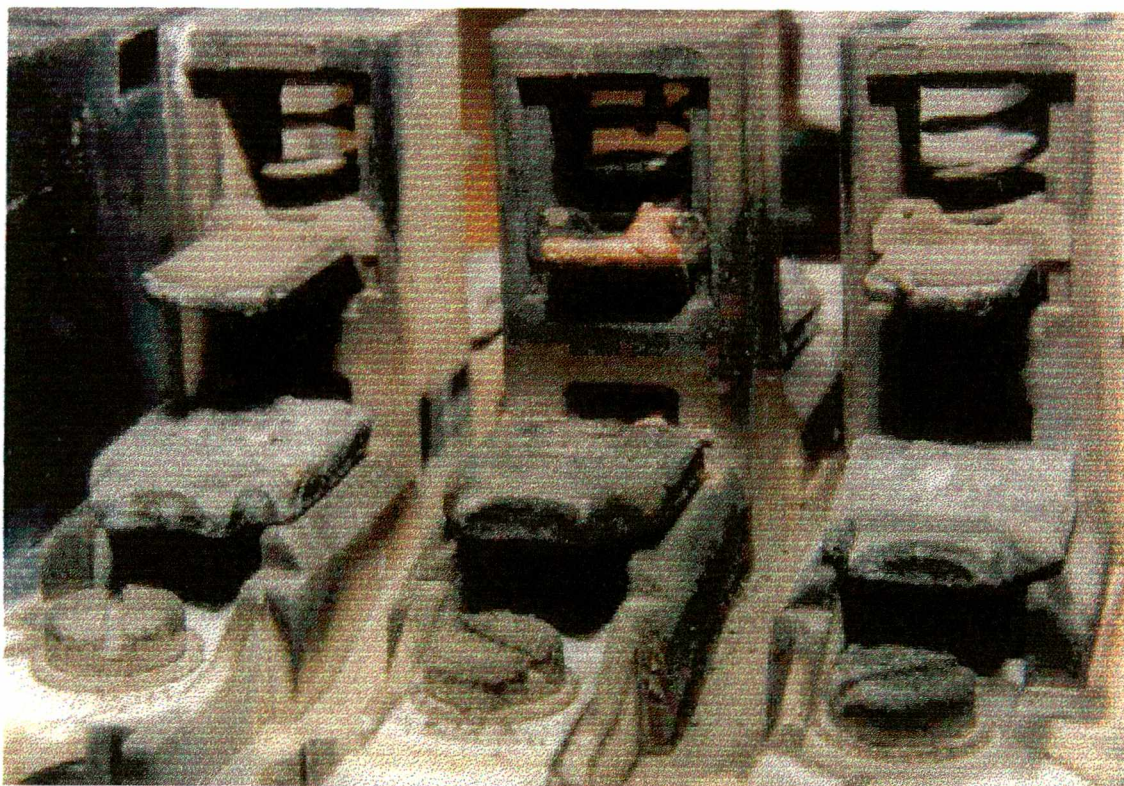
Rys. 6.9. Metoda pomiaru przechyłu styków badanych styczników LS 47 za pomocą mikrometrycznego wskaźnika zegarowego



Rys. 6.10. Metoda pomiaru siły docisku zestyków badanych styczników LS 47 za pomocą elektronicznego dynamometru



Rys. 6.11. Wygląd układu zestykowego po zakończeniu badań - stycznik nr 7



Rys. 6.12. Wygląd układu zestykowego po zakończeniu badań - stycznik nr 12

6.3.3. Wyniki badań oraz ich analiza

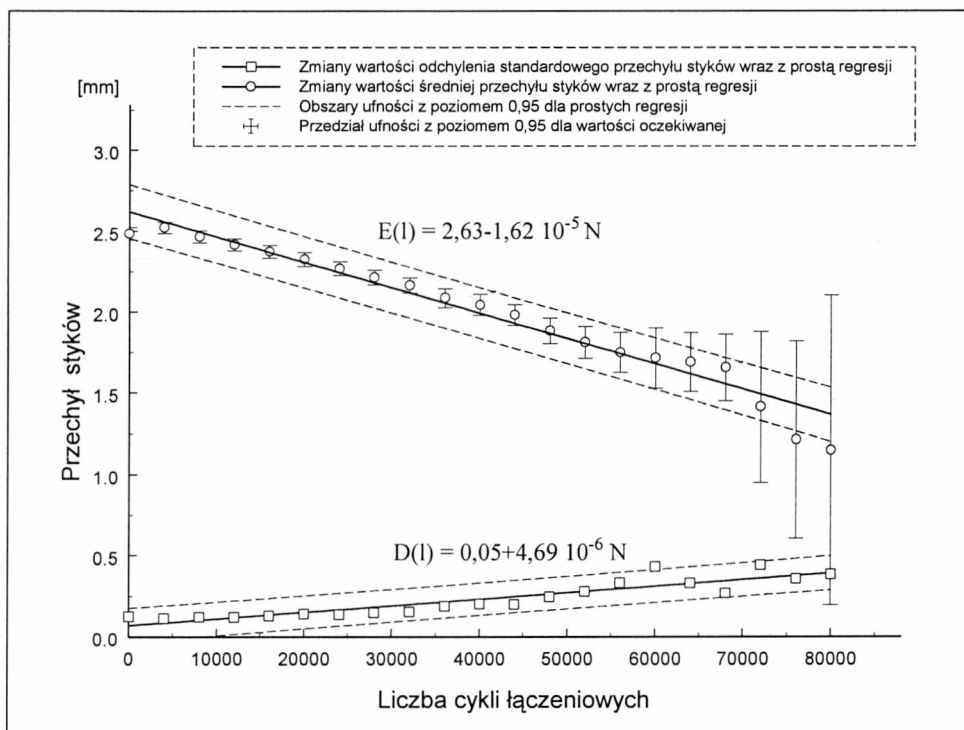
Dla każdego mierzonego parametru obliczono wartość średnią oraz odchylenie standardowe, jak również wyznaczono dla nich przedziały ufności z poziomem 0,95. Obliczone wartości średnie przechyłu styków, siły docisku zestykowego i czasów niejednoczesności zamykania zestyków wykazują istotną liniową zależność z liczbą cykli łączeniowych wykonanych przez zestyki. Nie zauważono natomiast istotnych zmian wartości średnich oraz odchylenia standardowego dla czasów trwania, występowania i liczby odskoków zestyków w funkcji wykonanych przez stycznik liczby cykli łączeniowych (kwadraty współczynników korelacji Pearsona dla poszczególnych parametrów podano w tabeli 6.11).

Przeprowadzona, z użyciem komputerowego programu Axum 5.0, weryfikacja wykazała możliwość aproksymowania prostymi regresji przebiegów empirycznych wartości średniej i odchylenia standardowego przechyłu styków, siły docisku zestykowego i czasów niejednoczesności zamykania zestyków. Dla każdej prostej regresji wyznaczono obszar ufności z poziomem 0,95. Tabela 6.11 zawiera wyznaczone dla wszystkich parametrów współczynniki prostych regresji zmian wartości średnich w funkcji liczby cykli łączeniowych.

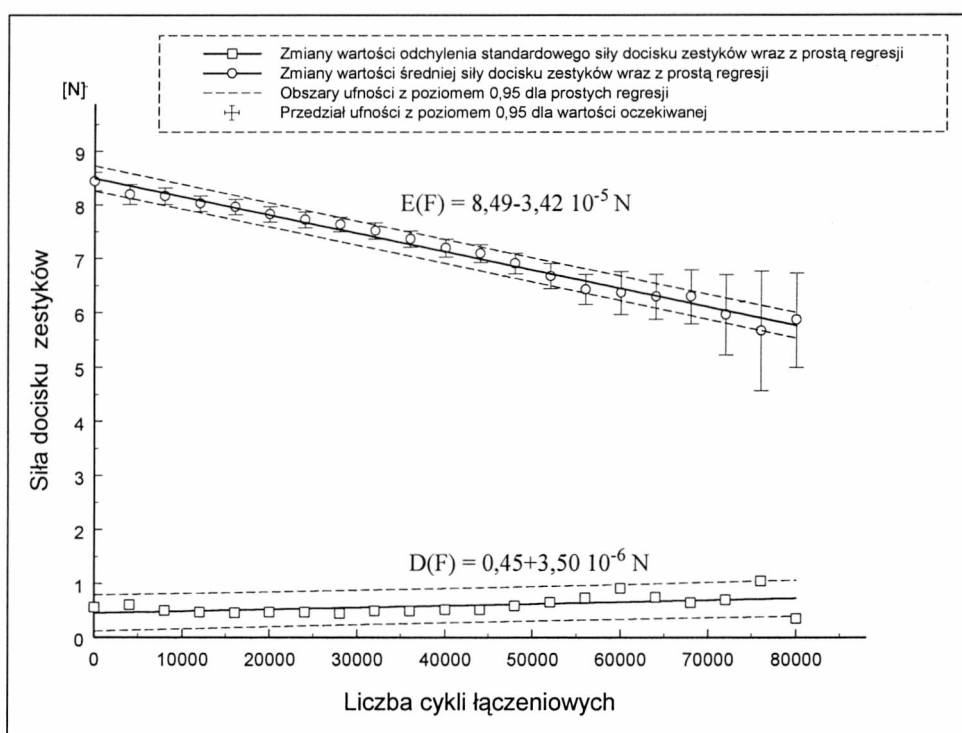
Tabela 6.11. Współczynniki prostych regresji zmian wartości średnich przechyłu styków, docisku zestyków, czasów i liczby odskoków, niejednoczesności zamykania zestyków w torze głównym styczników w funkcji liczby cykli łączeniowych oraz kwadraty współczynników korelacji Pearsona

Parametr	Wartość początkowa	Nachylenie prostej regresji	R^2 (kwadrat współ. korelacji Pearsena)
Przechył styków	2,63 [mm]	-1,62 [mm/10 ⁵]	0,958
Siła docisku zestyków	8,49 [N]	-3,42 [N/10 ⁵]	0,986
Czas niejednoczesności zamykania zestyków	0,13 [ms]	1,41 [ms/10 ⁵]	0,805
Czas trwania odskoków zestyków	0,86 [ms]	-1,91 [ms/10 ⁶]	0,156
Czas występowania odskoków zestyków	1,27 [ms]	3,07 [ms/10 ⁶]	0,229
Średnia liczba odskoków zestyków	4,20 [-]	- 1,73 [1/10 ⁵]	0,317

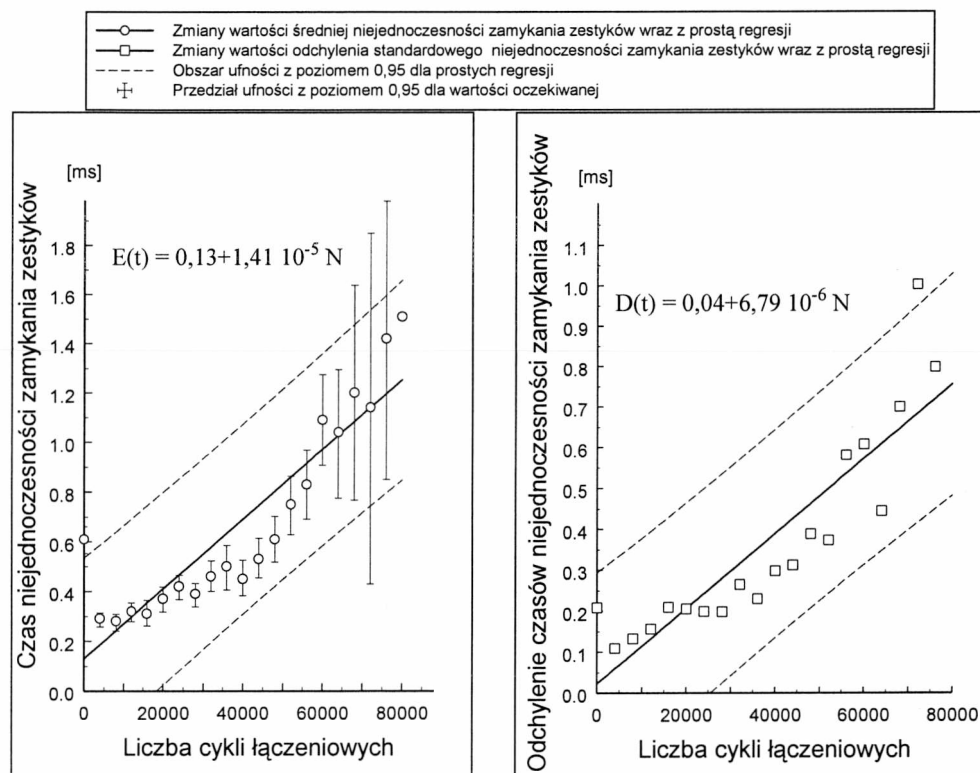
Zmiany wartości średniej i odchylenia standardowego dla wszystkich parametrów w funkcji liczby cykli łączeniowych oraz proste regresji z ich przedziałami ufności zilustrowano za pomocą wykresów przedstawionych na rysunkach 6.13 - 6.18.



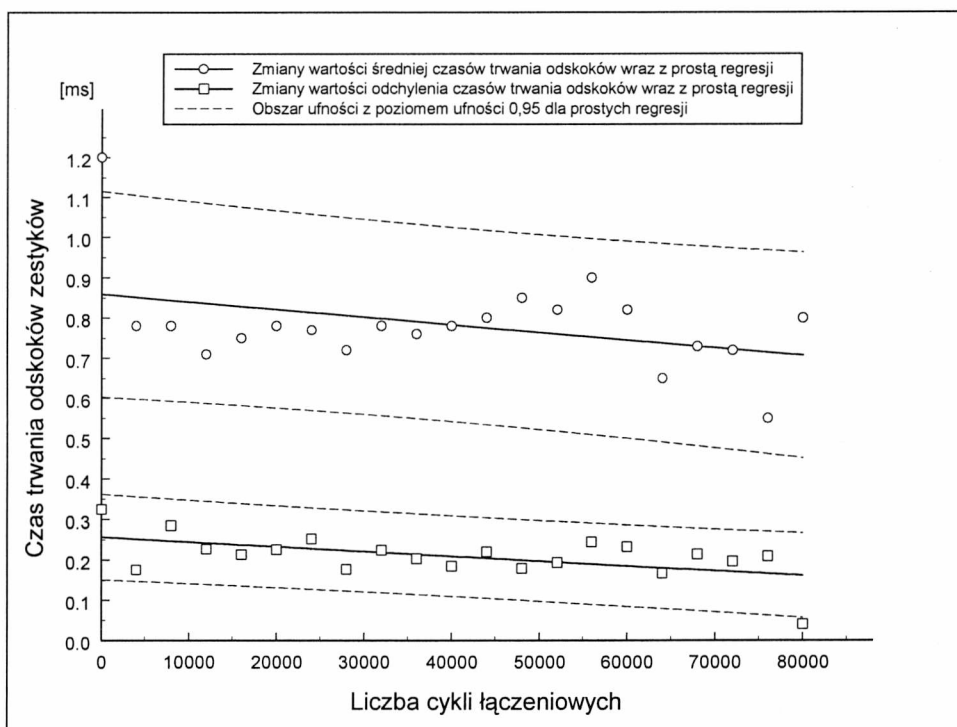
Rys. 6.13. Zmiany wartości średniej $E(l)$ i odchylenia standardowego $D(l)$ przechyłu styków w funkcji liczby cykli łączeniowych - N oraz równania prostych regresji



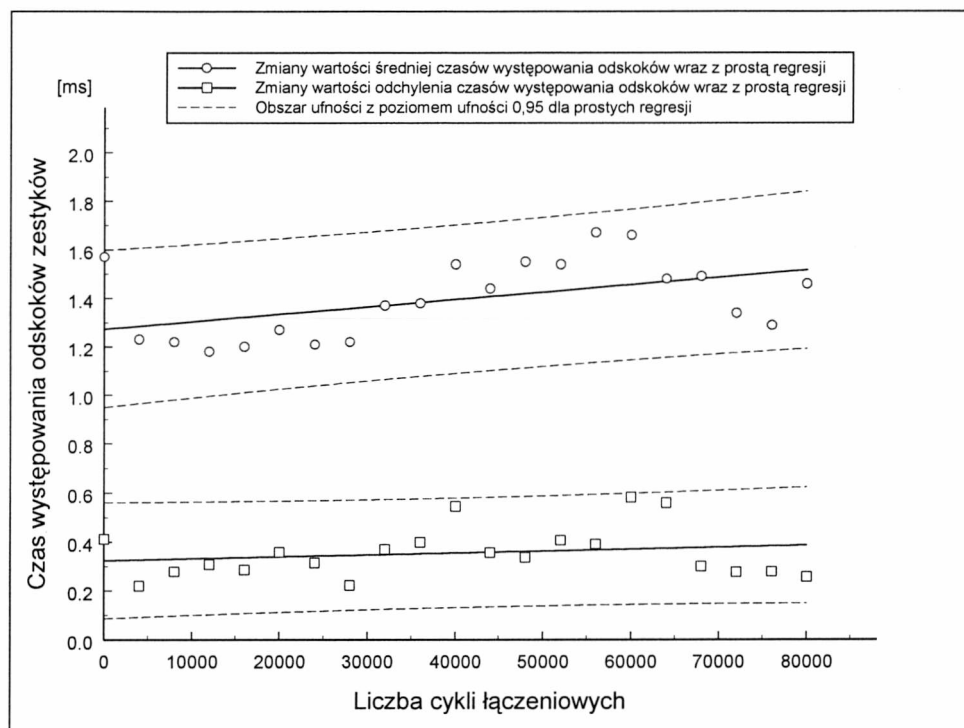
Rys. 6.14. Zmiany wartości średniej $E(F)$ i odchylenia standardowego $D(F)$ siły docisku zestyków w funkcji liczby cykli łączeniowych - N oraz równania prostych regresji



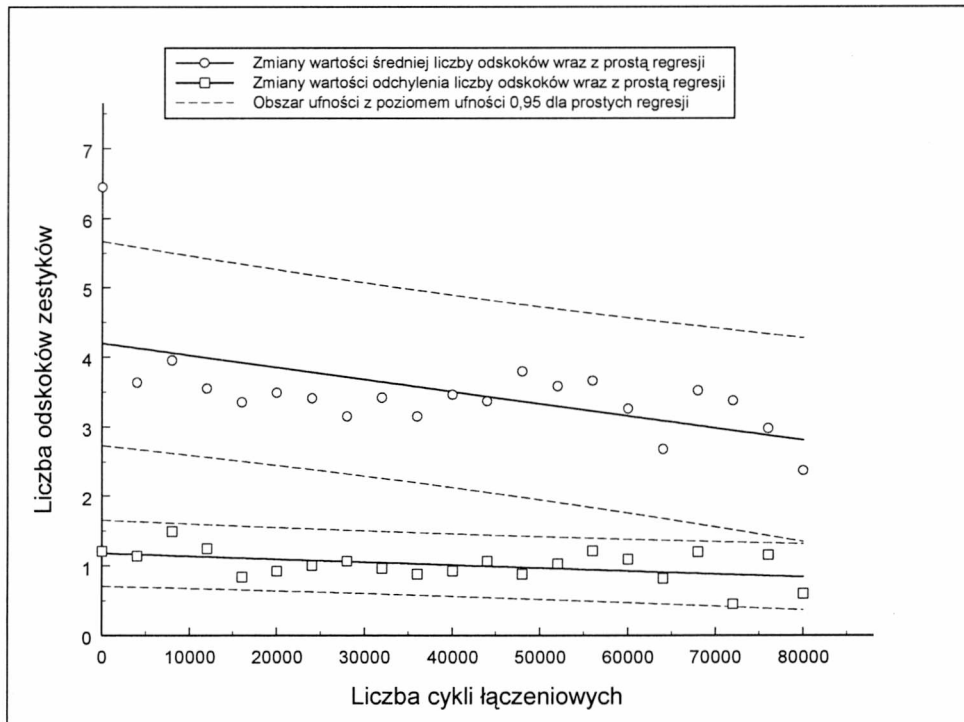
Rys. 6.15. Zmiany wartości średniej $E(t)$ i odchylenia standardowego $D(t)$ czasu niejednoczesności zamykania zestyków w funkcji liczby cykli łączeniowych - N oraz równania prostych regresji



Rys. 6.16. Zmiany wartości średniej i odchylenia standardowego czasu trwania odskoków zestyków w funkcji liczby cykli łączeniowych



Rys. 6.17. Zmiany wartości średniej i odchylenia standardowego czasu występowania odskoków zestyków w funkcji liczby cykli łączeniowych



Rys. 6.18. Zmiany wartości średniej i odchylenia standardowego liczby odskoków zestyków w funkcji liczby cykli łączeniowych

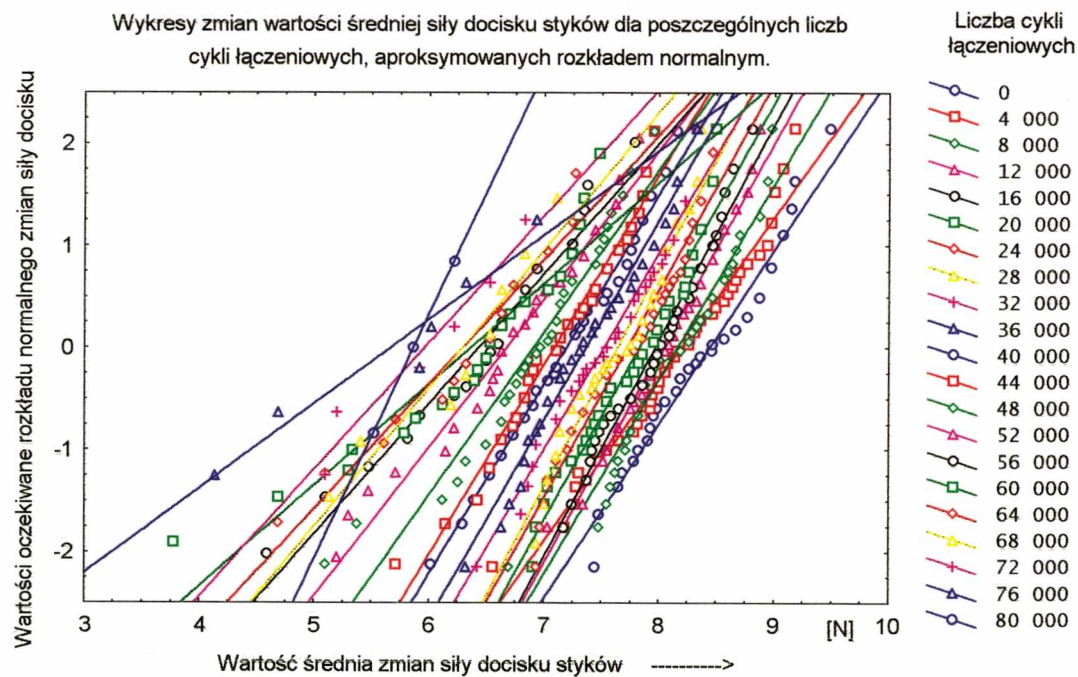
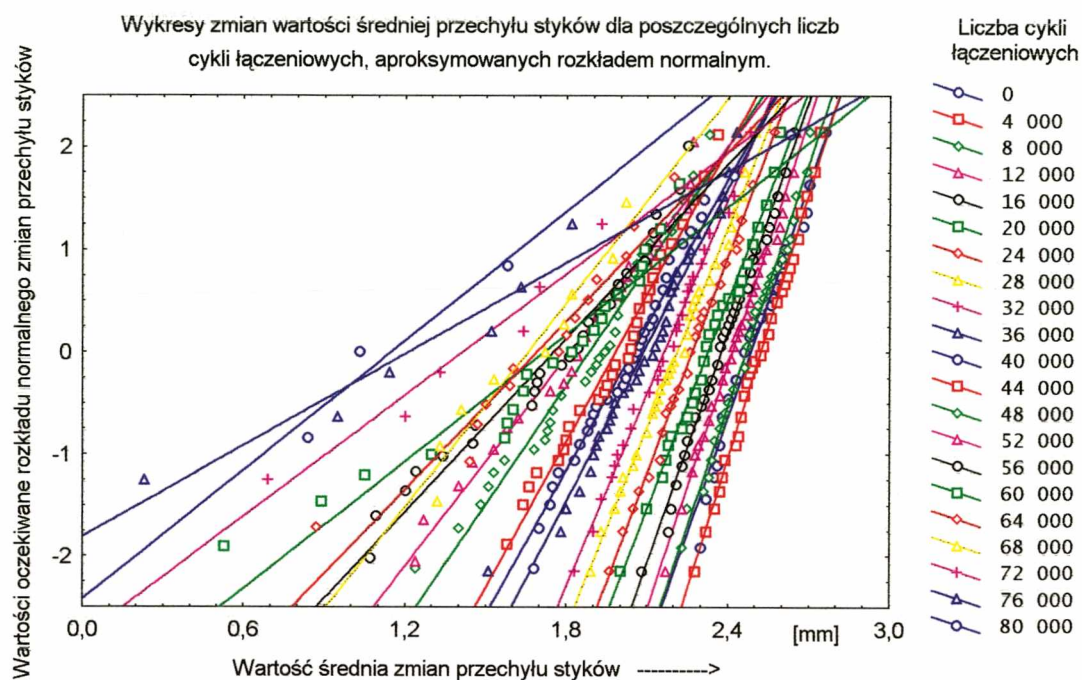
Jak wynika z przedstawionych wykresów, z dostateczną dla praktycznych zastosowań dokładnością zmiany wartości średniej i odchylenia standardowego przechyłu, siły docisku oraz niejednoczesności zamykania zestyków w funkcji liczby cykli łączeniowych, można uznać za liniowo zależną funkcję od wykonanych przez stycznik łącheń.

Na podstawie posiadanych statystyk empirycznych przechyłu styków, siły docisku zestyków oraz niejednoczesności zamykania zestyków wyznaczono rozkłady prawdopodobieństwa dla poszczególnych serii pomiarowych (przy danej liczbie cykli łączeniowych). Dokonano dopasowania kilku typowych rozkładów teoretycznych przy użyciu programu komputerowego Statistica for Windows wersji 5.1. Dla powyższych zmiennych najlepszą statystyką d Kołmogorowa-Smirnowa charakteryzowało się dopasowanie rozkładu normalnego. Możliwość aproksymacji rozkładu empirycznego wartości średnich przechyłu styków, siły docisku zestyków oraz niejednoczesności zamykania zestyków, zweryfikowano z zastosowaniem testów na normalność. Użyto testu W Shapiro-Wilka [10], zmodyfikowanego testu d Kołmogorowa-Smirnowa dla parametrów estymowanych z próbki (z prawdopodobieństwem Lillieforsa [10]) i testu χ^2 . Dla 59 testowanych zbiorów pomiarowych (wartość parametru przy danej liczbie cykli łączeniowych), w 54 przypadkach, żaden test nie dał podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności. Na rys. 6.19 przedstawiono dopasowanie rozkładu normalnego do zmian wartości średniej przechyłu styków i siły docisku, przy danej liczbie wykonanych przez styczniki cykli łączeniowych.

Za stosowaniem rozkładu normalnego przemawiają również następujące fakty [12]:

- krzywe pogarszania się parametrów łączników są rozciągnięte w czasie - nawet do kilku lat,
- poszczególne realizacje zużywania się styczników wzajemnie się przeplatają,
- występuje stała wartość średniej prędkości zużycia,
- zarówno błędy pomiarowe, jak i dokładność produkcji mają rozkład normalny,
- każda liniowa kombinacja niezależnych zmiennych losowych o rozkładach normalnych jest zmienną losową o rozkładzie normalnym,
- zautomatyzowane linie produkcyjne z kontrolą jakości zapewniają jednorodność produktu oraz wyeliminowanie łączników nie spełniających określonych wymogów.

Zasadność przyjęcia rozkładu normalnego można znaleźć także w pracach [24,56,59].



Rys. 6.19. Dopasowanie rozkładu normalnego do zmian wartości średniej przechyłu styków oraz siły docisku zestyków, przy danej liczbie cykli łączeniowych wykonanej przez badane styczniki

7. Wieloparametrowy symulacyjny model niezawodności zestyków styczników elektromagnetycznych

7.1. Uwagi ogólne

Z poprzednich rozdziałów rozprawy wynika, że w literaturze przedmiotowej [21,24,26,27,56+60] znane są matematyczne jednoparametrowe modele niezawodności styków, uwzględniające proces erozji materiału stykowego oraz zjawisko powstawania szepienia styków. Modele te cechuje duża złożoność funkcji niezawodności, powodująca komplikacje w wyznaczaniu parametrów i czasochłonność procesu obliczeniowego. Założenia upraszczające, przy jakich opracowano modele sprawiają, że pomimo tych samych danych wejściowych, wyniki otrzymywane na podstawie poszczególnych modeli różnią się [59]. Złożone, jeszcze nie w pełni poznane zjawiska fizykochemiczne i mechaniczne, związane z funkcjonowaniem zestyków oraz ich wpływ na niezawodność zestyków powodują, że tradycyjne metody projektowania nie zapewniają wymaganej niezawodności [21,58].

Znaczne uproszczenie metody wyznaczania niezawodności zestyków, jak również zwiększenie dokładności obliczeń, można osiągnąć przez opracowanie wieloparametrycznego symulacyjnego modelu cyfrowego niezawodności procesu powstawania uszkodzeń, opartego na metodzie Monte Carlo, w którym parametry prognozujące wyznaczane są na podstawie estymacji przedziałowej [19]. Estymacja przedziałowa polega na wyznaczeniu takich losowych przedziałów, aby z dostatecznie dużym prawdopodobieństwem można było oczekiwać, że wartość interesującego nas parametru zostanie objęta tym przedziałem, zwanym przedziałem ufności.

W dotychczasowych modelach niezawodności zestyków stosowano estymację punktową, która daje jednorazowe oszacowanie tego parametru na podstawie konkretnej próbki, bez określania dokładności uzyskanej oceny. Błąd estymacji punktowej jest mały, gdy liczebność próby jest duża. Jednak w większości przypadków badania trwałości układów zestykowych styczników prowadzi się na próbach o małej liczebności.

Również empiryczne proste regresji, wyznaczane dla zmian wartości średniej i odchylenia standardowego poszczególnych parametrów są rodziną prostych, które występują z tym samym prawdopodobieństwem, z jakim otrzymuje się próbę. Dlatego

dla każdej prostej regresji wprowadzono obszar ufności, który z założonym z góry prawdopodobieństwem będzie zawierał teoretyczną prostą regresji.

Na obszar ufności wpływa [20]:

- poziom ufności – (w praktyce zwykle przyjmuje się poziom ufności 0,95 lub 0,99, ale jest to wyłącznie kwestia umowy),
- wariancja estymatora (odchylenie standardowe estymatora),
- liczebność badanej próbki.

Opracowanie modelu niezawodności danego obiektu lub jego elementu uznanego za niepodzielny, wymaga wyodrębnienia czynników, będących przyczyną uszkodzeń. Aby model dobrze opisywał obiekt lub dane zjawisko, należy uwzględnić te parametry, które najwierniej opisują zmiany stanu niezawodności obiektu. Im większa liczba parametrów lub ich kombinacji, tym model bardziej się komplikuje, zwiększając jednocześnie koszt badań i pracochłonność analizy wyników. W celu opracowania modelu, konieczna jest informacja o charakterze zmian wartości parametrów prognozujących stan łącznika w czasie ich eksploatacji lub podczas przeprowadzanych badań laboratoryjnych (diagnostycznych). Istnieje szereg parametrów, które rejestrowane co określoną liczbę cykli łączeniowych, pozwalają ocenić stan techniczny łącznika i przy dostatecznym stanie wiedzy, przewidzieć jego ewentualne uszkodzenie. Możliwości pomiarowe zautomatyzowanych stanowisk badawczych oraz cyfrowej techniki [7,47], umożliwiają prowadzenie bieżącej diagnostyki aparatury łączeniowej, jak również w oparciu o skrócone badania, prognozowanie realnego czasu poprawnej pracy łącznika. Należy spośród wszystkich dostępnych parametrów wybrać tylko najistotniejsze, które zapewnią żadaną dokładność modelu.

Powinny one spełniać następujące wymagania:

- dobrze charakteryzować fizykę procesów powstawania uszkodzeń,
- być łatwo mierzalne (bez konieczności stosowania skomplikowanych układów pomiarowych),
- ich pomiar nie powinien powodować zmian w pracy stycznika (np. wzajemnej geometrii styków),
- powinien być podany sposób i układ ich pomiaru oraz wartości dopuszczalne,
- powinny jak najwierniej odzwierciedlać stan układu zestykowego stycznika (wykazywać silną korelację z liczbą cykli łączeniowych),
- wskazane jest, aby parametry miały dostępne dane historyczne oraz zawierały informację o warunkach pracy łącznika w jakich zostały zebrane.

Niezawodność zestyków łączników zależy od wielu czynników zewnętrznych o charakterze elektrycznym, mechanicznym, termicznym, które mogą oddziaływać na trwałość układu zestykowego, zarówno bezpośrednio jak i pośrednio. Niewątpliwie do istotnych czynników, które mają wpływ na trwałość zestyków styczników należy prąd łączeniowy, napięcie łączeniowe, częstość łączeń, temperatura, wilgotność, zapylenie, charakter pracy łączeniowej, itp. Znajomość powyższych czynników nie zawsze jest dostateczna, szczególnie jeżeli wyniki pomiarów pochodzą z bezpośredniej obserwacji łączników w rzeczywistych warunkach pracy.

Alternatywą do tego stanu są dane uzyskiwane podczas krótkotrwałych badań skróconych lub przyspieszonych (obciążenie forsowne) oraz dane będące wynikiem długotrwałych badań laboratoryjnych w warunkach odwzorowujących rzeczywiste warunki eksploatacyjne.

Wadą badań długotrwałych jest znaczny koszt i długi czas trwania. Odwzorowanie rzeczywistych warunków pracy łączników prowadzi się w znormalizowanych kategoriach użytkowania [30,31], przy określonym oddziaływaniu czynników zewnętrznych (zmiennych niezależnych). Wyniki badań uzyskiwane w określonych warunkach probierczych nie mogą być wykorzystywane do wnioskowania o trwałości zestyków stycznika w innych warunkach probierczych (dla zbliżonych warunków mogą mieć charakter orientacyjny).

W badaniach skróconych, na podstawie wyników uzyskanych w pewnym przedziale czasu, stanowiącym część zakładanej przez projektanta trwałości układu zestykowego oraz na podstawie wypracowanych metod prognozowania realnego czasu poprawnej pracy (opracowanych na podstawie badań długotrwałych), możliwe jest wnioskowanie o dalszym przebiegu funkcji niezawodności zestyków łącznika.

7.2. Parametry prognozujące niezawodność zestyków styczników

Zużywanie styków może być określone zmianami ich grubości, masy oraz przechyłu (erozyjny liniowy ubytek materiału stykowego). Najbardziej wiarygodne rezultaty daje pomiar grubości styków. Mierzy się łączną grubość styków, ruchomego i nieruchomego, w środku pozornej powierzchni ich styczności przy zamkniętym zestyku. Pomiar taki są kłopotliwe, a często wręcz niemożliwe do wykonania ze względu na trudny dostęp do styków. Badanie wagowego ubytku masy poszczególnych styków wymaga demontażu

zestyków wraz z elementami trwale związanymi z nimi. Powoduje to znaczne trudności z dokonaniem dokładnych pomiarów, jak również zmianę geometrii wzajemnego ustawienia styków, a w konsekwencji zmiany warunków ich pracy. Z powyższych względów najczęściej wykorzystywanym kryterium zużywania się styków jest pomiar przechyłu styków, który zapewnia zarówno dużą dokładność, jak i praktyczny sposób dokonywania pomiarów. Ponadto pomiar przechyłu styków uwzględnia również odkształcenia mechaniczne konstrukcji trzymającej styk nieruchomy.

Przechył styków jest określany drogą na jakiej przesunie się styk ruchomy, gdy w położeniu zamkniętym stycznika zostanie zabrany styk nieruchomy. Przechył styków jest losową, liniową funkcją zależną od liczby cykli łączeniowych wykonanych przez układ zestykowy [24,50] (rys. 6.13).

W miarę zmniejszania się przechyłu maleje wartość siły docisku zestykowego. Na wartość siły docisku wpływ mają również sprężyny układu zestykowego stycznika. Można przyjąć, że dla najczęściej stosowanych w układach zestykowych sprężyn śrubowych walcowych, w zakresie niewielkich ugięć, siła ściskająca jest proporcjonalna do ugięcia sprężyny. W celu zapewnienia jednorodności stosowanych sprężyn, w procesie produkcji styczników serii LS, sprężyny zestykowe są selekcionowane i dzielone na poszczególne grupy. Jednakże ze względu na przyjętą tolerancję wielkości nie jest możliwe zapewnienie równomierności charakterystyk sprężyn. W badanych przez autora stycznikach (rozdział 6.3), pomiar charakterystyk sprężyn zestykowych za pomocą elastikometru NRE-D1, potwierdził rozrzut wartości stałej sprężyn w zakresie od 1,96 N/mm do 2,05 N/mm. Powyższy fakt może mieć odzwierciedlenie w nierównomiernym zużywaniu się poszczególnych torów prądowych stycznika.

Zmiany docisku zestykowego są losową funkcją zależną liniowo od liczby cykli łączeniowych (rys. 6.14).

Zbyt mała siła docisku zestykowego powoduje nadmierne nagrzewanie się styków podczas przepływu prądu łączeniowego, jak również podczas załączania stycznika.

Innym istotnym parametrem, który może decydować o niezawodności łącznika, jest czas niejednoczesności zamykania zestyków głównych stycznika.

Czas niejednoczesności zamykania określa czas, od chwili uzyskania styczności zestyków w pierwszym zamykającym się torze prądowym, do chwili uzyskania styczności zestyków w ostatnim zamykającym się torze prądowym łącznika. Na czas niejednoczesności zamykania się zestyków wpływ mają odskoki sprężyste poszczególnych zestyków (czas trwania i występowania oraz ich liczba).

W wyniku nierównomiernego zużywania się poszczególnych torów prądowych stycznika, czas niejednoczesności zamykania zestyków zwiększa się wraz z liczbą łążeń. Energia wydzielana w łuku w czasie odskoków sprężystych ma bezpośredni wpływ na trwałość łączeniową zestyków stycznika [9,46,50,54,41]. Dążeniem każdego projektanta łączników jest ograniczenie amplitudy i czasu trwania odskoków sprężystych zestyków. Niestety, w praktyce konstruktorskiej nadal dominują w tej dziedzinie metody eksperymentalne, które wymagają dużych nakładów czasowych i finansowych.

Ze względu na losowy charakter wartości chwilowej prądu łączeniowego, występuje rozrzut mierzonego czasu niejednoczesności zamykania zestyków dla kolejnych cykli łączeniowych stycznika. Jednak, jak wykazały badania własne, średni czas niejednoczesności zamykania zestyków głównych stycznika oraz jego odchylenie standardowe z dostateczną dla celów praktycznych dokładnością, można uznać za losową, liniową funkcję zależną od liczby cykli łączeniowych stycznika (rys. 6.15).

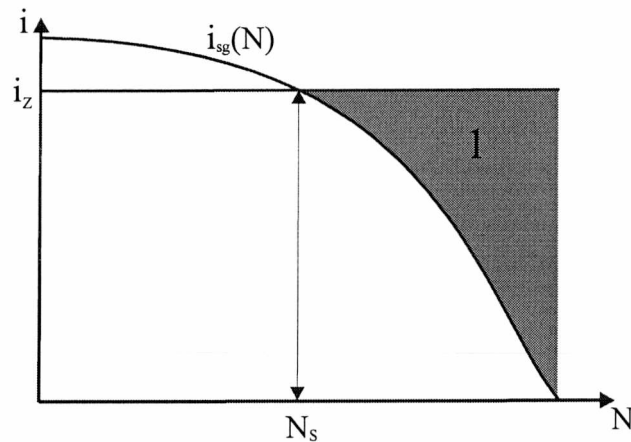
Zmniejszanie się siły docisku zestykowego $F(N)$ ze wzrostem liczby cykli łączeniowych N , powoduje zmniejszanie się wartości granicznego prądu szepienia styków i_{sg} zgodnie z empiryczną zależnością [56]

$$i_{sg}(N) = c_m \sqrt{F(N)}, \quad (7.1)$$

w której c_m jest współczynnikiem zależnym od fizycznych właściwości materiału nakładek stykowych oraz kinematyki łącznika, w sposób określony zależnością (2.8).

Zależność prądu szepienia od liczby cykli łączeniowych można przedstawić graficznie - rys. 7.1. Niezerowe prawdopodobieństwo uszkodzenia w wyniku szepienia styków, pojawia się wówczas, gdy w wyniku pracy łączeniowej stycznika, po N_s cyklach łączeniowych, siła docisku zestyków spada poniżej pewnej granicznej wartości, dla której graniczny prąd szepienia styków $i_{sg}(N)$ jest równy lub mniejszy od wartości szczytowej początkowego prądu załączeniowego i_z ($i_{sg}(N) \leq i_z$). Wyznaczaną wartość liczby cykli łączeniowych N_s należy odnieść do zakładanego zasobu pracy stycznika (trwałości łączeniowej stycznika).

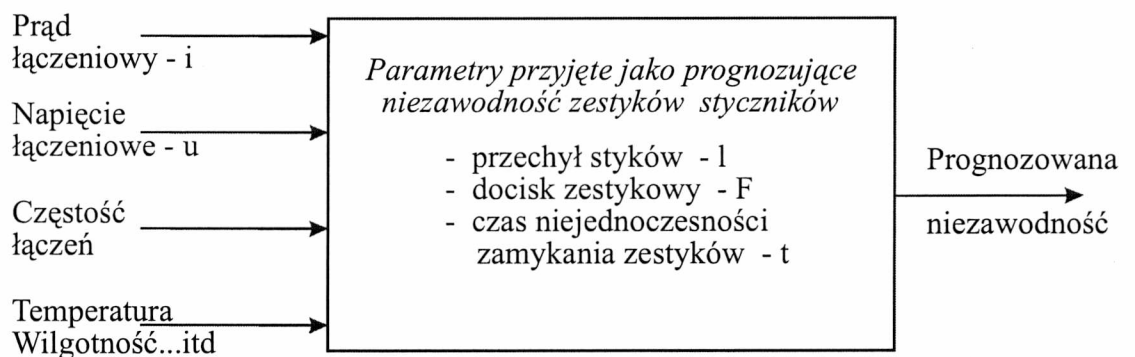
Gdy zachodzi warunek, że dla każdego N $i_{sg}(N) \leq i_z$, wówczas przez cały okres eksploatacji stycznika istnieje niezerowe prawdopodobieństwo wystąpienia szepienia styków.



Rys. 7.1. Zależność granicznego prądu szepienia styków $i_{sg}(N)$ od liczby cykli łączeniowych N
 N_s - liczba cykli łączeniowych, po przekroczeniu której występuje niezerowe prawdopodobieństwo szepienia styków, i_z - wartość szczytowa początkowego prądu załączeniowego, 1 - zakres występowania niezerowego prawdopodobieństwa uszkodzenia w wyniku szepienia styków

Na podstawie badań własnych, przedstawionych w poprzednim rozdziale, uwzględniając przeprowadzoną analizę procesów zachodzących w układzie zestykowym, oraz na podstawie wniosków wysuwanych w literaturze przedmiotowej [21,22,24,27,50,56] można uznać, że wyżej opisane parametry najpełniej odzwierciedlają zjawiska mające decydujący wpływ na niezawodność układu zestykowego, i można je przyjąć za parametry prognozujące (kryterialne) ich trwałość.

Na rys. 7.2 przedstawiono graficznie zestawienie tych parametrów wraz z wybranymi czynnikami, mającymi wpływ na niezawodność zestyków stycznika.



Rys. 7.2. Parametry przyjęte jako prognozujące oraz czynniki (zmiennne niezależne) mające wpływ na niezawodność zestyków styczników (zmienną zależną)

7.3. Metody wyznaczania przedziałów ufności dla estymowanych parametrów modelu

Jak wykazała analiza literaturowa zagadnienia oraz analiza przeprowadzonych badań laboratoryjnych (rys. 6.19), z dostateczną dla celów praktycznych dokładnością, rozkłady empiryczne wytypowanych parametrów prognozujących trwałość zestyków próbki badanych łączników, w każdym momencie pracy łączeniowej (po wykonaniu przez łącznik N_i cykli łączeniowych), można aproksymować rozkładem normalnym $NOR(\mu, \sigma)$, z zadaniem poziomem ufności [12,14,24,56,59]. W rozkładzie tym estymator wartości oczekiwanej μ zbiorowości generalnej X opisany jest zależnością

$$E(x) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k x_k, \quad (7.2)$$

w której x_k jest zmienną losową k obserwowanych w próbie wartości badanych parametrów prognozujących stan zestyków łącznika.

Estymator punktowy nieobciążony wariancji σ^2 określa zależność

$$D^2(x) = \frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^k [x_k - E(x)]^2, \quad (7.3)$$

natomiast estymator obciążony (najefektywniejszy) dla licznej próby -

$$D_E^2(x) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k [x_k - E(x)]^2. \quad (7.4)$$

Jednorazowa estymacja punktowa daje ocenę w postaci jednej liczby. Błąd estymacji punktowej jest mały, gdy liczebność próby jest duża oraz zastosowany estymator jest nieobciążony i efektywny. Aby zwiększyć dokładność metody prognozowania niezawodności zestyków łączników, celowym jest wprowadzenie estymacji przedziałowej. Ponieważ nie znamy rzeczywistej wartości wariancji, przedział ufności dla wartości średniej można wyznaczyć posługując się zmienną losową:

$$t_{\frac{\beta_e}{2}, k-1} = \frac{E(x) - \mu}{D_E(x)} \sqrt{k-1}, \quad (7.5)$$

o rozkładzie Studenta i $k-1$ stopniach swobody.

Przedział ufności dla wartości oczekiwanej z prawdopodobieństwem β_e dla liczby obiektów w próbie mniejszej od 30 można wyznaczyć z zależności [5]

$$CONF \left\{ E(x) - t_{\frac{\beta_e}{2}, k-1} \frac{D(x)}{\sqrt{k}}, E(x) + t_{1-\frac{\beta_e}{2}, k-1} \frac{D(x)}{\sqrt{k}} \right\}. \quad (7.6)$$

Szacowanie przedziału ufności dla wariancji σ^2 zbiorowości generalnej X o rozkładzie normalnym $NOR(\mu, \sigma)$ opiera się na stwierdzeniu, że zmienna losowa

$$\chi^2 = \frac{k D_E^2(x)}{\sigma^2} \quad (7.7)$$

ma rozkład chi-kwadrat o $(k-1)$ stopniach swobody.

Dla liczby obiektów w próbie mniejszej od 30, przedział ufności dla wariancji σ^2 z prawdopodobieństwem β_e ma postać [5]

$$CONF \left\{ D^2(x) \frac{k}{\chi_{1-\frac{\beta_e}{2}, k-1}^2}, D^2(x) \frac{k}{\chi_{\frac{\beta_e}{2}, k-1}^2} \right\}. \quad (7.8)$$

W przypadku próby o liczbie obiektów większej od 30, przedział ufności dla odchylenia standardowego σ z prawdopodobieństwem β_e ma postać [5]

$$CONF \left\{ \frac{D(x)}{1 + \frac{u_{1-\frac{\beta_e}{2}}}{\sqrt{2k}}}, \frac{D(x)}{1 + \frac{u_{\frac{\beta_e}{2}}}{\sqrt{2k}}} \right\}, \quad (7.9)$$

gdzie: $u_{1-\frac{\beta_e}{2}}, u_{\frac{\beta_e}{2}}$ - kwantyle rozkładu normalnego $NOR(0,1)$, natomiast

$$D(x) = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{j=1}^k [x_k - E(x)]^2} \quad (7.10)$$

jest estymatorem odchylenia standardowego.

Jak wynika z wcześniejszych rozważań, z dostateczną dla celów powyższej pracy dokładnością, rozpatrywane zmiany parametrów prognozujących l, F, t względem liczby cykli łączeniowych N , można opisać za pomocą prostych regresji.

Dla każdego parametru przyjętego za prognozujący możemy założyć, że istnieje teoretyczna prosta regresji określona zależnością [1,4,8,42]

$$Y(N) = A + B N, \quad (7.11)$$

gdzie pod zmienną $Y(N)$ należy rozumieć wartość danego parametru prognozującego trwałość zestyków stycznika (zależnego od liczby cykli łączeniowych), natomiast A, B są nieznanymi stałymi określającymi odpowiednio współczynnik kierunkowy prostej regresji oraz jej wyraz stały.

Stosując metodę najmniejszych kwadratów (MNK), można wyznaczyć współczynniki prostej, najlepiej opisującej otrzymane wyniki pomiarów zmian parametrów prognozujących.

Postępowanie przebiega wg następującej procedury. Podczas laboratoryjnych badań trwałościowych, wykonuje się co określoną liczbę cykli łączeniowych pomiary parametrów prognozujących. Na podstawie powyższych badań, wyznacza się zmiany parametrów prognozujących opisane prostymi regresji: $y(N) = \bar{a} + \bar{b} N$, gdzie nachylenie $\bar{b}$ jest estymatorem dla parametru populacji B oraz $\bar{a}$ jest estymatorem parametru populacji A .

Dla łącznika, który wykonał N_n cykli łączeniowych (to znaczy dokonano n pomiarów parametrów prognozujących) estymatory prostej regresji wyznaczamy z następujących zależności:

$$\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \sum_{i=1}^n N_i y_i - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n N_i^2}{\left(\sum_{i=1}^n N_i \right)^2 - n \sum_{i=1}^n N_i^2}, \quad (7.12)$$

$$\bar{b} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \sum_{i=1}^n y_i - n \sum_{i=1}^n N_i y_i}{\left(\sum_{i=1}^n N_i \right)^2 - n \sum_{i=1}^n N_i^2}. \quad (7.13)$$

Wówczas z równania

$$y(N_i) = \bar{a} + \bar{b} N_i \quad (7.14)$$

obliczyć możemy prognozowaną wartość $y(N_i)$ dla dowolnej liczby cykli łączeniowych N_i . Oczywistym jest, że tak wyznaczona wartość $y(N_i)$ nie jest dokładnie równa wartości uzyskanej w wyniku pomiarów. Sama bowiem znajomość funkcji regresji parametrów prognozujących od liczby cykli łączeniowych, nie pozwala nawet na bardzo ogólną możliwość oszacowania rozbieżności między prognozą $y(N_i)$,

a rzeczywistą wartością y_i , pomierzoną po wykonaniu przez łącznik N_i cykli łączeniowych.

Można wykazać, że popełniony błąd przy tak realizowanej estymacji współczynników prostej regresji (odchylenia standardowego wartości średnich współczynnika nachylenia $\bar{b}$ oraz wartości wyrazu wolnego $\bar{a}$) wyraża się zależnościami:

$$D_{\bar{a}} = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n N_i^2}{n \sum_{i=1}^n N_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n N_i \right)^2}}, \quad (7.15)$$

$$D_{\bar{b}} = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2} \sqrt{\frac{n}{n \sum_{i=1}^n N_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n N_i \right)^2}}, \quad (7.16)$$

w których: $\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \bar{b} \sum_{i=1}^n N_i y_i - \bar{a} \sum_{i=1}^n y_i$.

Zakładając, że dla ustalonej wartości N_i , zmienna y_i ma rozkład normalny $NOR(A + B \cdot N, \sigma^2)$, przy czym σ^2 nie zależy od N_i , wówczas prostą regresji, opisującą zmiany parametru prognozującego od liczby cykli łączeniowych z zadaniem poziomem ufności β , możemy zapisać za pomocą równania

$$y(N_i) = (\bar{a} \pm k D_{\bar{a}}) + (\bar{b} \pm k D_{\bar{b}}) N_i, \quad (7.17)$$

w którym k jest krotnością odchylenia standardowego dla założonego poziomu ufności β (tabela 7.1).

Zgodnie z funkcją rozkładu normalnego standaryzowanego, możemy określić prawdopodobieństwo tego, że obliczone współczynniki prostej regresji mieszczą się w przedziale $\bar{x} \pm \Delta x$, gdzie Δx wyznacza kolejne krotności odchylenia standardowego rozkładu.

Ponieważ zmienna losowa o rozkładzie normalnym $NOR(\mu, \sigma)$, może przyjmować wartości z przedziału $(-\infty, +\infty)$, w celu urealnienia obliczeń (wartość parametrów prognozujących ze względów fizycznych nie może być ujemna) przyjęto w modelu ogólnie stosowane uproszczenie pomijania wartości prawdopodobieństw spoza zakresu $E(x) \pm 3 \cdot D(x)$.

Tabela 7.1. Prawdopodobieństwo zawierania się zmiennej losowej x o rozkładzie normalnym w przedziale k – sigmowym [23]

Wartość przedziału Δx odpowiadającego k krotności odchylenia σ	Prawdopodobieństwo zawierania się wyniku w przedziale $\bar{x} \pm \Delta x$	Poziom ufności β
$\Delta x = \sigma$	$\Phi(0,7707)=0,68269$	0,68
$\Delta x = 2 \cdot \sigma$	$\Phi(1,414)=0,95450$	0,95
$\Delta x = 3 \cdot \sigma$	$\Phi(2,121)=0,99730$	0,997

Zgodnie z tabelą 7.1, prawdopodobieństwo zawierania się zmiennej losowej o rozkładzie normalnym w przedziale trzech sigm, jest równe 0,99730. Błąd popełniany z pominięcia wartości zmiennej losowej spoza tego obszaru nie jest istotny, gdyż nie przekracza prawdopodobieństwa 0,0027.

Przy szacowaniu teoretycznej prostej regresji na podstawie różnych prób pochodzących z tej samej populacji, otrzymuje się zazwyczaj różne wartości współczynników $\bar{a}, \bar{b}$ dla kolejnych prób. Celowym jest więc wprowadzenie przedziałów ufności dla współczynnika regresji $\bar{b}$ oraz obszaru ufności dla prostej regresji.

Przedział ufności dla estymowanego parametru $\bar{b}$, odpowiadający prawdopodobieństwu β_r , z jakim wyznaczona z próby wartość współczynnika B zawiera się w tym przedziale, można wyznaczyć z zależności [5]:

$$CONF\{\bar{b} - k_B \leq B \leq \bar{b} + k_B\}, \quad (7.18)$$

w której

$$k_B = t_{\beta_r/2, n-2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [y_i - y(N_i)]^2}{(n-2) \sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})}}, \quad (7.19)$$

$t_{\beta_r/2, n-2}$ - jest kwantylem dla $1 - \beta_r / 2$ rozkładu t-Studenta dla $n-2$ stopni swobody,

y_i - wartość parametru otrzymana z pomiarów,

$y(N_i)$ - wartość wyznaczona na podstawie prostej regresji opisanej równaniem (7.14), odpowiadająca wartości y_i .

Stosując metodę MNK możemy dokonać oceny obszaru ufności, który z założonym z góry prawdopodobieństwem zawiera teoretyczną postać prostej regresji [5]. Obszar ufności (pasmo predykcji dla prostej regresji), określający z prawdopodobieństwem β_r , że badana próbka zawiera się w nim, można wyznaczyć z zależności [5]:

$$CONF\{y(N_i) - k(N_i) \leq y_i \leq y(N_i) + k(N_i)\}, \quad (7.20)$$

gdzie współczynnik $k(N_i)$ (krzywe ufności Neymana) wyznacza się na podstawie wzoru:

$$k(N_i) = t_{\beta_r/2, n-2} se_e \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(N_i - \bar{N})^2}{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}}, \quad (7.21)$$

w którym se_e jest standardowym błędem estymacji wyrażonym zależnością

$$se_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [y_i - y(N_i)]^2}{n-2}}. \quad (7.22)$$

Jak wynika z zależności (7.21) najmniejsza szerokość obszaru ufności prostej regresji występuje dla N_i równego wartości średniej $\bar{N}$.

7.4. Symulacyjny wieloparametrowy model niezawodności zestyków głównych styczników elektromagnetycznych

7.4.1 Podstawowe wyjaśnienia

Wieloparametrowy model symulacyjny niezawodności zestyków głównych styczników został opracowany na podstawie analizy procesów fizycznochemicznych, elektrycznych i mechanicznych, jakie zachodzą w zestykach głównych stycznika oraz badań zmiany wybranych parametrów prognozujących trwałość łączeniową układu zestykowego w funkcji liczby cykli łączeniowych, opisanych w rozdziale 6.3.

Jest on oparty na znajomości prostych regresji zmian parametrów prognozujących w funkcji liczby cykli łączeniowych, wyznaczonych podczas skróconych badań laboratoryjnych, przeprowadzonych w danej kategorii użytkowania.

Założono w nim, że:

- badania skrócone przeprowadzone są na losowej próbie, która jest jednorodna oraz reprezentatywna dla całej populacji rozpatrywanych łączników,
- rozkłady empiryczne parametrów prognozujących niezawodność zestyków łączników w całym czasie ich badań (eksploatacji), dla danej liczby cykli łączeniowych, wykonanych przez łącznik, można aproksymować rozkładem normalnym,
- zmiany parametrów prognozujących zależą liniowo od liczby cykli łączeniowych wykonanych przez łącznik,
- poszczególne rodzaje uszkodzeń zestyków (charakteryzowane przez parametry prognozujące) są wzajemnie niezależne.

7.4.2. Estymacja parametrów prostych regresji rozkładów empirycznych zmian przechyłu styków w funkcji liczby cykli łączeniowych

Na podstawie skróconych badań laboratoryjnych, wyznacza się proste regresji wartości średnich oraz odchylenia standardowego empirycznego rozkładu statystycznego przechyłu styków, w funkcji liczby łączy wykonanych przez stycznik, korzystając z zależności

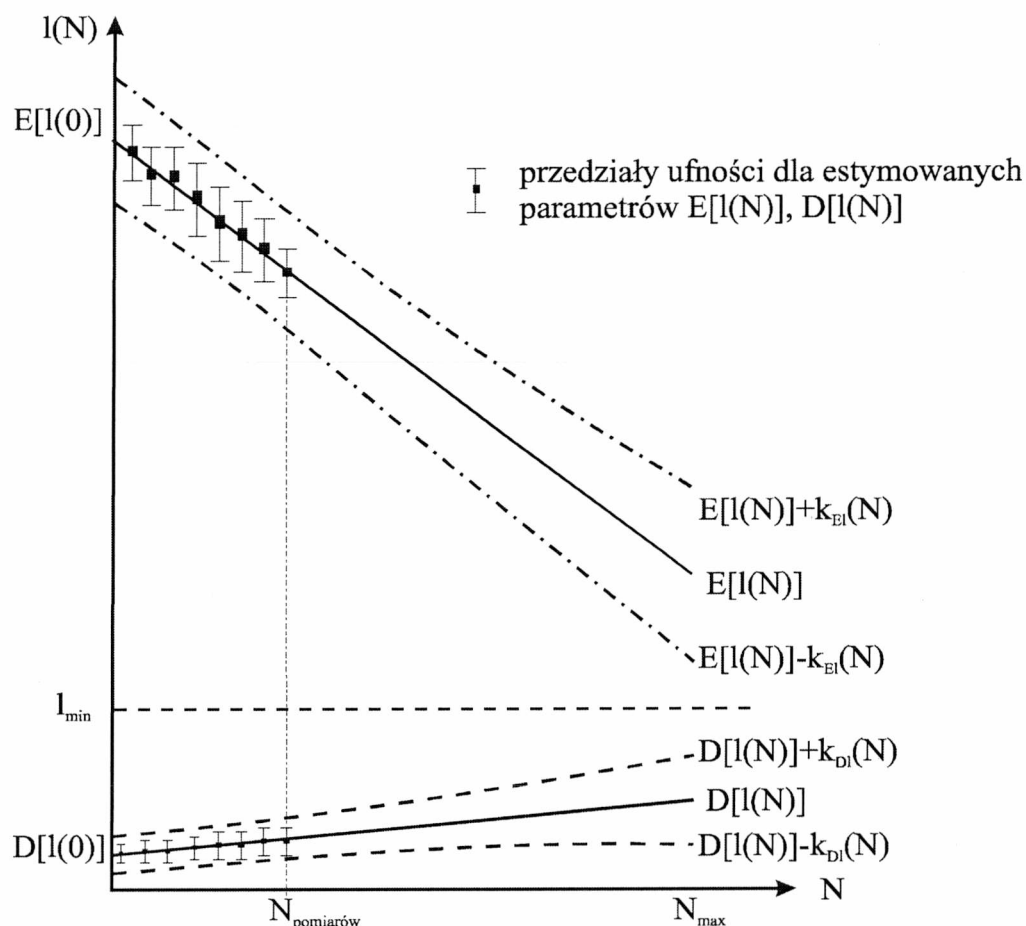
$$\begin{aligned} E[l(N_i)] &= \bar{a}_l + \bar{b}_l N_i \\ D[l(N_i)] &= \bar{c}_l + \bar{d}_l N_i, \end{aligned} \quad (7.23)$$

w których współczynniki prostych wyznaczone są metodą MNK.

Następnie wyznacza się przedziały ufności (rys. 7.3) dla poszczególnych realizacji prostych wartości średnich oraz odchylenia standardowego

$$CONF \left\{ \begin{aligned} &E[l(N_i)] + k_{El}(N_i), E[l(N_i)] - k_{El}(N_i) \\ &D[l(N_i)] + k_{Dl}(N_i), D[l(N_i)] - k_{Dl}(N_i) \end{aligned} \right\}, \quad (7.24)$$

gdzie $k_{El}(N_i)$, $k_{Dl}(N_i)$ są współczynnikami, których wartość wyznacza się odpowiednio dla poszczególnych prostych regresji z zależności (7.21).



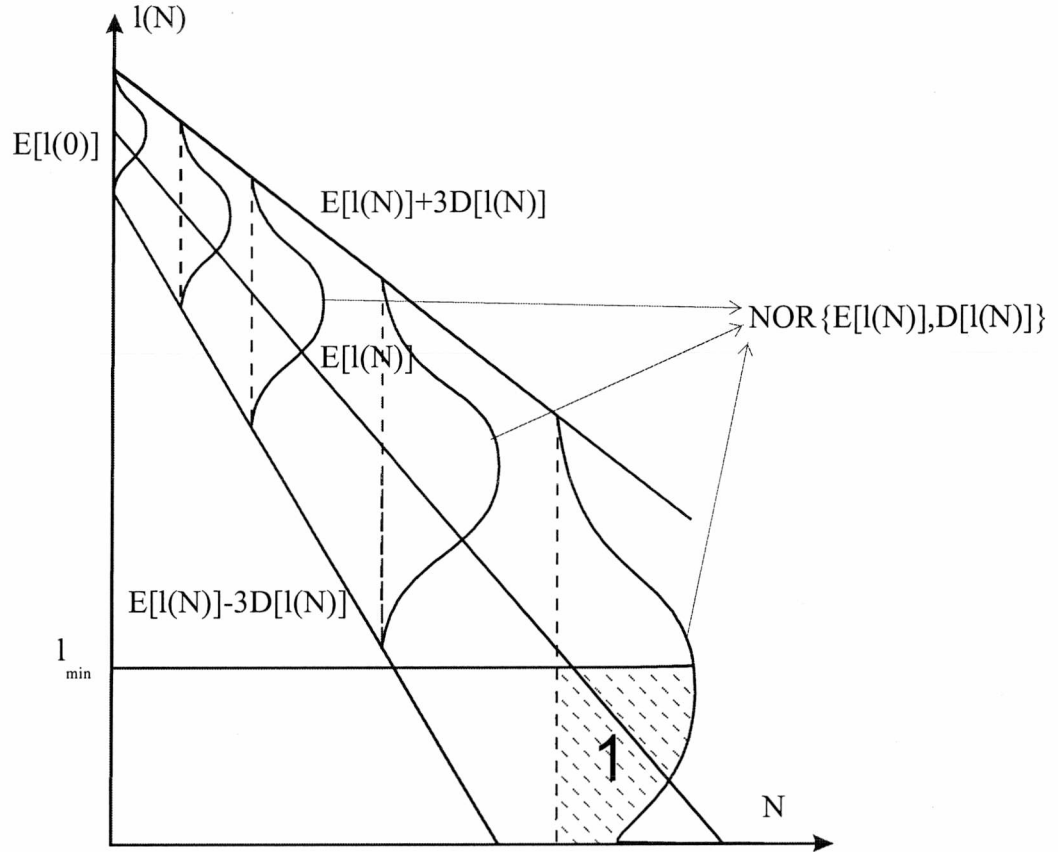
Rys. 7.3. Pasma predykcji prostych regresji wartości średnich oraz odchylenia standardowego dla przechyłu styków w funkcji liczby cykli łączeniowych

Na rys. 7.4 przedstawiono poglądowy przebieg zmian przechyłu styków łącznika, których rozkłady empiryczne wyznaczone po wykonaniu N cykli łączeniowych, opisano rozkładem normalnym. Przebiegi obwiedni dwustronnego trzysigmowego przedziału dla wartości oczekiwanej przechyłu styków opisano zależnościami (rys. 7.4)

$$\begin{aligned} l(N_i)_{\max} &= E[l(N_i)] + 3 D[l(N_i)] \\ l(N_i)_{\min} &= E[l(N_i)] - 3 D[l(N_i)]. \end{aligned} \quad (7.25)$$

Zaznaczono także przechył dopuszczalny (minimalny) $-l_{\min}$ i leżący poniżej niego obszar (pole 1 na rys. 7.4), wyznaczający zgodnie z rozkładem normalnym, γ procentowe zużycie łączników.

Dla poszczególnych realizacji zmian przechyłu styków wartość średnia i odchylenie standardowe są zmienną losową wyznaczaną na podstawie metody Monte Carlo z ich przedziału predykcji określonych zależnością (7.24).



Rys. 7.4. Zależność rozkładu statystycznego przechyłu styków od liczby cykli łączeniowych wraz z prostą regresji wartości oczekiwanej $E[l(N)]$ oraz obwiedniami przedziału trzysigmowego rozkładu normalnego $E[l(N)] \pm 3D[l(N)]$, $E[l(0)]$ - początkowa wartość przechyłu styków, l_{min} - minimalny przechył styków, $NOR\{E[l(N)], D[l(N)]\}$ - rozkład normalny dla danej liczby cykli łączeniowych, 1 - część rozkładu statystycznego określająca prawdopodobieństwo uszkodzenia styków w wyniku nadmiernego zużycia

Prawdopodobieństwo poprawnego działania zestyków łącznika, ze względu na możliwość zmniejszenia przechyłu styków poniżej wartości dopuszczalnej, można określić zależnością:

$$R[l(N)] = \int_{l_{min}}^{l(N)_{max}} f(l) dl = 1 - \Phi(l), \quad (7.26)$$

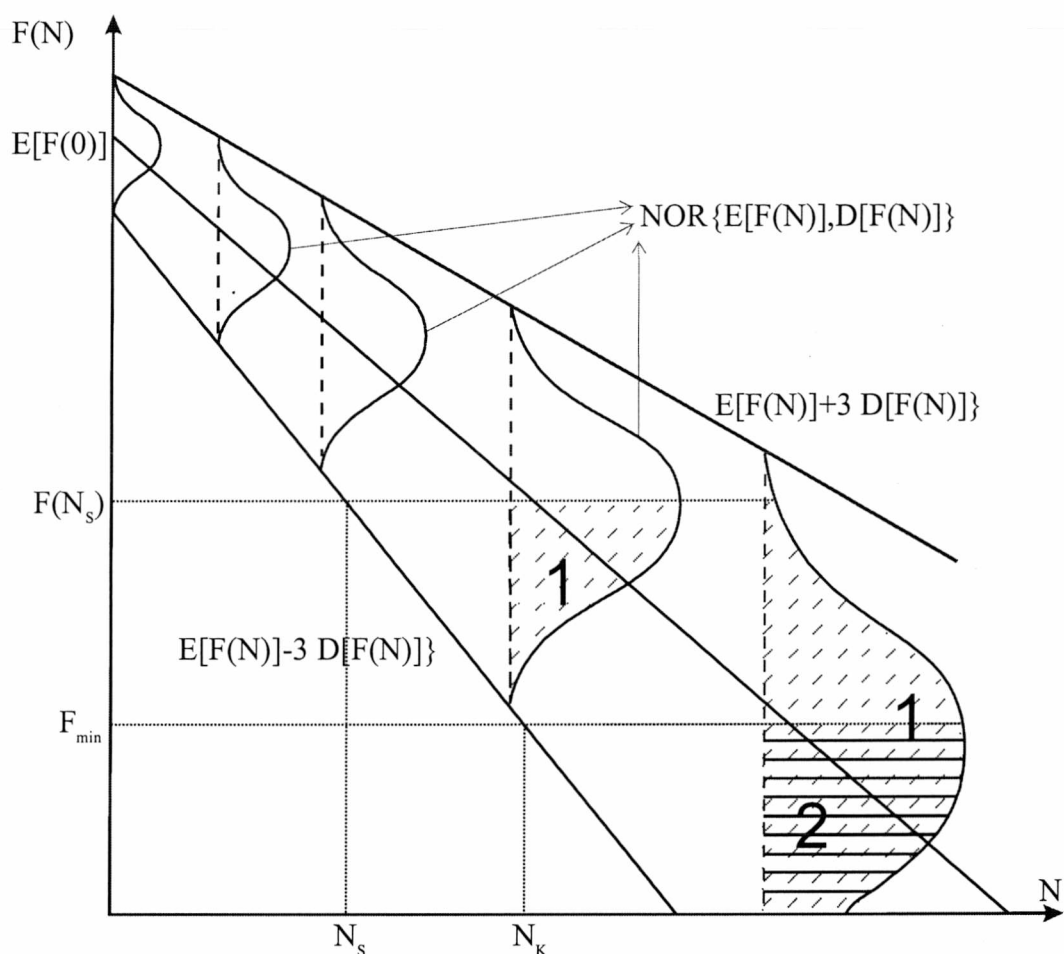
w której: $l(N)_{max} = E[l(N)] + 3D[l(N)]$ - górna granica przedziału trzysigmowego rozkładu normalnego,

$f(l) = NOR\{E[l(N)], D[l(N)]\}$ - funkcja rozkładu normalnego o parametrach wyznaczanych dla danej wartości liczby łączy,

$\Phi(l) = \Phi\left\{\frac{l_{min} - E[l(N)]}{D[l(N)]}\right\}$ - całka Laplace'a stabelaryzowana dla $NOR(0,1)$.

7.4.3. Estymacja parametrów prostych regresji rozkładów empirycznych zmian siły docisku zestykowego w funkcji liczby cykli łączeniowych

W sposób analogiczny do przechyłu styków, można wyznaczyć zależności wartości średniej i odchylenia standardowego siły docisku zestykowego w funkcji liczby cykli łączeniowych.



Rys. 7.5. Zależność rozkładu statystycznego siły docisku zestyków od liczby cykli łączeniowych oraz prostej regresji wartości oczekiwanej $E[F(N)]$ i obwiedni przedziału trzysigimowego rozkładu normalnego $E[F(N)] \pm 3D[F(N)]$, $E[F(0)]$ - początkowa wartość siły docisku styków, F_{min} - minimalna siła docisku styków, $NOR\{E[F(N)], D[F(N)]\}$ - rozkład normalny siły docisku zestyków dla danej liczby cykli łączeniowych, 1 - część rozkładu statystycznego określająca prawdopodobieństwo uszkodzenia styków w wyniku ich szczepienia, 2 - część rozkładu statystycznego określająca prawdopodobieństwo uszkodzenia styków w wyniku przekroczenia minimalnej wartości siły docisku

Na podstawie skróconych badań laboratoryjnych rozkładów siły docisku zestykowego w funkcji liczby wykonanych cykli łączeniowych, korzystając z zależności

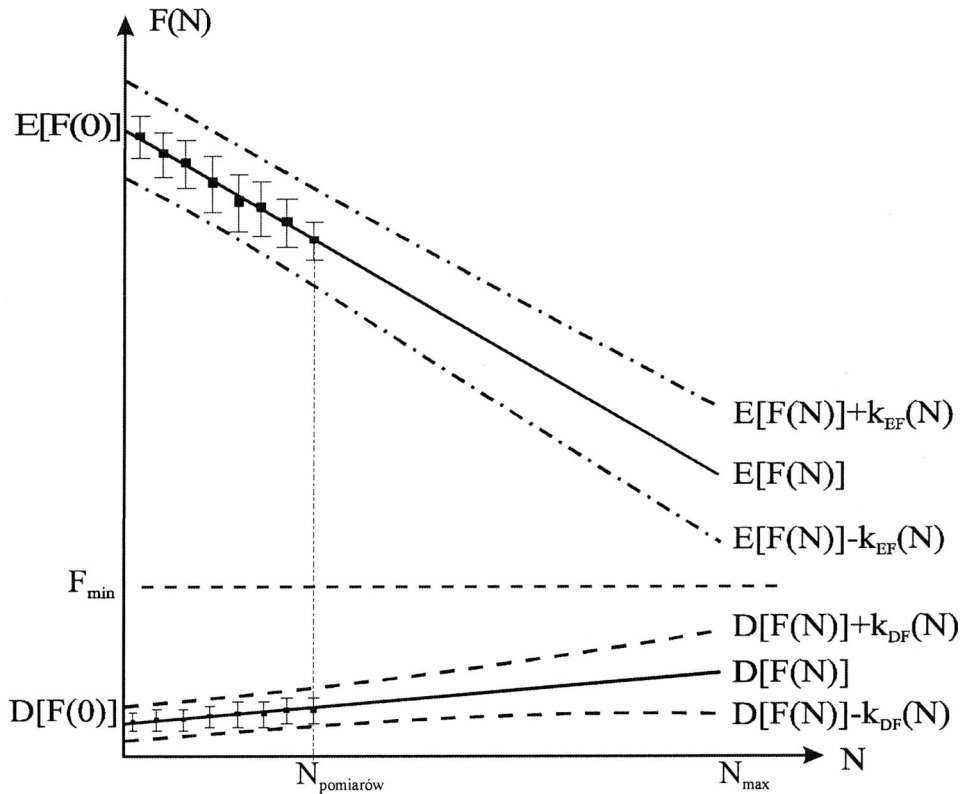
$$\begin{aligned} E[F(N_i)] &= \bar{a}_F + \bar{b}_F N_i \\ D[F(N_i)] &= \bar{c}_F + \bar{d}_F N_i, \end{aligned} \quad (7.27)$$

wyznaczamy proste regresji wartości średniej i odchylenia standardowego.

Prawdopodobieństwo przekroczenia wartości minimalnej siły docisku F_{min} będzie się zwiększało, zgodnie z rozkładem normalnym, w miarę zwiększania liczby łączy. Po wykonaniu przez stycznik N_K łączy, występuje przekroczenie wartości dopuszczalnej siły docisku zestykowego (rys. 7.5 – pole 2).

Analogicznie też wyznacza się proste dwustronne trzysigmowego przedziału ufności, dla wartości oczekiwanej siły dociskowej zestyków, korzystając z zależności (rys. 7.5)

$$\begin{aligned} F(N_i)_{max} &= E[F(N_i)] + 3 D[F(N_i)] \\ F(N_i)_{min} &= E[F(N_i)] - 3 D[F(N_i)] = \bar{e}_F + \bar{f}_F N_i. \end{aligned} \quad (7.28)$$



Rys. 7.6. Pasma predykcji prostych regresji wartości średnich oraz odchylenia standardowego dla siły docisku zestyków w funkcji liczby cykli łączeniowych

Prawdopodobieństwo poprawnego działania zestyków łącznika ze względu na możliwość przekroczenia dopuszczalnej siły docisku zestyków można określić zależnością

$$R[F(N)] = \int_{F_{min}}^{F(N)_{max}} f(F) dF = 1 - \Phi(F), \quad (7.29)$$

w której: $f(F) = NOR\{E[F(N)], D[F(N)]\}$ jest funkcją rozkładu normalnego,

o parametrach wyznaczanych dla danej wartości liczby łączy,

$$\Phi(F) = \Phi \left\{ \frac{F_{\min} - E[F(N)]}{D[F(N)]} \right\} \text{ jest całką Laplace'a.}$$

Dla poszczególnych realizacji zmian przechyłu styków wartość średnia i odchylenie standardowe są zmiennymi losowymi wyznaczanymi na podstawie metody Monte Carlo.

Zmiany siły docisku dla poszczególnych wartości liczby cykli łączeniowych (wraz z ich przedziałami predykcji) określone są zależnością (rys. 7.6).

$$f[F(N_i)] = \text{NOR}\{E[F(N_i)] \pm k_{EF}(N_i), D[F(N_i)] \pm k_{DF}(N_i)\}. \quad (7.30)$$

7.4.4. Wyznaczanie prawdopodobieństwa szepienia styków w funkcji liczby cykli łączeniowych

Szepienie styków wystąpić może w czasie, w którym wartość chwilowa początkowego prądu załączeniowego i , podczas zamykania się zestyków będąca zmienną losową niezależną od wartości siły docisku styków, osiągnie wartość granicznego prądu szepienia i_{sg} . Przy maksymalnym prądzie łączeniowym, jaki może wystąpić w komutowanym obwodzie i_z , graniczną wartość siły docisku począwszy od której może występować zjawisko szepienia wyznaczamy z zależności (2.7), przy $i_{sg}(N) = i_z$ otrzymując zależność

$$F(N_s) = \frac{i_z^2}{c_m^2}. \quad (7.31)$$

Na podstawie zależności (2.7), (7.28) możemy wyznaczyć liczbę cykli łączeniowych po wykonaniu której, dla badanych łączników występuje niezerowe prawdopodobieństwo szepienia styków. Powyższą liczbę cykli łączeniowych wyznaczamy z zależności

$$N_s = \text{INT} \left\{ \frac{F(N_s) - \bar{e}_F}{\bar{f}_F} \right\}. \quad (7.32)$$

Po przekroczeniu wartości $F(N_s)$, wraz ze wzrostem liczby cykli łączeniowych wykonanych przez styczniki, zgodnie z rozkładem normalnym zwiększa się $\gamma\%$ liczba styczników mogących ulec szepieniu styków (na rys. 7.5 określa ją pole 1 leżące poniżej prostej $F(N_s)$).

Podczas zamykania się styków w komutowanym obwodzie, szepienie styków wystąpić może w chwili, gdy wartość chwilowa prądu załączeniowego osiągnie wartość granicznego prądu szepieniowego zależnego od liczby cykli łączeniowych.

Biorąc pod uwagę tylko zjawisko szepienia styków (dla danej liczby cykli łączeniowych N), prawdopodobieństwo poprawnej pracy układu zestykowego pojedynczego toru prądowego stycznika R_1 można opisać zależnością

$$R_1[S(N)] = P\{i < i_{sg}(N)\} = \begin{cases} 1 & N < N_s \\ 1 & \text{dla } N \geq N_s, \quad i_{MC} < i_{sg}(N) \\ 0 & N \geq N_s, \quad i_{MC} \geq i_{sg}(N), \end{cases} \quad (7.33)$$

w której: i_{MC} – jest zmienna losową generowaną metodą Monte Carlo z rozkładu jednostajnego $UNI(0, i_z)$.

Wielokrotna symulacja niezależnej zmiennej losowej prądu łączeniowego pozwala dla każdej zadanej liczby cykli łączeniowych określić $\gamma\%$ prawdopodobieństwo poprawnej pracy łączników ze względu na zjawisko szepienia styków $R[S(N)]$.

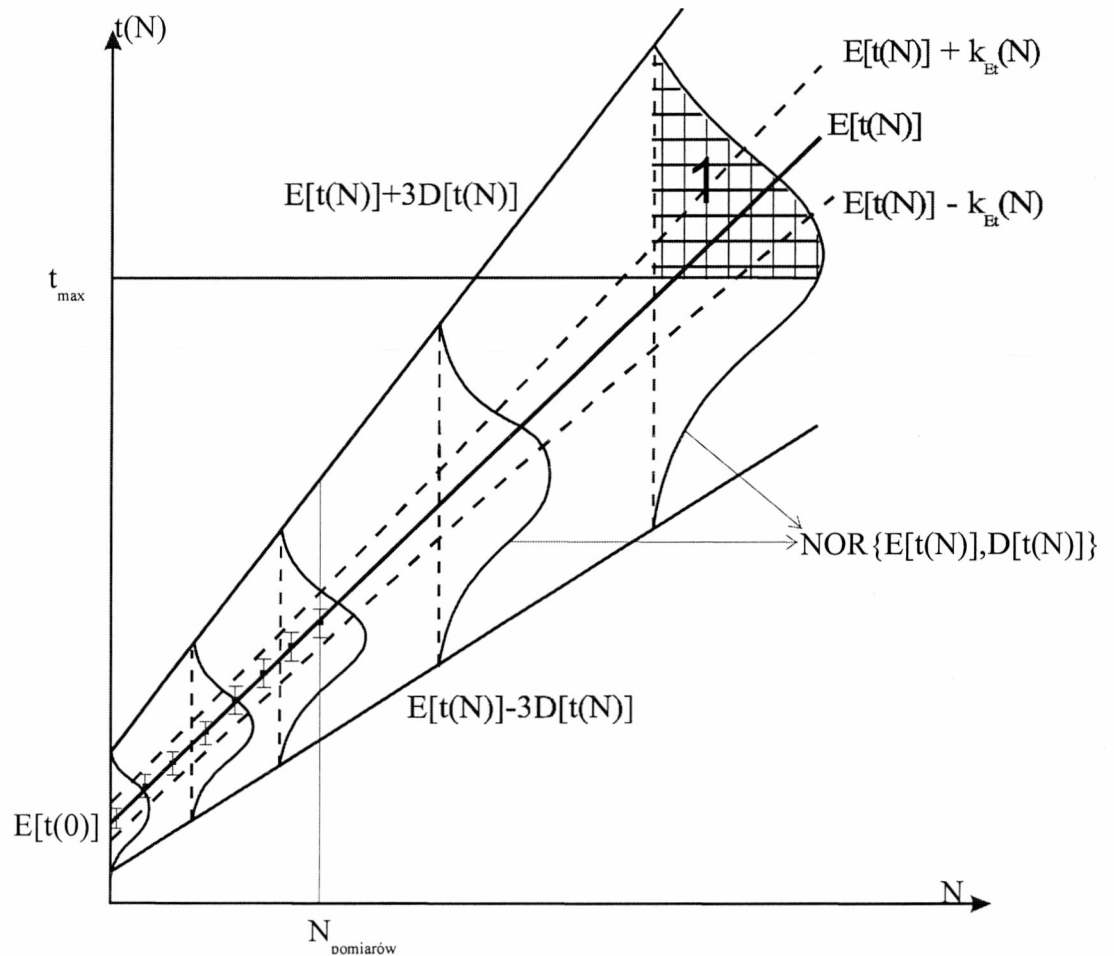
Zakładając, że podczas symulacji Monte Carlo przeprowadzone będzie L_{sym} symulacji a liczba zestyków, która w wyniku symulacji uległa uszkodzeniu wynosiła L_{usz} , wówczas dla danej liczby cykli łączeniowych N prawdopodobieństwo poprawnej pracy zestyków, ze względu na szepienia wyznaczamy z zależności

$$R[S(N)] = \frac{L_{usz}(N)}{L_{sym}}. \quad (7.34)$$

7.4.5. Estymacja parametrów prostych regresji rozkładów empirycznych zmian czasu niejednoczesności zamykania zestyków w funkcji liczby cykli łączeniowych

Analogicznie, jak dla poprzednich parametrów prognozujących, wyznaczamy metodą MNK proste regresji liniowej zmian parametrów rozkładu normalnego $E[t(N)]$, $D[t(N)]$ czasów niejednoczesności zamykania zestyków w funkcji liczby cykli łączeniowych z zależności

$$\begin{aligned} E[t(N_i)] &= \bar{a}_t + \bar{b}_t N_i \\ D[t(N_i)] &= \bar{c}_t + \bar{d}_t N_i. \end{aligned} \quad (7.35)$$



Rys. 7.7. Zależność rozkładu statystycznego czasów niejednoczesności zamykania zestyków od liczby cykli łączeniowych, wraz z prostą regresji wartości oczekiwanej $E[t(N)]$ oraz prostymi przedziału trzysigmowego rozkładu normalnego $E[t(N)] \pm 3D[t(N)]$, $E[t(0)]$ – początkowa wartość czasów niejednoczesności zamykania zestyków, t_{max} – dopuszczalny czas niejednoczesności zamykania zestyków, $NOR\{E[t(N)], D[t(N)]\}$ – rozkład normalny czasów niejednoczesności zamykania zestyków dla danej liczby cykli łączeniowych, 1 – część rozkładu statystycznego określająca prawdopodobieństwo uszkodzenia styków w wyniku przekroczenia dopuszczalnego czasu niejednoczesności zamykania zestyków

Następnie wyznaczamy współczynniki prostych regresji dolnego i górnego trzysigmowego przedziału dla czasów niejednoczesności zamykania zestyków na podstawie zależności

$$\begin{aligned} t(N_i)_{max} &= E[t(N_i)] + 3D[t(N_i)] \\ t(N_i)_{min} &= E[t(N_i)] - 3D[t(N_i)] \end{aligned} \quad (7.36)$$

Na rysunku 7.7 przedstawiono przykładowe zmiany wartości oczekiwanej i obwiedni największych wartości niejednoczesności zamykania zestyków, opisanych za pomocą prostych regresji liniowej w zależności od liczby cykli łączeniowych.

Prawdopodobieństwo poprawnego działania zestyków łącznika, ze względu na możliwość przekroczenia dopuszczalnej wartości czasu niejednoczesności zamykania zestyków łącznika, wyznaczamy z zależności

$$R[t(N)] = \int_{t(N)_{\min}}^{t_{\max}} f(t) dt = 1 - \Phi(t), \quad (7.37)$$

w której $f(t)$ jest funkcją rozkładu normalnego czasów niejednoczesności zamykania zestyków.

Dla poszczególnych realizacji zmian czasów niejednoczesności zamykania zestyków, wartość średnia i odchylenie standardowe są zmiennymi losowymi wyznaczanymi odpowiednio z ich obszarów predykcji na podstawie metody Monte Carlo z zależności

$$NOR\{E[t(N) \pm k_{Et}(N)], D[t(N) \pm k_{Dt}(N)]\}, \quad (7.38)$$

w której $k_{Et}(N)$, $k_{Dt}(N)$ są krzywymi Neymana wyznaczanymi dla danej prostej regresji na podstawie wzoru (7.21).

7.4.6. Prawdopodobieństwo poprawnej pracy zestyków

Ponieważ w opracowanym modelu uszkodzenie układu zestykowego może nastąpić zarówno w wyniku szepienia styków lub przekroczenia wartości kryterialnej przechyłu styków, siły docisku zestyków, czasu niejednoczesności zamykania zestyków, więc jako moment uszkodzenia układu zestykowego przyjmuje się liczbę cykli odpowiadających wystąpieniu pierwszego z tych zdarzeń.

Łączne prawdopodobieństwo poprawnej pracy zestyków stycznika, przy uwzględnieniu wcześniej zdefiniowanych zależności, można zapisać w postaci wyrażenia

$$R(N) = \min\{R[l(N)], R[F(N)], R[S(N)], R[t(N)]\}, \quad (7.39)$$

w którym $R[l(N)]$, $R[F(N)]$, $R[S(N)]$, $R[t(N)]$ są określone odpowiednio zależnościami (7.26), (7.29), (7.34) i (7.37).

Dodatkową zaletą powyższego modelu jest możliwość analizy przyczyny powstawania uszkodzenia zestyków oraz oceny wpływu poszczególnych czynników na niezawodność zestyków łączników jak również wyodrębnienia zjawisk mających dominujący wpływ na trwałość zestyków łącznika.

7.5. Dokładność prognozowania niezawodności zestyków za pomocą modelu symulacyjnego

Dokładność estymacji trwałości łączeniowej zestyków za pomocą metody symulacyjnej zależy od [59]:

- poziomu ufności β_p , z jakim wyznacza się w pełnych lub skróconych badaniach laboratoryjnych przedział ufności dla parametrów przyjętych jako prognozujące,
- poziomu ufności β_s , z jakim wyznacza się w badaniach symulacyjnych przedział tolerancji statystycznej trwałości zestyków stycznika.

Przebiegi empiryczne parametrów prognozujących i odpowiadające im symulacje cyfrowe są zmiennymi losowymi niezależnymi, dlatego też niezawodność zestyków stycznika szacowana jest na poziomie ufności β , równemu iloczynowi $\beta_p \beta_s$.

Zapewnienie wymaganego poziomu ufności β_s , w badaniach symulacyjnych (przedział tolerancji statystycznej) przy wykorzystaniu techniki cyfrowej, nie stanowi problemu. Liczba symulacji, polegających na generowaniu liczb pseudolosowych według algorytmu określonego modelem, może być bardzo duża. Czas trwania symulacji dla bardzo wielu styczników jest nieporównywalnie krótszy od czasu rzeczywistego trwania badania trwałości łączeniowej.

Korzystając z nieparametrycznego przedziału tolerancji statystycznej, liczbę symulacji n niezbędnych do zapewnienia żądanego poziomu ufności, można wyznaczyć na podstawie zależności [21,23,56]

$$1 - n\gamma^{n-1} + (n-1)\gamma^n = \beta_s, \quad (7.40)$$

lub z zależności, która jest jej bardzo dobrym przybliżeniem

$$n \geq \frac{1+\gamma}{1-\gamma} \frac{\chi_{4,\beta_s}^2}{4} + \frac{1}{2}, \quad (7.41)$$

gdzie χ_{4,β_s}^2 jest kwantylem rozkładu chi-kwadrat dla czterech stopni swobody i dla prawdopodobieństwa β_s .

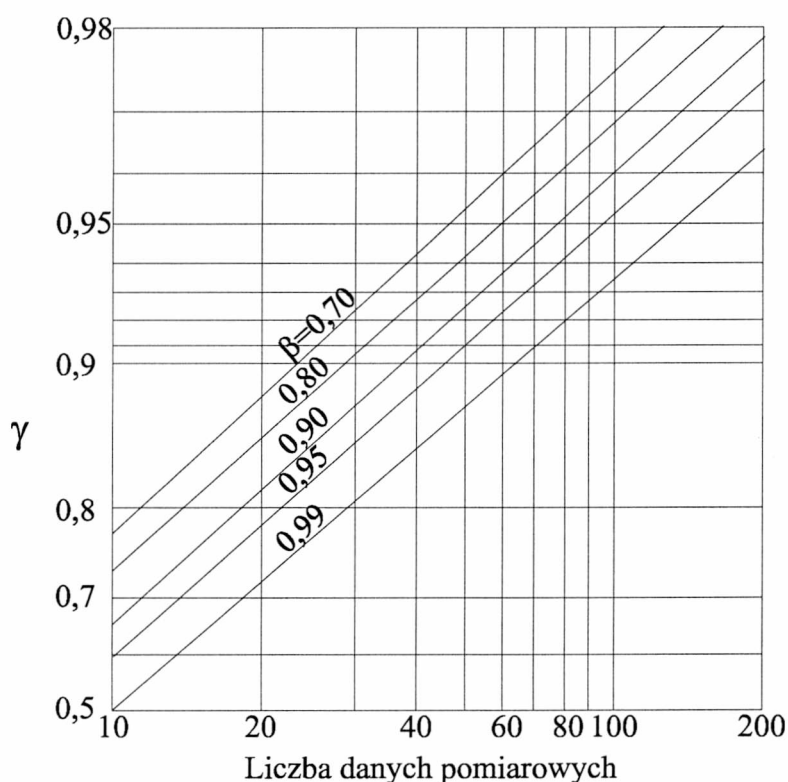
Dla założonej wartości γ , i β_s można wyznaczyć z tej nierówności niezbędną liczbę symulacji, po wykonaniu której za dolną i górną granicę dwustronnego przedziału tolerancji statystycznej przyjmuje się najmniejszą i największą wartość badanego parametru.

Prawdopodobieństwo β_r , z którym wyznacza się obszar ufności dla empirycznych prostych regresji parametrów prognozujących dobiera się tak, aby zawierał przedziały ufności (z prawdopodobieństwem β_e) z jakim wyznacza się w skróconych badaniach przedział ufności dla wartości średniej i odchylenia standardowego parametrów przyjętych za prognozujące.

Poziom ufności β_p , z jakim wyznacza się w skróconych badaniach przedział ufności dla parametrów przyjętych za prognozujące zależy od:

- liczby danych pomiarowych (liczebności próbki, liczby pomiarów i ich częstotści wykonywania),
- części γ zbioru łączników, do której ma się odnosić wyznaczony wskaźnik,
- wariancji estymatora.

Niezbędną liczebność próbki, wymaganą do zapewnienia żądanej dokładności oszacowania funkcji niezawodności zestyków, można wyznaczyć z zadaniem poziomem ufności β dla populacji γ zestyków styczników, na podstawie rys. 7.8.



Rys. 7.8. Zależność części γ zbioru wartości objętych dwustronnym przedziałem utworzonym przez najmniejszą i największą realizację badanej zmiennej losowej od liczebności próbki, dla określonych poziomów ufności β [58]

Zwiększając liczbę danych pomiarowych przez zwiększenie liczebności próbek badanych łączników oraz zwiększenie częstości wykonywanych pomiarów zmian parametrów, można uzyskać zakładaną dokładność wyznaczania funkcji niezawodności zestyków.

Prognozowanie trwałości zestyków styczników na podstawie znajomości początkowego przebiegu zmian parametrów prognozujących wymaga określenia, co ile cykli łączeniowych wykonywane będą poszczególne serie pomiarów. Ze względu na dokładność pożądana jest jak największa liczba wykonanych pomiarów, jednakże ze względów metrologicznych, odstęp pomiędzy poszczególnymi pomiarami powinien zapewnić możliwość pominięcia uchybów pomiarowych w porównaniu z występującymi zmianami rejestrowanych parametrów [13,56].

Przy zbyt krótkiej obserwacji procesu zużycia istnieje obawa że proces może się zmienić (etap dopasowywania się poszczególnych elementów), a prognoza będzie fałszywa.

Zgodnie z teorią procesów stochastycznych, z dostateczną dla celów praktycznych dokładnością, w celu wyznaczenia współczynników prostych regresji zmian parametrów prognozujących, wystarczy wyznaczyć przebieg tego procesu dla 20% przewidywanej trwałości łączeniowej badanych styczników [12]. Minimalna liczba łączy - $N_{\text{pomiarów}}$, jaką należy przeprowadzić podczas skróconych badań laboratoryjnych zależy również od kategorii użytkowania, w której chcemy badać styczniki.

Ze względu na fakt, że w typowym przebiegu eksploatacji styczników występuje początkowy etap dopasowywania, w ciągu którego zestyki styczników „przystosowują” się do warunków pracy (np. początkowe zwiększenie wartości przechyłu styków), do dalszej analizy, w celu wyznaczenia współczynników prostych regresji zmian parametrów prognozujących, należy pominąć dane pomierzone przy zerowej liczbie cykli łączeniowych.

8. Opis programu komputerowego do prognozowania niezawodności zestyków styczników

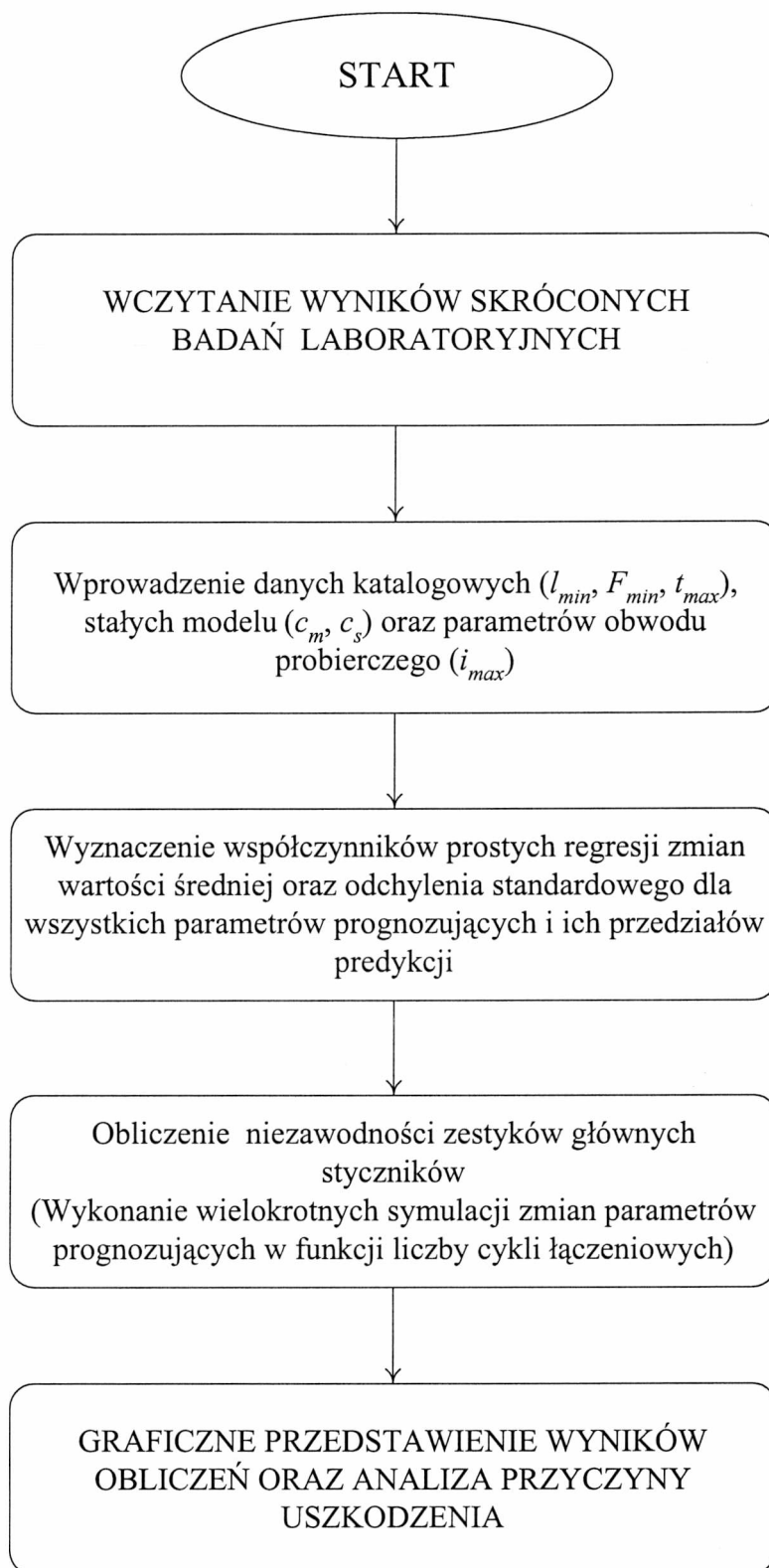
W oparciu o przedstawiony w rozdziale 7.4 pracy symulacyjny matematyczno-fizyczny model wieloparametrowy niezawodności zestyków łączników, opracowany został program komputerowy - PROZESTYK. Wykorzystano w nim procedury numeryczne pakietu Mathcad Professional wersji 8.0 dla środowiska Windows [29] i zapewniono łatwość modyfikacji danych wejściowych oraz algorytmu obliczeń. Zaletą programu jest graficzna prezentacja wyników pośrednich i końcowego wyniku obliczeń trwałości gamma-beta zestyków. Możliwa jest również analiza przyczyn powstawania uszkodzenia zestyków. W załączniku 12.3 przedstawiono wydruk powyższego programu.

Dane wejściowe do programu wprowadza się metodą wsadową, podając ścieżkę dostępu wraz z nazwą pliku danych pomiarowych zmian parametrów prognozujących uzyskanych podczas badań skróconych. Należy również określić wartości liczbowe stałych: c_m - współczynnika materiałowo-konstrukcyjnego zestyków, uwzględniającego kinematykę napędu, c_s - współczynnika sprężystości sprężyn stykowych oraz wartości kryterialnych parametrów prognozujących l_{min} , F_{min} , t_{max} .

Opracowany program komputerowy wspomagający obliczenia niezawodności zestyków ma na celu określenie przewidywanej realizacji procesu zmian pogarszania się właściwości łączników i wyznaczenie prognozowanej trwałości gamma-beta. Otrzymuje się ją na podstawie w -krotnej procedury powtarzania procesu symulacji. Program komputerowy generuje, zgodnie z algorytmem modelu symulacyjnego, zbiór realizacji zmiennych losowych siły docisku styków, przechyłu styków i czasu niejednoczesności zamykania styków, jak również wartości prądu łączeniowego [49].

W wyniku wielokrotnej symulacji liczb pseudolosowych o rozkładzie normalnym z danego zakresu ich wartości, generowane są losowe wartości zmian parametrów prognozujących z ich obszarów predykcji.

Program komputerowy do prognozowania niezawodności zestyków składa się z kilku wzajemnie powiązanych modułów przedstawionych graficznie na rys. 8.1.



Rys. 8.1. Graficzne przedstawienie procedury obliczania niezawodności zestyków styczników elektromagnetycznych na podstawie skróconych badań laboratoryjnych

1. Początkowe procedury programu mają na celu określenie, w oparciu o dane pomiarowe, realizację zmian parametrów prognozujących w funkcji liczby cykli łączeniowych. Macierze

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{L} &= \begin{bmatrix} l_{0,1} & l_{0,2} & \dots & l_{0,k} \\ l_{1,1} & l_{1,2} & \dots & l_{1,k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_{n,1} & l_{n,2} & \dots & l_{n,k} \end{bmatrix} \\ \mathbf{F} &= \begin{bmatrix} F_{0,1} & F_{0,2} & \dots & F_{0,k} \\ F_{1,1} & F_{1,2} & \dots & F_{1,k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{n,1} & F_{n,2} & \dots & F_{n,k} \end{bmatrix} \\ \mathbf{T} &= \begin{bmatrix} t_{0,1} & t_{0,2} & \dots & t_{0,k} \\ t_{1,1} & t_{1,2} & \dots & t_{1,k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{n,1} & t_{n,2} & \dots & t_{n,k} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (8.1)$$

zmian przechyłu styków, siły docisku zestyków, czasu niejednoczesności zamykania styków, wyznaczane są na podstawie badań losowej próbki łączników o liczebności $k+1$, dla której wykonano $n+1$ pomiarów wartości parametrów prognozujących, mierzonych co określoną liczbę cykli łączeniowych - $\Delta N = N_{i+1} - N_i$.

2. Na podstawie macierzy $\mathbf{L}, \mathbf{F}, \mathbf{T}$ zmian wektora losowego parametrów prognozujących dla poszczególnych łączników, wyznaczane są miary parametrów statystyki rozkładu normalnego *NOR* - wartości średnie - $E(X)$ oraz odchylenia standardowe - $D(X)$ tworząc macierz wyników $\mathbf{E}$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E[l(0)] & D[l(0)] & E[F(0)] & D[F(0)] & E[t(0)] & D[t(0)] \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ E[l(i)] & D[l(i)] & E[F(i)] & D[F(i)] & E[t(i)] & D[t(i)] \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ E[l(n)] & D[l(n)] & E[F(n)] & D[F(n)] & E[t(n)] & D[t(n)] \end{bmatrix}. \quad (8.2)$$

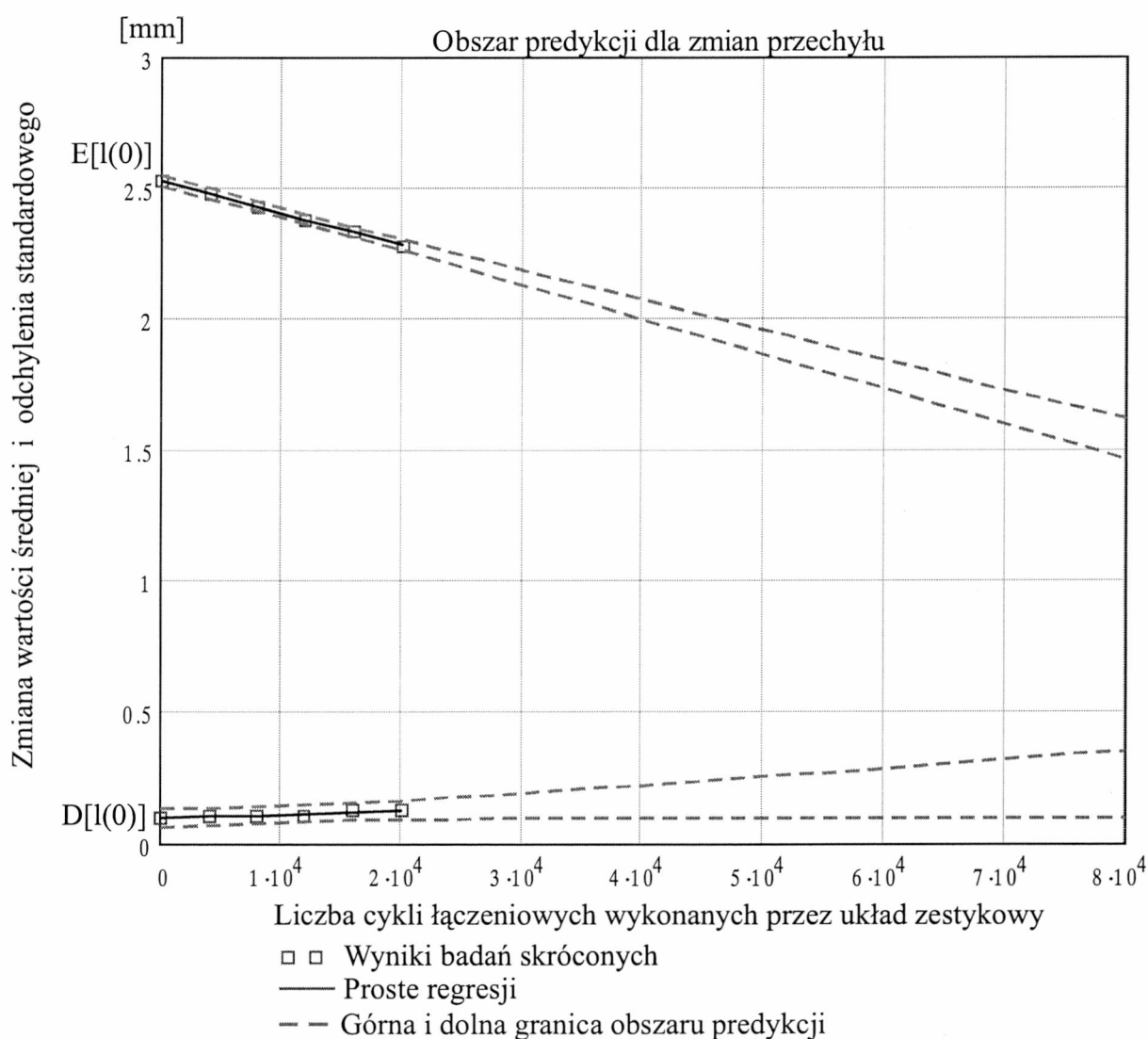
3. W toku dalszego postępowania wyznacza się macierz $\mathbf{P}$, która określa przedział ufności dla wartości średnich oraz odchyłeń standardowych, obliczonych z poziom ufności β_e na podstawie zależności (7.6), (7.8)

$$\mathbf{P} = CONF \{E[l(N)], D[l(N)], E[F(N)], D[F(N)], E[t(N)], D[t(N)]\}. \quad (8.3)$$

4. Na podstawie macierzy E , w oparciu o zmiany wartości średniej i odchylenia standardowego poszczególnych parametrów prognozujących, wyznacza się, za pomocą metody MNK, współczynniki prostych regresji parametrów prognozujących dla zmian obu miar rozkładu normalnego.

Uzyskuje się następujące proste regresji

$$\begin{aligned} E[l(N_i)] &= \bar{a}_l + \bar{b}_l N_i & E[F(N_i)] &= \bar{a}_F + \bar{b}_F N_i & E[t(N_i)] &= \bar{a}_t + \bar{b}_t N_i \\ D[l(N_i)] &= \bar{c}_l + \bar{d}_l N_i & D[F(N_i)] &= \bar{c}_F + \bar{d}_F N_i & D[t(N_i)] &= \bar{c}_t + \bar{d}_t N_i \end{aligned} \quad (8.4)$$



Rys. 8.2. Graficzna prezentacja wyników uzyskanych z obliczeń za pomocą programu PROZESTYK, na podstawie badań skróconych zmian przechyłu styków w funkcji liczby cykli łączeniowych oraz odpowiadające im proste regresji dla wartości średniej i odchylenia standardowego, jak również wyznaczony z poziomem ufności 0,95 obszar ufności dla prostych regresji

5. Dla estymowanych zmian wartości średniej i odchylenia standardowego poszczególnych parametrów, wyznaczany jest obszar predykcji dla poszczególnych realizacji prostych regresji (rys. 8.2). Poziom ufności prostych regresji β_r dobieramy tak, aby zawierał całkowicie przedziały ufności dla estymowanych wartości średnich i odchyłeń standardowych. Otrzymujemy więc krzywe opisane zależnością

$$k(N_i) = t_{\beta_r/2, n-2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [y_i - y(N_i)]^2}{n-2}} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(N_i - \bar{N})^2}{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}}, \quad (8.5)$$

w której y_i jest wartością średniej lub odchylenia standardowego danego parametru, wyznaczoną z $k+1$ pomiarów po wykonaniu przez łącznik N_i cykli łączeniowych, natomiast $y(N_i)$ jest wartością wyznaczoną na podstawie odpowiedniej prostej regresji.

W celu analizy istotności błędów zastosowania prostej regresji do opisu zmian parametrów prognozujących, należy wyznaczyć różnicę pomiędzy y_i a $y(N_i)$.

Tak otrzymane wartości błędów możemy uznać za losowe jeżeli:

- prawdopodobieństwo błędu ujemnego jest równe prawdopodobieństwu błędu dodatniego,
- kolejne błędy nie wykazują istotnych cech regularności (nie występują istotne związki stochastyczne między błędami wcześniejszymi i późniejszymi oraz nie występuje istotna zależność od liczby cykli łączeniowych).

Graficzne przedstawienie wartości błędów pozwala na szybką ocenę rozkładu błędów.

6. Na podstawie zależności (7.32) wyznacza się liczbę cykli łączeniowych N_s , po wykonaniu której występuje niezerowe prawdopodobieństwo szepienia styków - $R[S(N)] < 1$. Poszczególne losowe wartości prądu łączeniowego generowane są na podstawie rozkładu równomiernego $UNI(0, i_z)$. Zakładając, że podczas symulacji Monte Carlo przeprowadzone będzie L_{sym} symulacji, a liczba łączników, która uległa uszkodzeniu wynosiła L_{usz} , wówczas dla danej liczby cykli łączeniowych N , prawdopodobieństwo poprawnej pracy ze względu na szepienia, wyznacza się z zależności (7.34).

Uzyskane wyniki prawdopodobieństwa poprawnej pracy ze względu na szepienia zapisuje się w ostatniej kolumnie macierzy $\mathbf{W}$, uwzględniając fakt, że dla $N_i < N_s$ $R[S(N_i)] = 1$.

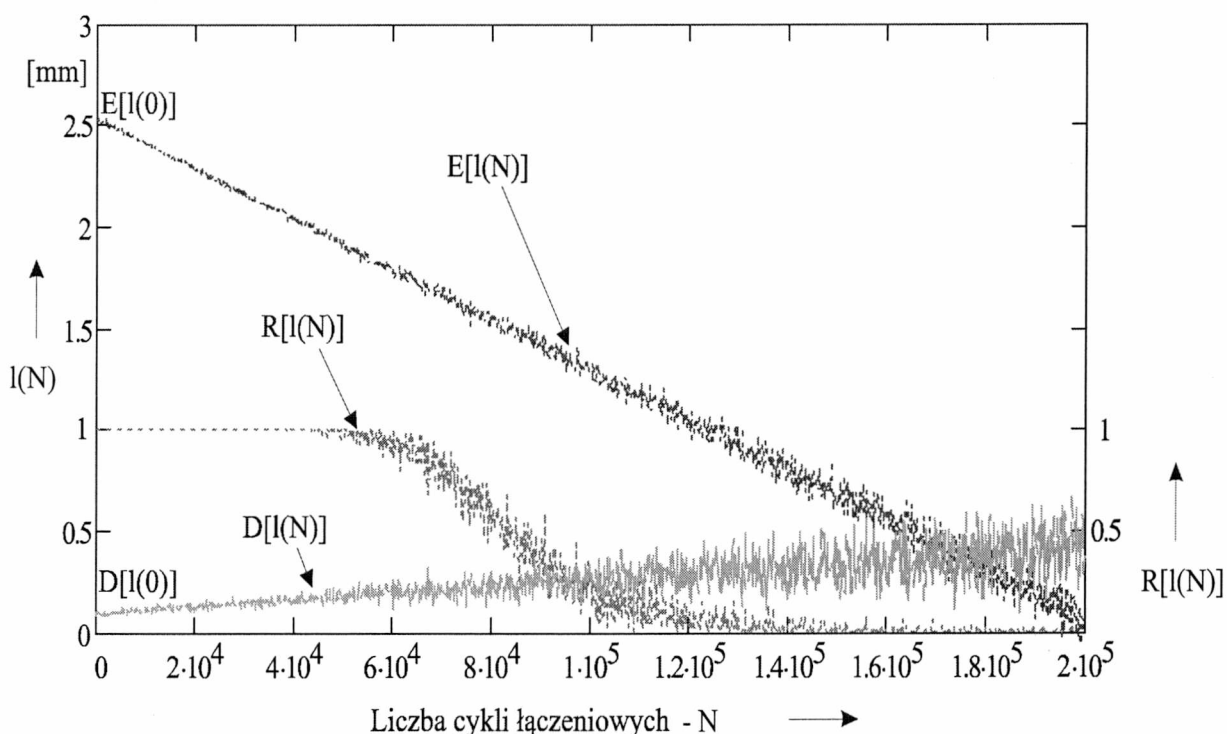
Cała macierz wyników $\mathbf{W}$ określona jest zależnością

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} R[l(N_0)] & R[F(N_0)] & R[t(N_0)] & R[S(N_0)] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R[l(N_i)] & R[F(N_i)] & R[t(N_i)] & R[S(N_i)] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R[l(N_{\max})] & R[F(N_{\max})] & R[t(N_{\max})] & R[S(N_{\max})] \end{bmatrix}, \quad (8.6)$$

w której w pierwszych trzech kolumnach umieszczane są prawdopodobieństwa poprawnej pracy zestyków badanych łączników, ze względu na zmiany danego parametru prognozującego.

W celu określenia horyzontu prognozy - $N_{\max}$ możemy, na podstawie analizy podawanych w katalogach trwałości łączeniowych obecnie produkowanych styczników założyć, że maksymalna liczba łączy jakie poprawnie mogą one wykonać jest rzędu 10^6 cykli łączeniowych.

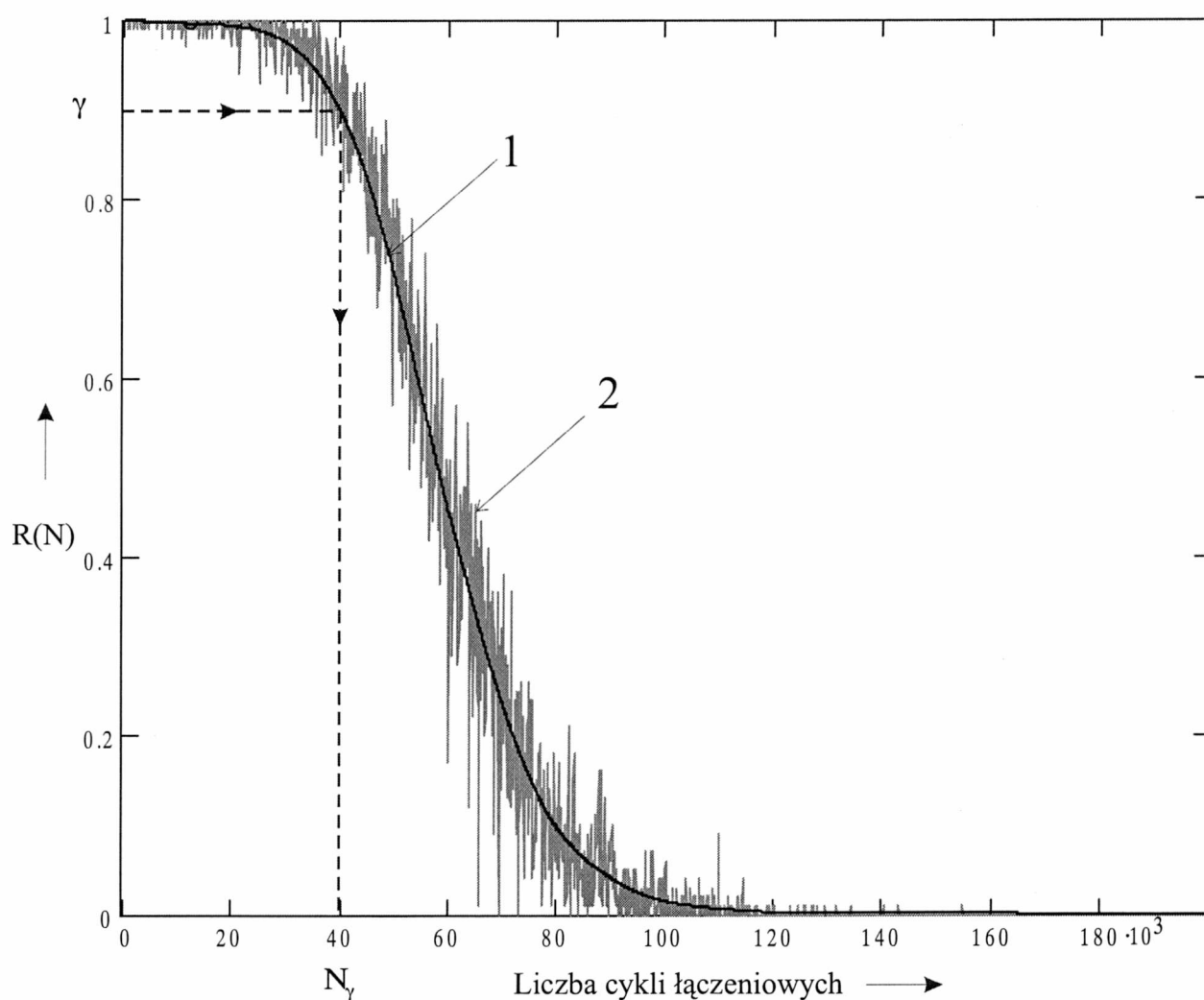
Program komputerowy generuje zbiór realizacji zmiennych losowych siły docisku styków, przechyłu styków i czasu niejednoczesności zamykania styków, jak również wartości prądu łączeniowego, zgodnie z algorytmem modelu symulacyjnego.



Rys. 8.3. Zależność prawdopodobieństwa poprawnej pracy zestyków styczników $R[l(N)]$ ze względu na możliwość przekroczenia dopuszczalnej wartości przechyłu styków w funkcji liczby cykli łączeniowych N . Na rysunku przedstawiono również zmiany symulowanych wartości średniej $E[l(N)]$ i odchylenia standardowego $D[l(N)]$ przechyłu styków. Wyniki uzyskano z obliczeń za pomocą programu PROZESTYK

W wyniku wielokrotnej symulacji liczb pseudolosowych o rozkładzie normalnym z danego zakresu ich wartości, generowane są losowane wartości zmian parametrów prognozujących z ich obszarów predykcji (rys. 8.3).

7. Na podstawie macierzy wyników $\mathbf{W}$ wyznacza się łączne prawdopodobieństwo poprawnej pracy zestyków styczników - $R(N)$. Jest ono określone minimalną wartością, przy danej liczbie cykli łączeniowych, spośród poszczególnych prawdopodobieństw $R[l(N)]$, $R[F(N)]$, $R[S(N)]$, $R[t(N)]$.



Rys. 8.4. Graficzna ilustracja przebiegu prawdopodobieństwa poprawnej pracy zestyków głównych styczników $R[N]$ w funkcji liczby cykli łączeniowych (krzywa 2) oraz ich wartość uśredniona wyznaczona metodą najmniejszych kwadratów (krzywa 1), uzyskane na podstawie badań skróconych z zastosowaniem programu PROZESTYK. Symulacje wykonano co 100 cykli łączeniowych, po 100 symulacji dla poszczególnych zmiennych losowych.

8. Po wyznaczeniu łącznego prawdopodobieństwa poprawnej pracy zestyków styczników ustala się trwałość gamma-beta zestyków. Za pomocą procedur numerycznych programu Mathcad, metodą najmniejszych kwadratów, oblicza się wartość średnią zmian łącznego prawdopodobieństwa poprawnej pracy zestyków styczników w funkcji liczby cykli łączeniowych (krzywa 1 na rys. 8.4). Następnie wyznacza się liczbę cykli łączeniowych N_γ dla zadanej wartości γ , dla której spełniony jest warunek

$$\bar{R}(N_\gamma) = \gamma, \quad (8.7)$$

gdzie: $\bar{R}(N)$ - wartość średnia zmian łącznego prawdopodobieństwa poprawnej pracy zestyków styczników w funkcji liczby cykli łączeniowych, γ - część zbioru zestyków styczników, których trwałość, określona gwarantowaną liczbą cykli łączeniowych, jest większa od N_γ .

Dla badanych styczników LS 47 w kategorii użytkowania AC-4 obliczona za pomocą programu PROZESTYK wartość trwałości gamma-beta, przy poziomie ufności $\beta = 0,9$ dla części $\gamma = 0,9$ populacji zestyków styczników, wynosi $T_{\gamma\beta} = 40$ tysięcy cykli łączeniowych (przebieg zmian prawdopodobieństwa poprawnej pracy zestyków w funkcji liczby cykli łączeniowych przedstawiono graficznie na rys. 8.4).

Opracowany program komputerowy do prognozowania niezawodności zestyków styczników, oparty o prezentowany w pracy wieloparametrowy model, umożliwia kompleksową analizę zmian trwałości gamma-beta w funkcji liczby cykli łączeniowych. Charakteryzuje się również łatwością rozbudowy i modernizacji oraz możliwością graficznej prezentacji wyników pośrednich i końcowych.

9. Metoda prognozowania trwałości zestyków styczników z bieżącej produkcji oraz jej weryfikacja

9.1. Procedura wyznaczania trwałości zestyków styczników

Aby wyznaczyć trwałość danego typu zestyków styczników elektromagnetycznych na podstawie wyników skróconych badań laboratoryjnych wybranych parametrów zestyków, przeprowadzonych w znormalizowanych warunkach probierczych (dla danej kategorii użytkowania), należy:

- ⇒ Pobrać losowo reprezentatywną próbkę styczników z bieżącej produkcji. W celu zapewnienia odpowiedniej dokładności wnioskowania statystycznego pobrana próbka, powinna być o dostatecznej liczebności, którą można wyznaczyć zgodnie z uwagami podanymi w podrozdziale 7.5 rozprawy (rys. 7.8).
- ⇒ Przeprowadzić skrócone badania laboratoryjne zmian parametrów prognozujących trwałość układu zestykowego w funkcji liczby cykli łączeniowych dla danych parametrów komutowanego obwodu probierczego i zadanej częstotliwości łączeń. Z dostateczną dla celów praktycznych dokładnością, w celu wyznaczenia współczynników prostych regresji zmian parametrów prognozujących, wystarczy wyznaczyć przebieg tego procesu dla 20% przewidywanej trwałości łączeniowej badanych styczników. Ze względów metrologicznych, odstęp pomiędzy poszczególnymi pomiarami powinien zapewnić możliwość pominięcia uchybów pomiarowych w porównaniu z występującymi zmianami rejestrowanych parametrów.
- ⇒ Wczytać wyniki laboratoryjnych badań skróconych parametrów prognozujących.
- ⇒ Wprowadzić parametry obwodu probierczego (i_{max}), stałe modelu (c_m, c_s) oraz dane katalogowe ($I_{min}, F_{min}, t_{max}$), oraz poziom ufności z jakim wyznaczany będzie obszar ufności dla empirycznych prostych regresji. Wprowadzamy również liczbę symulacji L_{sym} jaką chcemy wykonać dla poszczególnych wartości liczby cykli łączeniowych - N , oraz horyzont prognozy - N_{max} (maksymalna liczba łączeń dla której przeprowadzimy symulacje).
- ⇒ Dla kontrolowanych parametrów prognozujących wyznaczyć wartości średnie i odchylenia standardowe w każdym punkcie pomiarowym oraz ich przedziały predykcji (wzór 8.5).

- ⇒ Stosując przedstawiony w rozprawie wieloparametrowy model niezawodności zestyków, obliczyć trwałość zestyków głównych styczników dla poszczególnych parametrów prognozujących. W tym celu wykonuje się L_{sym} -krotne symulacje zmian parametrów prognozujących i określa ich funkcję niezawodności dla poszczególnych wartości cykli łączeniowych.
- ⇒ Określić prognozowaną trwałość gamma-beta w funkcji liczby cykli łączeniowych. W wyniku obliczeń wyznacza się liczbę cykli łączeniowych N_γ dla której przebieg zmian wartości średniej prawdopodobieństwa poprawnej pracy zestyków w funkcji liczby cykli łączeniowych jest równy wartości zakładanej γ .
- ⇒ Przedstawić graficznie zależność trwałości gamma-beta, którą z poziomem ufności β osiąga część γ zestyków styczników, w funkcji liczby cykli łączeniowych.

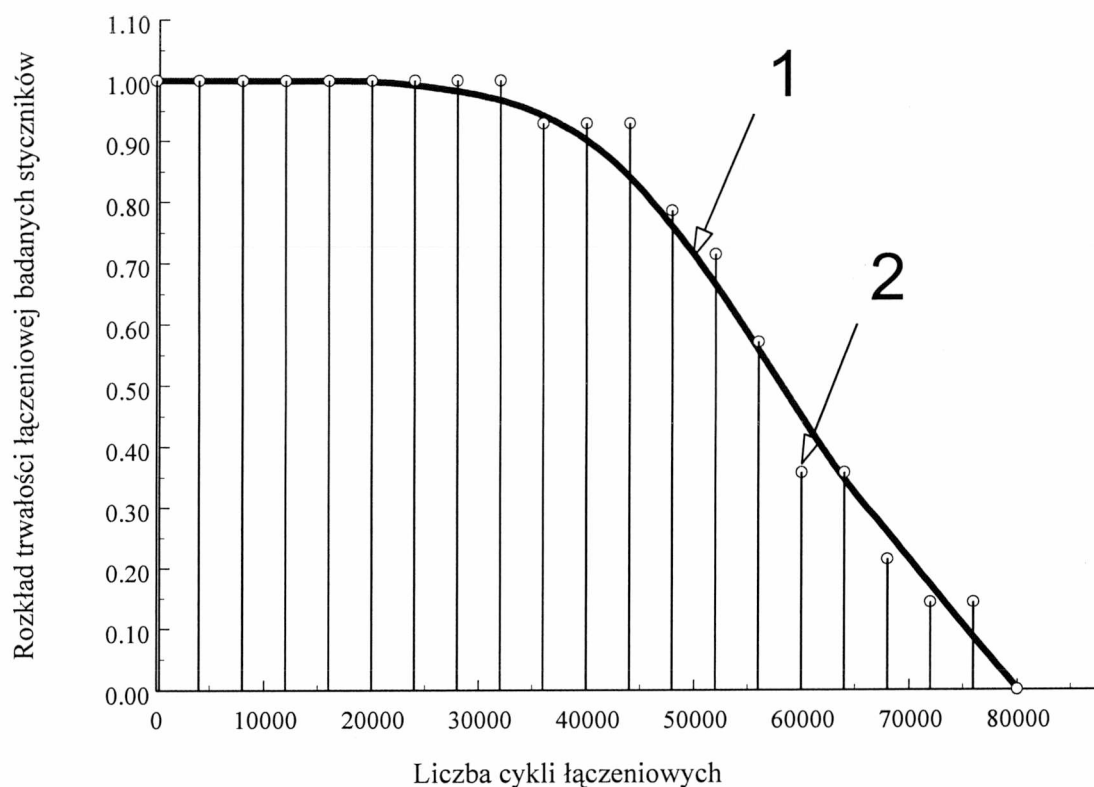
9.2. Weryfikacja opracowanej metody z danymi pomiarowymi

W wyniku laboratoryjnych badań parametrów układu zestykowego w funkcji liczby cykli łączeniowych, opisanych w rozdziale 6.4 rozprawy, uzyskano empiryczne wyniki trwałości łączeniowej badanych styczników podane w tabeli 9.1 i graficznie przedstawione na rys. 9.1.

Tabela 9.1. Wyniki trwałości łączeniowej uzyskane podczas laboratoryjnych badań parametrów układu zestykowego w funkcji liczby cykli łączeniowych

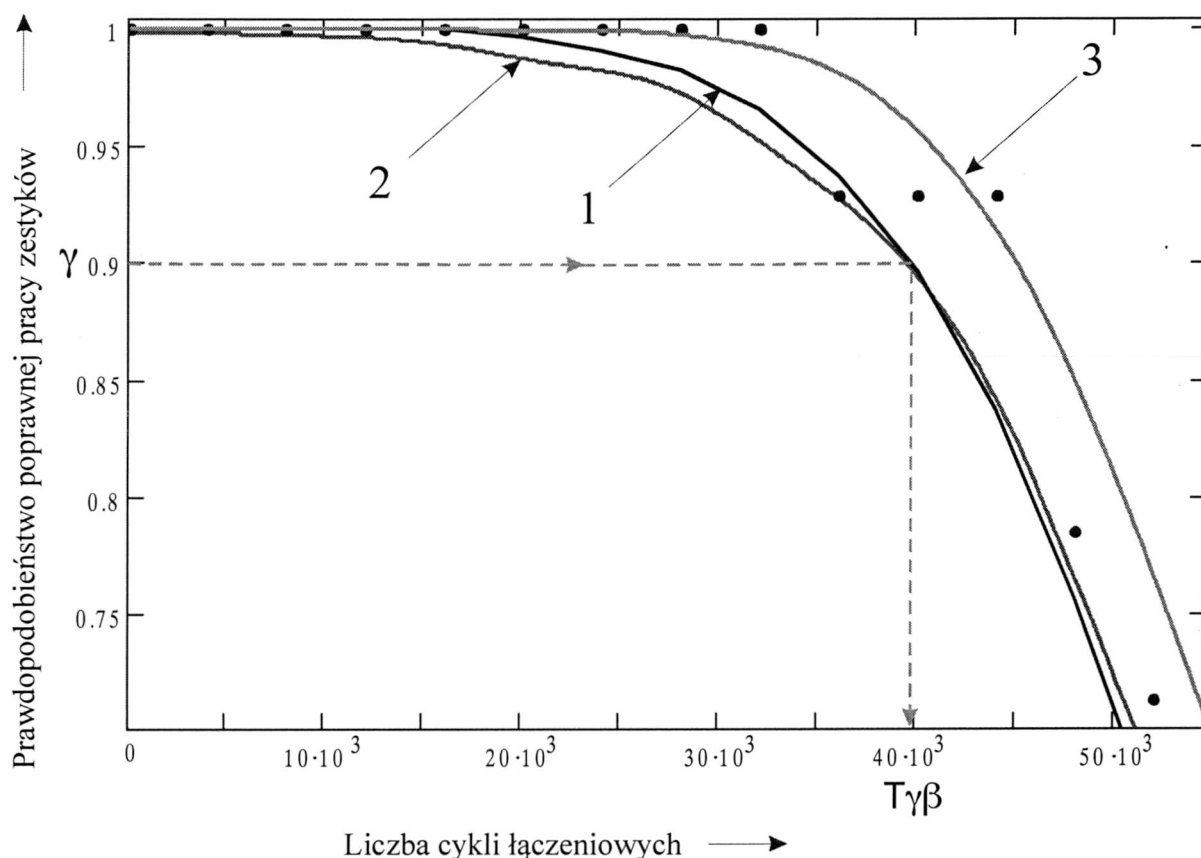
Nr stycznika	1	2	3	4	5	6	7
Trwałość łączeniowa	48 000	65 900	80 000	60 000	77 000	36 000	60 000
Nr stycznika	8	9	10	11	12	13	14
Trwałość łączeniowa	52 000	60 000	48 000	70 000	66 000	56 000	56 000

Ponieważ podczas powyższych badań, wszystkie uszkodzenia dotyczyły wyłącznie układu zestykowego badanych styczników, dlatego w dalszym toku analizy, uzyskaną trwałość łączeniową całego stycznika porównano z trwałością układu zestykowego obliczonego za pomocą opracowanego modelu, na podstawie wyników skróconych badań.



Rys. 9.1. Rozkład trwałości łączeniowej badanych styczników LS 47, uzyskanych podczas laboratoryjnych badań parametrów układu zestykowego w funkcji liczby cykli łączeniowych w kategorii AC 4, przedstawionych w rozdziale 6.4: 1 - rozkład trwałości łączeniowej aproksymowanej metodą najmniejszych kwadratów, 2- rozkład empiryczny

W celu weryfikacji przydatności wieloparametrowego modelu niezawodności zestyków głównych styczników oraz możliwości i efektywności programu komputerowego PROZESTYK, porównano trwałość łączeniową empiryczną z trwałością prognozowaną za pomocą modelu, jak również z wynikami uzyskanymi za pomocą modelu jednoparametrowego opisanego w rozdziale 5.4 rozprawy, uznawanego dotychczas za najdokładniejszy. Graficznie przedstawiono wyniki porównania powyższych trwałości na rys. 9.2.



Rys. 9.2. Przebieg funkcji prawdopodobieństwa poprawnej pracy zestyków styczników LS 47, uzyskanych na podstawie badań skróconych z zastosowaniem programu PROZESTYK (krzywa - 2) z rozkładem empirycznym trwałości łączeniowej badanych styczników (krzywa - 1) oraz z przebiegiem funkcji prawdopodobieństwa uzyskanym za pomocą modelu jednoparametrowego (krzywa - 3), opisanego w rozdziale 5.4

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych oraz eksperymentów komputerowych można stwierdzić, że:

- Prognoza trwałości zestyków, dokonana na podstawie wieloparametrowego modelu niezawodności zestyków głównych styczników, wykazała bardzo dużą zgodność z wartościami empirycznymi trwałości łączeniowej, uzyskanymi z badań pełnych przeprowadzonych w rzeczywistym obwodzie probierczym.
- Wyniki uzyskane w oparciu o symulacyjny model jednoparametrowy niezawodności zestyków głównych, który uwzględnia zmiany tylko jednego parametru prognozującego - przechyłu styków, chociaż bardzo zbliżone do wyznaczonych trwałości empirycznych i do trwałości wyznaczonych za pomocą wieloparametrowego modelu niezawodności zestyków głównych styczników, to jednak są nieco zawyżone (różnica jest zależna od wartości γ).

10. Podsumowanie i wnioski końcowe

W pracy przedstawiono nowy matematyczno-fizyczny model trwałości zestyków styczników elektromagnetycznych, łączący zalety modeli poprzednich i wykorzystujący symulację komputerową do prognozowania ich trwałości, na podstawie skróconych badań próbki pobranej losowo z bieżącej produkcji. Efektem analizy statystycznej zgromadzonych danych jest propozycja wykorzystania do prognozowania niezawodności zestyków większej niż dotychczas liczby parametrów prognozujących, pozwalających na dokładniejszą ocenę trwałości zestyków. Przedstawiono metodę estymacji przedziałowej parametrów prognozujących, na podstawie wyników skróconych badań laboratoryjnych trwałości łączeniowej losowej próbki styczników.

Wieloletnie badania trwałościowe styczników powietrznych przeprowadzone w kategoriach AC-3 i AC-4, posłużyły do pełniejszej analizy i klasyfikacji przyczyn uszkodzeń układu zestykowego styczników w powyższych kategoriach użytkowania.

Opracowanie modelu trwałości zestyków wymagało przeprowadzenia laboratoryjnych badań zależności wybranych parametrów, prognozujących trwałość zestyków w funkcji liczby cykli łączeniowych. W tym celu dostosowano istniejące stanowiska badawcze do potrzeb powyższych badań. W celu zapewnienia dużej dokładności pomiarów, opracowano nową metodykę pomiaru przechyłu styków i siły docisku (zwiększono dokładność pomiaru 10-krotnie - dotychczas parametry te były tylko kontrolowane).

Uzyskane, podczas przeprowadzonych badań, wyniki pomiarów parametrów istotnych ze względu na trwałość zestyków, utworzyły bazę składającą się z kilku tysięcy pomiarów, pozwalającą na weryfikację celowości i poprawności przyjęcia założeń opracowanego modelu.

Ponieważ przedstawiony model trwałości zestyków styczników elektromagnetycznych wymaga komputerowego wspomagania obliczeń, opracowano metodę i program do prognozowania trwałości gamma-beta zestyków. Program ten zapewnia łatwość modyfikacji i przejrzystość algorytmu obliczeń oraz graficzną prezentację wyników pośrednich i wyniku obliczeń trwałości gamma-beta zestyków.

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz dostępnej literatury przedmiotowej można wysunąć następujące wnioski:

1. Obowiązujące normy dotyczące metody badań trwałości łączeniowej styczników niskonapięciowych prądu przemiennego i ich kryterium oceny, są mało precyzyjne i nie pozwalają na prawidłową ocenę jakości i niezawodności tych łączników, w tym ich zestyków, od których zależą w stopniu decydującym.
2. Analiza niezawodności zestyków styczników oparta na metodzie statystycznej, nie może stanowić podstawowego źródła informacji do opracowania metody badań skróconych niezawodności zestyków styczników. Stwierdzenie statystycznej zgodności rozkładu teoretycznego z rozkładem empirycznym jest warunkiem koniecznym, lecz nie wystarczającym. Bez dogłębnej analizy fizyki procesu pogarszania się właściwości zestyków, wnioskowanie o właściwościach rozkładu trwałości zestyków lub estymowanie parametrów rozkładu może być obarczone znacznymi błędami. Ponadto, ze względu na długotrwałość i kosztowność badań trwałościowych styczników, przeprowadza się je na próbkach o małej liczebności nie zapewniając odpowiedniego poziomu ufności.
3. W celu zwiększenia dokładności prognozowanej trwałości, opracowano wieloparametrowy model w oparciu o estymację przedziałową zmian trzech parametrów prognozujących. W dotychczasowych modelach symulacyjnych prognozowano trwałość zestyków styczników opartych na estymacji punktowej.
4. Przedstawiony w rozprawie wieloparametrowy symulacyjny model niezawodności zestyków, umożliwia świadome projektowanie i weryfikację niezawodności zestyków produkowanych styczników w różnych warunkach eksploatacyjnych. Przedstawiony model pozwala na dokładną analizę wpływu zmian poszczególnych czynników na niezawodność zestyków łączników i wyodrębnieniu zjawisk mających dominujący wpływ na trwałość zestyków łącznika. Pozwala również na analizowanie wpływu wprowadzanych zmian materiałowo-konstrukcyjnych na niezawodność zestyków stycznika.
5. Zaprezentowana w pracy metoda prognozowania trwałości gamma-beta jest przydatna do wyznaczania z zadaniem poziomem ufności przebiegów charakterystycznych trwałości różnych typów styczników, na podstawie mało kosztownych - skróconych badań laboratoryjnych reprezentatywnej próbki styczników pobranej losowo z bieżącej produkcji.

6. Niewątpliwą zaletą przedstawionej metody prognozowania trwałości zestyków łączników jest także szybkie uzyskiwanie wyników. W przypadku tradycyjnych metod, polegających na przeprowadzeniu pełnych badań trwałościowych, wymagany jest długi okres badań, sprawiający że badane łączniki są już dawno sprzedane i eksploatowane.
7. Otrzymane, za pomocą opracowanego programu PROZESTYK, wskaźniki niezawodności zestyków styczników, porównane z trwałością uzyskaną z badań pełnych, przeprowadzonych w rzeczywistym obwodzie probierczym, wykazały słuszność przyjętych założeń oraz dokładność opracowanego modelu.
8. Uwzględnienie zmian przechyłu styków, siły docisku zestykowego i czasu niejednoczesności zamykania zestyków styczników opisuje w stopniu dostatecznym dla celów praktycznych, proces pogarszania się właściwości układu zestykowego.

Wskazane jest prowadzenie dalszych prac w celu przystosowania powyższego modelu do praktycznego zastosowania w bieżącej kontroli niezawodności produkowanych zestyków - zarówno do szybkiej weryfikacji jakości produkcji, jak i do weryfikacji wprowadzanych zmian konstrukcyjnych i materiałowych. Celowym jest również wykorzystanie powyższego modelu do analizy projektowanych łączników ze względu na ich niezawodność.

Gdyby prognozowanie niezawodności łączników wdrożono praktycznie, obciążenie laboratoriów, w których sprawdzana jest trwałość produkowanych łączników, byłaby zdecydowanie mniejsze.

11. Literatura

- [1] Bartoszewicz J. : Wykłady ze statystyki matematycznej. PWN, 1989.
- [2] Błaszczuk L., Gruszczyński Z., Roszuk W. : Uproszczona metoda wyznaczania charakterystyk trwałości łączeniowej styczników elektromagnetycznych prądu przemiennego. Informacje dla konstruktorów ORAM (ORŁN), 1975. Z. 4.
- [3] Bobrowski D. : Modele i metody matematyczne teorii niezawodności. WNT, Warszawa 1985.
- [4] Bobrowski D. : Probabilistyka w zastosowaniach technicznych. WNT, Warszawa 1986.
- [5] Bobrowski D, Maćkowiak-Łybacka K. : Wybrane metody wnioskowania statystycznego. WPP, Poznań, 1988.
- [6] Bojarski W.W. : Wprowadzenie do oceny niezawodności działania układów technicznych. PWN, Warszawa 1967.
- [7] Borkowski P., Walczuk E., Wysocki T. :Komputerowy program zautomatyzowanego stanowiska pomiarowego do badań erozji i rezystancji styków. Mat. Konferencyjne - III Konferencja Naukowo Techniczna „Zastosowanie Komputerów w Elektrotechnice”. Poznań/Kiekrz, 1998.
- [8] Box G.E.P., Jenkins G. M. :Analiza szeregów czasowych . PWN, Warszawa 1983.
- [9] Bóbr A., Polowczyk W., Tucholski J. : Styczniki energoelektryczne. WNT, Warszawa 1979.
- [10] Domański Cz. : Statystyczne testy nieparametryczne. PWN, Warszawa 1986.
- [11] Domżański E. : Normalizacja w zakresie niskonapięciowej aparatury rozdzielczej i sterowniczej w kontekście zagadnień związanych z opracowaniem Zakładowej Normy. Prace Naukowo-Badawcze OBR ORAM 1995.
- [12] Gercbach I. B., Kordonski CH. B. : Modele niezawodnościowe obiektów technicznych. WNT, Warszawa 1968.
- [13] Gajda J., Szyper M. : Modelowanie i badania symulacyjne systemów pomiarowych. Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Kraków 1998.
- [14] Grzesiak K., Kołodziejski J., Netzel Z. : Badania trwałościowe obiektów technicznych. WNT, Warszawa 1968.
- [15] Grzybowski Z., Dubilas A. : Wyznaczenie minimalnej, dopuszczalnej w eksploatacji wartości przechyłu i docisku roboczego zestyków styczników typu SLA. Prace Naukowo-Badawcze OBR ORAM 1988.
- [16] Grzybowski Z. : Badanie nakładek styków W Ag (wolfram srebro) w niskonapięciowych wyłącznikach prądu przemiennego. Prace Naukowo-Badawcze OBR ORAM 1990.
- [17] Haviland R.P. : Niezawodność urządzeń technicznych. PWN, Warszawa 1968.
- [18] Кобленц М. Г. : Исследование электрической износостойчивости контактов. Электромеханика. 1966/5.
- [19] Kornatka M., Wróblewski Z. : Wieloparametrowa metoda prognozowania niezawodności

- zestyków styczników elektromagnesowych powietrznych prądu przemiennego niskiego napięcia. Raport Serii Sprawozdania nr 45/99 Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej 1999.
- [20] Kubik L. T.: Zastosowanie elementarnego rachunku prawdopodobieństwa do wnioskowania statystycznego. Wykład i uwagi krytyczne. PWN, Warszawa 1998.
- [21] Lesiński S. : Niezawodność łączników energoelektrycznych. WNT, 1983.
- [22] Lesiński S. : Jak opisać niezawodność łączników niskonapięciowych, Przegląd Elektrotechniczny, 1985, nr 6.
- [23] Lesiński S. : Wzory i tablice do obliczania niezawodności urządzeń elektrycznych. Politechnika Łódzka, Łódź, 1994.
- [24] Lesiński S. : Projektowanie elementów urządzeń elektrotechnicznych ze względu na ich niezawodność. Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy, Bydgoszcz 1996.
- [25] Maksymiuk J. : Aparaty elektryczne. WNT, Warszawa, 1995.
- [26] Markiewicz H., Wróblewski Z. : Metoda oceny niezawodności styczników elektromagnetycznych prądu przemiennego niskiego napięcia. Przegląd Elektrotechniczny, 1977, nr 5.
- [27] Markiewicz H., Wróblewski Z. : Matematyczno-fizyczny model niezawodności styczników elektromagnetycznych prądu przemiennego. Archiwum Elektrotechniki 1978, Zeszyt nr 1.
- [28] Markiewicz H., Wołkowiński K. : Urządzenia elektroenergetyczne. WNT, Warszawa 1980.
- [29] MATHCAD 8.0 - Reference Manual, AXUM 5.0 - Technical Graphics and Data Analysis MathSoft Cambridge 1998.
- [30] PN-90/E-06150/10. Aparatura rozdzielcza i sterownicza niskonapięciowa. Przepisy ogólne.
- [31] PN-92/E-06150/41. Aparatura rozdzielcza i sterownicza niskonapięciowa. Styczniki i rozruszniki do silników.
- [32] PN-92/E-06150/51. Aparatura rozdzielcza i sterownicza niskonapięciowa. Aparaty i łączniki sterownicze. Elektromechaniczne aparaty sterownicze.
- [33] PN-90/N-01051. Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna. Terminologia.
- [34] PN-77/N-04005. Niezawodność w technice. Wskaźniki niezawodności. Nazwy, określenia i symbole.
- [35] PN-77/N-04010. Niezawodność w technice. Wybór wskaźników niezawodności.
- [36] PN-93/N-50191. Słownik terminologiczny elektryki. Niezawodność; jakość usługi.
- [37] PN-IEC 863: 1996 Przedstawienie wyników nieuszkodzalności, obsługiwalności i gotowości.
- [38] Poradnik niezawodności. Podstawy matematyczne. Praca zbiorowa pod red.: Migdalskiego J. WEMA, Warszawa 1982.
- [39] Poradnik tom II. Inżynieria niezawodności. Praca zbiorowa pod red.: Migdalskiego J. WEMA, Warszawa 1992.
- [40] Badania trwałości styczników SLA. OBR-ORAM, Łódź 1991-1997 (Prace niepublikowane).

- [41] Polowczyk W. : Analityczno-graficzna metoda określania parametrów odskoków styków układu stykowego o zestykach czołowych. Prace Instytutu Elektrotechniki Zeszyt 87, Warszawa 1974.
- [42] Rao C. Radhakrishna : Modele liniowe statystyki matematycznej. PWN, Warszawa 1982.
- [43] Skopiec J., Wróblewski Z. : Wpływ drgań mechanicznych na pracę styczników próżniowych typu SV-7. Przegląd Elektrotechniczny nr 10, 1978.
- [44] Tymowski J. : Materiały konstrukcyjne w budowie aparatury elektronicznej. WNT Warszawa 1978.
- [45] Тевлин З. В. : Прогнозирование надежности контактов низковольтных коммутационных аппаратов. Электромеханика. 1968/9.
- [46] Walczuk E. : Wpływ odskoków sprężystych na szepianie się zestyków łącznika. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej Elektryka Nr 37 Łódź 1972.
- [47] Walczuk E. : Komputerowo wspomagane badania łączników instalacyjnych. Konferencja Naukowo-Techniczna „Zastosowanie komputerów w Elektrotechnice” Poznań/Kiekrz 1998.
- [49] Wiczorkowski R. Zieliński R. : Komputerowe generatory liczb losowych. WNT Warszawa 1997.
- [48] Wesołowski G.O. : Multiple regression and analysis of variance, New York, Wiley 1976.
- [50] Wróblewski Z. : Niezawodność styczników elektromagnetycznych prądu przemiennego niskiego napięcia. Rozprawa doktorska P. Wrocławskiej Wrocław 1975.
- [51] Wróblewski Z. : Niezawodność styczników elektromagnetycznych prądu przemiennego niskiego napięcia. Prace Nauk. Inst. Energoelektryki P. Wrocławskiej. Wrocław 1977, nr 9.
- [52] Wróblewski Z. : Analiza statystyczna trwałości styczników elektromagnetycznych prądu przemiennego niskiego napięcia. Przegląd Elektrotechniczny, Warszawa 1978, nr 1.
- [53] Wróblewski Z., Markiewicz H. : Zuverlässigkeitsmodell und Verfahren zur Auswertung der Lebensdauer von Kontakten. ETZ Archiv. H. 7, 1981.
- [54] Wróblewski Z., Klajn A. : Odszuki styków styczników próżniowych przy pracy załączeniowej i przy zewnętrznych uderzeniach mechanicznych. Wiadomości Elektrotechniczne nr 9-10, 1985.
- [55] Wróblewski Z. : Awaryjność styczników próżniowych w górnictwie rud miedzi. Przegląd Elektrotechniczny nr 6, 1988.
- [56] Wróblewski Z. : Wielowariantowa metoda prognozowania niezawodności styczników elektromagnetycznych prądu przemiennego z bieżącej produkcji. Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki P. Wrocławskiej. - Seria Monografie nr 21, Wrocław 1988.
- [57] Wróblewski Z. : Uogólniony model matematyczno-fizyczny niezawodności styczników elektromagnetycznych prądu przemiennego. Archiwum Elektrotechniki - z. 1-4, 1989.
- [58] Wróblewski Z. : Probabilistyczny model i metoda oceny niezawodności zestyków łączników elektroenergetycznych. Przegląd Elektrotechniczny nr 4, 1996.

- [59] Wróblewski Z. : Symulacyjne modele cyfrowe niezawodności zestyków łączników elektroenergetycznych. Przegląd Elektrotechniczny nr 9, 1996.
- [60] Wróblewski Z. : Metoda wyznaczania trwałości styczników elektromagnetycznych prądu przemiennego. Przegląd Elektrotechniczny nr 9, 1997.
- [61] Zakładowa norma ZN-95-A2-02-001 z Kartą katalogową K-95 / A2-305 i Katalogiem produktów- ELESTER 1995.
- [62] Zakładowe karty informacyjne dla styczników głównych typu LS...sterowanych prądem stałym lub przemiennym - ELESTER 1998.

12. Załączniki

12.1. Wybrane wyniki badań trwałościowych styczników serii SLA

SLA 7 – II

Sprawdzenie trwałości łączeniowej styczników SLA 7-II w kategorii użytkowania AC - 3 przy $P_e = 5,5 \text{ kW}$, $U_e = 380 \text{ V}$.

Nr.	Trwałość	Opis uszkodzenia
1991 r.		
1/I	157 tys.	Przerwa w uzwojeniu cewki
2/I	330 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego zacisk „2” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 30 %.
3/I	460 tys.	Upalony styk ruchomy w torze 5-6. Zużycie nakładek pozostałych styków około 40 %.
1/III	40 tys.	Odpadnięcie nakładki styku ruchomego zacisk „2” - szepienie
1/IV	350 tys.	Upalony styk ruchomy zacisk „4” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków ok. 30 %.
2/IV	150 tys.	Odpadnięcie nakładki styku ruchomego zacisk „1” - szepienie
1/VI	815 tys.	Szepienie styków w torze 1-2. Zużycie nakładek pozostałych styków: ruchomych ok. 50%, nieruchomych ok. 70 %.
2/VI	238 tys.	Szepienie styków w torze 5-6. Zużycie nakładek pozostałych styków 30 %.
1/VIII	200 tys.	Całkowite zużycie nakładek styków ruchomych oraz nieruchomych zacisk 2 szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków ok. 30 %.
2/VIII	520 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego zacisk „3” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków ok. 50 %.
1/X	340 tys.	Upalenie mostka styku ruchomego zacisk „3”. Zużycie nakładek pozostałych styków ruchomych - 40 %, nieruchomych 30 %.
2/X	470 tys.	Upalenie mostka styku ruchomego zacisk „5”. Zużycie nakładek pozostałych styków: ruchomych -ok. 60 %, nieruchomych ok. 40 %.
1992 r		
1/I	532 tys.	Całkowite zużycie nakładek styków nieruchomych oraz ruchomych w torze 1-2. Zużycie nakładek pozostałych styków ok. 50 %.
2/I	406 tys.	Odpadnięcie nakładki styku nieruchomego zacisk „6” - upalenie mostka styku ruchomego. Zużycie nakładek pozostałych styków ok. 30 %.
3/I	284 tys.	Upalenie mostka styku ruchomego zacisk „1” szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków ok. 30 %.

1993 r

4/I	129 tys.	Odpadnięcie nakładki styku ruchomego biegun „2” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków ok. 30 %.
5/I	425 tys.	Zwarcie między torami 1-2 i 3-4 poprzez zworę elektromagnesu i zaciskiem cewki.
6/I	192 tys.	Odpadnięcie nakładki styku ruchomego biegun „2” - upalenie mostka. Zużycie nakładek pozostałych styków ok. 30 %.

1994 r

4/I	480 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego zacisk „3” (brak współosiowości styków).
5/I	510 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego zacisk „5” - szepienie.
6/I	497 tys.	Odpadnięcie nakładki styku ruchomego zacisk „1” - upalenie mostka. Zużycie nakładek pozostałych styków ok. 30 %.

1995 r

4/I	840 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego biegun „3” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków ok. 30 %.
5/I	205 tys.	Odpadnięcie nakładki styku ruchomego biegun „2” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków ok. 30 %.
6/I	754 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego biegun „2” - szepienie.

1996 r

4/I	1150 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego biegun „5”. Zużycie nakładek pozostałych styków ok. 80 %.
5/I	1110 tys.	Urwane wyprowadzenie cewki. Zużycie nakładek styków około 70 %.
6/I	1100 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego biegun „1”.

1997 r

4/I	545 tys.	80 % zużycia nakładki styku ruchomego oraz nieruchomego biegun „1” - szepienie.
5/I	270 tys.	90 % zużycia nakładki styku ruchomego oraz nieruchomego biegun „1” - szepienie (brak współosiowości przy załączaniu styków).
6/I	860 tys.	Zwarcie trójfazowe wewnątrz stycznika poprzez zworę i sprężynę zwrotną z zaciskiem cewki i obwodem sterującym.

SLA 12-II

Sprawdzenie trwałości łączeniowej styczników SLA 12-II w kategorii użytkowania AC - 3 przy $P_e = 7,5 \text{ kW}$, $U_e = 380 \text{ V}$.

Nr.	Trwałość	Opis uszkodzenia
1991 r		
1/I	950 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego zacisk „6” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków: nieruchomych 40 %.
2/I	35 tys.	Szepienie styków w torze 1-2 na skutek znacznej nie współosiowości.

3/I	350 tys.	Odpadnięcie nakładki styku ruchomego zacisk „1” - szczepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków ok. 30 %.
1/III	1100 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego zacisk „2” - szczepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków ok. 60 %.
1/IV	980 tys.	Całkowite zużycie nakładki styków ruchomych zacisk „5”. Zużycie pozostałych nakładek: nieruchomych 60 %, ruchomych 80 %.
2/IV	535 tys.	Zwarcie w torze 1-2 do obwodu sterowniczego. Zużycie nakładek pozostałych styków ok. 40 %.
1/VI	470 tys.	Odpadnięcie nakładki styku ruchomego zacisk „3” - upalenie mostka. Zużycie nakładek pozostałych styków ok. 40 %.
2/VI	1750 tys.	Całkowite zużycie nakładek styków ruchomego oraz nieruchomego biegun „1 i 3”. Zużycie nakładek pozostałych styków ok. 70 %.
1992 r		
1/I	740 tys.	Zwarcie między fazami R i S poprzez zworę z cewką stycznika.
3/I	733 tys.	Odpadnięcie nakładki styku ruchomego zacisk „2” - szczepienie. Zużycie pozostałych nakładek stykowych ok. 50 %.
2/I	1100 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego zacisk „1” - szczepienie. Zużycie pozostałych nakładek: nieruchomych, ruchomych ok. 50 %.
1993 r		
5/I	232 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego oraz nieruchomego biegun „5” - szczepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków ok. 30 %.
4/I	258 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego oraz nieruchomego biegun 5 i 6 - szczepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków 30 %.
6/I	560 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego oraz nieruchomego biegun „1” - szczepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków ok. 40 %.
1994 r		
5/I	800 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego zacisk „1” - szczepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 60 %.
6/I	805 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego biegun „1” - szczepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 60 %.
4/I	905 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego biegun „5” - szczepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 70 %.
1995 r		
5/I	29 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego biegun „2” - szczepienie.
4/I	155 tys.	jw. biegun „4”.
6/I	729 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego biegun „1” - szczepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 60 %.
1996 r.		
4/I	157 tys.	Zwarcie (wewnątrz) między biegunami „1” i „3” oraz poprzez zworę i zacisk cewki z obwodem sterującym.
5/I	254 tys.	jw.

6/I	654 tys.	90 % zużycia nakładki styku ruchomego i nieruchomego biegun „1” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 40 %.
-----	----------	---

1997 r.

5/I	470 tys.	90 % zużycia nakładki styku ruchomego oraz nieruchomego biegun „1” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 40 %.
4/I	503 tys.	80 % zużycia nakładki styku ruchomego i nieruchomego w biegunie „1” - szepienie (brak współosiowości). Zużycie nakładek pozostałych styków około 40 %.
6/I	648 tys.	Zwarcie wewnątrz stycznika między biegunami 1-3-5 oraz poprzez zworę i zacisk cewki z obwodem sterującym. Zużycie nakładek pozostałych styków około 50 %.

SLA 16-II

Sprawdzenie trwałości łączeniowej styczników SLA 16-II w kategorii użytkowania AC - 3 przy
Pe = 9,0 kW, Ue= 380 V.

Nr.	Trwałość	Opis uszkodzenia
1991 r.		
1/I	500 tys.	Wypaczenie trawersy - zablokowanie napędu stycznika. Zużycie nakładek styków ruchomych ok. 50 %, nieruchomych ok. 30 %.
1/IV	225 tys.	Szepienie styków w torze 3- 4. Zużycie nakładek styków w torze 1-2 ok. 60 % w torze 5-6 ok. 40 %.
2/IV	30 tys.	Odpadnięcie nakładki.
2/VI	210 tys.	Odpadnięcie nakładki styku nieruchomego zacisk „1” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 40 %.
1/IV	350 tys.	90 % zużycia nakładki styku ruchomego i nieruchomego. zacisk „1” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 30 %.
1/VIII	528 tys.	Odpadnięcie nakładki styku nieruchomego zacisk „4” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków ok. 40 %.
2/VIII	1153 tys.	Odpadnięcie nakładki styku nieruchomego zacisk „2” oraz ruchomego zacisk „4” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków ok. 70 %.
1992 r.		
1/I	427 tys.	Odpadnięcie nakładki styku nieruchomego zacisk „4” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 30 %.
3/I	290 tys.	Odpadnięcie nakładki styku nieruchomego zacisk „3” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 30 %.
2/I	350 tys.	Szepienie styków w torze 3-4 . Zużycie nakładek pozostałych styków około 40 %.

1993 r.

5/I	485 tys.	Odpadnięcie nakładki styku ruchomego biegun „1” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 30 %.
6/I	651 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego biegun „2” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 40 %.
4/I	740 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego oraz nieruchomego biegun „5” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 70 %.

1994 r.

4/I	205 tys.	90 % zużycia styku ruchomego oraz nieruchomego biegun „1” - szepienie. 80 % zużycia biegun 3-4, 20 % biegun 5-6.
6/I	237 tys.	jw. biegun „2” - szepienie. Biegun 3-4 zużycie nakładek ok. 60 %, biegun 5-6 zużycie nakładek ok. 50 %.
5/I	727 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego oraz nieruchomego biegun „1” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 60 %.

1995 r.

4/I	74 tys.	Odpadnięcie nakładki styku ruchomego biegun „2” - upalenie mostka - szepienie.
6/I	1050 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego biegun „3” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 80 %.
5/I	1075 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego biegun „1” i „5”. Zużycie nakładek pozostałych styków około 80 %.

1996 r.

5/I	110 tys.	Szepienie styków biegun „1” i „2”. Zużycie pozostałych styków około 10 %.
6/I	650 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku nieruchomego biegunie „1” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 50 %.
4/I	1043 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego oraz nieruchomego biegun „4” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków ok. 80 %.

1997 r.

6/I	295 tys.	80 % zużycia nakładki styku ruchomego oraz nieruchomego biegun „3” - szepienie. Brak współosiowości. Zużycie nakładek pozostałych styków około 40 %.
5/I	305 tys.	80 % zużycia nakładki styku ruchomego oraz nieruchomego w biegunie „1” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 40 %.
4/I	870 tys.	Całkowite zużycia nakładki styku ruchomego oraz nieruchomego w biegunie „3” - szepienie.

SLA 32

Sprawdzenie trwałości łączeniowej styczników SLA 32 w kategorii użytkowania AC - 3 przy
 $P_e = 15,0 \text{ kW}$, $U_e = 380 \text{ V}$.

Nr.	Trwałość	Opis uszkodzenia
1991 r.		
11/I	665 tys.	Wypadnięcie zwoju zwartego zablokowanie trawersy. Zużycie nakładek pozostałych styków około 30 %.
12/I	1150 tys.	jw. Zużycie nakładek pozostałych styków około 40 %.
13/I	1460 tys.	Wypadnięcie zwoju zwartego - zablokowanie trawersy. Zużycie nakładek pozostałych styków około 40 %.
1992 r.		
1/I	1700 tys.	Równomierne zużycie nakładek styków ruchomych oraz nieruchomych około 60 %.
2/I	1690 tys.	jw. Zużycie nakładek styków około 60 %.
3/I	1410 tys.	jw. Zużycie nakładek styków około 50 %.
1994 r.		
4/I	1150 tys.	80 % zużycia nakładki styku ruchomego oraz nieruchomego w biegunie „1” -sczepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 60 %.
5/I	1300 tys.	Równomierne zużycie nakładek styków ruchomych oraz nieruchomych około 60 %.
6/I	1300 tys.	jw.
1995 r.		
4/I	1610 tys.	Równomierne zużycie nakładek stykowych we wszystkich biegunach. Zużycie nakładek styków około 70 %.
5/I	1460 tys.	jw. Zużycie nakładek styków około 60 %.
6/I	1460 tys.	jw. Zużycie nakładek styków około 60 %.
1997 r.		
4/I	1120 tys.	Równomierne zużycie nakładek stykowych we wszystkich biegunach. Badanie przerwano ponieważ styczniki uzyskały wymaganą trwałość łączeniową
5/I	1120 tys.	jw.
6/I	1120 tys.	jw.

SLA 63

Sprawdzenie trwałości łączeniowej styczników SLA 63 w kategorii użytkowania AC - 3 przy $P_e = 30,0 \text{ kW}$, $U_e = 380 \text{ V}$.

Nr.	Trwałość	Opis uszkodzenia
1991 r.		
1/I	1750 tys.	Całkowite zużycie nakładek styków ruchomych oraz nieruchomych zacisk „5”- szepienie. Zużycie nakładek pozostałych około 80 %.
2/I	1320 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego zacisk „1 i 3”. Zużycie nakładek pozostałych styków około 60 %.
3/I	1370 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego oraz nieruchomego zacisk „1” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 60 %.
1992 r.		
3/I	1150 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego oraz nieruchomego zacisk 3 i 5 . Zużycie nakładek pozostałych styków około 70 %.
1/I	1230 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego zacisk 1 i 5. Zużycie nakładek pozostałych styków około 70 %.
2/I	1310 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku nieruchomego zacisk „1” oraz nieruchomego zacisk „3”. Zużycie nakładek pozostałych styków około 70 %.
1993 r.		
4/I	1250 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego zacisk „4” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 60 %.
5/I	1360 tys.	Całkowite zużycie nakładki, upalenie mostka styku ruchomego zacisk „4”. Zużycie nakładek pozostałych styków około 70 %.
6/I	1500 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego oraz nieruchomego zacisk „3” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 70 %.
1994 r.		
5/I	1250 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego biegun „3” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 60 %.
4/I	1290 tys.	jw. w biegunie „5”. Zużycie nakładek pozostałych styków około 60 %.
6/I	1345 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego oraz nieruchomego biegun „1” - szepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 70 %.
1995 r.		
5/I	610 tys.	Odkręcony wkręt mocujący styk stały z szyną - upalony styk biegun „4”. Zużycie nakładek pozostałych styków około 30 %.
6/I	650 tys.	jw. w biegunie „2”. Zużycie nakładek pozostałych styków około 30 %.
4/I	1350 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego biegun „5”. Zużycie nakładek pozostałych styków około 80 %.

1996 r.

5/I	910 tys.	Odpadnięcie nakładki od mostka styku ruchomego biegun „1” - sczepienie.
4/I	1120 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego biegun „2” - sczepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 70 %.
6/I	1050 tys.	Całkowite zużycie nakładki styku ruchomego i nieruchomego biegun „3” - sczepienie. Zużycie nakładek pozostałych styków około 70 %.

SLA 85

Sprawdzenie trwałości łączeniowej styczników SLA 85 w kategorii użytkowania AC - 3 przy
 $P_e = 45,0 \text{ kW}$, $U_e = 380 \text{ V}$.

Nr.	Trwałość	Opis uszkodzenia
1992 r.		
2/I	1044 tys.	Pęknięcie korpusu stycznika - sczepienie . Zużycie nakładek pozostałych styków około 50 %.
3/I	1425 tys.	Całkowite zużycie nakładek styku ruchomego oraz nieruchomego zacisk „4. Zużycie nakładek pozostałych styków około 70 %.
1/I	1516 tys.	90 % zużycia nakładki styku ruchomego zacisk „3”. Zużycie nakładek pozostałych styków około 70 %.
1993 r.		
4/I	2050 tys.	Równomierne zużycie nakładek styków ruchomych oraz nieruchomych około 80 %.
5/I	1600 tys.	jw. Zużycie nakładek styków około 70 %.
6/I	1550 tys.	jw. Zużycie nakładek styków około 70 %.
1995 r.		
5/I	1070 tys.	Odkręcenie wkrętu mocującego zespół styku nieruchomego biegun „1” - upalenie styków. Zużycie nakładek pozostałych styków ok. 60 %.
4/I	1120 tys.	80 % zużycia nakładki styku nieruchomego biegun „2”. Zużycie nakładek pozostałych styków około 70 %.
6/I	1200 tys.	Równomierne zużycie nakładek styków ruchomych oraz nieruchomych około 70 %.
1996 r.		
4/I	1050 tys.	80 % zużycia nakładki styku ruchomego oraz nieruchomego biegun „3”. Zużycie nakładek pozostałych styków około 70 %.
5/I	1070 tys.	80 % zużycia nakładki styku ruchomego oraz nieruchomego biegun „5”. Zużycie nakładek pozostałych styków około 70 %.
6/I	1120 tys.	80 % zużycia nakładki styku ruchomego oraz nieruchomego biegun „3 i 5”.Zużycie nakładek pozostałych styków około 70 %.

12.2. Wybrane wyniki badań zmian parametrów prognozujących niezawodność układu zestykowego styczników serii LS w funkcji liczby cykli łączeniowych

W poszczególnych tabelach przedstawiono:

- zmiany wartości średniej przechyłu styków w funkcji liczby cykli łączeniowych dla poszczególnych styczników oraz rodzaj uszkodzenia zestyków (tabela 12.1),
- zmiany wartości średniej siły docisku styków w funkcji liczby cykli łączeniowych dla poszczególnych styczników oraz rodzaj uszkodzenia zestyków (tabela 12.2),
- zmiany wartości średniej czasu niejednoczesności zamykania styków w funkcji liczby cykli łączeniowych dla poszczególnych styczników (tabela 12.3),
- zmiany wartości średniej czasu trwania odskoków sprężystych styków w funkcji liczby cykli łączeniowych dla poszczególnych styczników (tabela 12.4),
- zmiany wartości średniej czasu występowania odskoków sprężystych styków w funkcji liczby cykli łączeniowych dla poszczególnych styczników (tabela 12.5),
- zmiany wartości średniej liczby odskoków sprężystych styków w funkcji liczby cykli łączeniowych dla poszczególnych styczników (tabela 12.6),

Tabela 12.1. Zmiana wartości średnich przechyłu styków w funkcji liczby cykli łączeniowych oraz rodzaj uszkodzenia zestyków

	Stycznik nr 1			Stycznik nr 2			Stycznik nr 3			Stycznik nr 4			Stycznik nr 5			
L. łącheń	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	
0	2,46	2,43	2,46	2,46	2,43	2,46	2,37	2,30	2,38	2,37	2,30	2,38	2,50	2,59	2,69	
4 000	2,46	2,53	2,45	2,47	2,53	2,56	2,52	2,45	2,35	2,62	2,56	2,58	2,66	2,67	2,66	
8 000	2,46	2,48	2,40	2,42	2,49	2,46	2,47	2,39	2,31	2,63	2,55	2,46	2,60	2,65	2,54	
12 000	2,42	2,41	2,38	2,33	2,44	2,43	2,42	2,33	2,27	2,54	2,51	2,38	2,51	2,60	2,48	
16 000	2,31	2,37	2,36	2,23	2,40	2,36	2,36	2,28	2,21	2,47	2,49	2,34	2,50	2,54	2,44	
20 000	2,28	2,30	2,31	2,17	2,40	2,31	2,31	2,19	2,16	2,45	2,49	2,27	2,45	2,51	2,44	
24 000	2,16	2,22	2,29	2,11	2,37	2,25	2,26	2,16	2,16	2,34	2,45	2,19	2,39	2,45	2,39	
28 000	2,05	2,13	2,25	2,01	2,33	2,26	2,15	2,10	2,12	2,27	2,42	2,06	2,35	2,40	2,33	
32 000	1,97	2,05	2,23	1,99	2,27	2,20	2,11	2,04	2,05	2,26	2,40	1,98	2,24	2,30	2,25	
36 000	1,92	1,98	2,17	1,90	2,21	2,16	2,07	1,96	2,01	2,20	2,38	1,91	2,18	2,26	2,17	
40 000	1,88	1,91	2,13	1,85	2,12	2,11	2,02	1,90	1,99	2,17	2,30	1,75	2,18	2,26	2,13	
44 000	1,81	1,85	2,07	1,81	2,06	2,07	1,97	1,85	1,94	2,11	2,27	1,69	2,12	2,19	2,05	
48 000	1,24	1,75	1,98	1,72	2,00	1,98	1,91	1,78	1,87	2,03	2,23	1,53	2,06	2,11	1,87	
52 000	Odpadła nakładka w torze L1-T1			1,67	1,94	1,91	1,82	1,74	1,87	2,00	2,17	1,40	2,02	2,11	1,82	
56 000				1,46	1,88	1,92	1,81	1,67	1,86	1,96	2,13	1,24	2,02	2,10	1,78	
60 000				1,30	1,86	1,90	1,75	1,65	1,82	1,94	2,15		1,93	2,07	1,64	
64 000				0,87	1,80	1,88	1,50	1,44	1,77	Upalony zestyk w torze L3-T3			1,83	2,02	1,44	
68 000				Upalony mostek przy 65 900 cyklach łącz. w torze L1-T1			1,53	1,33	1,72				1,79	1,97	1,32	
72 000							1,33	1,20	1,70				1,64	1,93	0,69	
76 000							1,14	0,95	1,63				1,52	1,82	0,23	
80 000										1,03	0,84	1,58	Upalony zestyk przy 77 000 cylach łącz. w torze L3-T3			
							Całkowite zużycie w torze L2-T2									

Tabela 12.1. Zmiana wartości średnich przechyłu styków w funkcji liczby cykli łączeniowych oraz rodzaj uszkodzenia zestyków

	Stycznik nr 6			Stycznik nr 7			Stycznik nr 8			Stycznik nr 9			Stycznik nr 10		
L. łączy	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3
0	2,40	2,61	2,38	2,48	2,70	2,66	2,49	2,38	2,32	2,57	2,76	2,43	2,58	2,60	2,36
4 000	2,38	2,63	2,49	2,46	2,66	2,55	2,50	2,45	2,37	2,48	2,72	2,44	2,55	2,61	2,39
8 000	2,37	2,62	2,46	2,38	2,64	2,49	2,47	2,40	2,25	2,46	2,70	2,33	2,48	2,51	2,34
12 000	2,33	2,59	2,37	2,34	2,61	2,47	2,41	2,39	2,23	2,38	2,65	2,23	2,45	2,48	2,29
16 000	2,30	2,58	2,33	2,25	2,55	2,39	2,37	2,38	2,21	2,33	2,64	2,19	2,41	2,43	2,24
20 000	2,30	2,57	2,25	2,18	2,54	2,32	2,32	2,36	2,10	2,30	2,59	2,10	2,38	2,36	2,25
24 000	2,26	2,49	2,17	2,15	2,49	2,15	2,25	2,34	2,05	2,26	2,57	2,01	2,28	2,30	2,25
28 000	2,25	2,46	2,10	2,10	2,45	2,10	2,19	2,29	1,98	2,24	2,50	1,93	2,25	2,24	2,20
32 000	2,20	2,43	2,04	2,04	2,42	2,01	2,14	2,24	1,93	2,22	2,48	1,90	2,21	2,20	2,15
36 000	1,51	2,40	1,95	1,98	2,37	1,85	2,03	2,18	1,89	2,15	2,43	1,80	2,18	2,13	2,07
40 000	Odpadły nakładki w torze L1-T1			1,89	2,33	1,74	1,95	2,16	1,85	2,05	2,42	1,70	2,09	2,08	2,03
44 000				1,80	2,23	1,58	1,92	2,13	1,79	2,03	2,36	1,64	2,04	2,05	1,98
48 000				1,75	2,21	1,40	1,73	1,99	1,78	1,96	2,33	1,51	1,74	1,98	1,92
52 000				1,58	2,25	1,24	1,62	1,53	1,67	1,87	2,27	1,40	Całkowite zużycie w torze L2-T2 styk ruchomy		
56 000				1,45	2,12	1,09	Odpadła nakładka w torze L2-T2			1,70	2,25	1,07			
60 000				1,05	2,08	0,53				1,58	2,22	0,89			
64 000				Całkowite zużycie w torze L3-T3			styk nieruchomy			Całkowite zużycie w torze L3-T3 styk ruchomy					
68 000															
72 000															
76 000															
80 000															

Tabela 12.1. Zmiana wartości średnich przechyłu styków w funkcji liczby cykli łączeniowych oraz rodzaj uszkodzenia zestyków

	Stycznik nr 11			Stycznik nr 12			Stycznik nr 13			Stycznik nr 14		
L. łączy	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3
0	2,60	2,58	2,56	2,55	2,70	2,68	2,43	2,52	2,43	2,35	2,32	2,37
4 000	2,64	2,60	2,58	2,56	2,74	2,69	2,43	2,47	2,45	2,28	2,32	2,39
8 000	2,56	2,58	2,53	2,50	2,69	2,64	2,35	2,42	2,35	2,23	2,23	2,34
12 000	2,50	2,52	2,49	2,47	2,64	2,58	2,28	2,37	2,27	2,17	2,23	2,31
16 000	2,48	2,48	2,47	2,42	2,61	2,57	2,26	2,36	2,28	2,08	2,18	2,25
20 000	2,47	2,47	2,35	2,33	2,54	2,49	2,17	2,33	2,27	2,00	2,10	2,23
24 000	2,37	2,37	2,26	2,29	2,44	2,43	2,16	2,31	2,22	1,96	2,07	2,20
28 000	2,28	2,35	2,25	2,17	2,40	2,41	2,14	2,26	2,15	1,89	2,00	2,18
32 000	2,31	2,33	2,20	2,11	2,30	2,33	2,11	2,23	2,15	1,83	1,93	2,16
36 000	2,21	2,28	2,13	2,06	2,25	2,28	1,97	2,19	2,09	1,78	1,89	2,12
40 000	2,18	2,23	2,07	2,01	2,17	2,31	1,68	2,13	2,03	1,77	1,83	2,06
44 000	2,15	2,23	2,06	1,97	2,12	2,31	1,58	2,10	1,95	1,66	1,77	2,04
48 000	2,08	2,19	1,99	1,89	2,00	2,27	1,48	2,05	1,94	1,57	1,68	2,00
52 000	1,99	2,14	1,84	1,79	1,84	2,26	1,27	2,03	1,87	1,45	1,57	1,91
56 000	1,99	2,09	1,69	1,68	1,67	2,22	1,20	1,98	1,86	1,34	1,46	1,84
60 000	1,99	2,09	1,64	1,60	1,57	2,22	Całkowite zużycie w torze L1-T1 styk ruchomy			Całkowite zużycie w torze L1-T1 styk ruchomy		
64 000	1,91	2,05	1,60	1,59	1,47	2,20						
68 000	1,82	2,02	1,41	Upalony zestyk przy 66 000 cyklach łącz. w torze L2-T2 styk ruchomy								
72 000	Całkowite zużycie przy 70000 cyklach łącz. w torze L3-T3 styk ruchomy											
76 000												
80 000												

Tabela 12.2. Zmiana wartości średniej siły docisku styków w funkcji liczby cykli łączeniowych oraz rodzaj uszkodzenia zestyków

L. łączy	Stycznik nr 1			Stycznik nr 2			Stycznik nr 3			Stycznik nr 4			Stycznik nr 5		
	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3
0	7,98	7,90	7,47	7,78	7,82	7,47	8,19	7,44	7,92	8,19	8,06	7,92	8,67	8,97	8,16
4 000	7,18	7,27	6,56	7,81	7,99	7,94	7,92	7,93	8,00	8,31	8,14	7,78	7,28	7,65	7,30
8 000	7,47	7,62	6,69	7,85	7,85	7,71	7,88	7,82	7,72	8,33	8,29	7,75	7,58	8,60	8,42
12 000	7,34	7,37	6,90	7,78	7,88	7,85	8,09	7,92	7,92	7,95	8,36	7,65	7,65	8,49	8,22
16 000	7,17	7,37	6,90	7,58	7,92	7,92	8,01	7,95	8,09	7,98	8,49	7,44	7,40	8,36	8,16
20 000	7,01	7,11	6,93	7,58	7,95	7,55	7,98	7,78	8,06	8,06	8,36	7,37	7,04	8,29	8,22
24 000	7,01	7,11	6,93	7,44	8,03	7,34	7,85	7,34	7,78	8,09	8,26	7,04	6,96	8,23	8,29
28 000	7,04	7,01	7,11	7,41	8,03	7,31	7,72	7,24	7,82	7,92	8,03	6,93	6,93	8,33	8,33
32 000	6,80	6,90	6,93	7,37	7,82	7,11	7,55	7,11	7,62	8,03	8,23	6,80	6,86	8,23	8,29
36 000	7,04	6,86	6,93	7,04	7,04	7,24	7,58	6,83	7,24	7,95	8,13	6,80	6,83	8,16	8,33
40 000	6,63	6,73	6,83	7,14	7,09	6,73	7,31	6,73	7,14	7,72	7,92	6,39	6,29	7,78	7,52
44 000	6,53	6,63	6,93	7,11	7,21	6,83	7,31	6,53	7,14	7,44	7,75	6,15	6,63	7,55	7,82
48 000	5,10	6,50	6,96	7,07	7,11	6,63	7,17	6,63	7,11	7,44	7,58	6,12	6,63	7,47	7,75
52 000	Odpadła nakładka w torze L1-T1			6,90	6,93	6,53	6,90	6,60	6,63	7,34	7,62	5,48	6,63	7,34	7,65
56 000				6,42	6,83	6,22	6,83	6,32	6,63	7,24	7,34	5,10	6,50	6,63	7,24
60 000				5,88	6,53	6,22	6,83	6,12	6,63	7,24	7,34		6,42	7,04	7,14
64 000				4,69	6,53	6,22	6,73	5,61	6,63	Upalony zestyk w torze L3-T3			6,32	7,04	6,73
68 000				(zmienna wartość siły)			6,53	5,40	6,53				6,19	6,83	6,63
72 000				Upalony mostek			6,22	5,20	6,53				5,91	6,83	5,10
76 000				65 900 cykli łącz.			5,91	4,69	6,32				6,02	6,93	4,14
80 000				w torze L1-T1			5,86	5,52	6,22				Upalony zestyk przy 77 000 cyklach łącz. w torze L3-T3		
							Całkowite zużycie w torze L2-T2								

Tabela 12.2. Zmiana wartości średniej siły docisku styków w funkcji liczby cykli łączeniowych oraz rodzaj uszkodzenia zestyków

	Stycznik nr 6			Stycznik nr 7			Stycznik nr 8			Stycznik nr 9			Stycznik nr 10		
L. łącznie	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3
0	8,46	8,87	7,68	8,67	8,87	8,97	9,15	8,97	8,33	8,87	9,18	8,36	9,48	9,18	9,08
4 000	8,08	8,27	7,47	8,64	8,94	8,60	8,67	9,00	8,33	8,49	8,97	8,26	9,18	9,08	8,87
8 000	7,88	7,82	7,65	8,26	8,57	8,70	8,46	8,87	7,98	8,46	8,94	8,19	8,97	8,67	8,46
12 000	7,65	8,06	7,04	8,13	8,46	8,33	8,36	8,67	7,92	8,46	8,80	7,95	8,77	8,57	8,36
16 000	8,12	8,29	7,24	7,75	8,54	8,13	8,36	8,64	7,75	8,36	8,80	7,85	8,54	8,36	8,16
20 000	7,82	8,09	6,90	7,41	8,36	7,85	8,26	8,36	7,55	8,23	8,49	7,72	8,36	7,98	7,95
24 000	8,06	8,13	7,24	7,24	7,95	7,55	8,19	8,36	7,55	7,92	8,46	7,44	8,26	7,85	7,95
28 000	7,92	8,03	7,11	7,14	7,85	7,55	8,06	8,16	7,24	7,82	8,26	7,24	8,06	7,85	7,95
32 000	7,75	7,78	6,42	6,93	7,75	7,34	8,13	8,13	7,31	7,65	8,23	7,24	8,06	7,55	7,92
36 000	7,14	7,78	6,32	6,83	7,75	7,31	7,65	7,95	6,96	7,55	8,16	7,04	7,95	7,44	7,85
40 000	Odpadły nakładki w torze L1-T1			6,53	7,72	6,90	7,65	7,85	6,93	7,55	8,16	7,04	7,75	7,37	7,85
44 000				6,53	7,72	6,73	7,55	7,44	6,83	7,41	7,85	7,21	7,88	7,34	7,65
48 000				6,32	7,55	6,32	7,24	7,24	6,63	7,14	7,95	6,93	7,04	7,14	7,44
52 000				6,22	7,24	5,20	7,14	5,71	6,42	7,01	7,82	6,22	Całkowite zużycie w torze L2-T2 styk ruchomy		
56 000				6,12	6,63	4,59	Odpadła nakładka w torze L2-T2			6,93	7,78	5,81			
60 000				5,30	6,53	3,77				6,50	7,47	4,69			
64 000				Całkowite zużycie w torze L3-T3			styk nieruchomy			Całkowite zużycie w torze L3-T3 styk ruchomy					
68 000															
72 000															
76 000															
80 000															

Tabela 12.2. Zmiana wartości średniej siły docisku styków w funkcji liczby cykli łączeniowych oraz rodzaj uszkodzenia zestyków

	Stycznik nr 11			Stycznik nr 12			Stycznik nr 13			Stycznik nr 14		
L. łączy	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3
0	8,87	9,08	8,46	8,26	9,08	8,77	8,57	8,97	8,77	7,95	8,16	7,65
4 000	8,77	8,97	8,36	8,16	8,97	8,70	8,06	8,57	8,46	7,85	8,06	7,55
8 000	8,67	8,94	8,26	7,92	8,87	8,64	7,95	8,46	8,36	7,82	8,06	7,55
12 000	8,26	8,87	8,16	7,75	8,57	8,36	7,55	8,13	7,52	7,65	8,16	7,37
16 000	8,26	8,46	7,85	7,65	8,57	8,26	7,41	8,09	7,52	7,37	7,98	7,47
20 000	8,26	8,46	7,85	7,55	8,46	8,26	7,34	8,06	7,47	7,24	7,78	7,44
24 000	7,95	8,46	7,65	7,55	8,36	8,23	7,21	7,85	7,44	7,04	7,65	7,24
28 000	7,85	8,36	7,62	7,44	8,06	8,06	7,14	7,75	7,44	7,04	7,52	7,14
32 000	7,52	8,23	7,88	7,24	7,75	7,95	7,11	7,75	7,44	6,90	7,14	7,11
36 000	7,34	8,06	7,34	7,17	7,65	7,78	6,63	7,44	7,41	6,70	7,14	7,04
40 000	7,34	8,06	7,27	7,14	7,37	7,65	6,02	7,11	7,14	6,53	6,90	6,93
44 000	7,11	7,95	6,83	6,83	7,14	7,55	5,71	6,86	6,90	6,42	6,76	6,90
48 000	6,83	7,68	6,66	6,76	7,11	7,52	5,37	6,76	6,80	6,25	6,70	6,86
52 000	6,83	7,44	6,53	6,63	6,42	7,44	5,30	6,73	6,63	6,15	6,15	6,56
56 000	6,83	7,37	5,91	6,60	5,81	7,24	5,10	6,63	6,53	5,48	5,81	6,42
60 000	6,70	7,31	5,78	6,39	5,33	7,24	Całkowite zużycie w torze L1-T1 styk ruchomy			Całkowite zużycie w torze L1-T1 styk ruchomy		
64 000	6,53	7,27	5,71	6,12	5,10	7,24						
68 000	6,32	7,11	5,13	Upalony zestyk przy 66 000 cyklach łącz. w torze L2-T2 styk ruchomy								
72 000	Całkowite zużycie przy 70000 cyklach łącz. w torze L3-T3 styk ruchomy											
76 000												
80 000												

Tabela 12.3. Średni czas niejednoczesności zamykania zestyków w funkcji liczby cykli łączeniowych dla poszczególnych badanych styczników.

	Stycznik 1	Stycznik 2	Stycznik 3	Stycznik 4	Stycznik 5	Stycznik 6	Stycznik 7	Stycznik 8	Stycznik 9	Stycznik 10	Stycznik 11	Stycznik 12	Stycznik 13	Stycznik 14
L. łącheń	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms
0	0,32	0,68	0,38	0,71	0,55	0,39	0,86	0,75	0,31	0,78	0,42	0,75	0,82	0,78
4 000	0,11	0,28	0,46	0,22	0,28	0,39	0,29	0,46	0,35	0,24	0,26	0,21	0,30	0,15
8 000	0,06	0,17	0,23	0,31	0,31	0,22	0,34	0,52	0,45	0,26	0,23	0,09	0,36	0,30
12 000	0,18	0,18	0,26	0,45	0,30	0,17	0,47	0,62	0,48	0,26	0,25	0,38	0,30	0,14
16 000	0,08	0,20	0,25	0,32	0,13	0,61	0,40	0,71	0,48	0,19	0,23	0,15	0,49	0,15
20 000	0,57	0,24	0,28	0,28	0,30	0,46	0,51	0,79	0,59	0,11	0,21	0,21	0,31	0,30
24 000	0,41	0,27	0,24	0,37	0,14	0,72	0,59	0,64	0,56	0,64	0,25	0,34	0,41	0,25
28 000	0,29	0,34	0,13	0,42	0,25	0,51	0,50	0,75	0,58	0,14	0,21	0,52	0,42	0,34
32 000	0,39	0,41	0,26	0,53	0,21	0,43	1,02	0,75	0,58	0,14	0,31	0,38	0,63	0,44
36 000	0,39	0,26	0,13	0,63	0,19	1,30	0,96	0,61	0,68	0,11	0,27	0,32	0,50	0,60
40 000	0,44	0,26	0,25	0,77	0,28		0,82	0,10	0,83	0,13	0,40	0,39	0,50	0,74
44 000	0,48	0,25	0,22	0,77	0,27		1,04	0,61	0,72	0,10	0,37	0,51	0,90	0,71
48 000	1,08	0,18	0,17	0,87	0,55		1,20	0,40	0,66	0,23	0,44	0,55	0,89	0,72
52 000		0,50	0,25	1,02	0,47		1,19	0,44	0,81		1,16	0,47	1,34	0,76
56 000		0,61	0,18	1,23	0,34		1,68		1,15		0,83	0,76	0,86	0,66
60 000		0,74	0,30	1,35	0,72		2,04		1,15		1,24	1,19		
64 000		1,34	0,47		0,74						1,59			
68 000			0,38		1,37						1,86			
72 000			0,43		1,85									
76 000			0,85		1,98									
80 000			1,51											

Tabela 12.4. Średni czas trwania odskoków sprężystych zestyków w funkcji liczby cykli łączeniowych

L. łączy	Stycznik nr 1			Stycznik nr 2			Stycznik nr 3			Stycznik nr 4			Stycznik nr 5		
	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3
0	0,61	1,31	1,65	0,89	1,92	1,38	1,26	0,55	0,97	0,89	1,88	1,38	1,44	0,92	1,35
4 000	0,37	0,74	0,62	0,61	1,32	0,89	0,65	0,67	0,75	0,85	0,77	0,80	0,81	0,57	0,81
8 000	0,21	1,24	0,20	0,67	0,36	0,84	0,80	0,74	1,53	1,04	0,86	0,82	1,18	0,57	0,90
12 000	0,28	0,72	0,59	0,85	1,22	0,90	0,78	0,62	0,71	0,87	0,82	0,78	0,61	0,48	0,67
16 000	0,20	0,60	0,72	0,73	0,97	1,16	0,51	0,61	0,87	0,71	0,73	0,81	0,94	0,72	0,89
20 000	0,17	0,76	0,65	0,73	1,03	0,97	0,91	0,62	0,85	0,72	0,71	0,88	0,84	0,65	0,93
24 000	0,28	0,47	0,75	0,81	0,97	0,88	0,62	0,79	0,65	0,86	0,79	1,12	0,68	0,59	0,67
28 000	0,38	0,50	0,59	0,76	0,88	0,88	0,71	0,77	0,82	0,74	0,60	0,80	0,72	0,60	0,76
32 000	0,40	0,44	0,85	0,74	0,98	1,07	0,45	0,57	0,79	0,90	0,99	1,15	1,17	0,68	0,79
36 000	0,40	0,64	0,81	0,91	0,85	1,11	0,52	0,66	0,81	0,81	0,85	0,94	0,58	0,57	0,75
40 000	0,58	0,60	0,83	0,71	0,80	0,83	0,34	0,60	0,71	0,60	0,84	1,02	0,79	0,63	0,79
44 000	0,63	0,59	0,84	0,84	0,87	1,11	0,54	0,58	0,92	0,72	0,74	0,98	0,62	0,72	0,82
48 000	0,73	0,94	1,21	0,87	0,99	1,25	0,65	0,68	1,13	1,10	0,78	0,92	0,87	0,80	0,86
52 000				0,86	0,82	1,15	0,67	0,63	0,86	1,17	0,63	0,79	0,96	0,75	0,72
56 000				0,82	0,90	0,95	0,49	0,72	0,79	0,79	0,70	0,89	0,85	0,76	0,83
60 000				0,67	0,64	1,04	0,46	0,54	0,76	0,77	0,78		0,76	0,48	0,55
64 000				0,67	0,51	0,92	0,46	0,59	0,69				0,60	0,58	0,36
68 000							0,69	0,83	0,65				0,45	0,58	0,49
72 000							0,71	1,06	0,80				0,64	0,63	0,48
76 000							0,62	0,47	0,75				0,34	0,30	0,80
80 000							0,76	0,84	0,81						

Tabela 12.4. Średni czas trwania odskoków sprężystych zestyków w funkcji liczby cykli łączeniowych

L. łączy	Stycznik nr 6			Stycznik nr 7			Stycznik nr 8			Stycznik nr 9			Stycznik nr 10		
	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3
0	1,16	1,29	1,44	1,09	0,86	1,44	0,68	0,81	1,20	1,23	1,11	1,61	0,91	0,97	1,16
4 000	0,54	0,80	0,74	0,57	0,77	0,76	0,53	0,58	0,67	0,93	0,95	0,81	0,48	0,75	0,60
8 000	0,51	0,68	0,63	0,78	0,92	0,86	0,50	0,46	0,59	1,01	1,08	0,94	0,29	0,51	0,37
12 000	0,23	0,72	0,60	0,52	0,88	0,79	0,41	0,50	0,43	0,93	0,83	0,84	0,44	0,26	0,50
16 000	0,45	0,69	0,84	0,54	0,81	0,89	0,48	0,68	0,85	0,99	0,79	0,91	0,57	0,23	0,57
20 000	0,59	0,86	1,10	0,33	0,82	0,59	0,42	0,85	1,07	0,95	0,95	0,95	0,58	0,40	0,59
24 000	0,41	0,77	0,78	0,48	0,50	0,55	0,52	0,73	0,63	0,95	0,97	1,09	0,40	0,81	0,56
28 000	0,53	0,75	0,92	0,24	0,61	0,59	0,46	0,61	0,75	0,72	0,91	0,78	0,51	0,50	0,76
32 000	0,77	0,77	0,88	0,70	0,62	0,63	0,37	0,55	0,93	0,98	0,94	0,89	0,44	0,31	0,43
36 000	0,42	0,68	1,12	0,51	0,50	0,51	0,42	0,58	0,93	0,90	0,81	1,01	0,40	0,59	0,75
40 000				0,89	0,62	0,62	0,57	0,53	0,59	1,00	0,76	0,98	1,01	0,50	0,60
44 000				0,60	0,67	0,48	0,51	0,60	0,88	0,65	0,73	1,08	0,52	0,67	0,69
48 000				0,80	0,72	0,59	0,47	0,55	0,85	1,01	1,01	1,01	0,76	0,79	0,69
52 000				0,39	0,67	0,67	0,42	0,78	0,67	1,02	1,01	0,79			
56 000				0,47	1,02	0,66				1,03	0,91	1,11			
60 000				0,66	0,72	1,11				1,14	1,10	1,24			
64 000															
68 000															
72 000															
76 000															
80 000															

Tabela 12.4. Średni czas trwania odskoków sprężystych zestyków w funkcji liczby cykli łączeniowych

L. łącheń	Stycznik nr 11			Stycznik nr 12			Stycznik nr 13			Stycznik nr 14		
	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3
0	1,75	1,38	1,00	1,43	1,00	0,68	1,30	1,39	1,22	1,23	1,53	1,22
4 000	1,05	0,90	1,00	0,87	0,82	0,96	0,79	0,91	0,84	0,89	0,89	1,00
8 000	1,01	0,88	1,06	0,69	0,92	0,87	0,69	0,71	0,88	1,07	1,01	1,07
12 000	0,63	0,76	1,03	0,77	0,76	0,82	0,61	0,95	0,89	0,87	0,86	1,24
16 000	0,78	0,79	1,09	0,84	0,76	0,89	0,58	0,61	1,07	0,82	0,78	1,19
20 000	0,92	0,83	1,05	0,61	0,56	1,00	0,61	0,80	0,60	0,87	1,09	1,23
24 000	0,80	0,92	1,01	0,59	0,60	1,67	0,77	0,83	0,86	0,92	0,93	1,25
28 000	0,90	0,77	1,01	0,82	0,80	1,09	0,73	0,56	0,68	0,71	0,70	1,11
32 000	0,95	0,73	1,03	0,77	0,60	0,99	0,70	0,85	0,84	1,02	0,92	1,00
36 000	0,89	1,08	0,94	0,74	0,80	1,04	0,73	0,64	0,75	0,97	0,95	0,92
40 000	0,85	0,85	1,16	0,86	0,78	1,08	0,78	0,76	0,80	0,97	0,91	1,11
44 000	0,97	1,06	0,83	0,81	0,68	1,11	1,05	0,63	0,67	1,50	1,00	1,13
48 000	0,74	0,73	0,89	0,66	0,82	1,11	0,94	0,60	0,83	0,79	0,98	0,98
52 000	0,70	0,70	0,95	0,84	0,89	1,01	0,78	0,77	0,67	1,27	0,99	0,90
56 000	0,82	0,72	0,87	0,63	0,66	0,96	1,48	1,16	1,04	1,25	1,25	1,43
60 000	0,68	0,75	1,08	0,97	0,84	1,12						
64 000	0,75	0,82	0,86									
68 000	0,99	0,78	1,08									
72 000												
76 000												
80 000												

Tabela 12.5. Średni czas występowania odskoków sprężystych zestyków w funkcji liczby cykli łączeniowych

L. łączy	Stycznik nr 1			Stycznik nr 2			Stycznik nr 3			Stycznik nr 4			Stycznik nr 5		
	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3
0	0,78	1,48	2,06	1,36	2,26	1,75	1,19	0,85	1,73	1,36	2,25	1,76	1,74	1,38	1,56
4 000	0,86	1,27	1,09	1,26	1,64	1,22	1,41	1,06	1,25	1,49	1,18	1,49	1,26	1,00	1,12
8 000	0,76	1,21	0,76	1,03	0,80	1,15	1,56	1,02	1,30	1,59	1,46	1,34	1,95	1,64	1,34
12 000	0,63	1,07	1,46	1,49	1,86	1,18	1,15	1,28	1,04	1,44	1,28	1,37	1,19	0,79	1,01
16 000	0,66	1,19	1,04	1,85	1,58	1,83	1,03	1,00	1,35	1,26	1,10	1,39	1,62	1,20	1,22
20 000	0,56	1,30	1,22	1,22	1,72	1,69	1,72	0,96	1,58	1,27	1,15	1,54	1,60	0,97	1,26
24 000	0,80	0,92	1,34	1,24	1,62	1,25	1,03	1,49	1,16	1,41	1,34	1,71	1,37	1,00	1,04
28 000	0,93	0,97	0,98	1,52	1,40	1,29	1,18	1,10	1,20	1,49	0,95	1,45	1,18	1,22	1,26
32 000	0,91	1,01	1,54	1,44	1,63	1,60	0,99	1,50	1,23	1,54	1,43	1,67	1,90	1,46	1,11
36 000	1,41	1,16	1,11	1,62	1,33	1,67	0,95	1,14	1,20	1,22	1,30	1,43	1,07	1,07	0,99
40 000	1,37	1,45	1,15	1,59	1,39	1,15	0,89	0,99	1,24	0,99	1,05	1,47	1,69	1,25	1,14
44 000	1,48	1,13	1,71	1,30	1,31	1,56	1,00	1,15	1,31	1,34	0,92	1,79	1,08	1,10	1,35
48 000	1,50	1,97	2,36	1,48	1,67	1,75	2,06	1,01	1,49	1,68	1,06	1,51	1,28	1,30	1,79
52 000				1,66	1,42	1,66	1,35	1,06	1,42	1,43	1,08	1,54	1,37	1,50	1,07
56 000				1,49	1,35	1,19	1,34	2,18	1,49	1,55	1,04	1,58	1,29	1,53	1,73
60 000				1,43	1,23	1,64	1,05	1,23	1,35	1,49	1,04		1,34	1,18	1,33
64 000				1,35	1,03	1,47	1,17	1,27	1,11				1,41	1,15	0,97
68 000							1,67	1,63	1,10				1,24	1,51	1,15
72 000							1,64	1,62	1,17				1,27	1,40	0,92
76 000							1,63	1,35	1,15				0,83	1,48	1,32
80 000							1,68	1,53	1,18						

Tabela 12.5. Średni czas występowania odskoków sprężystych zestyków w funkcji liczby cykli łączeniowych

L. łączeń	Stycznik nr 6			Stycznik nr 7			Stycznik nr 8			Stycznik nr 9			Stycznik nr 10		
	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3
0	1,57	1,64	1,75	1,27	1,17	1,98	0,92	1,40	2,16	1,72	1,47	2,01	1,18	1,23	1,44
4 000	0,84	1,07	1,08	1,07	1,15	1,11	1,10	1,03	1,18	1,51	1,37	1,46	0,95	0,97	1,04
8 000	0,88	1,22	1,03	1,02	1,43	1,27	0,94	0,89	1,03	1,50	1,32	1,41	0,90	0,99	0,80
12 000	0,64	1,07	1,16	1,08	1,27	1,23	0,63	0,90	0,79	1,37	1,55	1,16	0,77	0,80	0,90
16 000	0,87	1,11	1,17	1,05	1,29	1,34	1,01	0,98	1,31	1,49	1,26	1,53	0,62	0,75	0,89
20 000	1,21	1,35	1,15	0,86	1,18	0,95	0,91	1,15	1,49	1,68	1,38	2,53	0,91	0,87	0,98
24 000	0,84	1,20	1,14	0,93	1,07	0,72	1,19	1,13	1,42	1,50	1,23	1,74	0,79	0,61	0,81
28 000	1,13	1,11	1,24	0,83	1,11	0,99	0,99	1,44	1,04	1,36	1,35	1,46	0,90	0,94	1,45
32 000	1,52	1,51	1,55	1,60	1,27	0,98	0,82	1,11	1,53	1,61	1,23	1,58	0,83	0,69	0,86
36 000	0,99	1,50	1,75	1,17	1,04	1,11	0,93	1,36	1,53	1,55	0,99	1,49	0,79	1,24	1,05
40 000				2,35	1,45	1,60	1,09	1,70	1,24	2,00	1,25	1,91	0,96	0,98	1,05
44 000				1,07	1,24	1,14	1,26	1,38	2,13	1,19	1,18	1,73	0,96	1,50	1,24
48 000				1,42	1,27	1,05	1,11	1,29	1,74	1,76	1,96	2,35	1,64	1,70	1,32
52 000				0,83	1,18	1,46	0,91	1,94	1,06	1,60	1,64	1,62			
56 000				0,85	1,87	1,60				1,88	1,49	2,08			
60 000				1,35	1,49	2,39				1,76	1,71	2,12			
64 000															
68 000															
72 000															
76 000															
80 000															

Tabela 12.5. Średni czas występowania odskoków sprężystych zestyków w funkcji liczby cykli łączeniowych

L. łączy	Stycznik nr 11			Stycznik nr 12			Stycznik nr 13			Stycznik nr 14		
	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3
0	1,91	2,91	1,52	1,71	1,29	0,97	1,54	1,60	1,42	1,56	1,83	1,42
4 000	1,69	1,23	1,24	1,39	1,06	1,31	1,06	1,10	1,29	1,79	1,46	1,46
8 000	1,34	1,18	1,67	1,34	1,20	1,21	1,18	1,12	1,13	1,63	1,51	1,39
12 000	1,54	1,07	1,55	1,12	1,07	1,15	0,94	1,44	1,00	1,50	1,54	1,89
16 000	1,09	1,15	1,39	1,33	1,12	1,14	0,92	1,02	0,73	1,44	1,33	1,60
20 000	1,43	1,01	1,11	1,13	1,02	1,39	1,05	1,08	0,80	1,53	1,43	1,92
24 000	1,12	0,99	1,49	0,99	0,86	1,52	1,11	1,48	1,15	1,48	1,28	2,17
28 000	1,55	1,05	1,49	1,31	1,09	1,67	1,49	0,95	0,99	1,31	1,50	1,43
32 000	1,03	0,91	1,80	1,43	0,85	1,22	1,70	1,72	2,58	1,63	1,47	1,60
36 000	1,31	1,34	1,42	1,33	1,95	1,68	1,61	1,47	3,01	2,11	1,51	2,08
40 000	1,48	1,48	1,64	1,78	1,06	1,50	1,72	2,25	2,13	3,35	2,25	2,97
44 000	1,45	1,44	1,71	1,44	1,58	1,36	1,71	2,17	1,40	2,25	1,53	2,46
48 000	1,26	1,10	1,53	1,45	1,31	1,40	1,60	1,66	1,28	1,97	1,55	1,98
52 000	1,70	1,41	2,74	1,65	1,51	1,72	1,33	1,61	1,78	2,59	1,89	2,01
56 000	1,50	1,66	1,71	1,98	1,32	2,02	2,08	1,96	1,53	2,73	2,11	2,10
60 000	1,65	1,76	3,72	1,55	1,91	2,38						
64 000	2,96	1,88	1,96									
68 000	1,73	1,38	2,01									
72 000												
76 000												
80 000												

Tabela 12.6. Średnia liczba odskoków sprężystych zestyków w funkcji liczby cykli łączeniowych

L. łążeń	Stycznik nr 1			Stycznik nr 2			Stycznik nr 3			Stycznik nr 4			Stycznik nr 5		
	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3
0	4,6	6,2	5,6	6,7	7,3	7,8	7,3	6,9	8,1	6,7	7,3	7,8	6,8	5,1	6,6
4 000	1,9	3,8	3,3	1,9	3,2	2,2	2,1	2,0	4,3	3,2	3,1	3,2	3,3	2,3	4,5
8 000	1,7	2,4	1,6	2,9	3,1	3,0	3,3	3,3	4,9	3,8	2,7	3,5	4,4	2,1	3,4
12 000	1,9	3,7	3,8	3,6	3,8	2,8	3,3	3,0	3,5	3,9	3,9	4,2	1,7	2,3	3,8
16 000	1,5	2,7	3,4	3,1	3,8	3,3	2,5	2,4	3,0	2,2	3,2	2,7	3,3	2,8	3,1
20 000	1,6	3,8	3,4	4,6	4,1	3,3	3,9	3,6	5,0	2,9	2,7	2,7	2,7	2,2	3,1
24 000	1,4	3,0	4,4	2,5	3,1	3,3	3,1	3,2	3,5	3,2	2,9	3,4	3,0	3,0	3,4
28 000	1,7	2,1	3,1	3,0	3,1	2,2	2,8	2,0	4,3	2,4	2,8	3,2	1,9	2,6	3,1
32 000	2,5	1,6	5,5	2,1	4,1	4,0	2,2	3,0	4,8	3,3	3,9	4,2	4,0	3,2	3,0
36 000	1,8	2,5	3,9	3,3	2,9	3,9	2,5	2,3	4,2	2,6	2,8	3,0	2,7	2,1	3,2
40 000	2,0	2,9	4,3	2,5	3,5	3,8	1,9	1,9	3,5	3,6	2,7	4,4	2,4	2,4	3,7
44 000	2,6	2,3	4,5	2,8	3,1	4,4	2,5	2,2	4,1	3,4	2,6	3,5	2,2	2,8	3,5
48 000	3,8	5,2	5,6	3,5	5,0	5,0	3,2	4,4	4,3	4,7	3,9	4,4	3,3	3,4	3,8
52 000				2,5	3,1	4,5	2,4	2,4	4,7	4,1	3,5	3,4	3,5	3,4	4,0
56 000				2,7	3,6	3,6	2,2	3,1	5,1	3,1	3,7	4,9	2,9	3,0	3,0
60 000				1,8	2,6	3,5	1,6	1,8	3,6	2,9	3,4		3,6	3,1	2,4
64 000				2,8	2,1	4,5	1,8	2,4	3,4				3,2	2,3	1,5
68 000							3,1	4,1	3,7				1,9	3,5	1,5
72 000							3,7	2,7	4,0				3,1	3,4	3,4
76 000							2,5	3,7	4,8				1,9	1,8	3,2
80 000							1,8	2,3	3,0						

Tabela 12.6. Średnia liczba odskoków sprężystych zestyków w funkcji liczby cykli łączeniowych

L. łączeń	Stycznik nr 6			Stycznik nr 7			Stycznik nr 8			Stycznik nr 9			Stycznik nr 10		
	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3
0	8,8	6,0	6,5	4,4	5,7	7,3	6,1	8,5	8,9	7,1	4,7	7,8	4,7	5,1	6,3
4 000	2,6	2,8	2,3	2,7	5,3	3,0	4,1	3,1	3,3	3,9	4,9	2,8	3,2	4,1	3,2
8 000	5,7	2,7	3,3	4,1	6,6	4,1	2,7	3,6	3,3	4,2	5,3	3,4	1,8	2,6	2,2
12 000	1,9	3,7	3,8	3,7	6,7	3,2	1,9	2,9	2,1	2,3	6,4	2,3	2,3	1,6	3,3
16 000	2,2	3,3	4,0	3,4	4,0	3,6	2,4	3,2	3,2	4,6	3,1	3,7	3,5	2,0	4,0
20 000	3,6	3,7	3,3	1,7	3,8	2,0	2,3	3,4	4,3	3,6	3,7	4,4	3,1	2,3	3,8
24 000	1,5	2,5	4,6	2,9	2,4	3,0	2,5	4,7	4,2	3,0	4,4	6,0	2,1	1,8	4,2
28 000	2,7	2,7	4,1	1,8	3,1	2,2	1,5	3,3	4,1	2,7	4,1	3,2	2,9	3,6	6,5
32 000	4,0	3,9	4,2	2,6	3,7	2,5	2,0	3,1	4,7	4,9	4,9	3,9	2,6	2,4	2,7
36 000	2,3	3,0	3,8	2,0	2,5	2,5	2,4	2,0	4,6	3,2	4,0	4,6	2,6	3,2	4,4
40 000				3,9	3,4	3,3	2,7	2,5	3,7	5,2	3,6	4,3	3,1	3,5	4,6
44 000				2,7	5,6	2,1	1,8	3,1	6,7	3,2	3,5	5,8	3,0	4,0	3,8
48 000				2,3	4,5	3,6	2,2	3,2	4,5	4,3	5,1	4,8	3,4	4,4	3,1
52 000				1,4	3,7	4,5	1,6	3,2	3,4	4,6	4,6	3,8			
56 000				2,0	7,0	2,9				5,8	4,4	3,8			
60 000				3,2	3,5	4,2				4,8	5,5	5,1			
64 000															
68 000															
72 000															
76 000															
80 000															

Tabela 12.6. Średnia liczba odskoków sprężystych zestyków w funkcji liczby cykli łączeniowych

L. łącheń	Stycznik nr 11			Stycznik nr 12			Stycznik nr 13			Stycznik nr 14		
	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3	L1-T1	L2-T2	L3-T3
0	6,4	8,5	6,5	5,6	4,7	5,1	5,5	6,3	5,4	5,9	6,5	5,6
4 000	5,4	3,6	4,6	3,8	4,9	6,1	4,6	5,3	6,1	3,3	3,8	5,4
8 000	3,9	5,2	4,3	7,5	6,1	7,7	5,7	5,9	4,1	4,1	4,1	5,4
12 000	4,0	3,5	3,5	4,5	4,5	4,1	3,5	6,1	3,3	3,2	5,1	6,3
16 000	3,9	3,4	3,6	5,2	2,9	4,3	3,3	4,9	4,4	3,9	2,5	5,4
20 000	4,5	3,8	3,6	2,8	2,7	5,3	3,7	5,4	2,7	4,2	4,2	4,9
24 000	4,6	3,4	3,8	2,9	3,6	5,8	3,5	4,2	3,7	3,0	3,5	5,0
28 000	3,7	3,4	3,9	3,7	4,1	6,7	2,7	3,2	3,8	1,9	3,2	3,0
32 000	3,2	3,1	5,0	2,9	4,1	4,8	2,2	3,6	3,5	2,7	2,7	2,5
36 000	3,4	4,0	3,5	2,4	3,8	5,2	3,2	2,8	4,0	2,2	2,2	5,0
40 000	3,1	3,2	6,0	3,3	3,3	4,9	3,2	3,3	4,8	3,3	2,6	4,6
44 000	3,4	4,6	3,6	2,9	2,6	4,1	3,0	1,9	2,6	4,0	3,2	3,8
48 000	2,7	2,8	3,8	2,1	2,8	4,0	3,3	2,8	3,9	2,8	3,7	4,1
52 000	3,0	4,4	2,8	2,1	3,5	4,1	2,8	3,8	4,5	6,3	3,6	5,1
56 000	2,3	3,3	3,3	1,6	2,3	3,4	4,2	5,3	3,9	4,1	5,2	4,2
60 000	3,5	1,2	3,4	2,6	3,3	4,3						
64 000	2,6	3,3	2,3									
68 000	4,5	4,2	5,2									
72 000												
76 000												
80 000												

12.3. Program komputerowy *PROZESTYK* do prognozowania niezawodności zestyków styczników

$L :=$  D:\..\przechyl_stykow.xls
 $F :=$  D:\DANE\Mathcad\si1a3.xls
 $T :=$  D:\..\czas_niejednoczesnosci.xls
 $N :=$  D:\..\liczba_cykli_laczeniowych.xls

$l_{min} := 1.8$

$F_{min} := 6.7$

$t_{min} := 0$

$l_{max} := 2.3$

$F_{max} := 9.6$

$t_{max} := 1.0$

$c_s := 2$

$c_m := 135$

$N_s := \text{rows}(L)$ $N_s = 6$

$L_{stycz} := \text{cols}(L)$ $L_{stycz} = 42$

$l_{\text{symulacji}} \equiv 200$ $\text{zakres} \equiv 1000$ $\text{krok}_{\text{sym}} \equiv 10^2$

$\alpha_t := 0.05$

$t(df, \alpha_t) := \text{qt}\left(1 - \frac{\alpha_t}{2}, df\right)$

$\alpha_e := 0.07$

$t(df, \alpha_e) := \text{qt}\left(1 - \frac{\alpha_e}{2}, df\right)$

$i := 0.. \text{cols}(L) - 1 \quad j := 0.. \text{rows}(L) - 1$

$m_{lj} := \text{mean} \left[\left(L^T \right)^{<j>} \right]$

$s_{lj} := \text{stdev} \left[\left(L^T \right)^{<j>} \right]$

$a_l := \text{intercept}(N, m_l) \quad a_l = 2.569$

$b_l := \text{slope}(N, m_l) \quad b_l = -1.235 \cdot 10^{-5}$

$c_l := \text{intercept}(N, s_l) \quad c_l = 0.107$

$d_l := \text{slope}(N, s_l) \quad d_l = 1.313 \cdot 10^{-6}$

$\text{SRED_L}(N) := a_l + b_l \cdot N \quad \text{ODCH_L}(N) := c_l + d_l \cdot N$

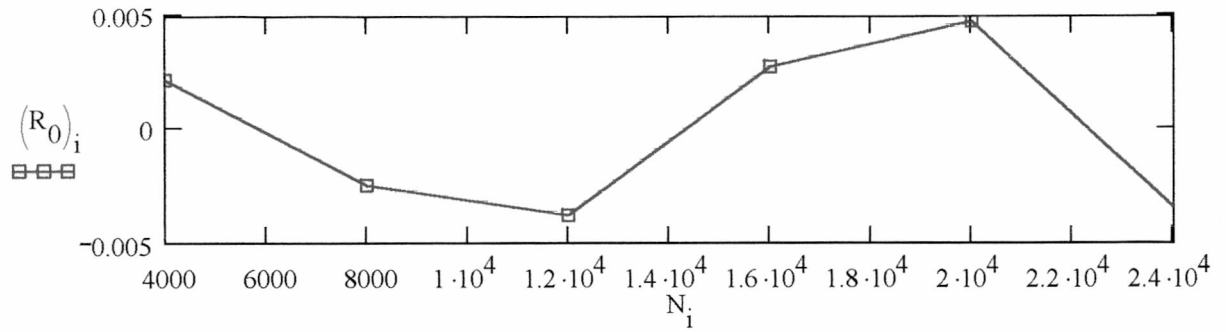
$\text{SL_P}(N_0, N) := a_l + b_l \cdot N_0 \quad \text{OL_P}(N_0, N) := c_l + d_l \cdot N_0$

$\text{RESZTY}(x, y) :=$

$\text{se_e} \leftarrow 0$ for $i \in 0.. \text{last}(x)$ $e_i \leftarrow y_i - (\text{slope}(x, y) \cdot x_i + \text{intercept}(x, y))$ $\sum_{i=0}^{\text{last}(x)} \left[y_i - (\text{slope}(x, y) \cdot x_i + \text{intercept}(x, y)) \right]^2$ $\text{se_e} \leftarrow \sqrt{\frac{\text{se_e}}{\text{rows}(x) - 2}}$ $R_0 \leftarrow e$ $R_1 \leftarrow \text{se_e}$ R	
--	--

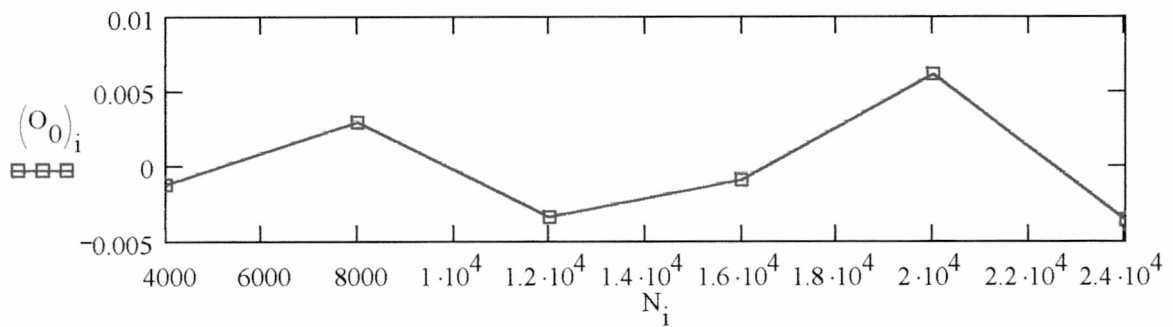
$R := \text{RESZTY}(N, m_l) \quad i := 0.. \text{last}(N)$

$\text{se_e_s} := R_1 \quad \text{se_e_s} = 4.106 \cdot 10^{-3}$



$O := \text{RESZTY}(N, s_1)$

$se_e_o := O_1 \quad se_e_o = 4.274 \cdot 10^{-3}$



$$Sl_{\text{slope}} := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{\text{rows}(N)} [m_{l_{i-1}} - (a_l + b_l \cdot N_{i-1})]^2}{(\text{rows}(N) - 2) \cdot \text{rows}(N) \cdot \text{var}(N)}}$$

$$Sl_{\text{intercept}} := \frac{1}{\text{rows}(N)} \cdot \sqrt{\frac{\left[\sum_{i=1}^{\text{rows}(N)} [m_{l_{i-1}} - (a_l + b_l \cdot N_{i-1})]^2 \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^{\text{rows}(N)} (N_{i-1})^2 \right]}{\text{var}(N)}}$$

$$y_g(W, n) := (a_l + n \cdot Sl_{\text{intercept}}) + (b_l + n \cdot Sl_{\text{slope}}) \cdot W$$

$$y_d(W, n) := (a_l - n \cdot Sl_{\text{intercept}}) + (b_l - n \cdot Sl_{\text{slope}}) \cdot W$$

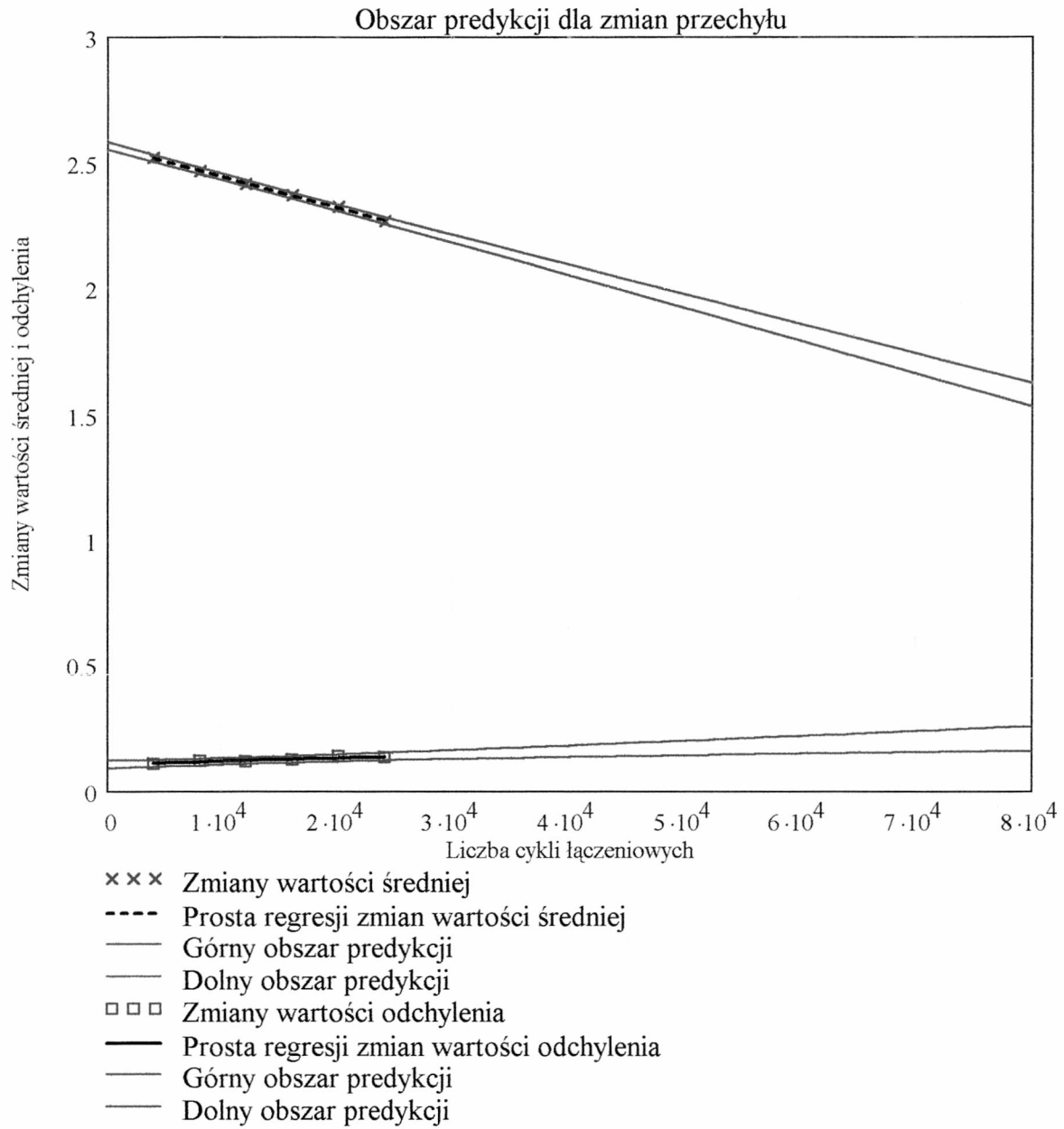
$$l := 0..20 \quad W_1 := 4 \cdot 10^3 \cdot l$$

$$\begin{aligned} \text{pred_s_u}(N0, \alpha_t) &:= \text{SL_P}(N0, N) \dots \\ &+ t(\text{rows}(N) - 2, \alpha_t) \cdot \text{se_e_s} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\text{rows}(N)} + \frac{(N0 - \text{mean}(N))^2}{\sum_i (N_i - \text{mean}(N))^2}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{pred_s_l}(N0, \alpha_t) &:= \text{SL_P}(N0, N) \dots \\ &+ - \left[t(\text{rows}(N) - 2, \alpha_t) \cdot \text{se_e_s} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\text{rows}(N)} + \frac{(N0 - \text{mean}(N))^2}{\sum_i (N_i - \text{mean}(N))^2}} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{pred_o_u}(N0, \alpha_t) &:= \text{OL_P}(N0, N) \dots \\ &+ t(\text{rows}(N) - 2, \alpha_t) \cdot \text{se_e_o} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\text{rows}(N)} + \frac{(N0 - \text{mean}(N))^2}{\sum_i (N_i - \text{mean}(N))^2}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{pred_o_l}(N0, \alpha_t) &:= \text{OL_P}(N0, N) \dots \\ &+ - \left[t(\text{rows}(N) - 2, \alpha_t) \cdot \text{se_e_o} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\text{rows}(N)} + \frac{(N0 - \text{mean}(N))^2}{\sum_i (N_i - \text{mean}(N))^2}} \right] \end{aligned}$$



$$K := \sum_i (N_i - \text{mean}(N))^2$$

$P(z, l_s) :=$ for $k \in 0..z-1$

$N0_k \leftarrow k \cdot \text{krok_sym}$

$P_u_s_k \leftarrow a_l + b_l \cdot N0_k \dots$

$$+ t(\text{rows}(N) - 2, \alpha_t) \cdot \text{se_e_s} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\text{rows}(N)} + \frac{(N0_k - \text{mean}(N))^2}{K}}$$

$P_l_s_k \leftarrow a_l + b_l \cdot N0_k \dots$

$$+ -t(\text{rows}(N) - 2, \alpha_t) \cdot \text{se_e_s} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\text{rows}(N)} + \frac{(N0_k - \text{mean}(N))^2}{K}}$$

$$Ps_k \leftarrow P_u_s_k - \frac{(P_u_s_k - P_l_s_k)}{2}$$

$$Po_k \leftarrow \frac{P_u_s_k - P_l_s_k}{6}$$

$\text{Prosta_s}_k \leftarrow \text{rnorm}(1, Ps_k, Po_k)_0$

$P_u_o_k \leftarrow c_l + d_l \cdot N0_k \dots$

$$+ t(\text{rows}(N) - 2, \alpha_t) \cdot \text{se_e_o} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\text{rows}(N)} + \frac{(N0_k - \text{mean}(N))^2}{K}}$$

$P_l_o_k \leftarrow c_l + d_l \cdot N0_k \dots$

$$+ -t(\text{rows}(N) - 2, \alpha_t) \cdot \text{se_e_o} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\text{rows}(N)} + \frac{(N0_k - \text{mean}(N))^2}{K}}$$

$P_l_o_k \leftarrow \begin{cases} P_l_o_k & \text{if } P_l_o_k \geq 0 \\ 0.001 & \text{otherwise} \end{cases}$

$\text{Prosta_op}_k \leftarrow \text{rnorm}\left(1, P_u_o_k - \frac{P_u_o_k - P_l_o_k}{2}, \frac{P_u_o_k - P_l_o_k}{6}\right)_0$

$\text{Prosta_o}_k \leftarrow \begin{cases} \text{Prosta_op}_k & \text{if } \text{Prosta_op}_k \geq 0 \\ 0.001 & \text{otherwise} \end{cases}$

$L_cykli_k \leftarrow k \cdot \text{krok_sym}$

$s \leftarrow \text{rnorm}(l_s, \text{Prosta_s}_k, \text{Prosta_o}_k)$

```

out ←  $\left[ \sum_{i=0}^{l_s - 1} s_i \leq l_{min} \right]$ 

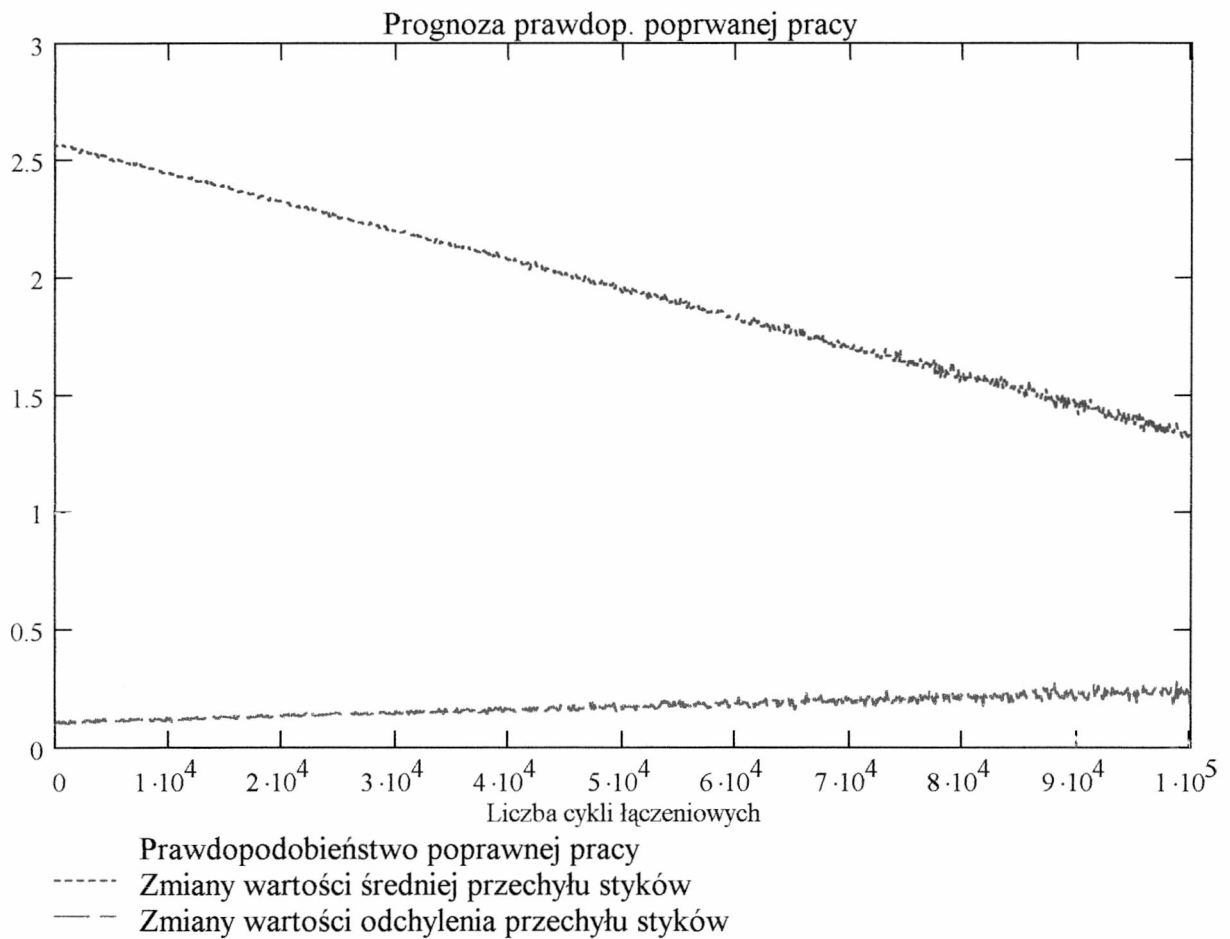
zakres1 ←  $\left[ \sum_{i=0}^{l_s - 1} \begin{matrix} Prosta\_s_k + 3 \dots \\ + Prosta\_o_k \end{matrix} \leq s_i \leq \begin{matrix} Prosta\_s_k - 3 \dots \\ + Prosta\_o_k \end{matrix} \right]$ 

 $P_k \leftarrow \frac{l_s - out}{l_s}$ 

S ← augment(Prosta_s, Prosta_o)
S ← augment(S, P)
S ← augment(S, L_cykli)
S

```

$L := P(\text{zakres}, l_{\text{symulacji}})$



$$i := 0.. \text{cols}(F) - 1 \quad j := 0.. \text{rows}(F) - 1 \quad m_{f_j} := \text{mean} \left[\left(F^T \right)^{<j>} \right]$$

$$s_{f_j} := \text{stdev} \left[\left(F^T \right)^{<j>} \right]$$

$$af := \text{intercept}(N, m_f) \quad af = 8.261$$

$$bf := \text{slope}(N, m_f) \quad bf = -2.636 \cdot 10^{-5}$$

$$cf := \text{intercept}(N, s_f) \quad cf = 0.487$$

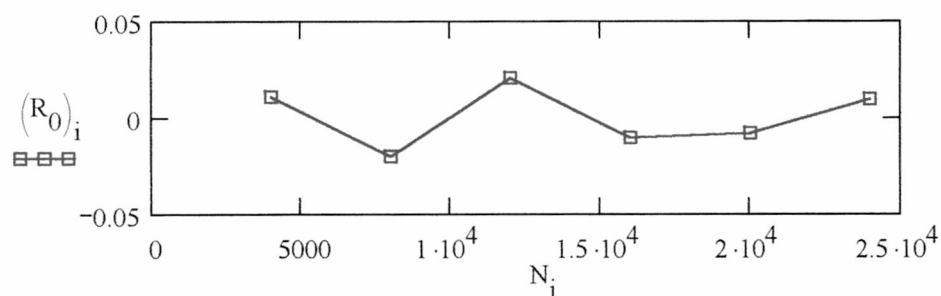
$$df := \text{slope}(N, s_f) \quad df = -2.003 \cdot 10^{-6}$$

$$\text{SRED}_F(N) := af + bf \cdot N \quad \text{ODCH}_F(N) := cf + df \cdot N$$

$$\text{SF}_P(N_0, N) := af + bf \cdot N_0 \quad \text{OF}_P(N_0, N) := cf + df \cdot N_0$$

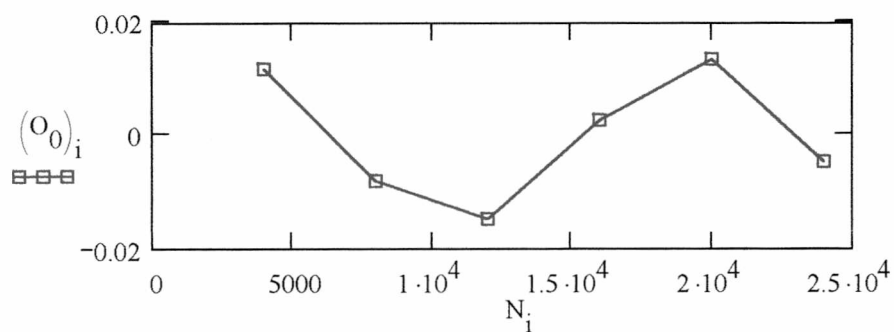
$$R := \text{RESZTY}(N, m_f) \quad i := 0.. \text{last}(N)$$

$$se_{e_s} := R_1 \quad se_{e_s} = 0.017$$



$$O := \text{RESZTY}(N, s_f)$$

$$se_{e_o} := O_1 \quad se_{e_o} = 0.013$$



$$Sf_{\text{slope}} := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{\text{rows}(N)} \left[m_{f_{i-1}} - (af + bf \cdot N_{i-1}) \right]^2}{(\text{rows}(N) - 2) \cdot \text{rows}(N) \cdot \text{var}(N)}}$$

$$Sf_{\text{slope}} = 1.041 \cdot 10^{-6}$$

$$Sf_{\text{intercept}} := \frac{1}{\text{rows}(N)} \cdot \sqrt{\frac{\left[\sum_{i=1}^{\text{rows}(N)} \left[m_{f_{i-1}} - (af + bf \cdot N_{i-1}) \right]^2 \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^{\text{rows}(N)} (N_{i-1})^2 \right]}{\text{var}(N)}}$$

$$Sf_{\text{intercept}} = 0.032$$

$$y_g(W, n) := (af + n \cdot Sf_{\text{intercept}}) + (bf + n \cdot Sf_{\text{slope}}) \cdot W$$

$$y_d(W, n) := (af - n \cdot Sf_{\text{intercept}}) + (bf - n \cdot Sf_{\text{slope}}) \cdot W$$

$$\text{predf_s_u}(N0, \alpha_t) := SF_P(N0, N) \dots$$

$$+ t(\text{rows}(N) - 2, \alpha_t) \cdot se_e_s \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\text{rows}(N)} + \frac{(N0 - \text{mean}(N))^2}{\sum_i (N_i - \text{mean}(N))^2}}$$

$$\text{predf_s_l}(N0, \alpha_t) := SF_P(N0, N) \dots$$

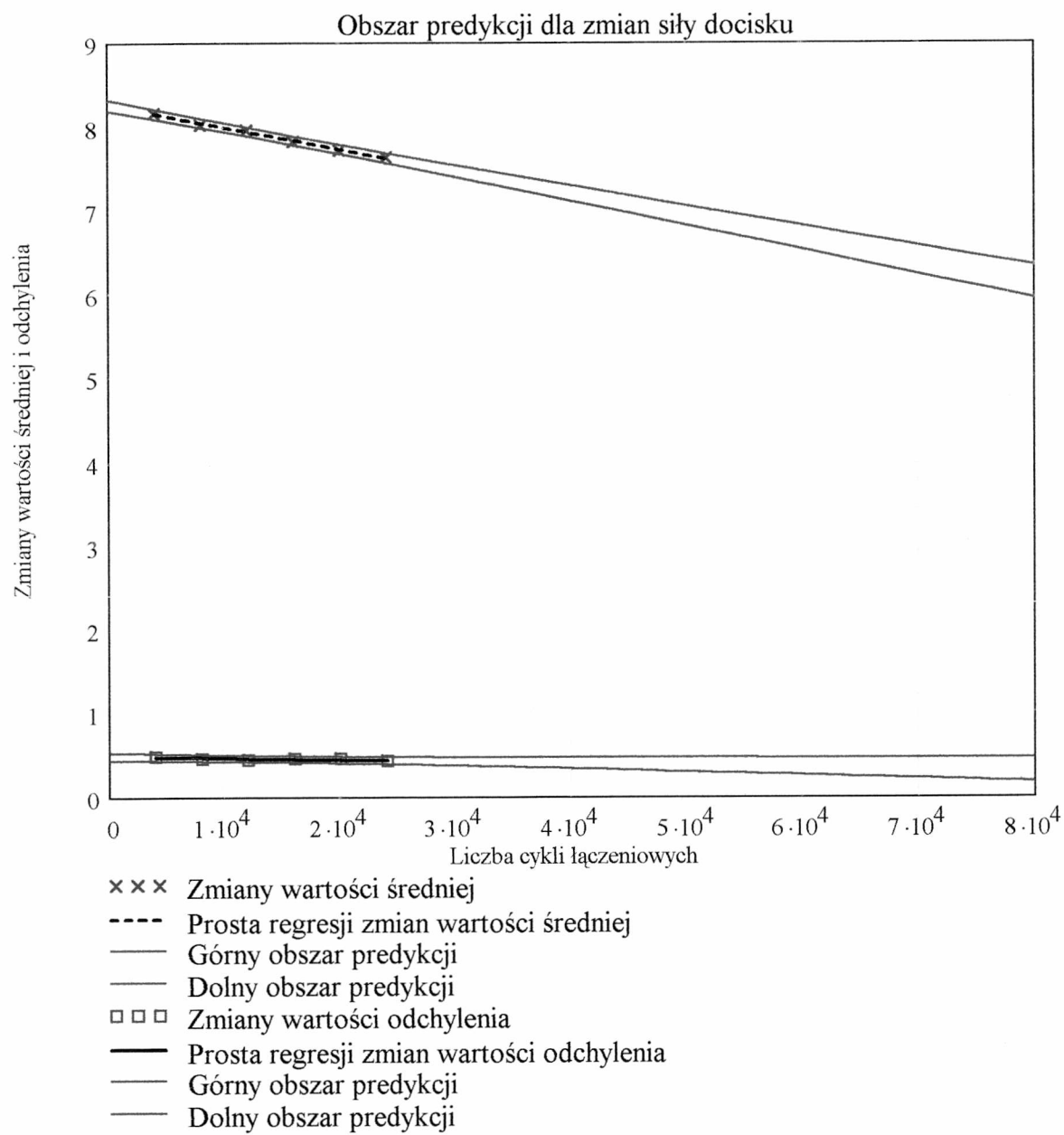
$$+ - \left[t(\text{rows}(N) - 2, \alpha_t) \cdot se_e_s \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\text{rows}(N)} + \frac{(N0 - \text{mean}(N))^2}{\sum_i (N_i - \text{mean}(N))^2}} \right]$$

$$\text{predf_o_u}(N0, \alpha_t) := OF_P(N0, N) \dots$$

$$+ t(\text{rows}(N) - 2, \alpha_t) \cdot se_e_o \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\text{rows}(N)} + \frac{(N0 - \text{mean}(N))^2}{\sum_i (N_i - \text{mean}(N))^2}}$$

$$\text{predf_o_l}(N0, \alpha_t) := OF_P(N0, N) \dots$$

$$+ - \left[t(\text{rows}(N) - 2, \alpha_t) \cdot se_e_o \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\text{rows}(N)} + \frac{(N0 - \text{mean}(N))^2}{\sum_i (N_i - \text{mean}(N))^2}} \right]$$



$P(z, l_s) :=$ for $k \in 0..z-1$

$N0_k \leftarrow k \cdot \text{krok_sym}$

$Pf_u_s_k \leftarrow af + bf \cdot N0_k \dots$

$$+ t(\text{rows}(N) - 2, \alpha_t) \cdot se_e_s \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\text{rows}(N)} + \frac{(N0_k - \text{mean}(N))^2}{K}}$$

$Pf_l_s_k \leftarrow af + bf \cdot N0_k \dots$

$$+ -t(\text{rows}(N) - 2, \alpha_t) \cdot se_e_s \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\text{rows}(N)} + \frac{(N0_k - \text{mean}(N))^2}{K}}$$

$$Pfs_k \leftarrow Pf_u_s_k - \frac{(Pf_u_s_k - Pf_l_s_k)}{2}$$

$$Pfo_k \leftarrow \frac{Pf_u_s_k - Pf_l_s_k}{6}$$

$Prostaf_s_k \leftarrow \text{rnorm}(1, Pfs_k, Pfo_k)_0$

$Pf_u_o_k \leftarrow cf + df \cdot N0_k \dots$

$$+ t(\text{rows}(N) - 2, \alpha_t) \cdot se_e_o \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\text{rows}(N)} + \frac{(N0_k - \text{mean}(N))^2}{K}}$$

$Pf_l_o_k \leftarrow cf + df \cdot N0_k \dots$

$$+ -t(\text{rows}(N) - 2, \alpha_t) \cdot se_e_o \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\text{rows}(N)} + \frac{(N0_k - \text{mean}(N))^2}{K}}$$

$$Pf_l_o_k \leftarrow \begin{cases} Pf_l_o_k & \text{if } Pf_l_o_k \geq 0 \\ 0.001 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Prostaf_op_k \leftarrow \text{rnorm}\left(1, Pf_u_o_k - \frac{Pf_u_o_k - Pf_l_o_k}{2}, \frac{Pf_u_o_k - Pf_l_o_k}{6}\right)_0$$

$$Prostaf_o_k \leftarrow \begin{cases} Prostaf_op_k & \text{if } Prostaf_op_k \geq 0 \\ 0.001 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$L_cykli_k \leftarrow k \cdot \text{krok_sym}$

$s \leftarrow \text{rnorm}(l_s, Prostaf_s_k, Prostaf_o_k)$

```

out ←  $\left[ \sum_{i=0}^{l_s - 1} s_i \leq F_{min} \right]$ 

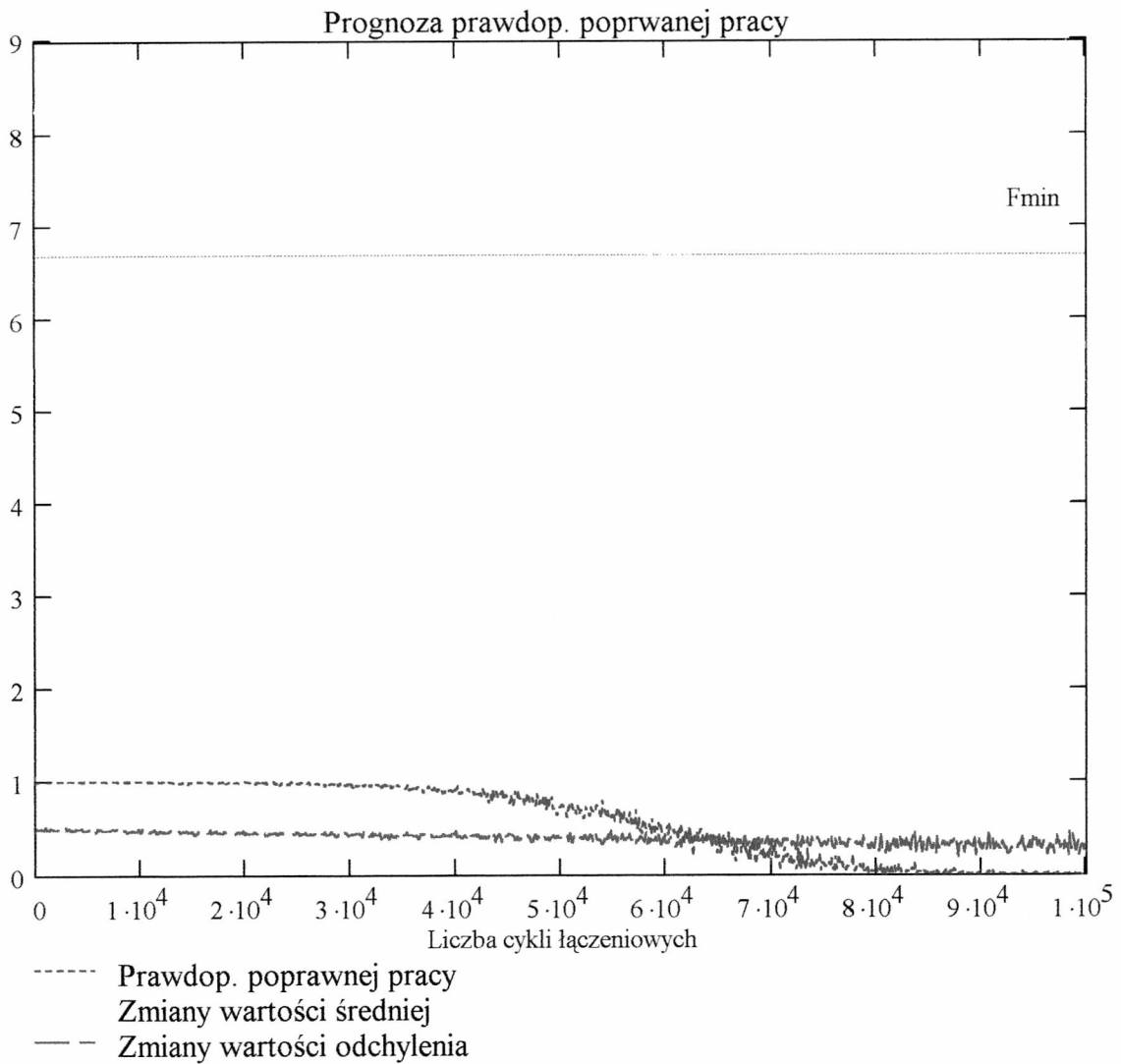
zakres1 ←  $\left[ \sum_{i=0}^{l_s - 1} \text{Prostaf\_s}_k + 3 \dots \leq s_i \leq \text{Prostaf\_s}_k - 3 \dots \right.$ 
 $\left. + \text{Prostaf\_o}_k \qquad \qquad \qquad + \text{Prostaf\_o}_k \right]$ 

 $P_k \leftarrow \frac{l_s - \text{out}}{l_s}$ 

S ← augment(Prostaf_s, Prostaf_o)
S ← augment(S, P)
S ← augment(S, L_cykli)

```

$F := P(\text{zakres}, l_{\text{symulacji}})$



$$l_0 := m \cdot l_0 \quad l_0 = 2.521$$

$$F_0 := m \cdot f_0 \quad F_0 = 8.166$$

$$F_{MIN} := F_0 - c_s (l_0 - l_{min}) \quad F_{MIN} = 6.723$$

$$i_{max} := 220 \cdot \sqrt{2}$$

$$i := 0..zakres - 1 \quad N_i := i \cdot krok_sym$$

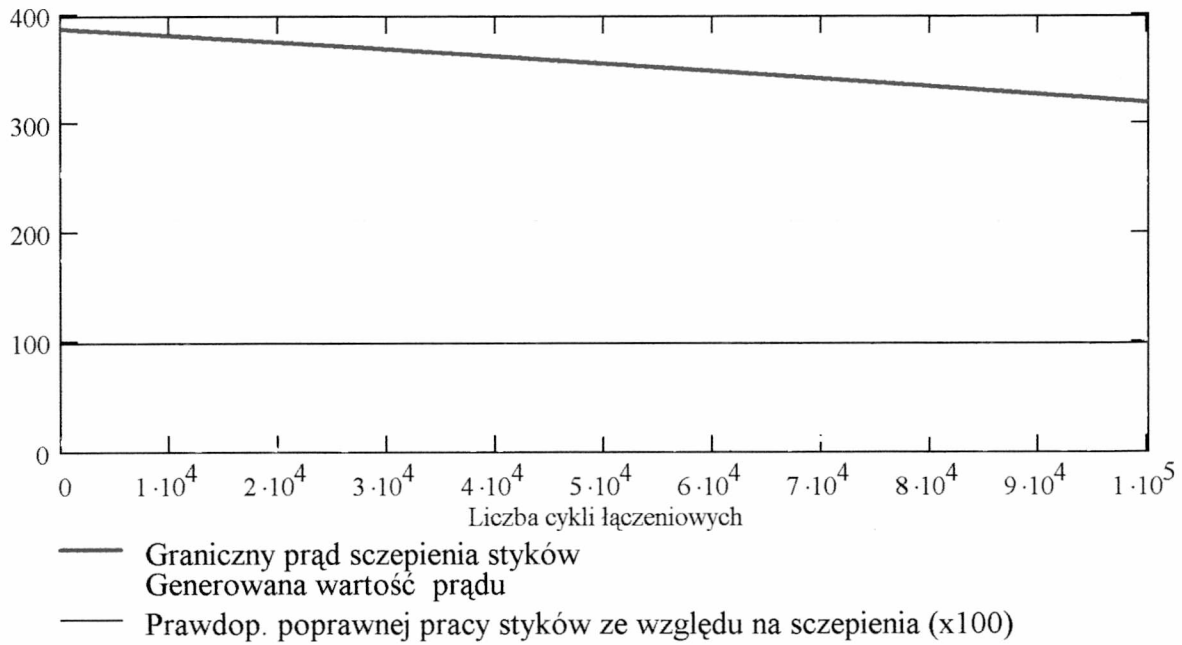
$$SRED_F_i := af + bf \cdot N_i \quad SRED_L_i := al + bl \cdot N_i$$

```

Psczep(Imax) :=
  for i ∈ 0..zakres - 1
    fi ← SRED_Fi
    isgi ← cm · √fi
    sumi ← 0
    for z ∈ 0..lsymulacji - 1
      iuz ← rnd(Imax)
      dz ←
        1 if isgi ≥ iuz
        0 if isgi < iuz
      sumi ← sumi + dz
    iui ← iu0
    pi ←  $\frac{sum_i}{l_{symulacji}}$ 
  P1 ← f
  P3 ← augment(P1, isg)
  P4 ← augment(P3, iu)
  P ← augment(P4, p)

```

$Q := \text{Psczep}(\text{imax})$



$i := 0.. \text{cols}(T) - 1 \quad j := 0.. \text{rows}(T) - 1$

$N :=$

D:\1.liczba_cykli_laczeniowych.xls

$m_{t_j} := \text{mean} \left[\left(T^T \right)^{<j>} \right]$

$s_{t_j} := \text{stdev} \left[\left(T^T \right)^{<j>} \right]$

$at := \text{intercept}(N, m_t) \quad at = 0.236$

$bt := \text{slope}(N, m_t) \quad bt = 6.648 \cdot 10^{-6}$

$ct := \text{intercept}(N, s_t) \quad ct = 0.089$

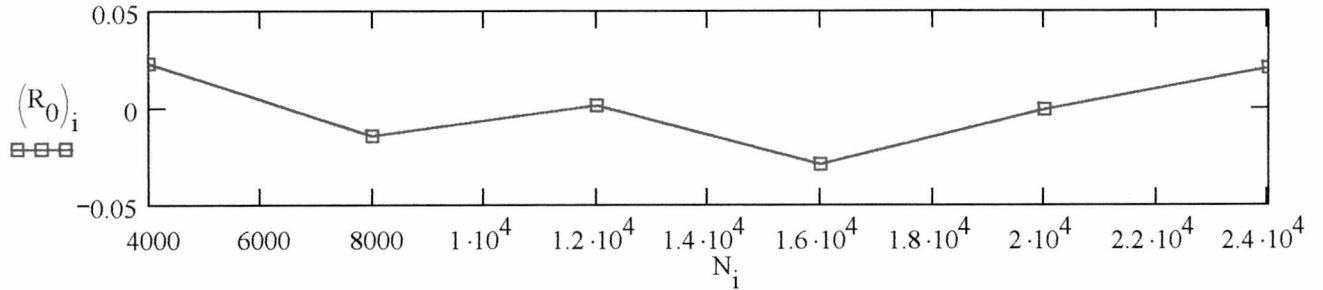
$dt := \text{slope}(N, s_t) \quad dt = 4.394 \cdot 10^{-6}$

$SRED_T(N) := at + bt \cdot N \quad ODCH_T(N) := ct + dt \cdot N$

$ST_T(N0) := at + bt \cdot N0 \quad OT_T(N0) := ct + dt \cdot N0$

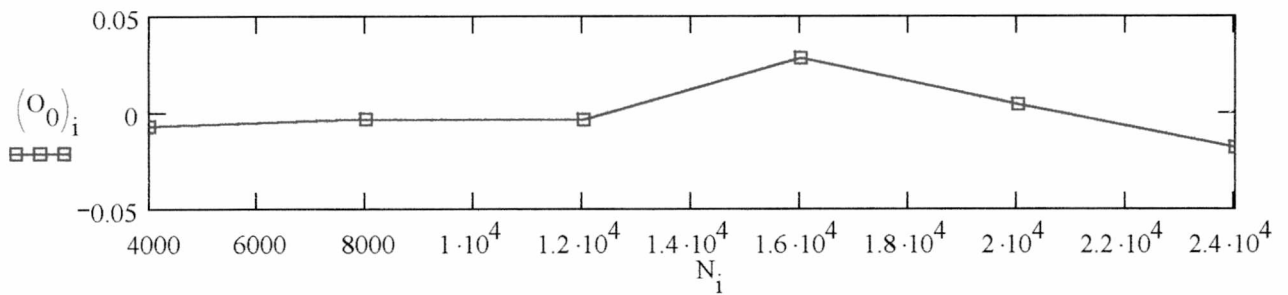
$R := \text{RESZTY}(N, m_t) \quad i := 0.. \text{last}(N)$

$se_e_s := R_1 \quad se_e_s = 0.022$



$O := \text{RESZTY}(N, s_t)$

$se_e_o := O_1 \quad se_e_o = 0.017$



$$St_{\text{slope}} := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{\text{rows}(N)} [m_{t_{i-1}} - (at + bt \cdot N_{i-1})]^2}{(\text{rows}(N) - 2) \cdot \text{rows}(N) \cdot \text{var}(N)}}} \quad St_{\text{slope}} = 1.337 \cdot 10^{-6}$$

$$St_{\text{intercept}} := \frac{1}{\text{rows}(N)} \cdot \sqrt{\frac{\left[\sum_{i=1}^{\text{rows}(N)} [m_{t_{i-1}} - (at + bt \cdot N_{i-1})]^2 \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^{\text{rows}(N)} (N_{i-1})^2 \right]}{\text{var}(N)}}} \quad St_{\text{intercept}} = 0.042$$

$$y_g(W, n) := (at + n \cdot St_{\text{intercept}}) + (bt + n \cdot St_{\text{slope}}) \cdot W$$

$$y_d(W, n) := (at - n \cdot St_{\text{intercept}}) + (bt - n \cdot St_{\text{slope}}) \cdot W$$

$$\text{predt_s_u}(N0, \alpha_t) := \text{ST_T}(N0) \dots$$

$$+ t(\text{rows}(N) - 2, \alpha_t) \cdot \text{se_e_s} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\text{rows}(N)} + \frac{(N0 - \text{mean}(N))^2}{\sum_i (N_i - \text{mean}(N))^2}}$$

$$\text{predt_s_l}(N0, \alpha_t) := \text{ST_T}(N0) \dots$$

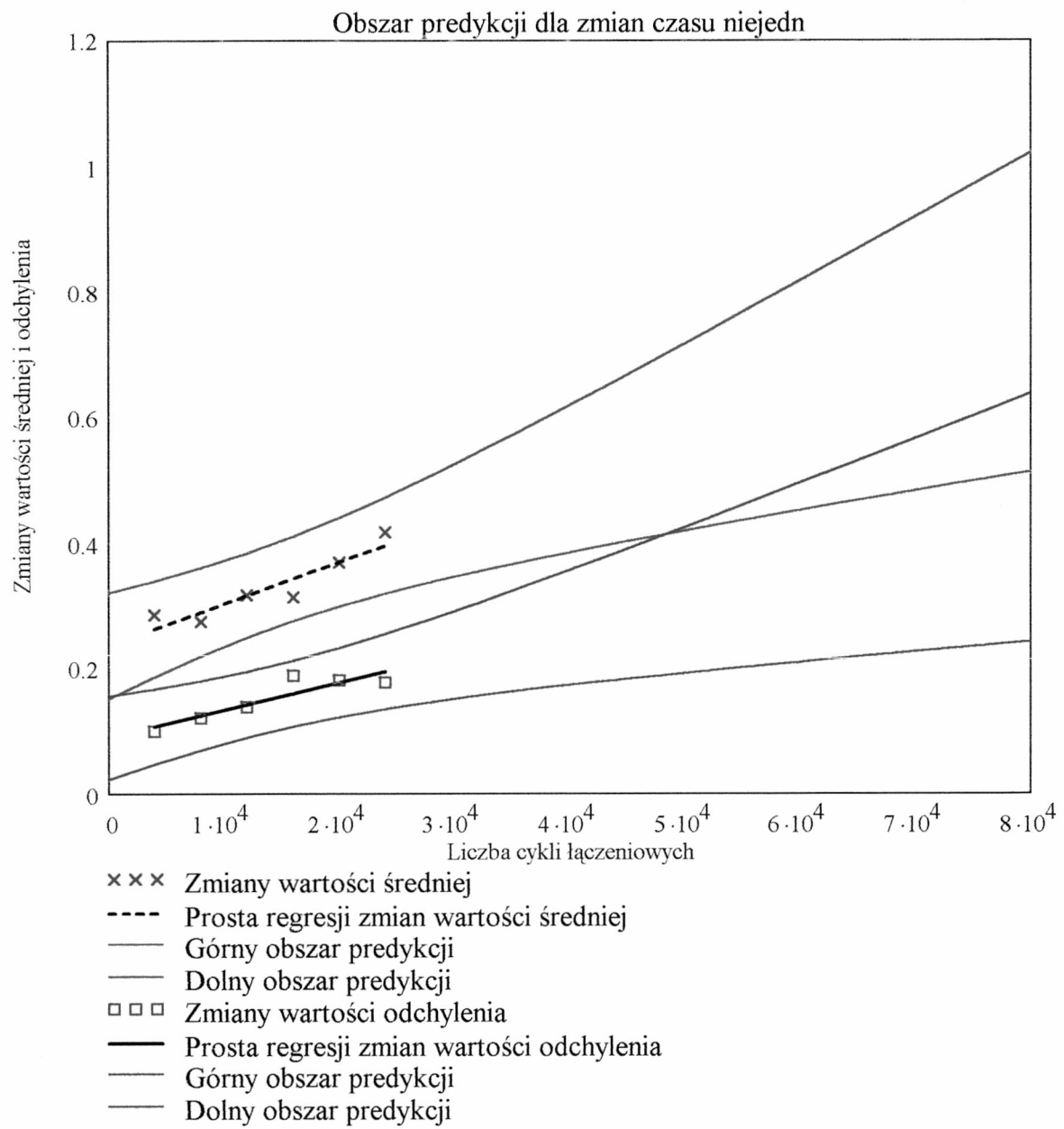
$$+ - \left[t(\text{rows}(N) - 2, \alpha_t) \cdot \text{se_e_s} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\text{rows}(N)} + \frac{(N0 - \text{mean}(N))^2}{\sum_i (N_i - \text{mean}(N))^2}} \right]$$

$$\text{predt_o_u}(N0, \alpha_t) := \text{OT_T}(N0) \dots$$

$$+ t(\text{rows}(N) - 2, \alpha_t) \cdot \text{se_e_o} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\text{rows}(N)} + \frac{(N0 - \text{mean}(N))^2}{\sum_i (N_i - \text{mean}(N))^2}}$$

$$\text{predt_o_l}(N0, \alpha_t) := \text{OT_T}(N0) \dots$$

$$+ - \left[t(\text{rows}(N) - 2, \alpha_t) \cdot \text{se_e_o} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\text{rows}(N)} + \frac{(N0 - \text{mean}(N))^2}{\sum_i (N_i - \text{mean}(N))^2}} \right]$$



```

P(z,l_s) := for k ∈ 0.. z - 1
    N0_k ← k · krok_sym
    Pt_u_s_k ← at + bt · N0_k ...
        + t (rows(N) - 2, α_t) · se_e_s · √(1 + 1/rows(N) + (N0_k - mean(N))^2 / K)
    Pt_l_s_k ← at + bt · N0_k ...
        + -t (rows(N) - 2, α_t) · se_e_s · √(1 + 1/rows(N) + (N0_k - mean(N))^2 / K)
    Pts_k ← Pt_u_s_k - (Pt_u_s_k - Pt_l_s_k) / 2
    Pto_k ← (Pt_u_s_k - Pt_l_s_k) / 6
    Prostat_s_k ← rnorm(1, Pts_k, Pto_k)_0
    Pt_u_o_k ← ct + dt · N0_k ...
        + t (rows(N) - 2, α_t) · se_e_o · √(1 + 1/rows(N) + (N0_k - mean(N))^2 / K)
    Pt_l_o_k ← ct + dt · N0_k ...
        + -t (rows(N) - 2, α_t) · se_e_o · √(1 + 1/rows(N) + (N0_k - mean(N))^2 / K)
    Pt_l_o_k ← | Pt_l_o_k if Pt_l_o_k ≥ 0
                | 0.001 otherwise
    Prostat_op_k ← rnorm(1, Pt_u_o_k - (Pt_u_o_k - Pt_l_o_k) / 2, (Pt_u_o_k - Pt_l_o_k) / 6)_0
    Prostat_o_k ← | Prostat_op_k if Prostat_op_k ≥ 0
                  | 0.001 otherwise
    L_cykli_k ← k · krok_sym

```

```

s ← rnorm(l_s, Prostat_s_k, Prostat_o_k)

out ←  $\left[ \sum_{i=0}^{l_s-1} s_i \geq t_{\max} \right]$ 

zakres1 ←  $\left[ \sum_{i=0}^{l_s-1} \text{Prostat\_s}_k + 3 \dots \leq s_i \leq \text{Prostat\_s}_k - 3 \dots \right]$ 
            $\quad \quad \quad + \text{Prostat\_o}_k \quad \quad \quad + \text{Prostat\_o}_k$ 

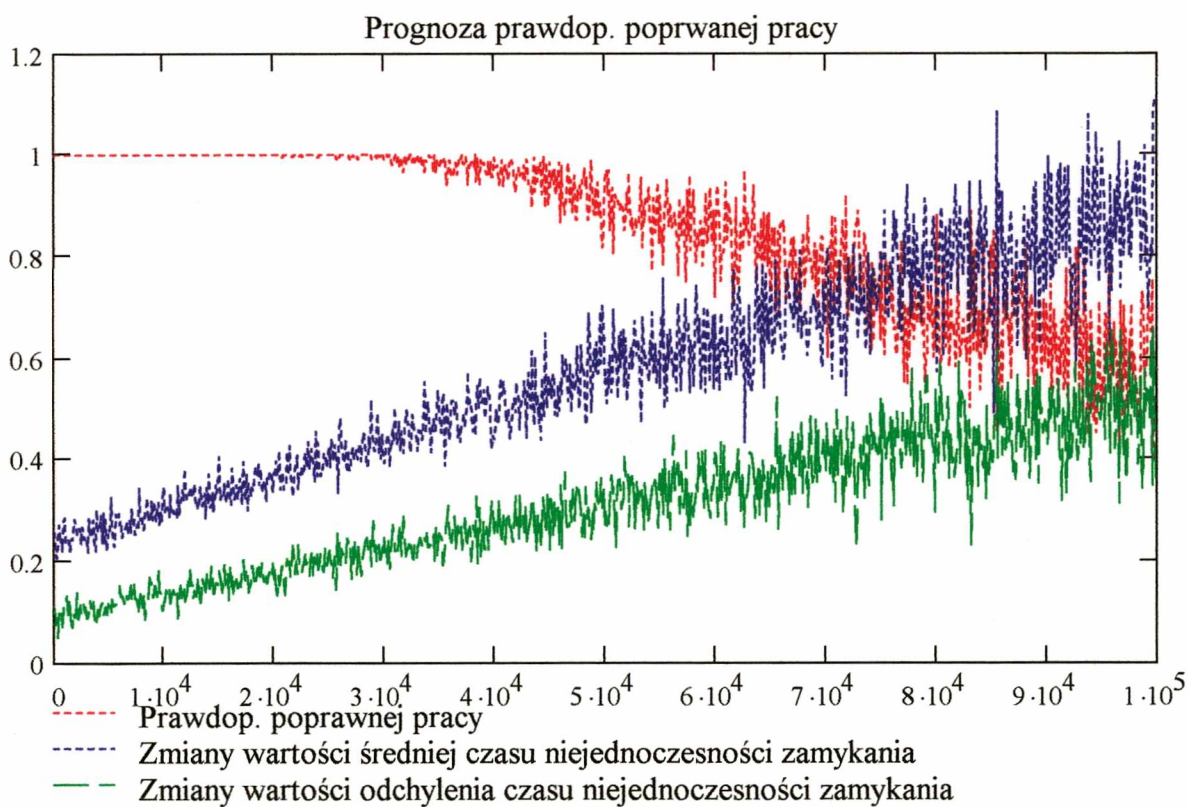
P_k ←  $\frac{l_s - \text{out}}{l_s}$ 

break if (Prostat_s_k ≥ t_max · 12)

S ← augment(Prostat_s, Prostat_o)
S ← augment(S, P)
S ← augment(S, L_cykli)
S

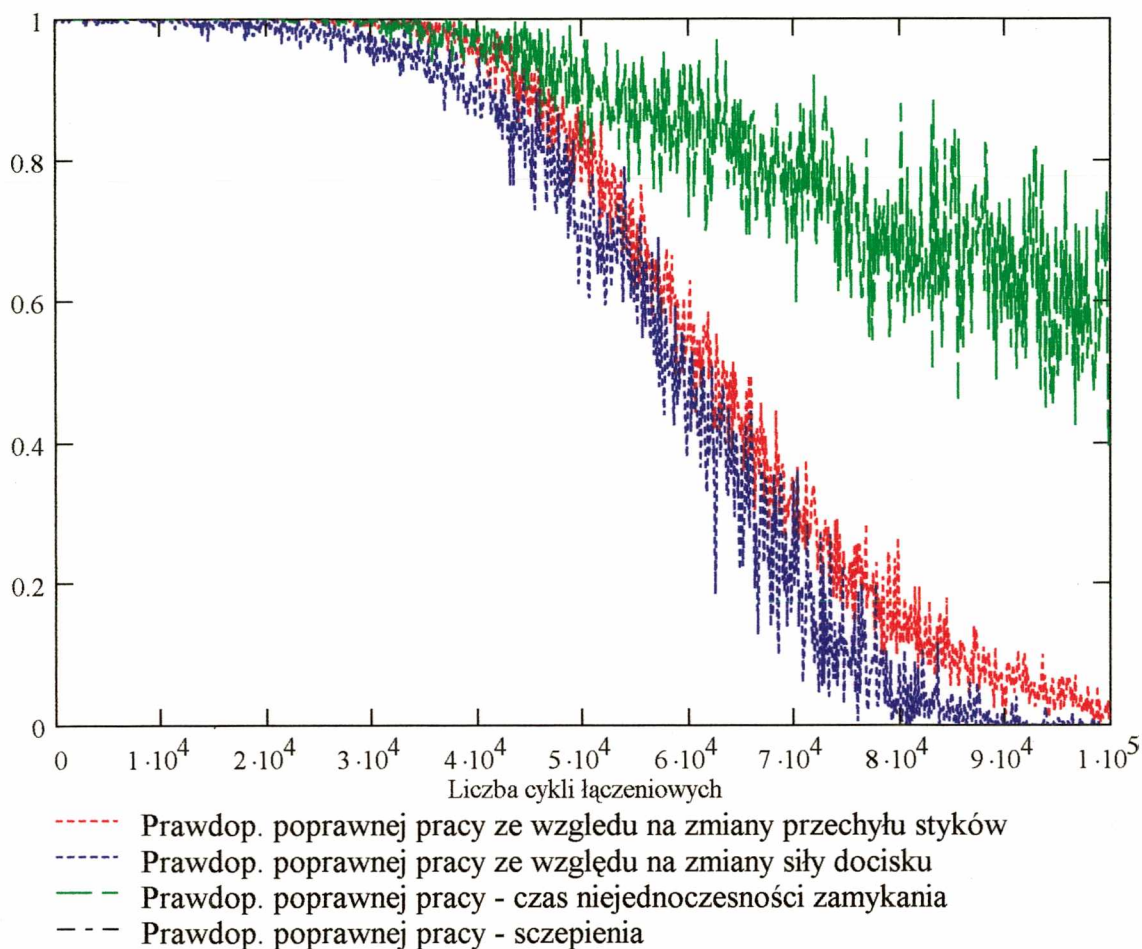
```

$T := P(\text{zakres}, l_{\text{symulacji}})$



ŁĄCZNA TABELA WYNIKÓW

W1 := augment($L^{<2>}$, $F^{<2>}$) W2 := augment(W1, $T^{<2>}$) WYNIKI := augment(W2, $Q^{<3>}$)



Macierz odwrotna wyników obliczeń

OD := WYNIKI^T

Wyznaczanie minimum macierzy dla każdego punktu symulacji parametrów prognozujących

r := rows(OD)

r = 4

c := cols(OD)

c = 1 · 10³

MIN := $\left| \begin{array}{l} \text{for } j \in 0..c-1 \\ \quad \text{for } i \in 0..r-1 \\ \quad \quad W_j \leftarrow \min(OD^{<j>}) \\ \quad \quad j := 0.. \text{last}(\text{MIN}) \\ W \end{array} \right|$

RZAD_j := j

DATA := augment(RZAD, MIN)

Sortowanie danych

DATA := csort(DATA, 0)

X := DATA^{<0>} Y := DATA^{<1>}

Liczba danych: n := rows(DATA) n = 1·10³

Łączne prawdopodobieństwo poprawnej pracy układu zestykowego (uzyskane wyniki symulacji aproksymowane metodą najmniejszych kwadratów)

SMU := supsmooth(X, Y)

Prawdopodobieństwo poprawnej pracy układu zestykowego tylko ze względu na zmiany TYLKO przechyłu styków

SMUL := supsmooth(X, WYNIKI^{<0>})

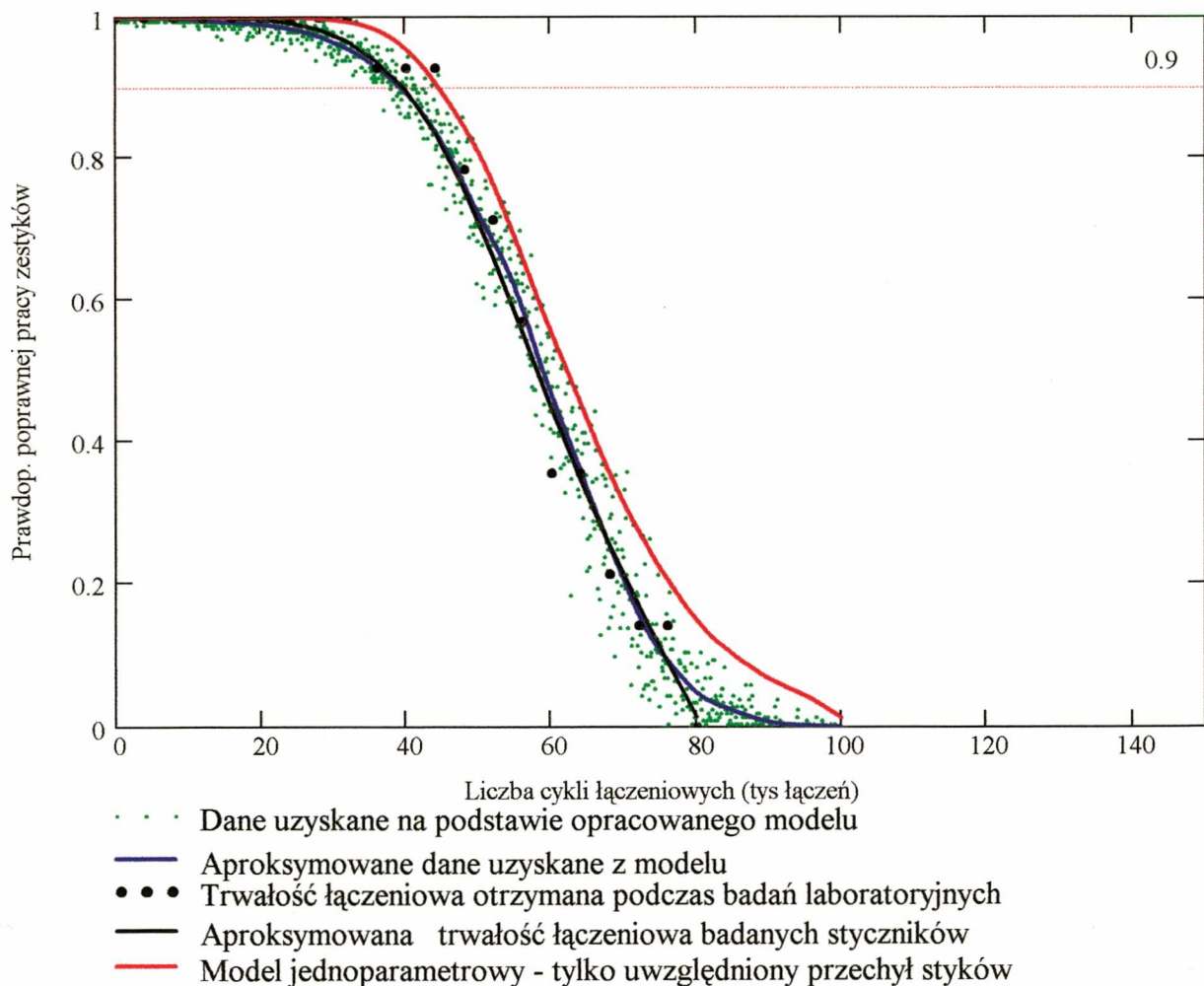
Wczytanie wyników badań trwałościowych dla 14 sztuk badanych styczników LS 47

TR :=

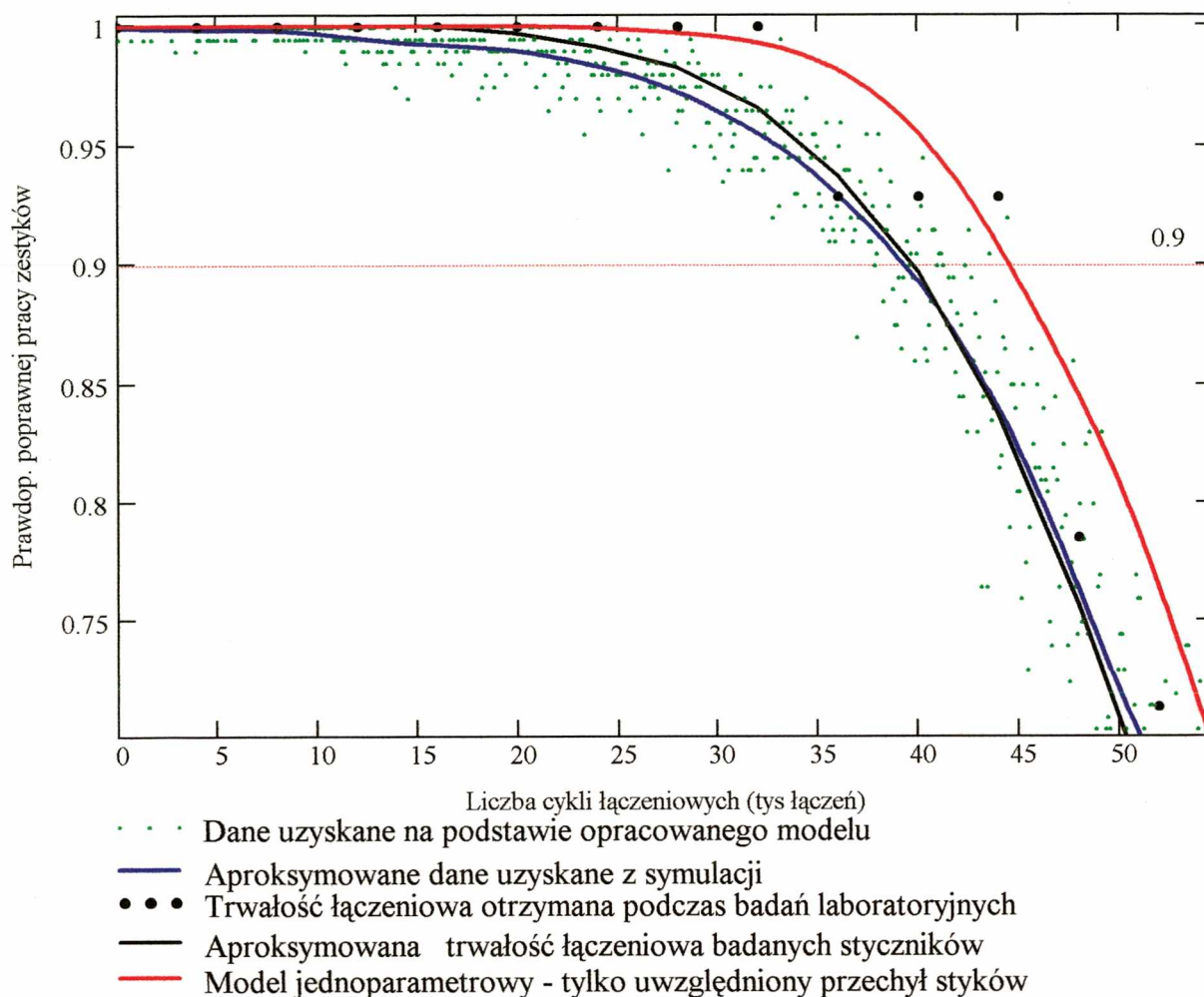
DA.wyniki_badan_trwalosciowych.xls

XT := $\left(\frac{TR}{100}\right)^{<0>}$

YT := (TR)^{<1>} SMUTR := supsmooth(XT, YT)



Powiększenie wybranego obszaru



Wyznaczona trwałość gamma-beta badanych zestyków styczników $\gamma := 0.9$

```

Look(SMU,  $\gamma$ ) :=
  i ← 0
  L ← 0
  for m ∈ 0..rows(SMU) - 1
    for n ∈ 0..cols(SMU) - 1
      i ← i + 1
      break if  $SMU_{m,n} \leq \gamma$ 
      L ← i
  L
  LICZBA := Look(SMU,  $\gamma$ )
  LICZBA = 393

```

Prognoszowana trwałość zestyków styczników obliczona na podstawie opracowanego modelu (dla $\beta=0.9$)

$$TR_{\gamma\beta} := LICZBA \cdot krok_sym \quad TR_{\gamma\beta} = 3.93 \cdot 10^4 \quad - \text{cykli łączeniowych}$$