STATYSTYKA W BADANIU NIEZAWODNOŚCI

dr hab. inż. Adam Walanus, StatSoft Polska Sp. z o.o.

Słowo niezawodność oznacza, że eksploatowane urządzenie (obiekt techniczny) nie zawiedzie nas, że będzie działało poprawnie tak długo jak tego od niego oczekujemy. Oczywiście nie istnieją urządzenia pracujące w nieskończoność, choć coraz częściej wyłącza się z eksploatacji obiekty zużyte „moralnie", czyli sprawne ale takie, które zostaną zastąpione przez nowsze, lepsze. To jest jednak inne zagadnienie, takie „zużycie" zależy od czynników zewnętrznych względem eksploatowanego urządzenia, nie od jego aktualnego stanu.

Ogólny postęp technologiczny, a także rosnąca kultura techniczna użytkowników sprawiają, że wymagania co do niezawodności urządzeń szybko rosną. W niektórych przypadkach, bynajmniej nie najprostszych urządzeń fakt zepsucia się jest zupełną dyskwalifikacją marki. Z punktu widzenia producenta coraz trudniej więc jest badać niezawodność. W takiej sytuacji nie ma żadnych wątpliwości, że konieczne jest zastosowanie metod statystycznych.

Podstawową miarą niezawodności jest czas poprawnej pracy, czyli czas jaki upływa od rozpoczęcia użytkowania nowego urządzenia do momentu pierwszej awarii. Statystyka matematyczna ma wiele do powiedzenia na temat tego czasu. Otóż obserwując czasy bezawaryjnej pracy możemy zostać zaskoczeni pewnymi dziwnymi, niezgodnymi z intuicją właściwościami rejestrowanych danych. Dlatego warto zapoznać się z poprawnym, statystycznym opisem zagadnienia niezawodności.

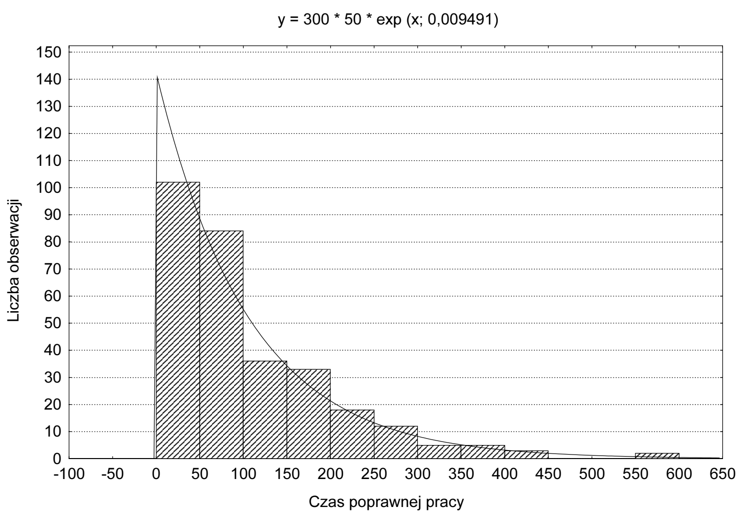
Przyjmijmy pewien model eksploatowanego obiektu, który to obiekt może się popsuć. Najprostszy byłby taki model, w którym urządzenie psułoby się po określonym czasie pracy, na przykład po roku. W pewnym sensie dzieje się tak z licencjonowanymi programami komputerowymi, które po ściśle określonym (w umowie licencyjnej) czasie odmówią pracy. Nie jest to jednak ciekawy temat dla statystyka. Metody statystyczne potrzebne są tam gdzie narażeni jesteśmy na nieznane wpływy niekontrolowanych czynników. Tam gdzie występują zjawiska losowe. Statystyka potrzebna jest więc wszędzie bo zawsze istnieje jakieś niekontrolowane otoczenie, operatorzy o różnej sprawności albo nieprzewidziane przez producenta nietypowe sposoby eksploatacji urządzenia.

Dobrym wstępnym modelem, dość bliskim rzeczywistości jest założenie, że urządzenie w każdej chwili narażone jest na awarię, która jednak jest mało prawdopodobna, ale możliwa. Aby przybliżyć ważną ideę niezależności losowej awarii od czasu weźmy bardzo prosty przykład. Wyobraźmy sobie szklankę herbaty na balkonie w czasie niezbyt intensywnego deszczu. W którymś momencie wpadnie do szklanki kropla deszczu (będzie to awaria - powiedzmy, że osoba pijąca tą herbatę jest bardzo czuła na punkcie czystości). Moment trafienia pierwszej kropli do szklanki jest niezależny od tego czy szklanka już długo stoi na balkonie ale jeszcze nie została trafiona, czy też została właśnie przyniesiona.

Zachodzi tu pewien paradoks. Otóż żeby wyznaczyć czas trzeba określić początek i koniec. Z końcem nie ma problemu, jest to moment awarii albo wpadnięcia kropli deszczu do szklanki. Początkowym momentem dla eksploatowanej maszyny jest jej pierwsze uruchomienie po rozpakowaniu. Szklanka też w jakimś momencie pojawiła się na balkonie. Ale tu pojawia się paradoks, coś niezgodnego z intuicją. Chodzi o to, że prawdopodobieństwo trafienia kropli w szklankę nie zależy od tego jak długo szklanka wystawiona jest na deszcz. Prawdopodobieństwo to (właściwie gęstość prawdopodobieństwa) jest stałe. Podobnie jest przy rzucaniu monetą, jeżeli otrzymaliśmy przypadkiem pięć orłów pod rząd, to w dalszym ciągu prawdopodobieństwa otrzymania w następnym rzucie orła albo reszki są takie same. W najmniejszym stopniu reszka nie staje się bardziej prawdopodobna.

Kwestia niezawodności maszyny jest bardziej skomplikowana niż rzuty monetą, albo picie herbaty na balkonie, jednak przyjmujemy na razie uproszczony model stałości prawdopodobieństwa awarii. Powiedzmy, że eksploatowanej maszynie codziennie może zdarzyć się awaria wyłączająca ją z ruchu i załóżmy, że prawdopodobieństwo awarii wynosi 0,01. Wartość prawdopodobieństwa; 1/100 sugeruje, że średni czas do awarii będzie wynosił około 100 dni. Tak jest w istocie. Natomiast prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy przez co najmniej 100 dni wynosi $(1\text{-}0,1)^{100}$=0,37 i oznacza, że mniej więcej dwie trzecie maszyn przestanie działać przed upływem stu dni.

Spróbujmy zobaczyć jakie mogłyby być różne poszczególne czasy bezawaryjnej pracy, czy będą one bliskie 100 dni? Modelowe wartości czasów wygenerować można w *STATISTICA* (można też siedzieć ze stoperem na balkonie). Nie wchodząc zbyt głęboko w szczegóły realizacji takiego modelu, warto zauważyć, że wszystko co jest potrzebne to wykonanie następującego przeliczenia zmiennej: =rnd(1)<0.01, w rezultacie którego otrzyma się w zmiennej serię zer i czasami jedynkę. Pierwsza od góry jedynka oznacza awarię, a numer przypadku, przy którym się pojawiła to czas do awarii. Powtarzając klika razy przeliczenie otrzymamy takie na przykład czasy awarii: 54, 220, 12, 38. Liczby te są raczej zaskakujące, żadna nie jest bliska 100 a ich rozrzut jest ogromny. Średnia będzie jednak wynosiła sto. Po otrzymaniu większej liczby czasów niezawodnej pracy (np. 300.) wykreślić można histogram tych czasów, który będzie wyglądał mniej więcej tak:



Histogram ten nie wykazuje żadnego maksimum w okolicy 100. Najwięcej awarii zdarzyło się na początku, przed upływem 50. dnia. Za to dwie maszyny pracowały prawie 600 dni. Tak to w rzeczywistości wygląda, jeżeli prawdopodobieństwo awarii nie zależy od tego ile czasu maszyna już przepracowała. Kształtu powyższego histogramu nie należy wyjaśniać faktem naturalnej wzmożonej częstości uszkodzeń w początkowej fazie eksploatacji urządzenia. W przyjętym modelu prawdopodobieństwo awarii jest stałe, takie samo w pierwszym dniu pracy jak i w trzydziestym i w dwusetnym, o ile do takiego czasu maszyna dożyła. Podobnie, nie jest tu uwzględnione starzenie się urządzenia.

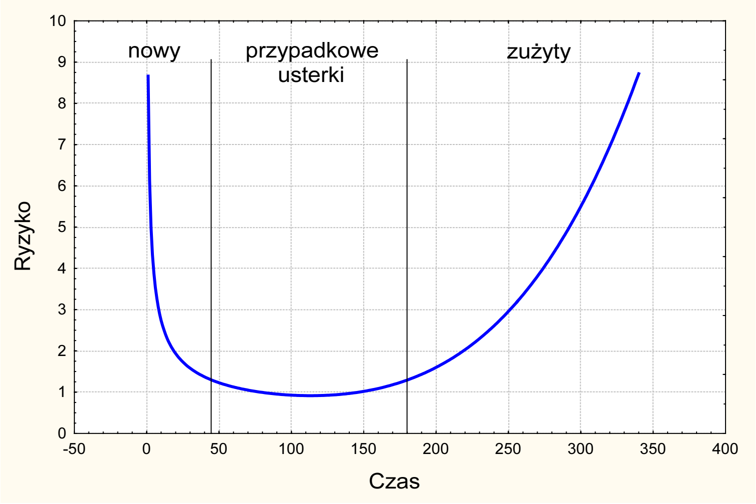
W sytuacji posiadania kilku urządzeń zapasowych, które uruchamiamy w momencie awarii poprzedniego, sytuacja staje się inna. Jeżeli mierzyć czasy do zepsucia się ostatniego zapasowego urządzenia to otrzymany histogram miałby wyraźne maksimum dla odpowiedniego czasu sumarycznego. Średni sumaryczny czas pracy byłby równy wtedy oczywiście średniemu czasowi pracy pojedynczego urządzenia pomnożonemu przez liczbę wszystkich wymienianych sztuk urządzeń. Jeżeli wymienianych sukcesywnie urządzeń byłoby kilkanaście to sumaryczny czas pracy miałby rozkład normalny, który w zagadnieniach niezawodności pojawia się jedynie w tak mało realistycznej sytuacji, podczas gdy w zapewnieniu jakości ma niemal wyłączność. Rolę rozkładu normalnego w zagadnieniach niezawodności pełni rozkład wykładniczy i jego rozszerzenie; rozkład Weibulla.

Krzywa ciągła na powyższym wykresie to dopasowany do histogramu właśnie rozkład wykładniczy. Rozkład ten ma jeden parametr, wynosi on tu 0,009491 i jest w dobrej zgodności z wartością 0,01 użytą do otrzymania modelowych czasów niezawodnej pracy.

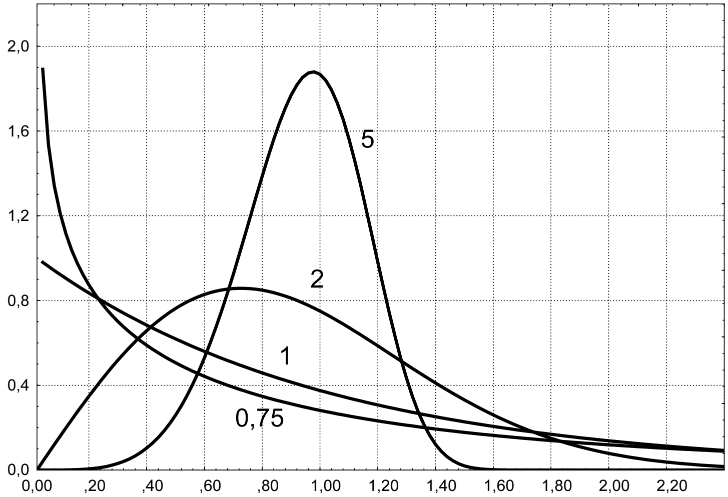
Rozkład wykładniczy jest podstawą planów badania zalecanych w normie *Niezawodność w technice* PN-77/N-04021. W rzeczywistych badaniach, w przeciwieństwie do modelowanych danych rzadko można sobie pozwolić na czekanie aż popsują się wszystkie przeznaczone do badania obiekty. Jeżeli testujemy trwałość produktu, który powinien pracować średnio co najmniej rok, to nie będziemy czekać 5 - 10 lat aż wszystkie badane sztuki się popsują. Czas badania może być nawet znacznie krótszy od średniego czasu życia maszyny. Norma dopuszcza nawet czas badania równy jednej setnej czasu poprawnej pracy. Karą za pośpiech jest wtedy konieczność użycia do badania dużej liczby sztuk obiektów. Maksymalny czas badania wynosi 1/3 czasu poprawnej pracy, w żadnym wypadku nie trzeba więc czekać aż wszystkie sztuki się popsują. Można tak postępować ponieważ założono, że znany jest rozkład czasów życia i że jest to rozkład wykładniczy. Z tych założeń wynika też prosta reguła zgrubnej oceny czasu życia produktu. Jeżeli po czasie t_B pewna liczba r obiektów z n wszystkich badanych uległa uszkodzeniu, to średni czas życia wynosi $t_B * n/r$, przy czym frakcja r nie może być zbyt duża, powinna wynosić co najwyżej $n/10$.

Model ze stałym prawdopodobieństwem awarii, albo inaczej ze stałym ryzykiem jest wyjściowym, podstawowym modelem uwzględniającym jedynie losowe awarie nie zależne od aktualnego stanu urządzenia.

Praktyka wykazuje, że ważne są dwa dodatkowe czynniki. Otóż prawdopodobieństwo awarii jest większe dla zupełnie nowego urządzenia oraz dla bardzo starego. W pierwszym przypadku ujawniają się błędy nie wykryte przy zbyt krótkim zapewne testowaniu urządzenia u producenta. Drugi czynnik to po prostu zużycie elementów urządzenia i ogólne starzenie się całości układu. Obydwa te czynniki są również losowe. Usterka powodująca, że maszyna popsuje się zaraz na początku ujawni się w losowym momencie, wcześniej lub później. Rządził tym będzie rozkład wykładniczy, tyle że o takiej wartości parametru, że średni czas życia będzie znacznie krótszy. Czas nowości zwykle dość szybko się kończy, za to wchodzenie w okres zużycia jest wolniejsze. Prawdopodobieństwo awarii starzejącego się układu powoli rośnie. W środku mamy najlepszy czas maksymalnie niezawodnej pracy, o najniższym prawdopodobieństwie pojawienia się awarii, najmniejszym ryzyku. Oby był jak najdłuższy.



Na powyższym rysunku przedstawiona jest tak zwana krzywa ryzyka, czyli prawdopodobieństwa awarii. Wykres ten otrzymany został na bazie rozkładu prawdopodobieństwa Weibulla, który jest uogólnieniem rozkładu wykładniczego pozwalającym uwzględnić omówione dwa dodatkowe efekty. Na rysunku poniżej podane są przykłady krzywych gęstości prawdopodobieństwa Weibulla dla różnych wartości parametru kształtu *c*. Rozkład ten, przy *c*<1 opisuje efekt rozruchowy urządzenia, dla *c*>1 efekt zużycia, który pojawia się po pewnym czasie a dla *c*=1 staje się rozkładem wykładniczym o stałej funkcji ryzyka opisującej dobrze okres środkowy, w którym urządzenie działa z maksymalną niezawodnością.



Zobaczmy jak rozkład Weibulla jest w stanie modelować dane zebrane przy testowaniu niezawodności obiektów technicznych. Jeśli jednak mowa o danych to konieczna jest uwaga na temat ich ucinania. Nie da się w praktyce czekać aż ostatnie z badanych urządzeń przestanie działać. Jak widać z wykresu rozkładu wykładniczego ciągnie się on długo w kierunku dużych czasów życia, z czego wynika, że całkiem prawdopodobne jest otrzymanie czasu do awarii wielokrotnie większego od średniego czasu pracy urządzenia. Mogłoby się więc zdarzyć, że aby zaobserwować awarię wszystkich badanych obiektów musielibyśmy bardzo długo czekać na jeden „złośliwy” przypadek, który nie chce się popsuć.

Rezygnacja z części danych nie jest niczym strasznym. Mniej danych to po prostu trochę mniej informacji, informacja trochę mniej dokładna. Możemy więc nie czekać na awarie wszystkich przeznaczonych do testowania maszyn i w pewnym momencie przerwać badanie. Na pewno jednak nie można po prostu nie wziąć pod uwagę tych maszyn które się nie popsuły. Nie można wziąć do testowania trzydziestu obiektów, poczekać aż dziesięć z nich się popsuje, rejestrując jak długo pracowały, a o reszcie zapomnieć. Pozostałe dwadzieścia sztuk jest bardzo ważne, mówi o tym, że jednak większa część przepracowała dany czas bezawaryjnie.

Oczywiście istnieją odpowiednie metody statystyczne pozwalające uwzględnić obserwacje ucięte, tzn. takie gdzie zarejestrowany czas pracy urządzenia nie wynika z tego, że się popsuło a z tego, że z niezależnych powodów musieliśmy przerwać badanie. Metody te wymagają bardzo zaawansowanego aparatu matematycznego i obliczeniowego. Nawet końcowe tabele publikowane w normach są skomplikowane. Jednak dysponując odpowiednim programem komputerowym jakim jest *STATISTICA* nie musimy zajmować się niczym ponad przygotowanie danych i odczytanie końcowych wyników. Oczywiście dobrze jest mieć orientację w temacie, w szczególności znać trzeba podstawowe pojęcia.

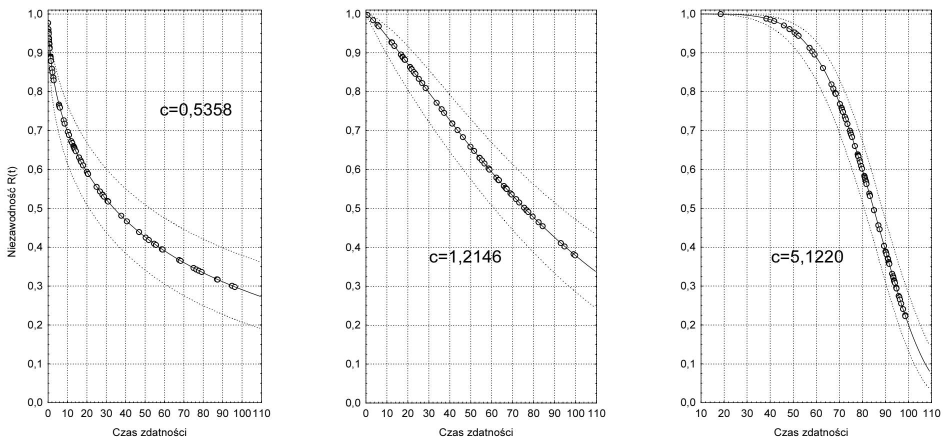
Poniżej zamieszczony jest fragment tabeli przykładowych danych zawierających obserwacje ucięte.

Nr	Czas [h]	Ucinanie
1	100	Ucięta
2	46	Kompletna
3	100	Ucięta
4	100	Ucięta
5	81	Kompletna
6	54	Kompletna
7	26	Kompletna
8	68	Kompletna

Jak można się zorientować z liczb zawartych w kolumnie *Czas* okres badania ograniczony był do stu godzin. W tym czasie urządzenia numer 2, 5, 6, 7 i 8 popsuły się a trzy urządzenia (1, 3, 4) pracowały do końca. Tak więc w tabeli jest zawarta informacja, że maszyna pierwsza przepracowała bezawaryjnie 100 godzin, a maszyna druga doznała awarii po 46. godzinach pracy itd. Są to dane dwóch różnych typów, wszystkie jednak będą uwzględnione w analizie statystycznej.

Wspomnieć jeszcze należy o innym typie niepełnych danych. Omówiony typ danych uciętych wiązał się z ograniczeniem czasu badania, można też ograniczyć badanie do zadanej liczby awarii. Zgodnie z normą dane takie nazywa się cenzorowanymi.

W module *Analiza procesu* programu *STATISTICA* dopasować można rozkład Weibulla do danych z uwzględnieniem obserwacji uciętych. Na poniższych wykresach pokazane są trzy wyniki dopasowywania, odpowiadające trzem różnym, opisywanym wcześniej sytuacjom zdarzającym się w praktyce. Wykresy przedstawiają funkcje niezawodności $R(t)$ czyli prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy urządzenia w ciągu czasu t. Funkcja niezawodności dla $t=0$ ma wartość $R(0)=1$, gdyż prawdopodobieństwo tego, że maszyna nie popsuje się w ciągu zera godzin wynosi 1i jest pewnością. Oczywiście idąc na wykresie w prawo, czyli zwiększając czas pracy obserwujemy spadek prawdopodobieństwa niezawodnej pracy.



Na pierwszym wykresie widoczne jest bardzo szybkie zmniejszanie się funkcji niezawodności w początkowym okresie, wykres ten odpowiada urządzeniom cechującym się dużą awaryjnością we wstępnym okresie eksploatacji. Są to urządzenia nieprzetestowane dostatecznie przez producenta, nie „wygrzane” albo nie traktowane wstrząsarką czy innym urządzeniem „przyspieszającym” bieg czasu w celu wyłapania błędów. Parametr c rozkładu Weibulla został tu oszacowany na c=0,5358 a więc wartość mniejszą od 1, co odpowiada właśnie efektowi rozruchowemu.

Na drugim wykresie c=1,2146 czyli jest mniej więcej równe 1, mamy więc tu przypadek awaryjności losowej, niezależnej od czasu. Powodowanej na przykład przez czynniki zewnętrzne, osobowe, pogodowe, związane z zasilaniem itp.

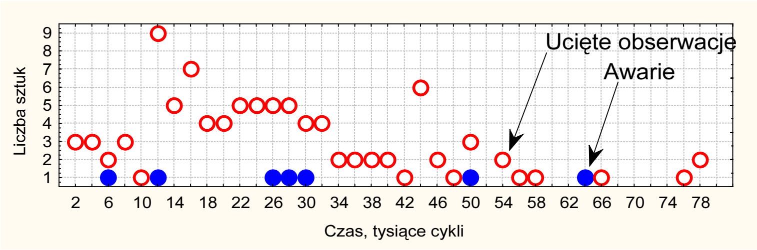
Na ostatnim wykresie c=5,1220, to przypadek urządzenia zużywającego się. Zużycie zaczyna być widoczne po 40. - 50. godzinach, a po 85. godzinach prawdopodobieństwo, że maszyna będzie jeszcze pracowała wynosi już tylko1/2. Widoczny na tym wykresie proces zużycia jest dość zdecydowany, c jest znacznie większe od 1. Jeżeli po 60. godzinach 90% maszyn jeszcze działa, a po 85. już tylko połowa to oznacza to coś niedobrego. Być może maszyny nie są konserwowane, np. nie jest uzupełniany olej, który dość systematycznie się wyczerpuje?

Warto zwrócić uwagę, że dane przedstawione na powyższych wykresach są ucięte, punkty nie wychodzą poza 100 godzin pracy, gdyż tak został ograniczony czas badania.

Na wykresach widoczna jest linia dopasowana do punktów pomiarowych. Linii tej towarzyszą dwie linie ograniczające z dwóch stron przedział ufności. Jest to 95% przedział ufności. Ze względu na skończoną liczbę danych (nigdy nie mamy nieskończonej liczby danych) wynik dopasowania modelu do danych nie jest idealny, jest to najlepsze dopasowanie, ale nie daje absolutnej pewności. Sens przedziału ufności jest taki, że z prawdopodobieństwem 0,95 można powiedzieć, że rzeczywista wartość funkcji niezawodności zawiera się wewnątrz tego przedziału. Im więcej danych i im rzadziej będą to dane ucięte, tym węższy będzie przedział ufności.

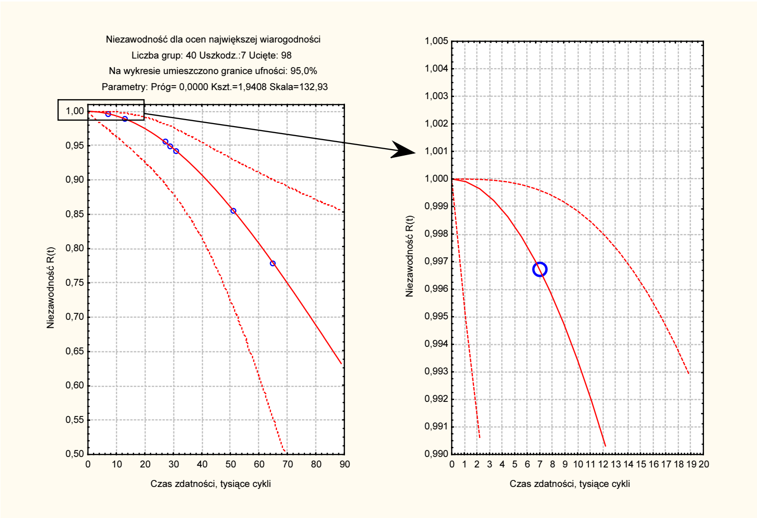
Ucięte obserwacje niekoniecznie muszą wyglądać tak jak w powyższej tabeli albo na wykresach, tzn. nie muszą być „obcięte” na tej samej wartości. Różne sztuki badanego produktu mogły być obserwowane przez różny czas, z zaobserwowaniem awarii lub bez niej. Z najróżniejszych powodów czas badania każdej sztuki może być inny. Dotyczy to w szczególności badań poprzez normalne eksploatowanie (wersji beta). Czas pracy urządzeń może być przypadkowy. W pewnym momencie gromadzimy dane do analizy i mamy jakąś liczbę czasów pracy do awarii i jakąś liczbę różnych czasów uciętych sztucznie, przez przerwanie obserwacji mimo braku awarii. Wszystko to są dane do analizy.

Rozpatrzmy przykład zamieszczony czerwcowym numerze *Quality Progress*. Badano 105 sztuk urządzenia elektronicznego, z których tylko 7 się popsuło a pozostałych 98 pracowało do końca. Różny czas pracy wynikał z tego, że urządzenia przekazywano do testowania sukcesywnie a ponadto intensywność eksploatacji była różna.



Na rysunku przedstawione są surowe dane. Miarą czasu pracy urządzenia jest liczba przepracowanych cykli. Dane rejestrowane były z dokładnością do 2 tys. cykli.

Patrząc na powyższy wykres nie jest łatwo stwierdzić jaki jest typ uszkodzeń, czy są to awarie nowych urządzeń, awarie niezależne od czasu, czy też wynikające ze starzenia się układu. Dopiero analiza statystyczna pozwala znaleźć parametr kształtu rozkładu Weibulla, wynosi on tutaj 1.94 i jednoznacznie wskazuje, że mamy do czynienia z awariami wynikającymi ze starzenia się urządzenia.



Z wykresu niezawodności otrzymanego dla omawianego przykładu odczytać można prawdopodobieństwo poprawnej pracy dłuższej niż 50.000 cykli; wynosi ono p=0,86. Jest to główny wynik analizy. Inne wyniki to: czas do awarii 0.1% i 10% urządzeń. Ten drugi, odczytany z powyższego wykresu wynosi 41.000 cykli. Natomiast odczytanie tak małej wartości prawdopodobieństwa jak 0,001 (=0,1%) wymaga powiększenia fragmentu wykresu.

Odczytany czas wynosi 3500 cykli. Jednak zwrócić trzeba uwagę na szerokość przedziału ufności, jest to przedział od 200 do 9500 cykli i jest bardzo szeroki. Taka niepewność wynika z faktu, że zaobserwowano jedynie siedem przypadków uszkodzeń.

Jest to dobry moment aby przypomnieć jaki jest sens badań statystycznych i co należy rozumieć przez dokładność wyniku statystycznego. Otóż liczba 3500 cykli odczytana jest z wykresu dość dokładnie. Oczywiście nie ma sensu dalsze powiększanie wykresu i odczytywanie punktu przecięcia z taką dokładnością by otrzymać na przykład liczbę 3512, tym bardziej, że nie ma powodu dla którego nie należałoby się posuwać jeszcze dalej i podawać jako wynik liczby np. 3512,34567. Przecięcie dwóch linii da się odczytać dowolnie dokładnie. Jednak prawda jest inna. Statystyczna prawda, a jest to w tym wypadku jedyna prawda jaką możemy poznać jest taka, że wynik znamy z dokładnością do przedziału 200-9500. Rzeczywista liczba cykli po której psuje się 0,1% układów elektronicznych zawiera się, z prawdopodobieństwem 0,95 w tym przedziale.

Nie koniec na tym. Poznanie prawdy nie jest łatwe. Aby mieć pełne zaufanie do takiego wyniku statystycznego trzeba zapytać czy spełnione były odpowiednie założenia konieczne dla przeprowadzenia badania. I tak, czy 105 badanych urządzeń stanowiło reprezentatywną próbkę dla całości urządzeń których dotyczyć ma wiedza zdobyta poprzez badanie statystyczne. Czy warunki zewnętrzne, środowiskowe ich eksploatacji były reprezentatywne, np. czy padał czasami deszcz, jeśli przewidziana jest eksploatacja w warunkach polowych.

Inna, trudniejsza nieco sprawa dotyczy charakteru awarii. Badane urządzenie elektroniczne jest skomplikowanym układem składającym się z wielu elementów. Przypuśćmy, że dwa spośród nich stanowią główną przyczynę awarii. Otóż trudno oczekiwać, że typ niezawodności obu elementów będzie identyczny. Przez typ niezawodności można rozumieć wartość parametru c rozkładu Weibulla. Jeżeli jeden z elementów miałby c=0,5, bo wykazywałby efekt nowości a drugi miałby c=2, bo starzeje się, to łączne ich traktowanie, które raczej jest nieuniknione może prowadzić do mniej dokładnych wyników. Z grubsza można powiedzieć, że estymowane c powinno być bliskie 1 ale będzie miało dużą niepewność. Dobrze jest, w takiej sytuacji oddzielnie traktować, o ile to możliwe różne przyczyny awarii.

Podkreślić trzeba, że kłopot jest tylko z parametrem c rozkładu Weibulla. Dla rozkładu wykładniczego, czyli gdy c=1 sumowanie awarii różnego pochodzenia jest wręcz definicyjnym przypadkiem. Rozkład wykładniczy występuje właśnie tam gdzie jest wiele niezależnych przyczyn awarii, które mogą mieć najróżniejsze prawdopodobieństwa awarii, byleby stałe w czasie. Każdy z elementów może się popsuć, niektóre psują się częściej od innych, w sumie otrzymuje się pewną wynikową niezawodność.

Konieczne w badaniach jest też pewne założenie dotyczące obserwacji uciętych. Czas zakończenia obserwacji urządzenia sprawnie pracującego musi być niezależny od aktualnego stanu urządzenia. Nie może na przykład być tak, że przerywamy obserwację bo zaczynamy dostrzegać pewne symptomy sugerujące zbliżającą się awarię. Choć odwrotna sytuacja też jest nieprawidłowa. Jeżeli przychodzi moment zaplanowanego wcześniej końca badania a my będziemy czekać na awarię bo widzimy jakieś jej pierwsze objawy, to taka sytuacja również jest statystycznie nieprawidłowa. Oczywiście można wcześniej zdefiniować awarię jako pojawienie się symptomów bliskiego zaprzestania pracy przez urządzenie.

Na koniec warto też wspomnieć, że prowadzenie kosztownych badań niezawodności produktu ma sens, jeśli proces jego wytwarzania jest uregulowany statystycznie. W przeciwnym wypadku wynik badania będzie miał ograniczoną wiarygodność.

Literatura:

1. N. Doganaksoy, G.J. Hahn, W.Q. Meeker, Product Life Data Analysis: A Case Study, Quality Progress 6/2000 p.115-122.
2. G.J. Hahn, N. Doganaksoy, W.Q. Meeker, Reliability Improvement, Issues and Tools, Quality Progress 5/1999 p.133-139.
3. J.P. Klein, M.L. Moeschberger, Survival Analysis, Techniques for Censored and Truncated Data, Springer, 1997.
4. PN-77/N-04021 Niezawodność w technice. Plany badania w przypadku rozkładu wykładniczego.
5. Analiza Weibulla niezawodności/czasu uszkodzeń, *STATISTICA* pomoc elektroniczna, dostepna w programie oraz: www.statsoft.pl

