

Niezawodność strukturalna podzespołów i aparatów stosowanych w układach zabezpieczeń i automatyki elektroenergetycznej

KD:658.56
62-50
IA:4.1.4

Nakreślono rozwój automatyki elektroenergetycznej, energetyki krajowej z punktu widzenia pewności ruchu, sformułowano zasady i warunki poprawnej syntezy układów automatyki oraz budowy aparatury składowej. Wyprowadzono zależności logiko-matematyczne wiążące elementy lub podzespoły aparatury z funkcjonalną pewnością i niezawodnością działania.

1. Istota i problem niezawodności

Jak wynika z elaboratu pt. "Statystyka i analiza działania automatyki i zabezpieczeń przekaźnikowych w energetyce zawodowej w latach 1956-1965" opracowanego przez Instytut Energetyki - ogólny wskaźnik prawidłowości działania zabezpieczeń przekaźnikowych wykazuje stałą tendencję wzrostową, a mianowicie: w 1956 r. wyniósł 86%, w 1965 r. - 95,2% i nadal wzrasta. Liczby te odnoszą się do całości aparatury przekaźnikowej zainstalowanej w energetyce zawodowej. W ilości tej partycypuje jednak znaczna liczba kompletów aparatury pochodzącej z dostaw zagranicznych i to przeważnie z firm o dawno ustalonej marce. Natomiast w odniesieniu do wyrobów produkcji krajowej nadal stwierdza się niezadowalającą jakość i małą pewność ruchową szeregu aparatów, zwłaszcza starszej konstrukcji. Wprawdzie poprawność działania przekaźników i układów automatyki w poważnym stopniu zależy od kwalifikacji personelu Służb Przekaznikowych Energetyki, należy jednak zdawać sobie sprawę, że najistotniejszym czynnikiem jest właściwa jakość i niezawodność stosowanej aparatury - techniczny atrybut pewności ruchowej zespołów energetycznych.

Obserwując rozwój energetyki zawodowej łatwo spostrzec kurs na instalowanie urządzeń energetycznych o coraz większych mocach, a więc i bardziej kosztownych. W związku z tym współczesne układy zabezpieczeń i automatyki z uwagi na pewność ruchową systemu energetycznego powinna cechować wysoka jednolitość konstrukcyjno-jakościowa podzespołów i elementów składowych.

Innymi słowy, układy zabezpieczeń nie mogą powstawać drogą syntezy z indywidualnych, przypadkowych elementów i podzespołów - wyrobów zwykle prostych funkcjonalnie lecz projektowanych, wytwarzanych i stosowanych oddzielnie. Jakość bowiem i niezawodność układów zabezpieczeń i automatyki określana jest i związana ze zbiorem cech odnoszących się do poszczególnych faz projektowo-wytwórczych, poczynając od opracowania koncepcji funkcjonalnej poprzez wszystkie stadia prac technologiczno-produkcyjnych, na eksploatacji i okresowych pracach korekcyjno-remontowych skończywszy.

Techniczne aspekty niezawodnej pracy elementów zabezpieczeń i układów automatyki są więc odzwierciedleniem ciągłym i jednoznacznym całokształtu prac i procesów techniczno-technologicznych zawartych w przedziale: myśl konstruktorska - efekt funkcjonalny. Ta ścisła i wzajemna zależność obejmuje wszystkie charakterystyki wyrobów, a zwłaszcza: dokładność działania, trwałość, bezawaryjność i podatność naprawczą.

W wymienionym przedziale prace konstrukcyjno-projektowe są jednak etapem najważniejszym, na którym zakłada się określony poziom niezawodności i precyzuje się zbiór wymagań niezawodnościowych.

Jak wykazuje bieżąca praktyka coraz większe zróżnicowanie elementów i układów zabezpieczeń oraz automatyki stwarza duże trudności w wyrobieniu sądu o ich jakości i niezawodności. Konieczne jest więc sformułowanie odpowiednich pojęć i zależności wiążących zbiory cech wyrobu z jednoczesnym uzależnieniem ich od określonych warunków techniczno-eksploatacyjnych.

2. Analiza niezawodności

Kompleksowe ujęcie problematyki niezawodnościowej, w której po pierwsze cała działalność wytwórcy ześrodkowana jest na przeznaczeniu wyrobu, a po wtóre - na poprawnym doborze i należytej eksploatacji ze strony odbiorcy daje gwarancję spełnienia wszystkich wymagań ruchomych, gwarancję niezawodnego działania. Jednak z praktyki i doświadczeń uzyskanych przez szereg renomowanych firm zagranicznych wynika, że oprócz całokształtu różnorodnych prób laboratoryjnych lub eksploatacyjnych mających na celu sprawdzenie możliwości spełnienia przez wyrób pełnego zakresu wymogów niezawodnościowych konieczne jest przeprowadzenie dodatkowego cyklu prób, ale w ostrzejszych niż pierwotnie warunkach. Wynika to stąd, że duża ilość parametrów składowych niezawodności nie została jeszcze sprawdzona doświadczalnie.

Badania wykazały, że czynniki oddziałujące w warunkach eksploatacyjnych przybierają niekiedy wartości przekraczające ustalenia norm, a niektóre czynniki nie są jeszcze należycie określone pod względem ich charakteru i "mocy destrukcyjnej". Konieczny jest zatem pewien margines bezpieczeństwa, umożliwiający niwelację przypadkowych niedociągnięć charakteru produkcyjnego lub eksploatacyjnego.

Wspomniane firmy stosują niekiedy duży zapas wytrzymałości. Na przykład /6/ w niektórych cyfrowych maszynach liczących współczynniki obciążenia elementów składowych wynoszą:

kondensatorów	0,05 - 0,10
oporników	0,2
diod	0,1
tranzystorów mocy	0,5.

Dzięki takim warunkom pracy elementów składowych maszyny te /typ Transac S - 2000/ uważane są za najbardziej niezawodne. Oczywiście elementy te muszą mieć też odpowiednią jakość.

Wymaga się, aby elementy pracujące w ważnych układach złożonych cechowała bardzo mała intensywność uszkodzeń nie przekraczająca 0,05% na 1000 godzin pracy. Takimi układami są też układy zabezpieczeń i automatyki energetycznej

Wiadomo, że warunku tego nie spełnia cały szereg elementów aktualnie zawartych w podzespołach i zespołach składowych zabezpieczeń lub automatyki. W takiej sytuacji należy sobie dobrze zdawać sprawę z realnej jakości i niezawodności układu zabezpieczającego ze względu na bardzo przykre niekiedy konsekwencje wynikające z nienależytej pracy układu. Konieczna jest zatem każdorazowe sumienne analiza niezawodności układu jak i elementów składowych z uwagi na to, że często zdarzają się przypadki braku należytego przystosowania wyrobów do specyficznych wymagań eksploatacyjnych. Podstawowym warunkiem należytego funkcjonowania aparatury będzie zachowanie się jej parametrów technicznych w określonych /przez producenta i odbiorcę/ przedziałach - tolerancjach. Niestety, permanentna analiza i określanie uchybów, błędów i usterek w działaniu aparatury jest procesem na ogół trudnym i długotrwałym. Główną trudność należy tu przypisać losowemu charakterowi wychodzenia parametrów wyrobu z zadanych przedziałów, a więc charakterystyki techniczno-eksploatacyjne opisujące niezawodność wyrobów mogą być określone jedynie metodami rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej.

W chwili obecnej istnieje szereg metod służących do określania niezawodności aparatów lub układów. Różnią się one podejściem do problemu oraz analityczną wnikliwością.

Z uwagi na różnorodność stosowanej obecnie w energetyce aparatury wydaje się najbardziej odpowiednie użycie takiej metody, która przynajmniej w odniesieniu do jednego typu aparatów czy układów umożliwiałaby uwzględnienie ich indywidualnych a zróżnicowanych właściwości.

W niniejszym artykule próbę analizy problemu i oceny niezawodności aparatury przeprowadzono przy założeniu, że na ogół aparatura jest tak projektowana, że uszkodzenie jednego elementu czy podzespołu nie może doprowadzić do uszkodzenia innych elementów w tym samym wyrobie i zasada ta przenosi się hierarchicznie na zespoły wyższych rzędów. Wobec tego kolejne uszkodzenia aparatury można traktować jako niezależne. Rozkładając więc zespół czy też aparat na n podzespołów /elementów/, z których każdy z określonym prawdopodobieństwem zdolny jest do wypełnienia normalnych funkcji, to prawdopodobieństwo poprawnego wypełnienia założonych funkcji przez aparat /układ/ będzie się równać iloczynowi prawdopodobieństw poprawnej pracy wszystkich elementów składowych, czyli

$$P/T > t/ = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot \dots \cdot P_n = \prod_{i=1}^n P_i, \quad /1/$$

gdzie:

P_i - prawdopodobieństwo niezawodnej pracy i -tego podzespołu /elementu/, przy czym poszczególne podzespoły /elementy/ nie są rezerwowane;

T - czas poprawnej pracy podzespołu /elementu/ od początku pracy do chwili pojawienia się uszkodzenia;

t - zadany czas poprawnej pracy podzespołu /elementu/.

Oczywiście, prawdopodobieństwo niezawodnej czy też zawodnej pracy i -tego podzespołu /elementu/ zależy od wielu czynników /zdarzeń/ $X_1, X_2, \dots, X_m$. Jeśli więc zdarzenia $X_1, X_2, \dots, X_m$ są parami wyłączające się i jedynie możliwe, to prawdopodobieństwo niezawodnej pracy i -tego elementu /podzespołu/ można zapisać jako

$$P_1 / X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_m / = P_1 / \prod_{i=1}^m X_i /, \quad /2/$$

Natomiast prawdopodobieństwo zawodnej pracy zapiszemy jako

$$P_2 / \overline{X_1} \cdot \overline{X_2} \cdot \dots \cdot \overline{X_m} / = P_2 \prod_{i=1}^m \overline{X_i} / \quad /3/$$

Zgodnie z prawami de Morgana

$$P_2 / \prod_{i=1}^m \overline{X_i} / = \prod_{i=1}^m P_2 / \overline{X_i} / = P_2 / \overline{\sum_{i=1}^m X_i} /, \quad /4/$$

a ponieważ w myśl odpowiedniego twierdzenia suma prawdopodobieństw zdarzeń wyłączających się równa jest jedności, czyli

$$P / X_i / + P / \overline{X_i} / = 1 \quad /5/$$

więc wprowadzając pomocnicze oznaczenie $q_i = P / \overline{X_i} /$, otrzymamy $1 - q_i = P / X_i /$ i w efekcie prawdopodobieństwo niezawodnej pracy i -tego podzespołu /elementu/ można wyrazić jako

$$P_i = \prod_{i=1}^m /1 - q_i / \quad /6/$$

Przytoczone wyżej prawo de Morgana pozwala na dalsze rozwinięcie otrzymanego wyrażenia, mianowicie

$$\begin{aligned} P_i &= \prod_{i=1}^m /1 - q_i / = P_i / X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_m / = 1 - P / \overline{X_1} + \overline{X_2} + \dots + \overline{X_m} / \\ &= 1 - \sum_k P / \overline{X_k} / + \sum_{k < l} P / \overline{X_k} \cdot \overline{X_l} / - \sum_{k < l < i} P / \overline{X_k} \cdot \overline{X_l} \cdot \overline{X_i} / + \dots \end{aligned}$$

Czyli postać ogólną na strukturalną niezawodność i-tego podzespołu /z niezależnymi elementami/, otrzymamy jako

$$P_i = 1 - \sum_{i=1}^m q_i + (-1)^k \sum_k C_m^k \prod_k q_m \quad /8/$$

gdzie:

$$C_m^k = \frac{m!}{k! (m-k)!}; \quad k = 2, 3, 4, \dots, m$$

Przebieg analizy pokazuje, że wyniki obliczeń w znacznym stopniu zależą od tego jakie są wartości niezawodności poszczególnych składowych elementów i podzespołów aparatu czy też układu. Praca uwiadamia więc konieczność przeprowadzenia eksperymentalnego potwierdzenia prawidłowości analitycznego modelu. Wyniknie wtedy w sposób wyraźny i konkretny specyfika stosowania niniejszego modelu w określonych układach zabezpieczeń i automatyki energetycznej. Jak wykazuje budowa wzoru /7/ sumy iloczynów $\bar{X}_k \cdot \bar{X}_1$, $\bar{X}_k \cdot \bar{X}_1 \cdot \bar{X}_1$ itd., określają prawdopodobieństwo przecięcia się zbiorów różnego rodzaju zdarzeń losowych /uszkodzeń/. Oczywiście, dla należyście zaprojektowanego i wykonanego aparatu /układu/ ta ilość zdarzeń jest zwykle niewielka. Jednak przy obliczeniach kontrolnych należy przewidywać powstanie takich zdarzeń, jak to przykładowo podaje opracowanie Instytutu Elektrotechniki nr 1025, oznaczone tu zgodnie ze wzorem /7/, a mianowicie:

- X_1 - zwarcie uzwojenia,
- X_2 - ułamanie się sprężyn zestyków,
- X_3 - uszkodzenie zwoju zwartego,
- X_4 - odkręcenia się śrub,

zachodzące przy przebiegach gwałtownych lub

- X_k - zmiana wartości rozruchowych,
- X_1 - zmiana czasu zadziałania,
- X_1 - zmiana docisku zestyków,

zachodzące przy przebiegach powolnych.

Należy tu bezstronnie stwierdzić, że budowa wzoru /8/ jest złożona i w ogólnym przypadku korzystanie z niego jest pracochłonne. Tym niemniej pozwala bez formalnych ograniczeń na uwzględnienie wpływu wielu zróżnicowanych usterek i wad lub uszkodzeń na finalną niezawodność wyrobu lub układu. Poza tym należy stwierdzić, że ilość klas zdarzeń, na których określone są prawdopodobieństwa poprawnej pracy elementów /podzespołów/ może mieć, zależnie od sytuacji, różną wielkość i odpowiednio do tego w różny sposób mogą rzutować na niezawodność finalną. Wprawdzie większość z wymienionych usterek daje podstawę do usunięcia aparatu z układu /celem ewentualnej reperacji/, co jest zupełnie uzasadnione z uwagi na ważność zautomatyzowanych obiektów.

Wobec tego, zdając sobie sprawę z rzeczywistej jakości rozpatrywanej aparatury należy każdorazowo przeprowadzić analizę niezawodności strukturalnej. Będzie ona tym dokładniejsza im dokładniej będziemy znali wartości liczbowe prawdopodobieństw q_j .

L i t e r a t u r a

1. PN-58/N-01051 "Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna",
2. M. Fiszer "Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna". PWN, Warszawa 1958,
3. B. Gniedienko i in. "Matematicheskiye metody w teorii nadiożnosti", Izdatielstwo Nauka, Moskwa 1965,
4. D. Chorafas "Procesy statystyczne i niezawodność urządzeń.WNT, Warszawa 1963,
5. E. Fidelis i in. "Matematyczne podstawy oceny niezawodności", PWN, Warszawa 1966,
6. R.A. Sapożnikow i in. "Nadiożnost awtomaticheskikh upravliajuszczich sistem" Izdat. Wyszaja Szkoła, Moskwa 1964.