УДК 621.314.2
Зіновкін В.В.[1], Третьяков А.О.[2], Расторгуєв Д.Б.[2], Колесников А.С.[3], Тітаренко О.С.[3]
[1] д-р. техн. наук., проф. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асп. НУ «Запорізька політехніка»
[3] студ. гр. Е-613 НУ «Запорізька політехніка»

ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОГЕННОГО СТАНУ СКЛАДНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Електромеханічні системи і трансформаторне устаткування представляють собою доволі складні конструктивні рішення. Вони складаються із активних і неактивних елементів і комплектуючих, що між собою поєднуються послідовно-паралельними і паралельно-послідовними схемами. Вони представляють собою синтез більш надійних структур із менш ненадійними елементами, що представляє доволі складне теоретичне і практичне завдання забезпечення надійності устаткування [1-7]. Езарі та Прошан запропонували цікавий спосіб знаходження так званої «верхньої» та «нижньої» меж оцінки надійності таких структур [5-7]. Такий підхід полягає у введенні понять системи (coherent system), мінімальних шляхів та мінімальних перерізів сполучення надійних та не надійних елементів. Верхній шар представляє переріз сукупність елементів, надійна робота яких забезпечує роботу об’єкта при номінальних режимах навантаження і задовольняє запланованій надійності. Нижній шар представляє собою переріз сукупності елементів, відмова яких гарантує відмову об’єкта. Такий підхід оцінки надійності об’єкта складної структури дозволяє отримати аналітичні залежності між очікуваними показниками надійності, оскільки отримати повну модель надійності отримати не можливо [4-6]. Якщо інтенсивності відмов окремих елементів залежать від рівня навантажень, то при аналізі доводиться мати справу з нелінійною марківською моделлю «загибелі», яка узагальнює моделі в спеціальних задачах медицини та ядерної фізики.

Розглянемо модель безвідмовної роботи деякого складного устаткування, що складається із випадкових і однаково розподілених показників надійності, що задовольняє деякій функції $F(t)$, що має безперервну першу похідну $f(t)$. У випадку коли техногенні ризики потребують заміни деяких елементів за дуже малі терміни часу, то середня кількість замін (ревізій) за час $[0,t)$ можливо визначити наступним рівнянням:

$$U(t) = \sum_{i=1}^{\infty} iP_i(t) \tag{1}$$

де $P_i(t)$ - ймовірність виникнення точно $i-$ї відмов.

$$P_i(t) = P\{X(t) = i\}. \tag{2}$$

Але подія $\{X(t) \geq i\}$ означає, що $\left\{\sum_{k=1}^{i} \xi_k \leq t\right\}$. (індекс k означає черговість відмови).

Виходячи із незалежності часів ξ_k, можливо представити розподіл ймовірностей їх суми в наступному співвідношенні:

$$P\left\{\sum_{k=1}^{i} \xi_k \leq t\right\} = \int_0^t F^{(i-1)}(t-\tau)dF(\tau) = F^{(i)}(t). \tag{3}$$

бо інакше ймовірність $P_i(t)$ виявиться як $P\{X(t) \geq i\} - P\{X(t) \geq i+1\}$.

На підставі такого представлення подій рівняння для $U(t)$ можливо переписати в наступному вигляді:

$$U(t) = \sum_{i=1}^{i} iP_i(t) = \sum_{i=1}^{\infty} F^{(i)}(t). \tag{4}$$

Враховуючи фізико-математичне тлумачення процесу, що розглядаємо, в динамічному розвитку, то його більш раціонально записати в інтегрально-диференційній формі

$$U(t) = F(t) + \int_0^{\infty} \sum_{i=2}^{\infty} F^{(i-1)}(t-\tau)dF(\tau) = F(t) + \int_0^t U(t-\tau)dF(\tau). \tag{5}$$

З точки зору теорії надійності і техногенних викликів таке інтегро-диференційне рівняння, яке називається рівнянням відновлення.

Продиференціювавши за t обидві частини останнього рівняння і врахувавши, що $U(0)f(t) = 0$, отримаємо

$$\frac{dU(t)}{dt} = u(t) = f(t) + \int_0^t u(t-\tau)f(\tau)dx. \tag{6}$$

Скориставшись перетворенням Лапласа, отримуємо наступну систему:

$$\bar{f}(s) = \int_0^\infty e^{-st} f(t)dt, \qquad \bar{U}(s) = \int_0^\infty e^{-st} U(t)dt,$$
$$\bar{u}(s) = \int_0^\infty e^{-st} u(t)dt, \qquad \bar{F}(s) = \int_0^\infty e^{-st} F(t)dt. \tag{7}$$

На підставі теореми про композицію фізико-математичних процесів отримаємо

$$\bar{U}(s) = \frac{\bar{F}(s)}{1 - \bar{f}(s)} \quad \text{та} \quad \bar{u}(s) = \frac{\bar{f}(s)}{1 - \bar{f}(s)}. \tag{8}$$

Аналіз приведених рівнянь показує, що коли $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0, \quad \bar{u}(s) = \frac{\lambda}{s},$ тому $u(t) = \lambda$. Це означає, що при необмеженому зростанні інтервалу часу в межах, що розглядаються при довільному розподілі ймовірностей часу безвідмовної роботи кожного об'єкта устаткування $\mathbf{F_i(t)} = \mathbf{F(t)} = P\{\xi \leq t\}$ має місце наступні граничні умови:

$$\lim_{t\to\infty} \frac{U(t)}{t} = \frac{1}{M[\xi]}, \tag{9}$$

де $M[\xi]$ – математичне очікування випадкової величини ξ.

Доцільно відзначити, що Кокс та Сміт вивчали таку схему заміни за умови, що окремі зразки мають різні розподіли. Джевелл дещо ускладнив модель, ввівши інтервал часу $[-\tau, 0]$, протягом якого невідомо точно стан зразка устаткування. Якщо $P_i(t|\tau)$ - ймовірність виникнення точно i аварій, а отже, і замін на інтервалі $[0, t)$ за умови, що останнє спостереження стану зразка здійснювалося у момент $-\tau$, то

$$P_0(t|\tau) = \int_t^\infty f(x|\tau)dx,$$
$$P_1(t|\tau) = \int_0^t f(x|\tau)P_0(t - x|0)dx, \tag{10}$$
$$\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots$$
$$P_i(t|\tau) = \int_0^t f(x|\tau)P_{i-1}(t - x|0)dx, (i = 2,3, \dots),$$

де $f(t|\tau)dt$ - ймовірність того, що перша аварія, що спостерігається, після відновлення спостережень відбудеться на інтервалі $(t, t + dt)$, за умови, що остання аварія та заміна до припинення спостережень сталися у момент $-\tau$. ймовірності $P_i(t|\tau)$ утворюють послідовний розподіл, і тому

$$\sum_{i=0}^{\infty} P_i(t|\tau) = 1, \tag{11}$$

причому

$$U(t|\tau) = \sum_{i=1}^{\infty} iP_i(t|\tau). \tag{12}$$

Якщо ввести подвійне перетворення Лапласа

$$\bar{\bar{f}}(s|p) = \int_0^{\infty}\int_0^{\infty} e^{-st}e^{-p\tau} f(t|\tau)dt\,d\tau, \tag{13}$$

то

$$\bar{\bar{f}}(s|p) = \frac{\left\{\bar{f}(s) - \bar{f}(p)\right\}}{p - s\left[1 - \bar{f}(p)\right]}. \tag{14}$$

На практиці резервування та проведення аварійних замін зразків обладнання, що відмовили, припущення про те, що заміна здійснюється абсолютно новим зразком, що зменшує можливості отримання інформації про наявність техногенних факторів надійності функціонування та теорії відновлення.

Висновки:

1. Отримані теоретичні дослідження забезпечення надійності складних електромеханічних об'єктів показали, що не всі техногенні виклики враховуються для забезпечення термінів надійного функціонування.

2. До причинно-наслідкових факторів техногенних викликів необхідно віднести порушення технічного завдання і технічних вимог до розробки і приймально-здавальних випробувань, наприклад [1,2-6].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Зіновкін В.В., Ященко М.М., Васильев Б.П., Літвін В.А. Експлуатаційна надійність перемикаючих пристроїв при різкозмінних навантаженнях // Тиждень науки-20 Електротехнічний факультет. Тези доповідей науково-практичної конференції, Запоріжжя, 13–17 квітня 2020 р. [Електронний ресурс] / Редкол. :В. В. Наумик (відпов. ред.) Електрон. дані. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. – С. 139-140.

2.Зіновкін, В.В. Аналіз причинно-наслідкових факторів аварійності електротехнічного обладнання при різкозмінних навантаженнях [Електронний ресурс] / В.В. Зіновкін, В.О. Лисенко // Тиждень науки: наук.-

практ. конф., 16-20 квіт. 2018 р.: тези доп. – Запоріжжя, 2018. – С. 492-493. Режим доступу: http://zntu.edu.ua/uploads/dept_s&r/2018/conf/1/TN2018.pdf.

3.Zinovkin, V., Kusch, V. (2012). Electromagnetic processes modelling in the electric equipment of the abruptly variable loads systems United States: The Advanced Science, 1, 138–140.

4.Box E., Jnkins G. Some recent advance in forecasting and control, Holder Dey, San Francisco, 2006.

5. Box E., Jnkins G. Some recent advance in forecasting and control, J. Apl. Statis., vol. 17, №2. 2006.

6.Harashima F. A Control Robustness Against Motor Parameter Variations in Induction Motor Drive. Текст. / F. Harashima, S. Kondo, K. Ohnishi, E. Arihara, M. Kajita // Int. Conf. Of Evalution and Modern AspectsofInductionMachines.-Turino.1986.July. P. 451-457.

7. Garces L. Parameter Adaptation for the Speed-Controlled static AC Drive with Squirrel-Cage Induction Motor. Текст. / L.Garces // IEEE Trans, on Ind. Appl., 1980. V. IA-16, No. 2. March/April. P. 173-178.