УДК 629.78.3

М.Ю. Яковлев[1], С.В. Герасимов[2], О.Б. Никитюк[3]

[1]*Национальный университет «Львовская политехника», Львов*
[2]*Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков*
[3]*Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков*

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДСТВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ СЛОЖНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Решается актуальная задача, связанная с исследованием закона распределения нестабильности метрологических характеристик средств измерительной техники сложных энергетических объектов. Определение основных характеристик закона распределения нестабильности метрологических характеристик позволит повысить эффективность эксплуатации СЭО за счет своевременного обнаружения неисправных СИТ и прогнозирования их реального технического состояния.

Ключевые слова: *надежность средств измерительной техники, параметраметры распределения, метрологические характеристики.*

Введение

Постановка проблемы. В процессе эксплуатации метрологические характеристики средств измерительной техники (СИТ) подвергаются различным изменениям. Эти изменения носят случайный характер и приводят к отказам, то есть к невозможности СИТ выполнять свои функции [1 – 3].

Постепенное изменение метрологических характеристик СИТ позволяет ввести как угодно много работоспособных состояний с разным уровнем эффективности их функционирования, обусловленной степенью приближения метрологических характеристик СИТ к допустимым предельным значениям. Это приводит к необходимости разработки специальных методов анализа метрологической надежности средств измерительной техники.

Анализ литературы. Вопросу исследования законов распределения характеристик надежности СИТ посвященное большое число работ, например [4 – 6]. Однако они не учитывают специфики метрологической надежности СИТ, которая заключается в том, что для нее основное положение классической теории надежности про постоянство во времени интенсивности отказов является неправомерным. Теория надежности ориентируется на изделия, которые характеризуются двумя характерными состояниями: работоспособное и неработоспособное. Постепенное изменение погрешности СИТ позволяет ввести несколько работоспособных состояний с разными уровнями эффективности функционирования, обусловленных степенью приближения погрешности СИТ до допустимых граничных значений. Это в свою очередь, приводит к невозможности определения достоверных параметров эксплуатации СИТ. Эта проблема особенно актуальна для СИТ, которые эксплуатируются в составе сложных энергетических объектов (СЭО), таких, например, как АЭС, ГЭС и др. Неверные показания СИТ могут привести к неправильным выводам, что может послужить появлению аварийной ситуации на СЭО.

Цель статьи. В статье решается актуальная задача, связанная с исследованием закона распределения нестабильности метрологических характеристик средств измерительной техники сложных энергетических объектов. Определение основных характеристик закона распределения нестабильности метрологических характеристик позволит повысить эффективность эксплуатации СЭО за счет своевременного обнаружения неисправных СИТ и прогнозирования их реального технического состояния.

Основная часть

Известно, что при параболической интенсивности дрейфа метрологических характеристик средств измерительной техники сложных энергетических объектов закон распределения нестабильности метрологических характеристик СИТ СЭО уже не является нормальным. Однако его можно рассматривать как нормальное распределение относительно интенсивности дрейфа метрологических характеристик СИТ:

$$G(t,\xi) = \Psi(t,\xi)\sigma(0) + m(0),$$

где $\Psi(t,\xi)$ – решение дифференциального уравнения регрессии дрейфа метрологических характеристик СИТ; $\sigma(0)$ – дисперсия в момент времени $t = 0$; $m(0)$ – математическое ожидание в момент времени $t = 0$; ξ – нестабильность метрологических характеристик СИТ.

Особенностью СИТ, эксплуатируемыми в СЭО, является то, что они продолжительное время функционируют в дежурном режиме и должны постоянно при этом контролировать большое количество энергетических параметров. Эти особенности эксплуатации СИТ учтены в функции ξ.

Функция $\Psi(t,\xi)$ имеет исключительно важное значение в теории метрологической надежности СИТ. Ее физический смысл заключается в преобразовании метрологических характеристик СИТ к начальной точке отсчета времени. При линейной интенсивности дрейфа $G(t,\xi) = (\xi - m(t))/\sigma(t)$, при параболической $G(t,\xi)=\dfrac{\xi-m(t)+\sigma(t)e^{-R(t)}u(t)}{\sigma(t)e^{-R(t)}+[\xi-m(t)]u(t)}$.

Поясним ее смысл. В начальный момент времени функция $G(0,\xi)=\left(\xi-m(0)\right)/\sigma(0)$ равна центрированному и нормированному значению начальной нестабильности ξ_0. Так как $P(0,\xi)=\int\limits_{-\infty}^{G(0,\xi)}\varphi(\eta)d\eta$, то $G(0,\xi)$ является квантилем нормального распределения, соответствующим вероятности $P(0,\xi)$. В процессе дрейфа значения $G(0,\xi)$ изменяются по закону $G(t,\xi)$, но и при этом указанная связь сохраняется: при любом t функция $G(t,\xi)$ является квантилем нормального распределения, соответствующим вероятности $P(t,\xi)$. В частности, $G(t,\Delta)$ соответствует вероятности $P(t,\Delta)$ того, что нестабильность ξ не превысит верхней границы области допускаемых значений Δ, $G(t,\Delta)$ соответствует аналогичной вероятности $[1-P(t,-\Delta)]$. Таким образом, $G(t,\Delta)$ является своеобразной характеристикой распределения дрейфа метрологических характеристик. Назовем ее функцией дрейфа. После введения этого термина легко формулируется общее правило:

Нестабильность метрологических характеристик любого СИТ за время t распределена по нормальному закону с нулевым средним значением и единичной дисперсией относительно функции дрейфа $G(t,\Delta)$.

Частным случаем распределения нестабильности является α-распределение [7]:

$$\phi_t(\xi)=\left(\beta(t)/\sqrt{2\pi}\xi^2\right)\cdot\exp\left(-0,5\cdot\left(\beta(t)/\xi-\alpha(t)\right)^2\right),$$

которое получается из соотношения

$$\varphi_t(\xi)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\cdot\frac{\partial G(t,\xi)}{\partial\xi}e^{-G^2(t,\xi)};\quad G(t,\xi)=\frac{\beta(t)}{\xi}-\alpha(t),\qquad(1)$$

где $\alpha(t)=\dfrac{1}{u(t)}$; $\beta(t)=\dfrac{[1-u^2(t)]\sigma(t)e^{-R(t)}}{u(t)}$,

$$R(t)=\int\limits_0^t\frac{\gamma(\tau)\gamma'(\tau)}{3[\omega(\tau)-\gamma^2(\tau)-1]}d\tau,\qquad(2)$$

промежуточная функция параметров $\omega(\tau)$ и $\gamma(\tau)$;

$$u(t)=\int\limits_0^t\frac{\gamma'(\tau)e^{-R(\tau)}}{3[\omega(\tau)-\gamma^2(\tau)-1]}d\tau\qquad(3)$$

функция параметров $\omega(\tau)$ и $\gamma(\tau)$; Δ – допуск на параметр СИТ; $P(t,\xi)$ – функция распределения нестабильности метрологических характеристик СИТ; $\omega(t)$ – эксцесс распределения нестабильности метрологических характеристик СИТ; $\gamma(\tau)$ – коэффициент асимметрии дрейфа характеристик СИТ в момент времени τ; $\varphi_1(\xi)$ – плотность распределения нестабильности характеристик СИТ за временя t.

С другой стороны, функция (1) является обобщением нормального закона и так же удобно для практического применения, так как использовать табулированную функцию Лапласа.

Найдем статистические характеристики распределения $\varphi_1(\xi)$. Медиана распределения метрологических характеристик СИТ СЭО Me находится из уравнения $P(t,\xi)=0,5$. Следовательно,

$$Me=m(t)-u(t)\sigma(t)e^{-R(t)}.$$

Мода распределения метрологических характеристик СИТ СЭО Mo находится из уравнения $\dfrac{\partial\phi_t(\xi)}{\partial\xi}=0$, т.е. $Mo\cong m(t)-\dfrac{2u(t)}{1+u^2(t)}\sigma(t)e^{-R(t)}$.

Математическое ожидание и дисперсия реального распределения нестабильности метрологических характеристик СИТ СЭО по определению равны m (t) и $\sigma^2(t)$. Но $\varphi_1(\xi)$, так же как распределение Коши и ряд других теоретических распределений, строго говоря, не имеет математического ожидания и дисперсии, так как соответствующие интегралы расходятся при $\xi=\infty$. Для устранения этого несоответствия целесообразно провести усечение распределения $\varphi_1(\xi)$ по некоторому значению функции $B[u(t)]$, выбранному таким образом, чтобы

$$M[\varphi_t^*(\xi)]=m(t),\qquad D[\varphi_t^*(\xi)]=\sigma^2(t),$$

где $$M[\varphi_t^*(\xi)]=m(t),\qquad D[\varphi_t^*(\xi)]=\sigma^2(t),$$

$$\phi_t^*(\xi)=1\Bigg/\int\limits_{-\infty}^{B[u(t)]}\phi_t(\xi)\partial\xi\cdot\begin{cases}\phi_t(\xi), & \xi\le B[u(t)],\\ 0, & \xi>B[u(t)].\end{cases}$$

$$Me=m(t)-u(t)\sigma(t)e^{-R(t)},$$

$$Mo=m(t)-2u(t)\Big/\left(1+u^2(t)\right)\sigma(t)e^{-R(t)},$$

$$\xi_0=m(t)-\left(1/u(t)\right)\sigma(t)e^{-R(t)}.$$

Таким образом, получены два уравнения относительно $B[u(t)]$ и $R(t)$:

$$\int\limits_{-1/u(t)}^{B[u(t)]}\frac{x}{[1+xu(t)]^2}e^{-0,5[\frac{x+u(t)}{1+xu(t)}]^2}\partial x=0,$$

$$\frac{1-u^2(t)}{\sqrt{2\pi}}\int\limits_{-\frac{1}{u(t)}}^{B[u(t)]}\frac{x^2}{[1+xu(t)]^2}e^{-0,5[\frac{x+u(t)}{1+xu(t)}]^2}\partial x=e^{-2R(t)},$$

где $x=\left(\xi-m(t)\right)/\sigma(t)$.

Далее, необходимо установить связь между u(t) и R(t), входящими в выражение плотности $\varphi_1(x)$, и коэффициентом асимметрии γ(t) и эксцессом ω(t). Для этого воспользуемся формулами (2) и (3). Продифференцировав их по γ(t), получим:

$$\frac{\partial R(t)}{\partial\gamma(t)}=\frac{\gamma(t)}{3[\omega(t)-\gamma^2(t)-1]};\quad \frac{\partial u(t)}{\partial\gamma(t)}=\frac{e^{-R(t)}}{3[\omega(t)-\gamma^2(t)-1]},$$

т.е. $\gamma(t)=\dfrac{\partial R(t)}{\partial u(t)}e^{-R(t)}$; $\omega(t)=1+\gamma^2(t)+\dfrac{\gamma(t)}{3}\cdot\dfrac{\partial\gamma(t)}{\partial R(t)}$.

Объединяя эти уравнения с первыми двумя, получаем систему из 4-х уравнений относительно неизвестных $B[u(t)]$, $R(t)$, $\gamma(t)$ и $\omega(t)$. Эта система решается последовательно для $u_1 = u(t_1)$ с шагом Δu. На первом шаге $u_1 = 0$, $\gamma_1 = 0$, $\omega_1 = 3$, $R_1 = 0$, $B_1 = \infty$, так как $\varphi_0(x)$ – плотность нормального распределения метрологических характеристик СИТ СЭО. На втором и всех последующих шагах $u_i = u_{i-1}+\Delta u$, B_i определяется из уравнения

$$\int\limits_{-1/u_i}^{B_i} \frac{x}{[1+xu_i]^2} e^{-0,5[\frac{x+u_i}{1+xu_i}]^2} \partial x = 0, \qquad (4)$$

R_i – из уравнения

$$\frac{1-u_i^2}{\sqrt{2\pi}} \int\limits_{-1/u_i}^{B_i} \frac{x^2}{[1+xu_i]^2} e^{-0,5[\frac{x+u_i}{1+xu_i}]^2} \partial x = e^{-2R_i}, \qquad (5)$$

γ_i и ω_i – из уравнений:

$$\gamma_i = \frac{R_i - R_{i-1}}{\Delta u} e^{-R_i}; \quad \omega_i(t) = 1 + \gamma_i^2 + \frac{\gamma_i}{3} \cdot \frac{\gamma_i - \gamma_{i-1}}{R_i - R_{i-1}}. \qquad (6)$$

Решение системы уравнения (4 - 6) на ПЕВМ показало, что с высокой точностью $B[u(t)] = 6$, а параметры $u(t)$, $R(t)$ и $\omega(t)$ можно представить в виде следующих интерполяционных полиномов, полученных методов наименьших квадратов:

$$R(t) = \begin{cases} 0{,}01[0{,}0047 - 0{,}148|\gamma| + 8{,}5|\gamma|^2 + 0{,}05|\gamma|^3 - \\ -2{,}6|\gamma|^4 + 0{,}7|\gamma|^5], \ \gamma = \gamma(t) \neq 0, \\ 0, \qquad \gamma = \gamma(t) = 0, \end{cases}$$

$$u(t) = \begin{cases} 0{,}01\operatorname{sign}(\gamma)[0{,}0055 + 16{,}56|\gamma| + 0{,}59|\gamma|^2 - \\ -4{,}57|\gamma|^3 + 1{,}48|\gamma|^4 - 0{,}1|\gamma|^5], \ \gamma = \gamma(t) \neq 0; \\ 0, \qquad \gamma = \gamma(t) = 0, \end{cases}$$

$$\gamma(t) = \begin{cases} \operatorname{sign}(u)[-0{,}0174 + 9|u| - 127|u|^2 + 2103|u|^3 - \\ -14212|u|^4 + 36055|u|^5], \qquad u = u(t) \neq 0; \\ 0, \qquad u = u(t) = 0. \end{cases}$$

Таким образом, окончательно принимаем следующую зависимость плотности распределения нестабильности метрологических характеристик СИТ СЭО от времени. При $\gamma(t) > 0$

$$\phi_t(\xi) = \begin{cases} \phi[G(t,\xi)], \ m(t) - \sigma(t)e^{-R(t)}/u(t) \le \xi \le 6\sigma(t), \\ 0, \quad \xi < m(t) - \sigma(t)e^{-R(t)}/u(t); \quad \xi > 6\sigma(t); \end{cases} \qquad (8)$$

а при $\gamma(t) < 0$

$$\phi_t(\xi) = \begin{cases} \phi[G(t,\xi)], \ -6\sigma(t) \le \xi \le m(t) - \sigma(t)e^{-R(t)}/u(t); \\ 0, \quad \xi > m(t) - \sigma(t)e^{-R(t)}/u(t); \quad \xi < -6\sigma(t). \end{cases} \qquad (9)$$

Из выражений (8) и (9) следует, что при статистической обработке результатов испытаний на нестабильность значения $\xi(t)$, превышающие по модулю $6\sigma(t)$ следует исключить из выборки, квалифицируя их как промахи.

Выводы

В результате исследования нестабильности метрологических характеристик СИТ СЭО получена зависимость плотности распределения нестабильности метрологических характеристик СИТ СЭО от времени. Сделаны предложения по использованию полученной зависимости при статистической обработке результатов испытаний на нестабильность СИТ СЭО.

Список литературы

1. *Кудрицкий В.Д. Прогнозирующий контроль радиоэлектронных устройств. – К.: Техника, 1982. – 168 с.*
2. *Оценка эффективности и параметрический синтез метрологического обслуживания радиоаппаратуры / Отв. за выпуск Е.И. Сычев. – М.: МО СССР, 1984. – 385 с.*
3. *Основы эксплуатации средств измерений / В.А. Кузнецов, А.Н. Пашков, О.А. Подольский и др. / Под ред. Р.П. Покровского. – М.: Радио и связь, 1984. – 184 с.*
4. *Метрологическое обеспечение и эксплуатация измерительной техники / Г.П. Богданов, В.А. Кузнецов и др. – М.: Радио и связь, 1990. – 240 с.*
5. *Фридман А.Э. Теория метрологической надежности средств измерений // Измерительная техника. – 1991. – № 11. – С. 3-10.*
6. *Фридман А.Э. Оценка метрологической надежности измерительных приборов и многозначных мер // Измерительная техника. – 1993. – № 5. – С. 7-10.*
7. *Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 480 с.*

Поступила в редколлегию 11.04.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.К. Волосюк, Харьковский аэрокосмический университет «ХАИ», Харьков.

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСТАБІЛЬНОСТІ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ СКЛАДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

М.Ю. Яковлєв, С.В. Герасимов, О.Б. Нікітюк

Вирішується актуальне завдання, пов'язане з дослідженням закону розподілу нестабільності метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки складних енергетичних об'єктів. Визначення основних характеристик закону розподілу нестабільності метрологічних характеристик дозволить підвищити ефективність експлуатації СЕО за рахунок своєчасного виявлення несправних СИТ і прогнозування їх реального технічного стану.

Ключові слова: *надійність засобів вимірювальної техніки, параметри розподілу, метрологічні характеристики.*

RESEARCH OF INSTABILITY OF METROLOGY DESCRIPTIONS OF FACILITIES OF MEASURING TECHNIQUE OF THE DIFFICULT POWER OBJECTS

M.Yu. Yakovlev, S.V. Gerasimov, O.B. Nikityuk

Aktual'naya decides task, related to research of law of distributing of instability of metrology descriptions of facilities of measuring technique of difficult power objects, decides. Determination of basic descriptions of law of distributing of instability of metrology descriptions will allow to promote efficiency of exploitation of SEO due to the timely exposure of defective SIT and prognostication of them the real technical state.

Keywords: *reliability of facilities of measuring technique, distributing parameters, metrology descriptions.*