электрических машин и аппаратов. — 1975. — №1. — С.25—29.
5. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов. Серия «Трансформаторы». Выпуск 36. Перевод с венгерского / Л. Киш. — М. : Энергия. — 1980. — 208 с.: ил.
6. Готтер Г. Нагрев и охлаждение электрических машин / Г. Готтер. — М. : нергоиздат. 1956. — 480с.: ил.
7. Протокол испытаний ОАХ 128 159. 066. Исследование теплоотдачи обмоток с радиальной шириной 50 мм при естественном движении масла. Введен 23.11.76 / Ю. А. Михайловский, Л. В. Васильев, И. И. Щукина. — Запорожье : ВИТ. 1976. — 68 с.: черт.
8. Яковлєва І. Г. Математичне моделювання теплообмінних процесів в обмотках трансформаторів з висотою горизонтального каналу менше 3 мм / І. Г. Яковлєва, С. В. Ільїн // Математичне моделювання. Науковий журнал. Дніпродзержинськ : 2010. — №1(22). — С.82—86.

пост.10.11.14

Исследование параметров надежности аппарата «искусственная почка»

С. К. МЕЩАНИНОВ, Б. Р. КУРИЛО

Днепродзержинский государственный технический университет

Приведены данные аналитических исследований параметров, определяющих надежность функционирования комплекса аппарата «искусственная почка». Получено математическое выражение векторного функционала, который является математической моделью надежности функционирования аппарата «искусственная почка». Сделан вывод о том, что полученная математическая модель является полностью определенной, если определен ее вид и известны численные значения ее параметров.

Приведені дані аналітичних досліджень параметрів, що визначають надійність функціонування комплексу апарату «штучна нирка». Отримано математичний вираз векторного функціоналу, який є математичною моделлю надійності функціонування апарату «штучна нирка». Зроблений висновок про те, що отримана математична модель є повністю визначеною, якщо відомий її вид і визначені чисельні значення її параметрів.

Presented the data of analytical researches parameters, qualificatory reliability of functioning of vehicle «artificial bud». Mathematical expression of victories functional which is the mathematical model of reliability functioning of vehicle «artificial bud» is got. Drawn conclusion that the got mathematical model is fully certain, if its kind are certain and the numeral values of its parameters are known.

Введение. Надежность определяют как свойство объекта сохранять во времени способность к выполнению требуемых функций в заданных режимах и условиях эксплуатации. Это определение, широко используемое в международной литературе, включает в себя, как частный случай, параметрическое определение понятия надежности, согласно которому надежность есть свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Постановка задачи исследований. Понятие надежности тесно связано с понятием долговечности. Под долговечностью понимают свойство системы, обеспечивающее её длительную эффективность при заданных условиях эксплуатации. За меру долговечности обычно принимается либо время работы системы от начала эксплуатации до выхода из строя, либо полная наработка (то есть суммарное время полезного функционирования). Долговечность системы является случайной величиной. Особенно важна надежность в случае использования аппарата «искусственная почка» (ИП), от правильной работы которой зависит, по существу, весь ход технологического процесса любого современного производства. Таким образом, **целью настоящей работы** является исследование параметров, определяющих надежность функционирования медико-биологической аппаратуры как сложной технической системы.

Применительно к анализу надежности функционирования комплекса аппарата ИП как сложной (большой) технической системы, представляется наиболее целесообразным использовать многостадийную модель накопления повреждений, отражающую тот факт, что многие процессы потери работоспособности (накопления повреждений) состоят из двух или более стадий, каждая из которых протекает по своим законам. Болотин в 1959 г. [1] предложил многостадийную модель в сочетании с гипотезой об автомодельности для каждой стадии в отдельности. Так, введя безразмерное время, отнесенное к продолжительности каждой стадии, выражение для меры повреждения для b-й подсистемы (процесса) можно записать следующим образом:

$$\psi_b(t)=\psi_{k-1}+(\psi_k-\psi_{k-1})g_k\left[\frac{t-T_{b,k-1}(q)}{T_{b,\,k}(q)-T_{b,\,k-1}(q)}\right], \quad (1)$$

$T_{b,\,k-1}(q)<t\le T_{b,\,k}(q);\ k=1,...,m.$

где ψ_{k-1} и ψ_k – меры повреждений, соответствующие началу и завершению k–й стадии ($\psi_0=0,\ \psi_m=1$); $T_{b,\,k-1}(q)$, $T_{b,\,k}(q)$ – моменты начала и завершения k–й стадии при q=const $\left(T_{b,\,k}(q)=0\right)$; q – интенсивность действия повреждающего фактора.

Продифференцировав полученное уравнение по *t* можно записать следующую систему уравнений:

$$\frac{d\psi}{dt}=\begin{cases}\psi_1 f_1(\psi)/T_{b1}(q),\ (0\le\psi\le\psi_1),\\ (\psi_2-\psi_1)f_2(\psi)/[T_{b2}(q)-T_{b1}(q)],\ (\psi_1<\psi<\psi_2),\\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots,\\ (\psi_m-\psi_{m-1})f_m(\psi)/[T_{bm}(q)-T_{b,\,m-1}(q)],\\ \qquad (\psi_{m-1}<\psi\le 1).\end{cases} \quad (2)$$

Здесь функции $f_k(\psi)$ удовлетворяют условиям:

$$\int_0^{\psi}\frac{d\psi}{f_1(\psi)}\int_0^t f_2[q(\tau)]d\tau,\quad \int_0^1\frac{d\psi}{f_1(\psi)}=1. \quad (3)$$

Для каждой стадии в отдельности уравнение (2) допускает решение путем разделения переменных. В результате можно прийти к следующей последовательности уравнений:

$$\int_{T_{k-1}}^{T_k}\frac{d\tau}{T_{bk}[q(\tau)]-T_{b,\,k-1}[q(\tau)]}=1,\ (k=1,....,m), \quad (4)$$

решив которые можно найти значения $T_1,...,T_m$. Очевидно, что полный ресурс $T_l=T_m$ ([2]).

Как известно, основным показателем надежности, является коэффициент готовности $k_г$, который имеет реальный экономический смысл только для простых систем, работающих с постоянной нагрузкой [3]. В этом случае он позволяет определить средний работоспособность аппарата. ИП, работает в условиях современных высокоавтоматизированных систем с переменными нагрузками. Поэтому их коэффициент готовности не может быть единственным критерием надежности. Надежность работы ИП и ее основных элементов можно оценить лишь с помощью системы взаимоувязанных критериев, учитывающих безопасность, точность и экономичность реализации необходимых функций.

Кроме коэффициента готовности существует также ряд показателей, совокупность которых образует полный набор параметров, определяющих надежность функционирования ИП. К ним относятся:

<u>Коэффициент простоя системы</u>, $Q_s(t)$ – вероятность того, что конечное событие (отказ, авария) существует в момент времени t. Это есть вероятность отказа системы или вероятность отдельного опасного состояния системы в момент времени t, зависящий от конечного события. Коэффициент простоя системы является дополнением коэффициента готовности:

$$k_г(t)+Q_s(t)=1. \quad (5)$$

<u>Показатель надежности системы</u>, $R_s(t)$ – вероятность того, что конечное событие не случится в интервале времени $[0,\ t]$. Справедливо неравенство:

$$R_s(t)\le k_г(t). \quad (6)$$

<u>Показатель ненадежности системы</u>, $F_s(t)$ – вероятность того, что конечное событие случится до момента времени t. Этот показатель является дополнением показателя надежности:

$$\begin{aligned}&R_s(t)+F_s(t)=1,\\ &F_s(t)\ge Q_s(t).\end{aligned} \quad (7)$$

<u>Плотность вероятности отказов</u>, $f(t)$:

$$f(t)=\frac{dF_s(t)}{dt} \quad (8)$$

Вероятность возникновения k перерывов всех видов распределена по закону Пуассона:

$$P(k)=\frac{\lambda^k}{k!}e^{-\lambda}. \quad (9)$$

По аналогии с результатами работы [4], производственная функция комплексе ИП (величина, характеризующая её точность исследования с заданной эффективностью), имеет вид:

$$\Phi=\begin{cases}\Phi_{max},\ \text{при}\ P=P_{max},\\ \Phi,\ \text{при}\ P_{доп}\le P\le P_{max},\\ 0,\ \text{при}\ P\lhd P_{доп}.\end{cases} \quad (10)$$

Тогда относительное приращение эффективности функционирования ИП $\Delta E(t)$ по аналогии с данными работы [5]:

$$\Delta E(t)=\frac{\Phi_д(t)-\Phi(t)}{\Phi_{ди}(t)-\Phi(t)}, \quad (11)$$

где $\Phi(t)$ и $\Phi_д(t)$ – показатели эффективности соответственно недиагностируемой и диагностируемой частей ИП; $\Phi_{ди}(t)$ – показатель эффективности ИП при осуществлении идеального диагностирования (без затрат и потерь).

Для обеспечения эксплуатационной надежности и безопасности современные комплексы ИП снабжаются, как правило, системами мониторинга [4]. Под мониторингом понимается научно спроектированная система (средства и методы) непрерывных наблюдений и измерений с применением соответствующих оценочных процедур (идентификации, анализа текущего состояния, распознавания особых ситуаций, краткосрочного (1 – 2 с) и долговременного (минуты, часы…) прогнозирования и автоматического принятия оперативных и тактических решений. Общая схема аппаратной реализации системы мониторинга состоит из датчиков с интерфейсами, устройств буферного хранения информации и пакета прикладных программ, осуществляющих соответствующие оценочные процедуры в реальном масштабе времени, терминала с дисплеем и человеком–оператором, каналов обратной связи с сервомеханизмами и системами предотвращения и защиты.

Математическая модель функционирования объекта контроля в общем случае может быть представлена следующим образом:

$$F(X,K,U,t)=0, \quad (12)$$

где $X=[x_1(t),x_2(t),...,x_m(t)]$ – вектор–функция выходных реакций;

$K=[k_1,k_2,...,k_n]$ – вектор параметров математической модели;

$U=[U_1(t), U_2(t),..., U_l(t)]$ – вектор–функция входных воздействий.

Математическая модель (12) считается полностью известной, если определены вид модели (например, разностная, дифференциальная, логические соотношения и т.п.) и численные значения ее параметров.

Показатель качества и эффективности функционирования аппарата ИП можно представить векторным потенциалом: $\vec{\Phi}=[\Phi_1, \Phi_2,...,\Phi_p]$, где компоненты Φ_i, $(i=1,..., p)$ – технические характеристики ИП, определяющие ее способность выполнять исследования. Показатель Φ задается двумя способами:

1. На множестве входных воздействий и параметров ИП:

$$\Phi=\Phi(K, U). \quad (13)$$

2. На множестве входных воздействий и выходных реакций:

$$\Phi=\Phi(X, U). \quad (14)$$

Формула (14) характерна для этапа проектирования, так как вытекает из логики создания технической системы – в ходе проектирования известны входные воздействия U, выбираются параметры создаваемой аппаратом ИП K, а следовательно и математическая модель ее функционирования (12).

Задание показателя Φ в форме (14) целесообразно для случаев, когда входные и выходные характеристики объекта контроля могут быть относительно легко измерены.

Техническое состояние ИП можно выразить аналитически следующим образом:

$$\frac{dx}{dt}=Q(x, y, z, t), \quad (15)$$

где x – техническое состояние ИП; y и z – факторы, соответственно ухудшающие и восстанавливающие техническое состояние ИП; – текущее время.

Обозначая $Q(x, y, z, t)=k$, соотношение (15) можно переписать следующим образом:

$$Q(k+1)=Q(k)+f'[Q(k)], \quad (16)$$

или уравнением в конечных разностях:

$$x=\sum_{k=0}^{n}[Q(k)+\Delta f[Q(k)]]. \quad (17)$$

Изменение уровня надежности функционирования ИП определяется действием внезапных и постепенных отказов, закономерность которого выражает функция вероятности безотказной работы:

$$P(t)=1-[P_1(t)][1-P_2(t)], \quad (18)$$

где $P_1(t)$, $P_2(t)$ – вероятности безотказной работы выработки соответственно при постепенных и внезапных отказах.

По данным работы [3] вероятность безотказной работы при постепенных отказах ИП подчиняется гамма–закону, а при внезапных – экспоненциальному. Таким образом, вероятность безотказной работы может быть представлена зависимостями: $P_1(t)=\sum_{k=1}^{r-1}\frac{(\omega t)^k}{k!}e^{-\omega t}$ – функция гамма–распределения; $P_2(t)=e^{-\lambda t}$ – экспоненциальная функция; r – число нарушений, вызывающих отказ; ω – параметр потока постепенных отказов.

Тогда, учитывая последние выражения, функция вероятности безотказной работы выражается зависимостью:

$$P(t)=1-\left(\sum_{k=1}^{r-1}\frac{(\omega t)^k}{k!}e^{-\omega t}\right)\left(1-e^{-\lambda t}\right)=1-\sum_{k=2}^{\infty}\left[\frac{(\omega t)^k}{k!}e^{-\omega t}\right]\times \times\left(1-e^{-\lambda t}\right) \quad (19)$$

С экономической точки зрения, анализ эффективности функционирования ИП заключается в определении двух составляющих затрат: затрат на создание и эксплуатацию ИП Z_1 и затрат, обусловленных ненадежностью ее функционирования Z_2. Сравнение величин Z_1 и Z_2 позволяет сделать вывод об экономической целесообразности достижения данного уровня надежности функционирования аппарата ИП.

В качестве критерия экономической эффективности, как правило, рассматривают средние удельные приведенные затраты – затраты, рассчитанные за весь период использования аппарата ИП и отнесенные к количеству проведенных исследований. При анализе функционирования ИП, средние удельные затраты Z представляют собой затраты, отнесенные к суммарному количеству проводимых исследований C за рассматриваемый период эксплуатации всего технологического цикла:

$$Z=(Z_1+Z_2)/C. \quad (20)$$

Затраты на создание и эксплуатацию комплекса ИП – Z_1, то есть капитальные и эксплуатационные затраты можно представить в следующем виде:

$$Z_1=\sum_{t=1}^{T}(W_н k_t+Є_t)\beta_t, \quad (21)$$

где k_t, $Є_t$ – капитальные и эксплуатационные затраты за t-й период времени (месяц, квартал, сутки); T – продолжительность эксплуатации ИП; $W_н$, β_t – нормативные коэффициенты.

Затраты Z_2, связанные с ненадежностью ИП состоят из двух частей:

- затраты на устранение отказов ИП и затраты на проведение мероприятий, направленных на снижение влияния дестабилизирующих работу факторов.

Выводы

Проанализированы основные параметры, определяющие надежность функционирования современных комплексов ИП применительно к функционированию системы защиты пациента во время проведения исследований. Показано, что математическая модель надежности функционирования ИП может быть представлена в идее векторного функционала. С его использованием такая модель может считаться полностью определенной, если известны её вид и численные значения ее параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болотин В. В. Ресурс машин и конструкцій / В. В. Болотин — М. : Машиностроение. 1990. — 448 с.
2. Надежность и эффективность в технике : Справочник в 10 т. Т.8. Эксплуатация и ремонт. — М. : 1990. — 320 с.
3. Дерябин И. И. Искусственная почка. Методика и практическое применение / Б. С. Иванов, А. В. Будаев, В. В. Москва // 1973. — №9. — С.55—57.
4. Портативная экстракорпоральная система Кортэкс 01/02 для санитарной авиации и скорой медицинской помощи. КНГЖ. 408732 ТП,П3. — М. : ГосЦНИРТИ/НПП “Кортэкс”. — 406 с.
5. Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10 т. Т.9. Техническая диагностика. — М. : Машиностроение. 1987. — 352 с.
6. Червоный А. А. Надежность сложных систем. / А. А. Червоный, В. И. Лукьященко — М. : Машиностроение. 1976. — 288 с.

пост.17.11.14