

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА НА РАБОТОСПОСОБНОСТТА НА ОПЕРАТОРА В СЛОЖНА ЧОВЕКО-МАШИНА СИСТЕМА

З. Хубенова, А. Андонов*

ИКИ – БАН, e-mail: zhubenova@space.bas.bg
*ВТУ "Т. Каблешков", София, e-mail: andonov@vtu.bg

ANALYSIS AND ESTIMATION THE HUMAN OPERATOR FITNESS TO WORK IN COMPLEX MAN-MACHINE SYSTEM

Z.Hubenova, A.Andonov*

Space Research Institute - BAS, e-mail: zhubenova@space.bas.bg
*University of Transport Todor Kableshkov, Sofia, e-mail: andonov@vtu.bg

Key words: man – machine system, operator, efficiency.

Abstract: The human acts as operator or makes ergadic reservation in the complex programme supported man-machine system. The target of work is to give possibility directions for formalization and approach development for human-operator estimation.

Сложните човеко-машинни системи (ЧМС) съдържат в своята структура следните компоненти: технически средства, програмно осигуряване и човека-оператор (ЧО) или група оператори. Качеството на функциониране на такива системи се свързва с тяхната работоспособност или както е прието в техническата литература – с тяхната надеждност. Прилагането на термина надеждност към сложните човеко-машинни системи, обаче е дискуссионно. Сложните ЧМС са системи със структурен и информационен излишък. Техните елементи притежават адаптивност и приспособляемост в смисъл на самоорганизация към условията на функциониране. Затова за такива системи е неправомерно да се приложи термина надеждност, а при тях е трудно да се дефинира понятието отказ. Работоспособността на посочените системи съществено ще зависи от надеждността, респективно работоспособността на всичките три компонента. В съответствие с това комплексният модел на функциониране на сложните ергадични системи ще съдържа три иерархични нива. Първото ниво представлява модела на състоянията на системата – техническите устройства и програмното осигуряване, оператор, среда. Второто ниво представлява модел на движението на системата в пространството на състоянията, включващо управлението на състоянията, описващи динамиката на системата и управление на наблюдението, определящо механизма на образуване на данните, достъпни за измерване и контрол, както и модел на дейността на оператора по отношение на целите на управление, свеждан най-често към

алгоритмични модели на последователности от елементарни управляващи въздействия в различни ситуации. Третото ниво включва различни частни модели като необходими елементи на модела от второто ниво.

Трябва да се подчертае, че надеждността на техническите средства е изследвана достатъчно пълно и са постигнати значителни постижения в изучаване на надеждностните свойства на програмното осигуряване. Същевременно обаче, надеждностните свойства на работоспособността на оператора, в частност и въобще на живите организми като цяло е слабо изучена, което се обуславя от настоящия момент на еволюцията на системите от прости към сложни.

Тъй като моделирането на дейността на човека представлява изключително сложна задача, изискващо разбиране и описание на много фини психофизиологични процеси, в настояще време е невъзможно адекватно да се опише поведението на ЧО във всички възможни ситуации. Възможно е обаче разработването на практически полезни модели на неговите действия, описвани чрез различни алгоритми, определящи последователността на изпълнение на елементарни операции за решаването, изпълнението и постигането на дадени задачи и цели. Формирането на специални алгоритми и тяхното практическо усвояване позволява да се съкрати процеса на разпознаване на неопределена ситуация, да се противопостави на неизправността (психологически стрес) с готов механизъм на действие. Показателите по които се оценяват алгоритмите са следните:

– стеритипност Z – оценява се по наличието в алгоритъма от непрекъснати последователности на елементарни действия без логически условия, а също и според дължината на тези последователности:

$$(1) \quad Z = \sum_{n=1}^Q P_n^{(o)}, X_n^{(o)} \quad ,$$

където $X_n^{(o)}$ е броят на последователните операции в групата без логически условия; $P_n^{(o)}$ е честотата, с която се срещат отделните групи.

– логическа сложност:

$$(2) \quad L = \sum_{n=1}^m P_n X_n \quad ,$$

където X_n броят на проверяемите логически условия в група, а P_n - честотата на тези групи.

В общия случай за описание на елементарните действия са достатъчни четири типа модели: на информационното търсене, възприемане на информацията, приемане на решения и изпълнението им. По същество търсенето и възприемането на информацията, приемането на решение и контрол на резултата, протича като единен сензорно-логичен процес. Като първо приближение елементарните действия на оператора могат да бъдат характеризирани с математическото очакване на времето необходимо за информационно търсене и изпълнение, както и възможната дисперсия за оператори с различна подготовка. Основният параметър на процеса на информационно търсене зависи от обема на информационното поле, т.е. от броя на обектите N , доставящи на ЧО необходимата информация и броя на обектите M , притежаващи исканите признаци. Ако търсенето е случайно, без запомняне на разглежданите обекти и следващата стъпка на търсене не зависи от предходната, то математическото очакване на броя на стъпки на търсене е [1]:

$$(3) \quad E_T = p + 2pq + 3pq^2 + \dots \quad ,$$

където p е априорната вероятност за определяне на искания обект за произволна стъпка на търсене; $q = 1 - p$, а формулата за времето на търсене t_n е:

$$(4) \quad t_n = E_T \cdot t_{\text{фик.}} \quad ,$$

където $t_{\text{фик.}}$ е средната продължителност за зрителна фиксация. Времето за търсене зависи и от тактиката на търсене. В случай че информационно търсене е със запомняне, тогава:

$$(5) \quad t_u = \frac{(N/\alpha) + 1}{M + 1} t_{\text{фик.}} \cdot$$

Математическият модел на процеса на възприемане на информацията от оператора трябва да дава оценка за броя на възприеманите за даден интервал от време сигнали и за тяхната информативност. Такива оценки могат да бъдат получени на базата на теоретико-информационен подход, въз основа на добре разработени модели за дискретни информационни канали за връзка. При този подход може да се осигури еднаквост на количествените съотношения за различни задачи, възникващи при изследване действията на оператора в ергадични системи. ЧО е подходящо да се разглежда като информационен канал в тези случаи на поведение, които могат да опишат неговите реакции на дразнителни (стимули). В зависимост от степента до която ЧО свързва или допълва физическите канали за връзка или управление в човеко-машинните системи, неговото поведение и свойствата на физическите канали могат количествено да се оценяват с един и същи единици. Използваните при това мерки за информация количествено определят връзката между входния сигнал и определен брой набор от изходни реализации. Трябва да се подчертае, че информационният подход е изключително подходящ за изучаване поведението на ЧО по схемата стимул-реакция. Това се дължи на факта, че същия не изисква количествено измерване на събитията на входа и изхода, а само тяхната различимост, защото описва само статистическата близост на входа и изхода и не е нужно да отчита свързващите ги причинно-следствени връзки. Освен това в дадения метод се използват количествени отношения, еднакви за различните задачи, които възникват при съпоставяне на действията на човека в машината.

Направения до тук анализ на характера на операциите, изпълнявани от ЧО позволява те да се класифицират както следва: групи единици операции, образуващи определена последователност и имащи признаци за начало и край; единични операции, необходимостта от изпълнение на които възниква с периодичност като например контрол на режими, коригиращи действия, сеанси за връзка и т.н. Последователността на операциите служи за основа при разработването на алгоритмични модели на действие L . В теорията на масовото обслужване сумарният поток от заявки за операции $\varphi(t)$, образуван от ред елементарни потоци стандартни операции се определя както следва:

$$(6) \quad \varphi(t) = \sum_{k=1}^n \varphi_k(t); \quad k = 1, 2, \dots, n \quad ,$$

където $\varphi_k(t)$ са елементарните потоци операции; n – е броят на елементарните потоци, образуващи сумарния поток.

Времето на заетост – нужното време за обслужване на системата е $t_n = t_\varphi + t_L$, където t_φ и t_L са времената нужни за обслужване на потока $\varphi(t)$ и алгоритъма $L(t)$. В общ случай дължината на паузите между операциите във всеки елементарен поток (T_k) и времето необходимо на ЧО за тяхното изпълнение (τ_k)

имат случаен характер, описван с вероятностните плътности на техните разпределения $f_{T_k}(t)$ и $f_{\tau_k}(t)$.

С оглед синтезирането на модел за оценка на работоспособността на оператор ще бъдат приети следните допускания: независимост и стационарност на елементарните потоци. Това позволява при достатъчно голямо n ($n \geq 5$) да се счита сумарния поток за поасонов [1]. При това може да се приеме, че елементарните потоци по отношение на приоритета са еднакви. В съответствие на приетите допускания, интервалът от време между заявките в сумарния поток τ се разпределя по експоненциален закон:

$$(7) \quad f_{\tau} = \lambda \exp(-\lambda, t) \quad ,$$

а интензивността на сумарния поток е:

$$(8) \quad \lambda = \sum_{k=1}^n \lambda_k \quad , \quad \lambda_k = 1/T_k$$

където λ_k е интензивността на k -тия поток от заявки.

Ако времето необходимо за изпълнение на операциите в сумарния поток се описва с разпределението $f_{\tau}(t)$, то за математическото очакване за времето на изпълнение на операциите в сумарния поток е изпълнено:

$$(9) \quad M(t) = I / \mu = \int_0^{\infty} t f_{\tau}(t) dt$$

където μ е интензивността на изпълнение на заявките. Ако $f_{\tau_k}(t)$ е нормалното разпределение, то:

$$(10) \quad M(\tau) = \sum_{k=1}^n \lambda_k M(\tau_k) \quad , \quad \sigma(\tau) = \sqrt{\sum_{k=1}^n \lambda_k \sigma^2(\tau_k)} \quad ,$$

където $M(\tau_k)$ и $\sigma(\tau_k)$ са съответно математическото очакване и средното квадратично отклонение на k -тия поток.

За случай на поасонов поток на заявки за изпълнение на операции, вероятността за свободното състояние на канала се определя съгласно формулата на Ерланг [2]:

$$(11) \quad \rho_0 = \frac{I}{1 + \frac{\rho}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \dots + \frac{\rho^q}{q!}} \quad , \quad \rho = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda \cdot M(\tau)$$

За едноканална система:

$$(12) \quad \rho_0 = I / (I + \rho) = \mu / (\mu + \lambda)$$

Величината ρ_0 изразява относителната пропускателна способност, а средното относително време, определящо обслужването на сумарния поток заявки с отчитане на динамиката на изменение на работоспособността на оператора е :

$$(13) \quad \bar{t}_{\varphi} = t_{\varphi} / t_p = \lambda / [\pi(Q)\mu + \lambda] \quad ,$$

където $\pi(Q)$ е коефициентът на изменение на работоспособността на оператора. Следователно, оценката на надеждността на действие (работоспособността) на оператора се основава на формализираното представяне на процеса на функционирането му във вид на алгоритъм от дейности, изпълняван на фона от

операции по обслужване на сумарния поток заявки $\varphi(t)$. Под алгоритъм на дейността на оператора се разбира формализираното описание на действията му на базата на т.н. типови единици на функциониране, отразяващи неговите управленчески функции в процеса на достигане на поставени цели в типово задание за управление на човеко-машинна система. Необходимо условие за годността на алгоритъма на дейността за количествена оценка на работоспособността на функциониране на оператора (надеждността на функциониране) е възможността за съпоставяне по време с типови единици на функциониране, както и наличие на каталог с такива типови единици. Такива каталози се разработват на базата на експериментални изследвания и експертни оценки.

Алгоритъмът на дейността е възможно да се разбие на l относително самостоятелни по своето функционално предназначение групи типови единици на функциониране, наречени тактове. Ако тактовете се разглеждат като независими събития, вероятността за правилно и своевременно изпълнение на алгоритъма на действие на оператора може да се оцени по формулата:

$$(14) \quad p_L = \prod_{j=1}^l [p_j + (1-p_j)p_{zj}] ,$$

където p_j е вероятността за своевременни и правилни действия при изпълнение на j -тия такт на алгоритъма; p_{zj} – вероятността за своевременна корекция на грешни действия в такта, която характеризира степента на самоконтрол на оператора.

Основните фактори, влияещи върху работоспособността на оператора са продължителността и интензивността на работа му. Интензивността на работата се оценява чрез интензивността на изпълнение на операциите:

$$(15) \quad \bar{t}_j = t_{onj} / t_j ,$$

където t_{onj} е времето необходимо на оператора за изпълнение на обема операции в такта. Разполагаемото време за изпълнение на тези операции е:

$$(16) \quad t_j = t'_j (1 - \bar{t}_\varphi) ,$$

където t'_j е общото време на такта, определено от условията за изпълнение на предварително задание за управление. Величината t_j е случайна функция, зависеща както от времевите характеристики на типовите единици на функциониране, така и от степента на умора на оператора. Чрез метода на каноничните разложения от теория на вероятностите [1], вероятностните характеристики на t_{onj} , разложени като случайна функция с нормален закон на разпределение, може да се представи във вид:

$$(17) \quad M(t_{onj}) = \pi_j(Q)M(t_j) , \quad \sigma(t_{onj}) = r_j(Q)\sigma(t_j)$$

където $\pi_j(Q)$ са показателите на изменение на характеристиките на случайната величина на t_{onj} вследствие на умора на оператора, $r_j(Q) = \{1, \dots, \pi_j(Q)\}$, $\pi_j(Q) \geq 1$; $M(t_j)$ и $\sigma(t_j)$ са математическото очакване и средноквадратичното отклонение на времето, необходимо за изпълнение на операциите от j -тия такт от оператора при нормални условия (без наличие на умора). Стойностите на $M(t_j)$ и $\sigma(t_j)$ въз основа правилата на декомпозиция на нормалните закони на разпределение се определят както следва:

$$(18) \quad M(t_j) = \sum_{i=1}^m a_i t_i, \quad \sigma(t_j) = \sqrt{\sum_{i=1}^m a_i \sigma_i^2},$$

където t_j и σ_i са съответно математическото очакване и средноквадратичното отклонение на времето за изпълнение на типовите единици на функциониране от i -тия тип, a_i - техният брой в такта, m - броят на типовите единици в такта.

Влошаването на характеристиките на работоспособността на оператора вследствие от натрупването на умора се проявява преди всичко чрез нарастване на необходимото време за изпълнение на предписаните операции. Степента на това нарастване се определя на основата на експериментални изследвания. Направените в литературата [3] зависимости на нарастване на времето за изпълнение на моторни действия π_m , логически операции π_l и операции на информационно взаимодействие с програмно осигуряване и конкретна измервателна апаратура π_u от нивото на умора имат експоненциален закон с различна стръмност. Степента на умора се оценява в балове от специална функция на загубите Q с приета скала на оценки: 1-4 – малка; 5-7 – умерена; 8-10 – висока и т.н. Стойностите на функциите на загубите на ЧО се определят по рекурентна формула:

$$(19) \quad Q_j = Q_{j-1} + \Delta Q_j,$$

където Q_{j-1} е стойността на функцията в края на изпълнение на j -тия такт. На базата на решаване на уравнението, описващо динамиката на умора:

$$(20) \quad dQ/dt = C_{1j}Q,$$

може да се получи следната формула:

$$(21) \quad \Delta Q_j = C_T [exp(C_{1j}T_j) - exp(C_{1j} - T_{j-1})],$$

където C_{1j} и C_T са константи, зависещи от интензивността и условията на работа на оператора. Величината C_{1j} характеризира темпа на натрупване на умора. Изборът и за всеки такт трябва да се извърши в съответствие с изложеното в настоящата работа материал.

При формирането на модел за работоспособността на оператора трябва да се отчетат и съвременните представи и достижения за работата на биологичната система за адаптация на организма на човека и осигуряването на неговата хомеостаза в екстремални условия [4]. Биологичният механизъм на адаптация на организма на човека в зависимост от сложността на решаваните задачи и необходимата интензивност на работа се стреми да осигури нужната мобилизация на ресурси на организма по пътя на съответната активизация на психофизиологичните процеси. При това могат да бъдат различени две нива на такава мобилизация: едно съответстващо на разхода на нормално възтановяващи се процеси и друго съответстващо на разход на дълбоки, трудно възтановими ресурси. Качеството на дейност на ЧО се свързва с тези нива на мобилизация. Могат да се определят две гранични стойности на показателя на интензивност: \bar{t}_1 , съответстващ на границите между първото и второто ниво и t_2 , който съответства на съществено влошаване на качеството на дейност на оператора, когато дори второто ниво на мобилизация е нестабилно да осигури нужната надеждна функция на оператора. Следователно, в зависимост от вида интензивност могат да бъдат отделени три режима на дейността на ЧО: нормален при $\bar{t}_j \leq \bar{t}_1 (t_{onj} \leq t_{pj} \bar{t}_1)$;

екстремален при $\bar{t}_1 < \bar{t}_j \leq \bar{t}_2 (t_{pj}\bar{t}_1 < t_{onj} \leq t_{pj}\bar{t}_2)$ и свръхекстремален, при $\bar{t}_j > \bar{t}_2 (t_{onj} > t_{pj}\bar{t}_2)$. Величините t_1 и t_2 са случайни и вследствие на това притежават свойството размитост. На базата на приетия модел за изменение на работоспособността на оператора, за вероятността за правилно и своевременно изпълнение на j -тия такт на алгоритъма за дейност на оператора и показателя на типа на умора, може да се запише:

$$(22) \quad p_j = p_{1j}p_{\sigma 1} + p_{2j}p_{\sigma 2} + p_{3j}p_{\sigma 3} ; \quad c_{1j} = K_m \left(p_{1j} + \frac{T_1}{T_2} p_{2j} + \frac{T_1}{T_3} p_{3j} \right) ,$$

където, p_{1j}, p_{2j}, p_{3j} са вероятностите за работа на ЧО в рамките на такта в съответните режими; K_m - мащабен коефициент; T_1, T_2, T_3 са допустимите времена на работа за съответните режими; $p_{\sigma 1}, p_{\sigma 2}, p_{\sigma 3}$ - вероятност за правилно изпълнение на такта, определян по данни от експериментални изследвания. При известни закони на разпределение на случайните величини, t_{onj} , \bar{t}_1 и $\bar{t}_2 - f_0(t_{onj})$, $f_1(\bar{t}_{onj})$ и $f_2(\bar{t}_{onj})$ и стойностите на вероятностите, p_{1j}, p_{2j}, p_{3j} , могат да се определят съгласно изразите:

$$(23) \quad \begin{aligned} p_{1j} &= p\{\bar{t}_j \leq \bar{t}_1\} = \int_0^{\infty} f_1(\bar{t}_1 t_{pj}) \left[\int_0^t f_0(t_{onj}) dt \right] dt ; \\ p_{2j} &= p\{\bar{t}_1 < \bar{t}_j \leq \bar{t}_2\} = 1 - p_{1j} - p_{3j} ; \\ p_{3j} &= p\{\bar{t}_j > \bar{t}_2\} = \int_0^{\infty} f_2(\bar{t}_2 t_{pj}) \left[1 - \int_0^t f_0(t_{onj}) dt \right] dt . \end{aligned}$$

Следователно, за определяне на стойностите на p_j по описаната методика е необходима следната информация: времевите характеристики на типовете единици на функциониране, влизащи в такта; законите на разпределение на $f_1(\bar{t}_1)$ и $f_2(\bar{t}_2)$, стойностите на вероятностите на $p_{\sigma 1}, p_{\sigma 2}, p_{\sigma 3}$ и стойностите на допустимото време за работа на различните режими T_1, T_2, T_3 . Тези данни могат да бъдат получени на базата на обработка и анализ на експериментални данни и експертни методи. Предложения модел за оценка на работоспособността на ЧО позволява да се получат количествени оценки в зависимост от характера, условията и продължителността на дейност на оператора.

Литература:

1. Венцель Е., Л. Овчаров, Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М., 1988 г.
2. Венцель Е., Исследование операции. М., Советское радио, 1972 г.
3. Иванов К., О. Лукьянов, В. Черноморец и др., Психология оператора в системах человек-машина. Киев, 1980 г.
4. Горский Ю.М. Основы гомеостатики. Гармония и дисгармония в живых, природных, социальных и искусственных системах. - Иркутск: Изд-во ИГЭА, 1998 г.
5. Remington R., Shafto M., Freed M., Making, Human-Machine System Simulation a Practical Engineering Technique, HFJournal, N3, 2001.