
ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТТА НА САТЕЛИТНИ МРЕЖОВИ СТРУКТУРИ*

АТАНАС НАЧЕВ

FINDING THE RELABILITY OF SATALITE NETWORK STRUCTURES

ATANAS NACHEV

***ABSTRACT:** This article suggests a model for finding the reliability of satellite network structures based of the execution of the information process with the influence of the reliability parameters of the equipment.*

Сателитните комуникационни мрежи определят в голяма степен облика на съвременните глобални комуникации и са от съществено значение за реализацията на тоталната кибернетизация, като се явяват неделим елемент от нея. Те представляват сложни техническо обекти, реализирани с достиженията на съвременните космически технологии, преплетени с последните новости от областта на електрониката, радиотехниката, системитехниката, компютърните науки и пр. Особения характер и спецификата на работа на сателитните комуникационни мрежи поставят особено остро проблема осигуряване на необходимата им функционална надеждност.

Надеждностните характеристики на мрежовите структури са в пряка зависимост от надеждностните характеристики на основните структурно-функционални елементи, структурата и организацията на функциониране на мрежата. Организацията на обмена на информация, надеждностните характеристики на средствата и каналите за предаване на данни до голяма степен определят функционалната надеждност на сателитните комуникационни мрежи.

Теорията на надеждността, която възникна главно като резултат от развитието на радиоелектронните системи с военно предназначение, в края на 60-те години на миналия век получи своята завършеност и се утвърди като теория, пряко свързана с решаване на продиктувани от практиката задачи. Опитите обаче за непосредственото използване на тази теория за описване и определяне на структурната надеждност на мрежови обекти, каквито са и сателитните комуникационни мрежи, не води до обективно полезни резултати. Един от пътищата за решаване на тези проблеми се основава на теорията на изпълнение на информационните процеси в условия на реална надеждност, т.е. в контекста на надеждността на реализиращите ги технически и програмни средства. Първи стъпки за решаване на надеждността на специфични обекти на базата на времето за изпълнение на информационни процеси с отчитане на реалната надеждност на реализиращите ги средства се срещат в работите [1, 5]. Опит за разпространяване на този подход като инвариантен по отношение на всякакъв вид мрежови информационни структури, в това число и сателитни комуникационни мрежи, е направен в [2, 3, 4].

В контекста на разглежданата тема под информационен процес се разбира всеки един процес, свързан с обработване или предаване на информация.

* Докладът е подпомогнат от проект РД-08-119/2016 на ФМИ към ШУ

Изпълнението на информационните процеси в сателитните комуникационни мрежи е съпътствано с влиянието на различни смущаващи въздействия, породени от надеждността на тяхното оборудване. Тези въздействия, независимо от физическата си природа и място на възникване в мрежата водят до един и същ краен резултат-загуба на информация и удължаване на времето за изпълнение на информационните процеси. Това дава основание да се говори за време за изпълнение на информационните процеси с отчитане на надеждността на средата, която ги реализира. В качеството на показатели за тази оценка се използва математическото очакване $M[\tau_c]$ на времето за изпълнение на информационния процес с отчитане на надеждността на реализиращите ги средства и на дисперсията $D[\tau_c]$ на това време.

Изпълнението на даден информационен процес може да се прекрати поради отказ на реализиращите ги средства. Възникващите при това откази формират един от следните потоци:

1. Поток от устойчиви откази, като при възникването на всеки един отказ изпълнението на информационния процес не може да продължи и отказалото техническо средство се нуждае от ремонт за възстановяване на нарушената му работоспособност. След възстановяване на нарушената работоспособност информационният процес отново се изпълнява от самото му начало. При сателитните комуникации отказите на бордовото оборудване се извършва с прилагане на специални методи, които не са обект на настоящото изложение.

2. Поток от устойчиви откази, като при възникване на отказ изпълнението на информационния процес не може да продължи, отказалото устройство се ремонтира. Информационният процес започва да се изпълнява от начало от резервно оборудване.

4. Поток от устойчиви откази, като при възникване на отказ изпълнението на информационния процес не може да продължи, отказалото устройство се ремонтира, а информационният процес продължава да се изпълнява от точката на прекъсване от резервно оборудване.

5. Поток от самоотстраняващи се откази (сбоеве), при възникването на които оборудването се самовъзстановява. Прекъснатият информационен процес започва да се изпълнява отначало след осъществено самовъзстановяване.

6. Поток от самоотстраняващи се откази (сбоеве), при възникване на които оборудването се самовъзстановява. Прекъснатият информационен процес след самовъзстановяване на съответните средства продължава да се изпълнява от мястото на прекъсване.

Особено място сред смущаващите изпълнението на информационните процеси въздействия заемат процесите на фазиране, които могат да окажат влияние, аналогично на влиянието на кратковременните прекъсвания или на устойчивите откази [1, 2].

Техническите средства, чрез които се изграждат съвременните сателитни комуникационни мрежи представляват високонадеждни устройства. Това дава основание да се счита, че разгледаните по-горе потоци от откази са елементарни, стационарни поасоновидни потоци, поради което интервалите между възникването на два съседни отказа, независимо от типа им, са подчинено на експоненциален закон на разпределение с интензивност λ_i , където i е индекс на типа на съответния поток. В такъв случай математическото очакване на времето между възникването на два съседни отказа, т. е. времето за безотказна работа на оборудването ще бъде $T_{0i} = 1/\lambda_i$, а вероятността за безотказна работа $p_i(t)$ за времето t в отношение на i -ти поток ще се представи чрез

$p_i(t) = \exp(-\lambda_i t)$. Плътноста на разпределение на времето за безотказна работа $f_i(t)$ ще е $f_i(t) = -\frac{dp_i(t)}{dt} = \lambda_i \exp(-\lambda_i t)$.

Нека информационният процес има обем M (количество предадени съобщение, количество обработени данни и пр.) и нека изпълнението на този процес в идеални условия, т.е. при отсъствие на откази, е равно на Q . В такъв случай може да се каже, че информационният процес се изпълнява с производителност $V_0 = \frac{M}{Q}$.

При условие, че изпълнението на информационния процес е подложено на въздействието на едни или други типове откази, времето T за изпълнението на процеса ще се представи като $T = S + X$, където S е сумата от времевите интервали, през които се изпълнява процесът $S = \sum_{i=1}^{N-1} s_i$; X е сумата на времевите интервали на престой- $X = \sum_{i=1}^N x_i$; N – количество на възникналите прекъсвания на изпълнението на информационния процес. Тогава реалната производителност на изпълнение на информационния процес ще се определи като $V = \frac{M}{T} = \frac{M}{S + X}$.

Тъй като количеството на възникналите откази за времето на изпълнение на информационния процес и тяхната продължителност представляват случайни величини, то времето T бъде случайна величина, която в общия случай ще се представи като $T = Q + \theta$, където θ е случайно време, добавяно към времето за изпълнение на процеса.

Нека за целите на темата на изложението разгледаме следния случай: Даден е информационен възел на сателитна комуникационна мрежа, който изпълнява m различни по характер (тип) информационни задачи (заявки). Изпълнението на всяка една заявка се осъществява в рамките на конкретен информационен процес. Общото количество заявки за изпълнение за времето $T_{\text{цф}}$ на функциониране (цикъл на функциониране) е равно на n . Количеството заявки от i -ти тип, $i = \overline{1, m}$, които постъпват за обслужване във възела за времето $T_{\text{цф}}$ представляват случайна величина с поасонов закон на разпределение с параметър λ_i , $i = \overline{1, m}$. Времето за изпълнение τ_i на i -та, $i = \overline{1, m}$, заявка е случайна величина с експоненциален закон на разпределение с интензивност μ_i : $\tau_i = \frac{1}{\mu_i}$.

По време на работата на възела същият е подложен на въздействието на кратковременни прекъсвания (сбоеве), количеството на които за времето $T_{\text{цф}}$ е случайна величина с поасонов закон на разпределение с параметър λ_c . Продължителността на сбоевете τ_c е случайна величина с експоненциален закон на разпределение с параметър μ_c , т.е. $\tau_c = 1/\mu_c$.

В указаните условие е необходимо да се определи средната продължителност на изпълнение на постъпващите заявки с отчитане на дефинираното смущаващо въздействие, при условие, че времената за изпълнение на отделните заявки без възникване на сбоеве са съизмерими. Ще допуснем, че в даден момент може да постъпи само една заявка, т.е. няма „застъпване” на постъпващите заявки.

При така дефинираната постановка количеството n_i заявки от i -ти тип, $i = \overline{1, m}$, които постъпват за обслужване за времето $T_{уф}$ ще се определи като:

$$n_i = \lambda_i T_{уф}. \quad (1)$$

Средната продължителност \bar{t} на изпълнение на една заявка ще бъде:

$$\bar{t} = \frac{n_1 \tau_1 + n_2 \tau_2 + n_3 \tau_3 + \dots + n_m \tau_m}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m n_i \tau_i. \quad (2)$$

Тъй като $p_i = \frac{n_i}{n}$ е вероятността, че при постъпване на заявка за обслужване тя е от i -ти тип, $i = \overline{1, m}$, то (2) ще приеме вида:

$$\bar{t} = \sum_{i=1}^m p_i \tau_i = \sum_{i=1}^m \frac{p_i}{\mu_i}. \quad (3)$$

Ще обозначим чрез $\Lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_i$ сумарната интензивност на постъпване на заявки за обслужване в информационния възел. Тогава $p_i = \frac{n_i}{n} = \frac{\lambda_i T_{уф}}{\Lambda T_{уф}} = \frac{\lambda_i}{\Lambda}$. В такъв случай (3) ще приеме вида $\bar{t} = \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i}{\Lambda} \tau_i = \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i}{\Lambda \mu_i}$. От тук средното време T_3 , за цикъла на функциониране $T_{уф}$, за което информационният възел е зает с изпълнение на постъпили заявки ще се определи като:

$$T_3 = n \bar{t} = n \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i}{\Lambda \mu_i}. \quad (4)$$

Предвид на това, че $\Lambda = \frac{n}{T_{уф}}$ ще имаме $n = \Lambda T_{уф}$. Тогава (4) ще запишем като:

$$T_3 = \Lambda T_{уф} \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i}{\Lambda \mu_i}. \quad (5)$$

За времето на изпълнение на една заявка информационният възел е подложен на въздействието на кратковременни прекъсвания. В резултат на това средното време за изпълнение на една заявка ще се увеличи със случайното време θ . Ще обозначим това време с \bar{t} .

$$\bar{t} = \bar{t} + \theta. \quad (6)$$

За времето \bar{t} ще възникнат η кратковременни прекъсвания

$$\eta = \lambda_c \bar{t}. \quad (7)$$

При всяко прекъсване на изпълнението на заявката се извършва повторното и изпълнение след самовъзстановяване на информационния възел, което се осъществява за времето $\tau_c = 1/\mu_c$. В резултат времето \bar{t} ще се увеличи със случайната величина θ :

$$\theta = \eta \left(\bar{t} + \tau_c \right) = \eta \left(\bar{t} + \frac{1}{\mu_c} \right). \quad (8)$$

Предвид на (7) изразът (8) ще добие вида:

$$\theta = \lambda_c \bar{t} \left(\bar{t} + \frac{1}{\mu_c} \right). \quad (9)$$

Тогава

$$\bar{t} = \bar{t} + \lambda_c \bar{t} \left(\bar{t} + \frac{1}{\mu_c} \right). \quad (10)$$

Нека разгледаме случай, когато след отстраняването на възникналото кратковременно прекъсване процесът на изпълнение на заявките се осъществява не отначало, а от момента на прекъсването. Очевидно в условията на разглеждания случай средното време за изпълнение на една заявка ще съдържа времето \bar{t} , плюс $\eta = \lambda_c \bar{t}$ интервала с продължителност, равна на продължителността $\tau_c = 1/\mu_c$ на кратковременните прекъсвания, т.е.:

$$\bar{t} = \bar{t} + \lambda_c \bar{t} \tau_c = \bar{t} + \lambda_c \frac{\bar{t}}{\mu_c}.$$

Ще изнесем \bar{t} пред скоба и ще получим:

$$\bar{t} = \bar{t} \left(1 + \frac{\lambda_c}{\mu_c} \right). \quad (11)$$

Нека се изпълнява информационен процес, като за времето на неговото изпълнение реализиращите го средства са подложени на въздействието на сбоеве (кратковременни откази), устойчиви откази и процеси на фазирание, количеството въздействия от които са случайни величини с поасонов закон на разпределение, съответно с параметри λ_c , λ_0 и

λ_ϕ . Продължителността на сбоевете и процесите на фазиране са случайни величини с експоненциален закон на разпределение, съответно с интензивност μ_c и μ_ϕ . Времето за възстановяване след устойчив отказ е случайна величина с експоненциален закон на разпределение с интензивност μ_0 .

След самовъзстановяването на реализиращите информационния процес средства той продължава да се изпълнява от точката на прекъсване.

После възстановяването на оборудването в резултат на устойчив отказ информационният процес се изпълнява отначало.

При възникване на необходимост от фазиране, след неговото извършване прекъснатият информационен процес се изпълнява отначало.

В указанията условия е необходимо да се определи математическото очакване $M[\tau_c]$ на времето τ_c за изпълнение на информационния процес, ако за изпълнението му при отсъствие на посочените смущаващи въздействия е необходимо времето Q .

Ще въведем следните обозначения:

p_0 – вероятност за безотказна работа за времето \bar{Q} за изпълнение на информационния процес с отчитане на възникващите кратковременни прекъсвания; q_0 – вероятност на възникване на един отказ за същото време:

$$p_0 = e^{-\lambda_0 \bar{Q}};$$

$$q_0 = 1 - p_0 = 1 - e^{-\lambda_0 \bar{Q}},$$

където p_ϕ – вероятност, че за времето \bar{Q} няма да възникне необходимост от фазиране и q_ϕ – вероятност за възникване на необходимост от фазиране за това време:

$$p_\phi = e^{-\lambda_\phi \bar{Q}};$$

$$q_\phi = 1 - p_\phi = 1 - e^{-\lambda_\phi \bar{Q}}$$

В [104] е получено следното съотношение за определяне на математическото очакване $M[\tau_c]$ на времето за изпълнение на информационния процес:

$$M[\tau_c] = Q \left(1 + \frac{\lambda_c}{\mu_c} \right) + \frac{q_\phi}{p_\phi} \left(1 + \frac{q_0}{p_0} \right) \left[\frac{(1 + \frac{\lambda_c}{\mu_c})(1 - e^{-\lambda_\phi \bar{Q}} - \lambda_\phi \bar{Q} e^{-\lambda_\phi \bar{Q}})}{\lambda_\phi (1 - e^{-\lambda_\phi \bar{Q}})} + \frac{1}{\mu_\phi} \right] +$$

$$+ \frac{q_0}{p_0} \frac{1}{\mu_0},$$

където съгласно (11) $\bar{Q} = Q \left(1 + \frac{\lambda_c}{\mu_c} \right)$.

Информационните процеси в мрежовите структури представляват суперпозиция от протичащи в отделните елементи на мрежата процеси. Нека разгледаме най-простия

случай, когато се извършва обработка на информация в два, A и B , пространствено разделени възли на компютърна мрежа. Ще приемем, че във възел A протича информационен процес, след прекратяването на който по канала за обмен на информация между от A във B се предават данни, след което във възел B се изпълнява финален, за конкретния случай, информационен процес. От изложеното е очевидно, че обработката на информацията представлява съвкупност от три обобщени информационни процеси, два от които са свързани с обработка на данни във възлите A и B и един е процес на информационен обмен между тези възли. Нека обозначим тези процеси съответно с Π_A , Π_B и Π_D . Времето за тяхното изпълнение, при отсъствие на различни по характер откази съответно ще бъде Q_A, Q_B и Q_D . Общото време за изпълнение на цялостния процес на обработка на информацията в разглежданите условия ще се определи като

$$Q = Q_A + Q_B + Q_D .$$

Техническите и програмни средства във възлите A и B и в системата за обмен на информация D притежават реална, а не идеална надеждност. Поради това в общия случай времето за изпълнение на дефинираните информационни процеси ще се извърши за времеви интервали, математическите очаквания на продължителността на които съответно ще бъдат $M[\tau_A]$, $M[\tau_B]$ и $M[\tau_D]$. В този случай математическото очакване $M[\tau_\Sigma]$ на времето за цялостното изпълнение на процеса на обработка на информацията, протичащ във възлите A и B ще бъде

$$M[\tau_\Sigma] = M[\tau_A] + M[\tau_B] + M[\tau_D] .$$

За функционалната надеждност на системата при обработката на информацията в системата в случая може да съдим по коефициента на функционална ефективност, който е равен:

$$K = \frac{Q}{M[\tau_\Sigma]} .$$

Нека в системата се изпълняват k процеса на обработка на информация, като за всеки един коефициентът на функционална ефективност е K_j , $j = 1, 2, 3, \dots, k$. В този случай коефициентът на функционална ефективност ще се определи като:

$$K = \frac{\sum_{j=1}^k K_j}{k} .$$

Използването на методите на оценка на надеждността на базата на времето за реализация на изпълняваните от конкретна мрежова структура информационни процеси позволява да се оцени как влияят надеждностните характеристики на мрежовите технически средства върху общата ефективност на функциониране. Тези методи следва да се разглеждат като елемент от моделите, които описват организацията на работа на

мрежата при решаването на възложените и задачи, т.е. те са елемент от моделите за изследване на функционалната ефективност, съставна част от която е функционалната надеждност. Ще разгледаме това на конкретен пример.

Нека имаме управляваща изчислителна система, която реализира даден алгоритъм. Времето на заетост на системата съответства на максималната натовареност на процесорите на системата, което се определя като сума от независими случайни величини, които имат еднакви функции на разпределение. Съгласно централната пределна теорема законът на разпределение на сумата от независими случайни величини, които имат еднакъв закон на разпределение ще се стреми към нормален закон. Ще допуснем, че управляващата система реализира достатъчно голям брой операции (например над 1000). Това ни дава основание да приемем, че времето за изпълнение на операциите от групата процесори ще е случайна величина с нормален закон на разпределение. В такъв случай времето T на заетост на процесорите на системата ще бъде случайна величина с плътност на разпределение

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-M[T])^2}{2\sigma^2}},$$

Функцията на разпределение на T ще се зададе посредством израза

$$F(t) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{\Phi[(t-M[\tau_c])]}{\sigma\sqrt{2}} \right\},$$

където $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ – функция на Лаплас, $M[\tau_c]$ – математическо очакване на времето на заетост на процесорите с отчитане на възникналите откази.

В зависимост от възникващите откази в процеса на работа на управляващата изчислителна система математическото очакване $M[\tau_c]$ може да се определи по един от разгледаните в т. 7.1 методи. Например ако системата е подложена на въздействието само на сбоеве, количеството на които за зададен времеви интервал е случайна величина с интензивност λ и при експоненциален закон на разпределение на продължителността на сбоевете с параметър μ , при условие, че след всеки сбой информационният процес продължава да се изпълнява от мястото на прекъсването му, $M[\tau_c]$ ще се определи по

$$\text{израза } M[\tau_c] = Q \left(1 + \frac{\lambda}{\mu} \right).$$

Нека управляващата система се състои от две групи процесори, една от които е резервна и се включва веднага след като другата откаже. Тъй като времето на заетост на всяка група процесори е разпределено по нормален закон, плътността на разпределение на времето на заетост T_i , $i = 1, 2$ ще има плътност [1]

$$f_i(t) = \frac{1}{\sigma_i\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-M[T_i])^2}{2\sigma_i^2}},$$

$$F_i(t) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{\Phi[(t - M[T_i])]}{\sigma_i \sqrt{2}} \right\}.$$

Продължителността на изпълнение от управляващата система на определен обем от оператори ще се определи съгласно $F_c = \max_i \{T_i\}$. Функцията на разпределение на F_c ще има вида:

$$F_c(t) = \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^t f(t_1, t_2) dt_1 dt_2.$$

При условие, че случайните величини T_1 и T_2 са независими, математическото очакване на случайната величина F_c се определя като [1]:

$$M[F_c] = s(\eta) \sqrt{\sigma_1^2 - 2\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} + \frac{1}{2} \{M[T_1] + M[T_2]\},$$

където

$$s(\eta) = \frac{\sqrt{\pi} \eta \Phi(\eta) + e^{-\eta^2}}{\sqrt{2\pi}},$$

$$\eta = \frac{M[T_2] - M[T_1]}{2\sqrt{\sigma_1^2 - 2\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}}.$$

С отчитане на влиянието на възникващите откази:

$$M[F_c] = s(\eta) \sqrt{\sigma_1^2 - 2\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} + \frac{1}{2} \{M[\tau_{c1}] + M[\tau_{c2}]\},$$

където

$$\eta = \frac{M[\tau_{c2}] - M[\tau_{c1}]}{2\sqrt{\sigma_1^2 - 2\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}}.$$

Математическото очакване $M[\tau_{ci}]$ може да се определи по един от разгледаните в методи, например $M[\tau_{ci}] = T[T_i] \left(1 + \frac{\lambda}{\mu} \right), i = 1, 2.$

Ако времевите интервали T_1 и T_2 представляват зависими случайни величини с коефициент на корелация μ_{12} ще имаме [5] :

$$M[F_c] = s(\eta)\sqrt{\sigma_1^2 - 2\mu_{12}\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} + \frac{1}{2}\{M[\tau_{c1}] + M[\tau_{c2}]\},$$

където

$$\eta = \frac{M[\tau_{c2}] - M[\tau_{c1}]}{2\sqrt{\sigma_1^2 - 2\mu_{12}\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}}.$$

По такъв начин с използване на методите на функционална надеждност чрез моделите за определяне на времевите характеристики на изпълняваните информационни процеси с отчитане на надеждностните характеристики на реализиращите ги средства може да се определи функционалната ефективност на мрежови структури като функция от надеждността на структурните им елементи. Този метод е един от пътищата за определяне на надеждността на сателитни комуникационни мрежи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Голубьев-Новожилов**, Многомашины комплексы вычислительных средств, Москва, Советское радио, 1967.
2. **Начев А. И.**, Информационни процеси в компютърните мрежи в условия на реална надеждност, София, Военно издателство, 2001.
3. **Начев А. И.**, Структурнофункционална надеждност на компютърни мрежи, София, Военно издателство, 2002.
4. **Начев А. И.**, Надеждност на въоръжението. Методи за определяне на надеждността на примера на радиоелектронните средства и системи въоръжение, София, Българска академия на науките, Институт по металознание, съоръжения и технологии „Академик Ангел Балевски“, с център по хидро- и аеродинамика, 2016.
5. **Рожков Л. И.**, Контроль и коммутация оборудования в системах передачи данных, Москва, Советское радио, 1979.