УДК 681.142.019.3

ЖИВУЧИЕ ОДНОРОДНЫЕ УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

В.Г. Хорошевский

Живучие однородные универсальные вычислительные системы (УВС) [I] предназначены для решения таких задач, для которых имеются универсальные программы. Эти программы могут автоматически перестраиваться в зависимости от числа исправных элементарных машин (ЭМ) в УВС. Установлено [I], что для широкого круга сложных задач могут быть составлены универсальные программы.

Пусть N -число ЭМ в системе, $E=\{0,I,\ldots,N\}$ - пространство состояний УВС, $n\in E$, $n\neq 0$, - значение нижней границы, то есть то минимальное число исправных ЭМ в УВС, при котором производительность системы не менее заданной.

Живучей однородной универсальной вычислительной системой называется такая однородная УВС, производительность которой для каждого состояния $k\in E$ определяется по формуле:

$$\Omega_k = A_k\cdot\Delta(k-n)\cdot k\cdot\omega,$$

где ω - производительность ЭМ (либо номинальное, либо эффективное, либо среднее эффективное быстродействия [I]),

$$\Delta(\ell)=\begin{cases} I, & \text{если } \ell\geq 0,\\ 0, & \text{если } \ell<0,\end{cases}$$

$A_k\geq I$, как правило, для сложных задач. Заметим, что при помощи A_k может быть задана любая зависимость Ω_k от $k\in E$.

Целью работы является рассмотрение количественных характеристик, при помощи которых можно было бы анализировать и синтезировать живучие однородные УВС с точки зрения надежности и производительности.

§ I. Количественные характеристики надежности живучих однородных универсальных вычислительных систем

Важной мерой надежности живучей однородной УВС является вероятность $P_i(t)$ того, что в момент времени t исправно $i \in E$ машин. Зная вероятности $P_i(t), i \in E$, можно рассчитать, например, математическое ожидание $\mathcal{N}(t)$ и дисперсию числа исправных ЭМ, математические ожидания числа отказавших машин, ожидающих начала восстановления, и числа занятых восстанавливающих устройств $\mathcal{M}(t)$ в момент времени t, функцию живучести [2]:

$$N(t) = \frac{\mathcal{N}(t)}{N}. \tag{I.1}$$

Прежде чем определить другие меры надежности, введем следующую функцию:

$$\Omega(t) = \begin{cases} \Omega^k = k\omega, & \text{если в момент времени } t \geq 0 \text{ УВС находится в состоянии } k \in E_1; \\ 0, & \text{если в момент времени } t \geq 0 \quad k \in E \setminus E_1, \end{cases}$$

где $E_1 = \{n, (n+1), \ldots, N\}$, $E \setminus E_1 = \{0, 1, \ldots, (n-1)\}$.

$\Omega(t)$ назовем производительностью живучей однородной УВС в момент времени t. (Принято допущение $A_k = 1$, $k \in E_1$, которое, очевидно, не нарушает общности исследования).

Введем, далее, функцию

$$S_k(t) = P\{\Omega(t) \geq \Omega^k\},$$

где $P\{\Omega(t) \geq \Omega^k\}$ – вероятность события $\Omega(t) \geq \Omega^k$.

Вектор-функцией готовности назовем

$$\vec{S}(t) = \{S_k(t)\}, \quad k \in E_1, \tag{I.2}$$

а вектор-коэффициентом готовности –

$$\vec{S} = \{S_k\}, \quad k \in E_1, \tag{I.3}$$

где $S_k = \lim\limits_{t \to \infty} S_k(t)$.

Рассмотрим величину

$$T_k = \int_0^{T^\circ} S_k(t)\,dt, \quad k \in E_1. \tag{I.4}$$

T_k является средней частью времени работы однородной УВС с производительностью не менее производительности Ω^k для конечного промежутка времени $[0, T^\circ]$.

$$\vec{T} = \{T_k\}, \quad k \in E_1, \tag{I.5}$$

назовем вектором среднего времени пребывания УВС в состоянии готовности для промежутка $[0, T^\circ]$.

Введем функцию

$$R_k(t) = P\{\Omega(\tau) \geq \Omega^k\}, \quad k \in E_1,$$

где τ – любой момент времени, принадлежащий промежутку $[0, t]$.

Вектор-функцией надежности живучей однородной УВС назовем

$$\vec{R}(t) = \{R_k(t)\}, \quad k \in E_1. \tag{I.6}$$

Определение вектора среднего времени безотказной работы $\vec{\Theta}$ очевидно. Легко заметить при этом, что для невосстанавливаемых систем

$$\vec{S}(t) = \vec{R}(t),$$

$$\vec{T} = \vec{\Theta} \text{ при } T^\circ = \infty.$$

Назовем функцией занятости восстанавливающей системы

$$\mathcal{M}(t) = \frac{\mathcal{M}(t)}{m}, \tag{I.7}$$

где m – число устройств в восстанавливающей системе.

Пусть

$$U_k(t) = 1 - P\{\Omega(\tau) < \Omega^k\}, \quad k \in E_1,$$

где τ – любой момент времени, принадлежащий $[0, t]$.

Назовем вектор-функцией восстановимости живучей однородной системы

$$\vec{U}(t) = \{U_k(t)\}, \quad k \in E_1. \tag{I.8}$$

Используя (I.8), легко определить вектор среднего времени восстановления $\vec{T}$.

Заметим, что если $\Omega(\tau)$ – производительность в момент времени τ однородной УВС, режим работы которой является стационарным, то (I.6), (I.8) будут стационарными вектор-функциями соответственно надежности и восстановимости.

§ 2. Функция живучести однородной универсальной вычислительной системы. Функция занятости восстанавливающей системы

Допустим, что в любой момент времени производительности как однородной УВС, так и восстанавливающей системы (ВС) пропорциональны соответственно не случайному числу исправных ЭМ и не случайному числу занятых восстанавливающих устройств, а математическим ожиданиям соответствующих чисел.

Допущение естественно для однородных УВС высокой производительности [I], в которых случайности, связанные с выходом элементарной машины из строя (освобождением восстанавливающего устройства), мало сказываются на суммарной производительности однородной УВС (восстанавливаемой системы), которая для каждого момента времени оказывается близкой к своему среднему значению.

Установлено, что если число ЭМ даже в невосстанавливаемой системе порядка 50 и выше, вполне допустима замена случайного числа его средним [3]. Заметим, что число ЭМ в УВС высокой производительности более 10^8.

Составим дифференциальные уравнения для $\mathcal{N}(t)$ и $\mathcal{M}(t)$, для чего обозначим через $\Delta\mathcal{N}(t)$ и $\Delta\mathcal{M}(t)$ приращения соответственно $\mathcal{N}(t)$ и $\mathcal{M}(t)$ за малый промежуток Δt.

Легко увидеть, что при $[N-\mathcal{N}(t)] < m$

$$\left.\begin{aligned} \Delta\mathcal{N}(t) &= -\mathcal{N}(t)\cdot\lambda\Delta t + \mathcal{M}(t)\cdot\mu\cdot\Delta t, \\ \Delta\mathcal{M}(t) &= -\mathcal{M}(t)\mu\,\Delta t + \mathcal{N}(t)\cdot\lambda\cdot\Delta t, \end{aligned}\right\} \qquad (2.1)$$

где λ - интенсивность потока отказов в элементарной машине, а μ - интенсивность восстановлений в восстанавливающем устройстве [4].

Деля обе части равенств (2.I) на Δt и переходя к пределу при $\Delta t \to 0$, получим систему дифференциальных уравнений

$$\left.\begin{aligned} \frac{d}{dt}\mathcal{N}(t) &= -\lambda\mathcal{N}(t) + \mu\mathcal{M}(t), \\ \frac{d}{dt}\mathcal{M}(t) &= \lambda\mathcal{N}(t) - \mu\mathcal{M}(t). \end{aligned}\right\} \qquad (2.2)$$

Естественно задать следующие начальные условия:

$$\mathcal{N}(0) = N, \quad \mathcal{M}(0) = 0. \qquad (2.3)$$

Аналогично можно получить систему уравнений и при $[N-\mathcal{N}(t)] \geq m$

$$\left.\begin{aligned} \frac{d}{dt}\mathcal{N}(t) &= m\mu - \lambda\mathcal{N}(t), \\ \frac{d}{dt}\mathcal{M}(t) &= 0, \end{aligned}\right\} \qquad (2.4)$$

причем начальные условия задаются следующим образом:

$$\mathcal{N}(t_0) = N - m, \quad \mathcal{M}(t_0) = m, \qquad (2.5)$$

где t_0 - момент времени, начиная с которого будет справедлива система уравнений (2.4).

Решая системы уравнений (2.2) и (2.4) соответственно с начальными условиями (2.3) и (2.5) и учитывая (I.I) и (I.7), получаем:

$$\left.\begin{aligned} \mathcal{N}(t) &= \frac{\mu}{\lambda+\mu} + \frac{\lambda}{\lambda+\mu}e^{-(\lambda+\mu)t}, && \text{если } \left(1-\frac{m}{N}\right) < \mathcal{N}(t), \\ \mathcal{N}(t) &= \frac{m\mu}{N\lambda} - \frac{m(\lambda+\mu)}{N\lambda}e^{-\lambda t} + e^{-\lambda t}, && \text{если } \left(1-\frac{m}{N}\right) \geq \mathcal{N}(t), \end{aligned}\right\} \qquad (2.6)$$

$$\left.\begin{aligned} \mathcal{M}(t) &= \frac{N\lambda}{m(\lambda+\mu)} - \frac{N\lambda}{m(\lambda+\mu)}e^{-(\lambda+\mu)t}, && \text{если } \left(1-\frac{m}{N}\right) < \mathcal{N}(t), \\ \mathcal{M}(t) &= 1, && \text{если } \left(1-\frac{m}{N}\right) \geq \mathcal{N}(t). \end{aligned}\right\} \qquad (2.7)$$

Заметим, что полученные решения (2.6) справедливы не только для $1 \leq m \leq N$, но и для $m = 0$. (При $m = 0$ УВС будет невосстанавливаемой).

Известно [4], что функция надежности элементарной машины

$$\tau(t) = e^{-\lambda t}. \qquad (2.8)$$

Таким образом, если однородная УВС является невосстанавливаемой, то ее функция живучести $\mathcal{N}(t)$ равна функции надежности элементарной машины $\tau(t)$.

§ 3. Вектор-функция готовности невосстанавливаемой однородной универсальной вычислительной системы

I⁰. При помощи известных методов теории массового обслуживания [5] в случае невосстанавливаемой УВС можно получить следующую формулу для вероятностей $P_i(t)$:

$$P_i(t) = \frac{N!\,\lambda^{(N-i)}}{i!}\sum_{\ell=i}^{N}\frac{e^{-\ell\cdot\lambda\cdot t}}{f'(-\ell\lambda)}, \qquad (3.1)$$

где

$$f(S) = [S+i\lambda][S+(i+1)\lambda]\cdot\ldots\cdot[S+N\lambda], \quad i \in E.$$

Легко заметить, что

$$S_k(t) = \sum_{i=k}^{N} P_i(t), \quad k \in E_1. \qquad (3.2)$$

Формулы (I.2), (3.I) и (3.2) позволяют вычислить вектор-функцию готовности.

2⁰. Можно показать, что

$$S_k(t) = \sum_{i=k}^{N}\binom{N}{i}\tau^i(t)\left[1-\tau(t)\right]^{(N-i)}, \quad k \in E_1, \qquad (3.3)$$

где $\tau(t)$ определяется по формуле (2.8),

$$\binom{N}{i} = \frac{N!}{i!(N-i)!}.$$

3⁰. Вектор среднего времени пребывания системы в состоянии готовности, определяемый формулой (I.5),

$$\vec{T} = \left\{\sum_{i=k}^{N}\frac{1}{i\lambda}\right\}, \quad k \in E_1.$$

Последнее видно из формул (I.4) и (3.3).

После этого нетрудно доказать, что для невосстанавливаемы живучих однородных УВС сумма координат вектора среднего времени пребывания системы в состоянии готовности

$$T^n = \sum_{K=n}^{N} T_K = \sum_{i=0}^{N-n} \frac{(i+1)}{(n+i)\lambda}.$$

Видно, что $\frac{N}{\lambda} = T^1 \geq T^n \geq T^N = \frac{1}{N\lambda}, \quad 1 \leq n \leq N.$

§ 4. Вектор-функция готовности восстанавливаемой однородной универсальной вычислительной системы

I⁰. Известным способом [5] можно получить следующую систему дифференциальных уравнений для вероятностей $P_i(t)$:

$$\left.\begin{aligned}
&P_0'(t) = -m\mu P_0(t) + \lambda P_1(t),\\
&P_i'(t) = m\mu P_{i-1}(t) - (i\lambda + m\mu)P_i(t) + (i+1)\lambda P_{i+1}(t),\\
&\qquad\qquad 0 < i \leq (N-m),\\
&P_i'(t) = [N-(i-1)]\mu P_{i-1}(t) - [i\lambda + (N-i)\mu]\, P_i(t) +\\
&\qquad +(i+1)\lambda P_{i+1}(t), \qquad (N-m) < i < N,\\
&P_N'(t) = \mu P_{N-1}(t) - N\lambda P_N(t),
\end{aligned}\right\} \tag{4.I}$$

причем

$$P_i(0) = 0, \quad 0 \leq i < N, \quad P_N(0) = 1.$$

Решая (4.I) при помощи преобразования Лапласа-Карсона, получаем, что

$$P_i(t) = \frac{1}{2\pi j}\int_c \frac{e^{st}}{S}\bar{P}_i(S)\,dS, \quad i \in E, \tag{4.2}$$

где S - комплексный параметр, $j = \sqrt{-1}$, π = 3,I4...,

$$\bar{P}_i(S) = \frac{\Delta_i(S)}{\Delta(S)}, \tag{4.3}$$

$\Delta(S)$ - определитель системы, получаемой из (4.I) для операторных изображений $\bar{P}_i(S)$, $\Delta_i(S)$ - определитель, образованный из $\Delta(S)$ путем замены i-го столбца столбцом из свободных членов, c - контур, охватывающий все нули $\Delta(S)$.

Для вычисления интеграла (4.2) необходимо знать корни многочлена $\Delta(S)$. Для каждого фиксированного m нахождение корней многочлена $\Delta(S)$ не представляет принципиальной трудности, причем корни оказываются действительными и однократными [5]. Нахождение решения (4.2) для всех значений $m \in E$, $m \neq 0$, является трудоемким процессом.

В некоторых случаях для получения численного решения системы уравнений (4.I) можно воспользоваться разложением в ряд

вероятностей $P_i(t)$, $i \in E$ [6].

Ниже будет найдено решение (4.2) для двух наиболее интересных случаев.

2⁰. Пусть имеется распределенная однородная универсальная вычислительная система [I]. Тогда необходимо положить $m = N$. Последнее равенство может иметь место и для сосредоточенных УВС.

Для рассматриваемых УВС равенство (4.3) принимает вид:

$$\bar{P}_i(S) = \frac{\Delta_i(S)}{\Delta_{N,N}(S)},$$

где

$$\Delta_i(S) = S\frac{N!}{i!}\lambda^{(N-i)}\Delta_{N,i-1}(S),$$

$$\Delta_{N,i}(S) = [(N-i)\mu + i\lambda + S]\,\Delta_{N,i-1}(S) - i\lambda[N-(i-1)]\mu\Delta_{N,i-2}(S), \tag{4.4}$$

$$\Delta_{N,-1}(S) = 1, \quad (i-1),\ i \in E'.$$

Легко заметить, что $\Delta_{N,i}(S)$, $i \in E$, является полиномом (i+I) степени. Старший коэффициент полинома $\Delta_{N,i}(S)$ равен единице, а все остальные - действительные числа.

Корни полиномов $\Delta_{N,i}(S)$, $i \in E'$, $E' = \{-I, 0, I, \ldots, N\}$, обладают следующими свойствами.

СВОЙСТВО I. Соседние полиномы $\Delta_{N,i}(S)$ и $\Delta_{N,i-1}(S)$, $(i-1)$, $i \in E'$, не могут иметь общего корня.

СВОЙСТВО 2. Если α есть корень полинома $\Delta_{N,i-1}(S)$, то числа $\Delta_{N,i}(\alpha)$ и $\Delta_{N,i-2}(\alpha)$, $(i-2)$, $i \in E'$, имеют разные знаки.

СВОЙСТВО 3. Все корни полинома $\Delta_{N,i}(S)$, $i \in E$, $i \neq N$, простые (различные) и отрицательные. У полинома $\Delta_{N,N}(S)$ один из корней равен нулю.

СВОЙСТВО 4. Сумма корней полинома $\Delta_{N,i}(S)$, $i \in E$, равна

$$-A_i = -\frac{i(i+1)}{2}\lambda - \frac{(i+1)(2N-i)}{2}\mu.$$

СВОЙСТВО 5. Для сумм корней $(-A_\ell)$, $\ell \in \{0, 1, \ldots, i\}$, справедливо следующее неравенство:

$$0 > (-A_0) > (-A_1) > \cdots > (-A_{i-1}) > (-A_i).$$

СВОЙСТВО 6. Между корнями S_τ полинома $\Delta_{N,i}(S)$, $\tau\in\{0,I,\dots,i\}$, $i\in E$, и корнями $S_\ell^{(i+1)}$ полинома $\Delta_{N,i+1}(S)$, $\ell\in\{0,I,\dots,i+1\}$, $(i+1)\in E$, имеет место неравенство:

$$0>S_0^{(i+1)}>S_0^{i}>S_1^{(i+1)}>S_1^{(i)}>S_2^{(i+1)}>\dots>S_i^{(i+1)}>S_i^{(i)}>S_{i+1}^{(i+1)}>-A_{i+1}.$$

Методика доказательств перечисленных свойств известна [5,7].

Эти свойства позволяют вычислить (приближенно [8]) корни полинома $\Delta_{N,i}(S)$, если известны корни полинома $\Delta_{N,i-1}(S)$, $(i-1)$, $i\in E$.

Итак, пусть $0=\beta_0, -\beta_1,\dots,-\beta_N$ есть вычисленные корни полинома $\Delta(S)=\Delta_{N,N}(S)$. Тогда

$$\frac{\Delta_i(S)}{S\Delta_{N,N}(S)}=\frac{D_i(S)}{\Delta_{N,N}(S)}=\frac{A_{i,0}}{S}+\sum_{\ell=1}^{N}\frac{A_{i,\ell}}{S+\beta_\ell},$$

а решение (4.2) принимает вид:

$$P_i(t)=P_i+\sum_{\ell=1}^{N}A_{i,\ell}\cdot e^{-\beta_\ell t},\quad i\in E, \tag{4.5}$$

где

$$A_{i,\ell}=\frac{D_i(-\beta_\ell)}{\Delta'_{N,N}(-\beta_\ell)},\qquad P_i=\lim_{t\to\infty}P_i(t)=A_{i,0}. \tag{4.6}$$

(4.5) является решением системы уравнений (4.I) для $m=N$.

3⁰. Допустим, что имеется сосредоточенная однородная УВС [I], которая относится к классу систем малой и средней производительности [I]. Показано [9], что для последних систем экономически целесообразно иметь одно восстанавливающее устройство; $m=$ I.

Для этих систем (4.3) имеет вид:

$$\bar{P}_i(S)=\frac{\Delta_i(S)}{\Delta_{0N}(S)},\quad i\in E,$$

где

$$\Delta_{0,N}(S)=(N\lambda+S)\Delta_{0,N-1}(S)-N\lambda\mu\Delta_{0,N-2}(S),$$

$$\Delta_i(S)=S\frac{N!}{i!}\lambda^{(N-i)}\Delta_{0,i-1}(S),\quad i\in E,$$

$$\Delta_{0,i}(S)=(i\lambda+\mu+S)\Delta_{0,i-1}(S)-i\lambda\mu\Delta_{0,i-2}(S),$$

$$\Delta_{0,-1}(S)=1,\quad i\in E,\ i\neq N.$$

Корни полиномов $\Delta_{0,i}(S)$ обладают аналогичными свойствами, как и корни полиномов $\Delta_{N,i}(S), i\in E'$, за исключением свойства 4.

СВОЙСТВО 4. Сумма корней полинома $\Delta_{0,i}(S)$, $i\in E$, равна

$$-A_i=-(i+1)\mu-\frac{i(i+1)}{2}\lambda,\quad i\neq N,$$

$$-A_N=-N\mu-\frac{N(N+1)}{2}\lambda.$$

Решением системы уравнений (4.I) при $m=$I будет

$$P_i(t)=\sum_{\ell=0}^{N}A_{i,\ell}e^{-\beta_\ell t},\quad i\in E, \tag{4.7}$$

где

$$A_{i,\ell}=\frac{D_i(-\beta_\ell)}{\Delta'_{0,N}(-\beta_\ell)},$$

$$D_i(-\beta_\ell)=\frac{\Delta_i(-\beta_\ell)}{-\beta_\ell},$$

а величины $(-\beta_\ell)$, $\ell\in E$, являются корнями полинома $\Delta_{0,N}(S)$.

4⁰. Для вычисления координат $S_k(t)$, $k\in E_1$, вектор-функции готовности (I.2) необходимо воспользоваться формулой (3.2) и найденными решениями (4.2), (4.5), (4.7).

Вектор-коэффициент готовности (I.3) можно рассчитать, если воспользоваться известными формулами для вероятностей P_i, $i\in E$ [4,5].

§ 5. О расчете вектор-функций надежности и восстановимости однородной универсальной вычислительной системы

Чтобы определить координаты $R_k(t)$, $k\in E_1$, вектор-функции надежности (I.6) восстанавливаемой УВС, необходимо считать состояния $i\in\{0,I,\dots,(k-1)\}$ поглощающими; составить дифференциальные уравнения для $P_i(t)$, $i\in E$, решить эти уравнения, воспользовавшись такой же методикой, как и в § 4. Тогда

$$R_k(t)=\sum_{i=k}^{N}P_i(t),\quad k\in E_1.$$

Координаты $U_k(t)$, $k\in E_1$, вектор-функции восстановимости (I.8) вычисляются в предположении, что состояния $i\in\{k,(k+1),\dots,N\}$ – поглощающие; тогда

$$U_k(t)=1-\sum_{i=0}^{k-1}P_i(t).$$

При расчете векторов среднего времени безотказной работы и среднего времени восстановления можно использовать частотный метод [IO]. Этот метод прост и приводит к результатам, которые хорошо согласуются с результатами более точных расчетов.

Идея расчета стационарных вектор-функций надежности $\vec{R}^*(t)$ и восстановимости $\vec{U}^*(t)$ содержится в [4]. Кроме того, можно показать, что $\vec{R}^*(0)=\left\{\sum_{i=k}^{N} P_i\right\}=1-\bar{U}^*(0)$,

$$\vec{R}^*=\left\{R_k^*=\sum_{i=k}^{N-1} P_i\right\},\ k\in E_1,$$

где величины $P_i,\ i\in E$, определяются из (4.6),

$$R_k^*=\lim_{t\to\infty} R_k^*(t).$$

§ 6. Примеры живучих однородных универсальных вычислительных систем

1. Имеется УВС "Минск-222" [4,II]. Функция живучести УВС (I.I) и функция занятости ВС (I.7), рассчитанные соответственно по формулам (2.6) и (2.7), представлены на рис. I. Здесь же изображена функция живучести невосстанавливаемой системы, которая рассчитана по формуле (2.8). $\sigma = m/N$.

2. Пусть имеется невосстанавливаемая система "Минск-222"; N = I6, n = 3. Вектор-функция готовности $\vec{S}(t)$ (I.2) изображена на рис. 2; S_i, $i\in\{3,4,\ldots,16\}$, является i-й координатой $\vec{S}(t)$. На этот же рисунок нанесены значения безразмерной величины $\lambda\cdot t$ и соответствующие им значения координат вектор-функции готовности.

3. Для невосстанавливаемой системы "Минск-222", у которой N =I00, n =50, вектор-функция готовности представлена на рис. 3, на который нанесены значения безразмерной величины $\lambda\cdot t$. Числом $i\in\{50,51,\ldots,100\}$ обозначена i-я координата вектор-функции готовности.

4. Вектор-коэффициент готовности (I.3) для системы "Минск-22", состоящей из I00 ЭМ и имеющей n =66, для различных m представлен на рис. 4.

5. Пусть имеются системы, у которых N =I000, N =I00, m=I. Зависимости векторов $\vec{\Theta}$ и $\vec{T}$ от λ и μ представлены соответственно на рис.5 и рис.6 ($1/\mu$ в мин, K =0,9 N + I,0 N).

6. Стационарная вектор-функция надежности для системы "Минск-222", имеющей N =I00, n =90, m =I0, изображена на

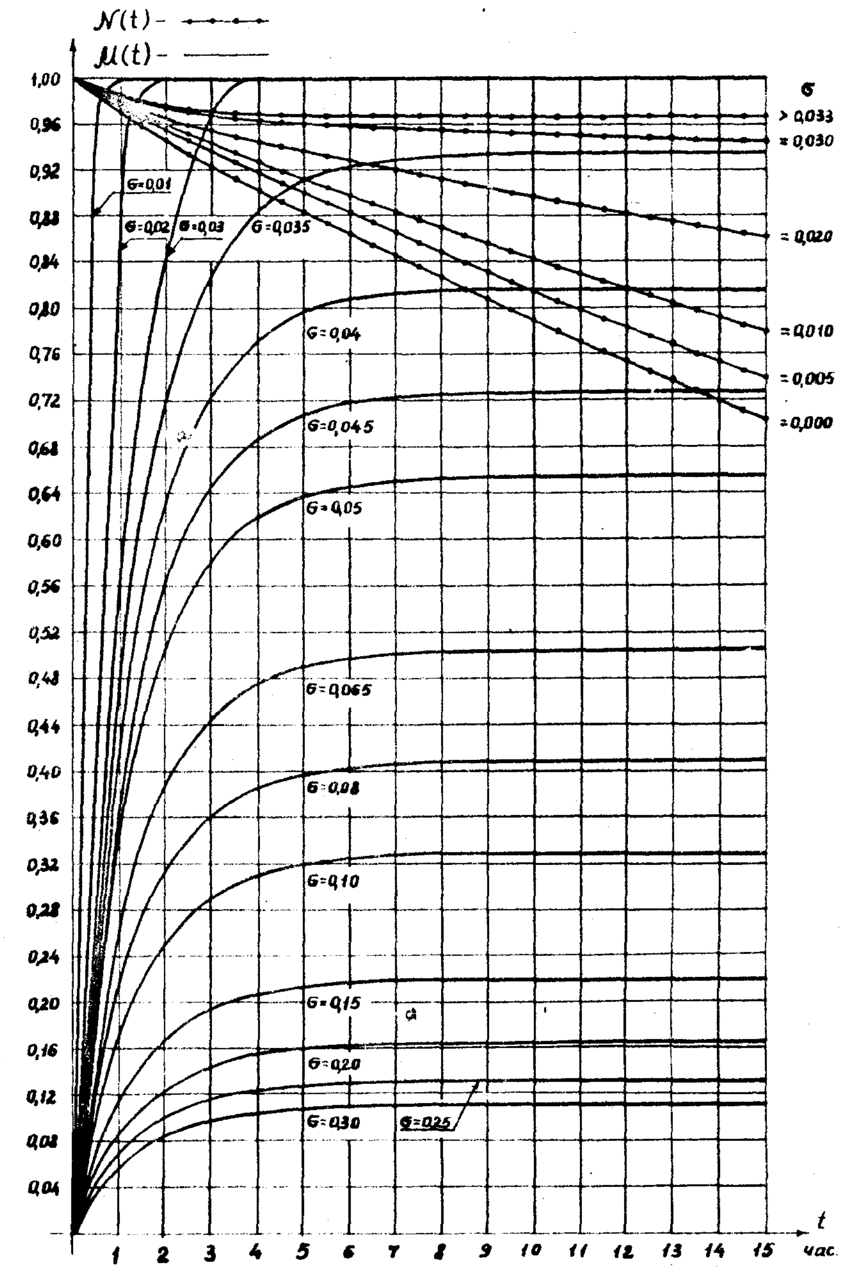
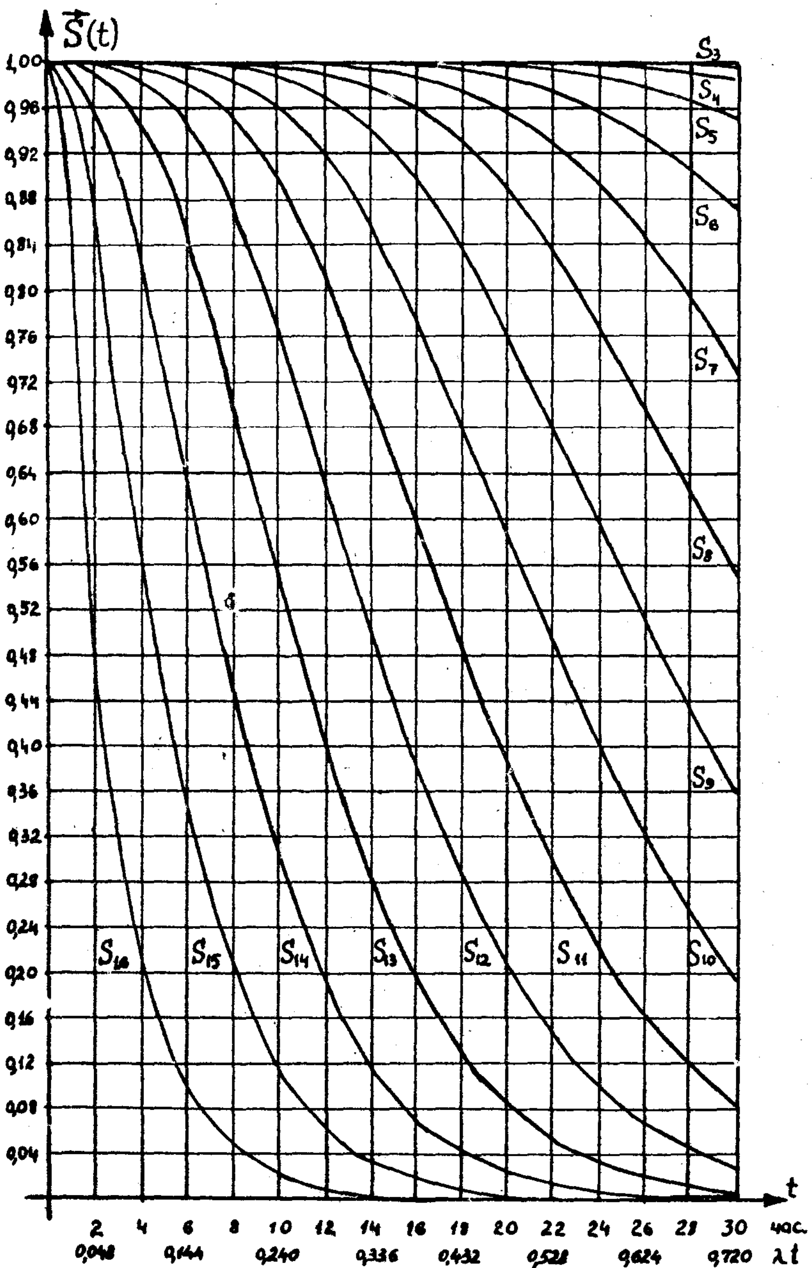
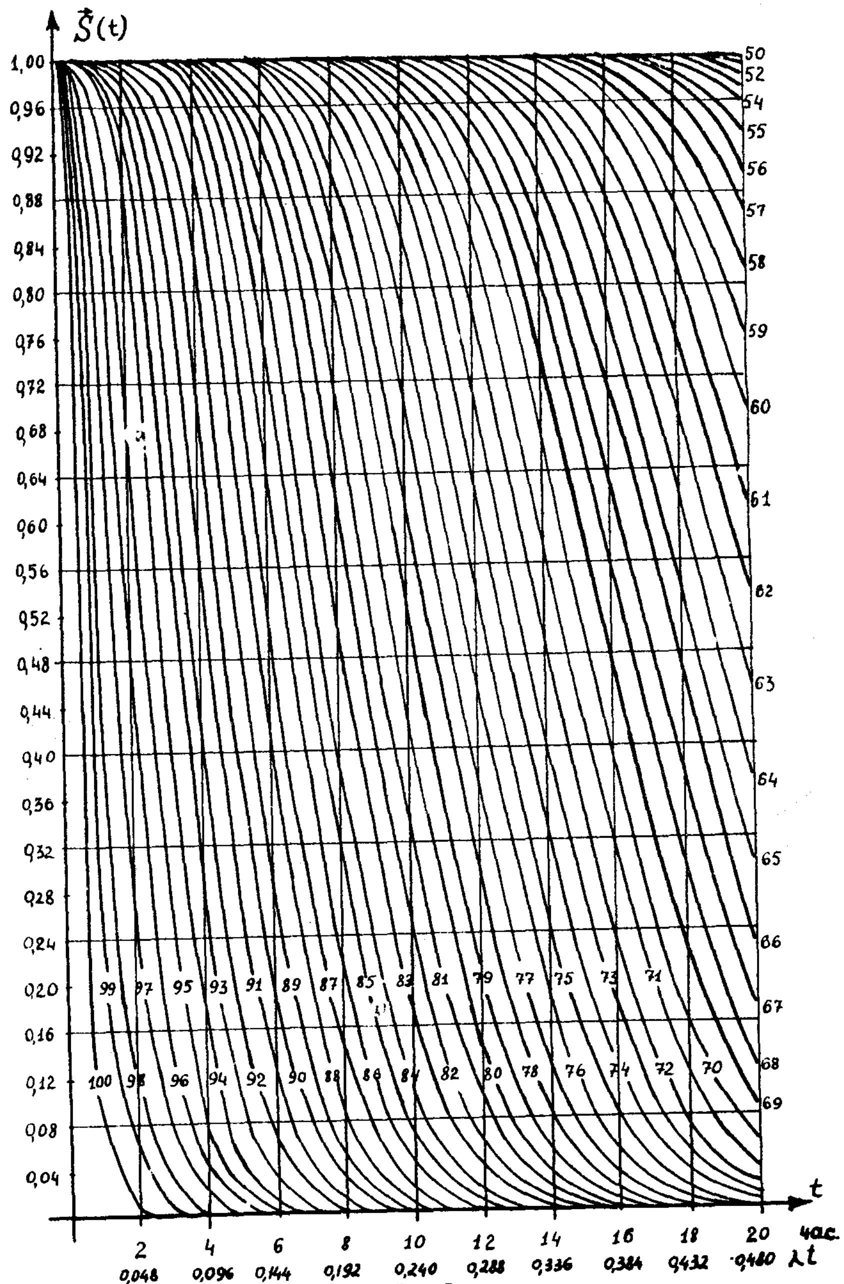


Рис.I



S(t)
S3
S4
S5
S6
S7
S8
S9
S10
S11
S12
S13
S14
S15
S16
t
час.
λt

Рис.2



S(t)
t
час.
λt

Рис.3

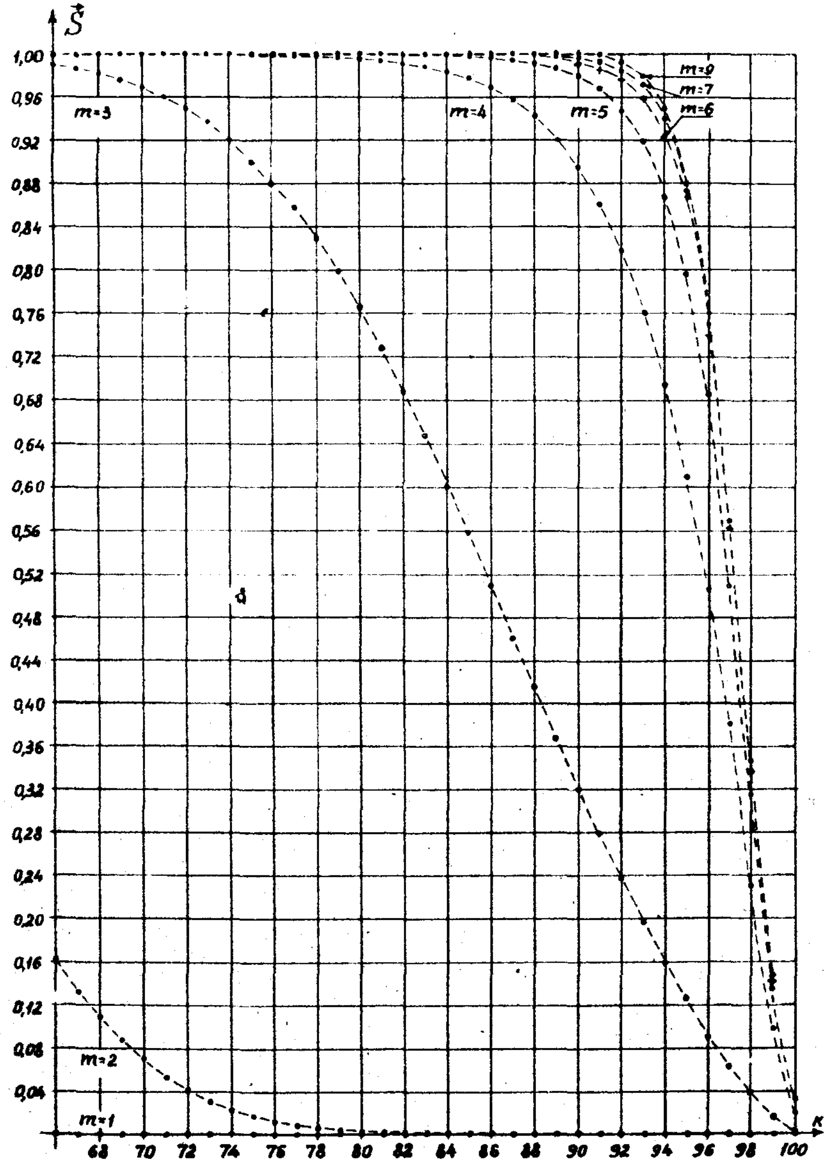

S
m=9
m=7
m=6
m=3
m=4
m=5
m=2
m=1
k

Рис.4

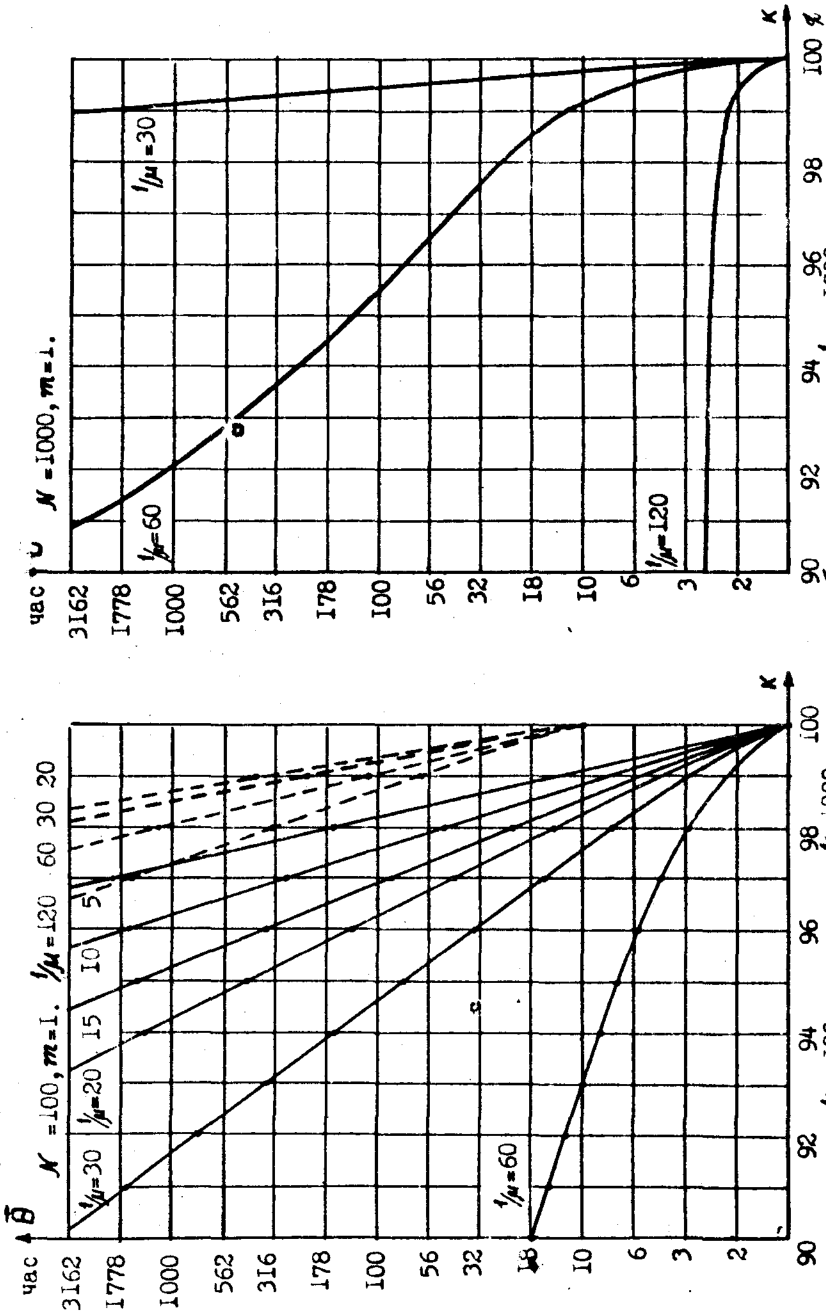
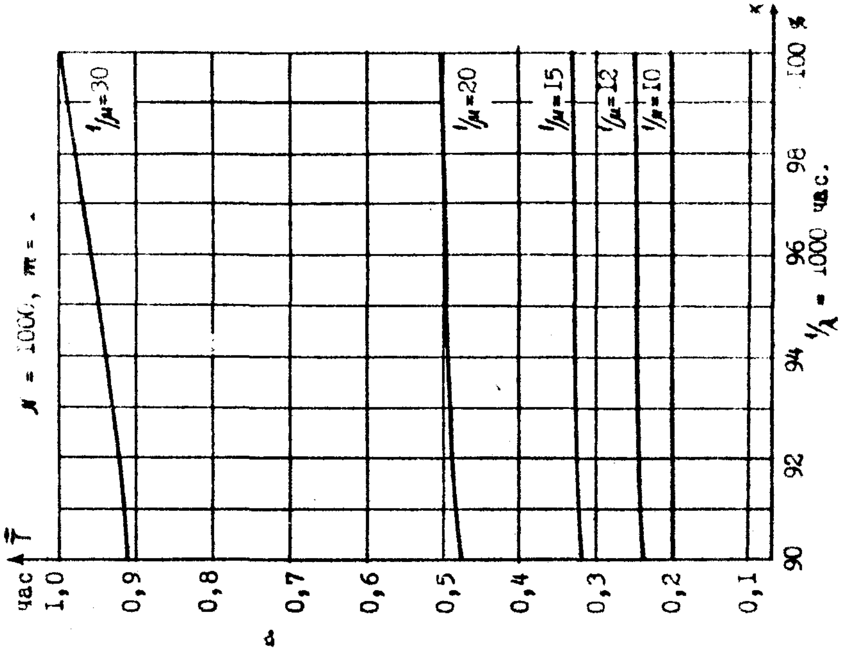

N =1000, m=1.
1/μ=30
1/μ=60
1/μ=120
1/λ = 1000 час.
N =100, m=1.
1/λ = 100 час.
час
k

Рис.5


N = 1000, m = 1
1/μ=30
1/μ=20
1/μ=15
1/μ=12
1/μ=10
1/λ = 1000 час.

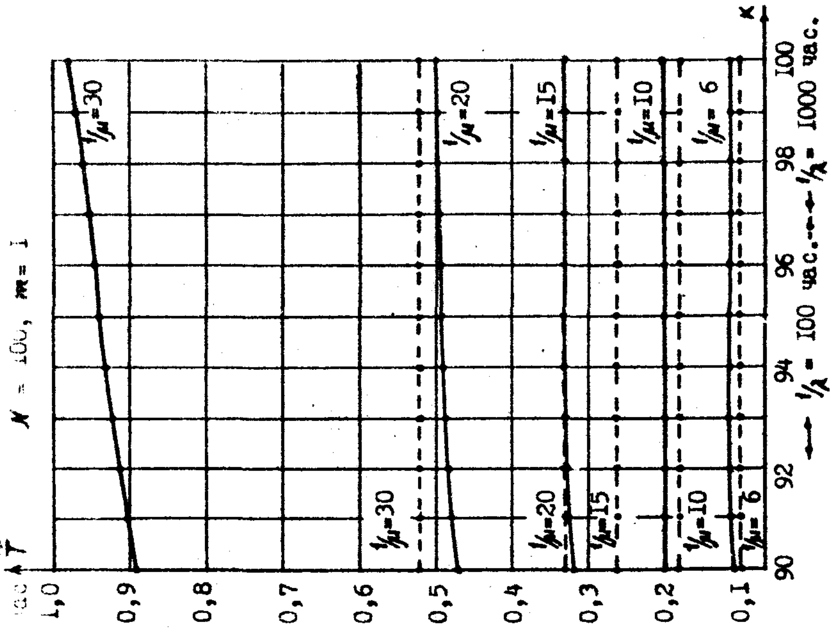

N = 100, m = 1
1/μ=30
1/μ=20
1/μ=15
1/μ=10
1/μ= 6
1/λ = 100 час.
1/λ = 1000 час.

Рис.

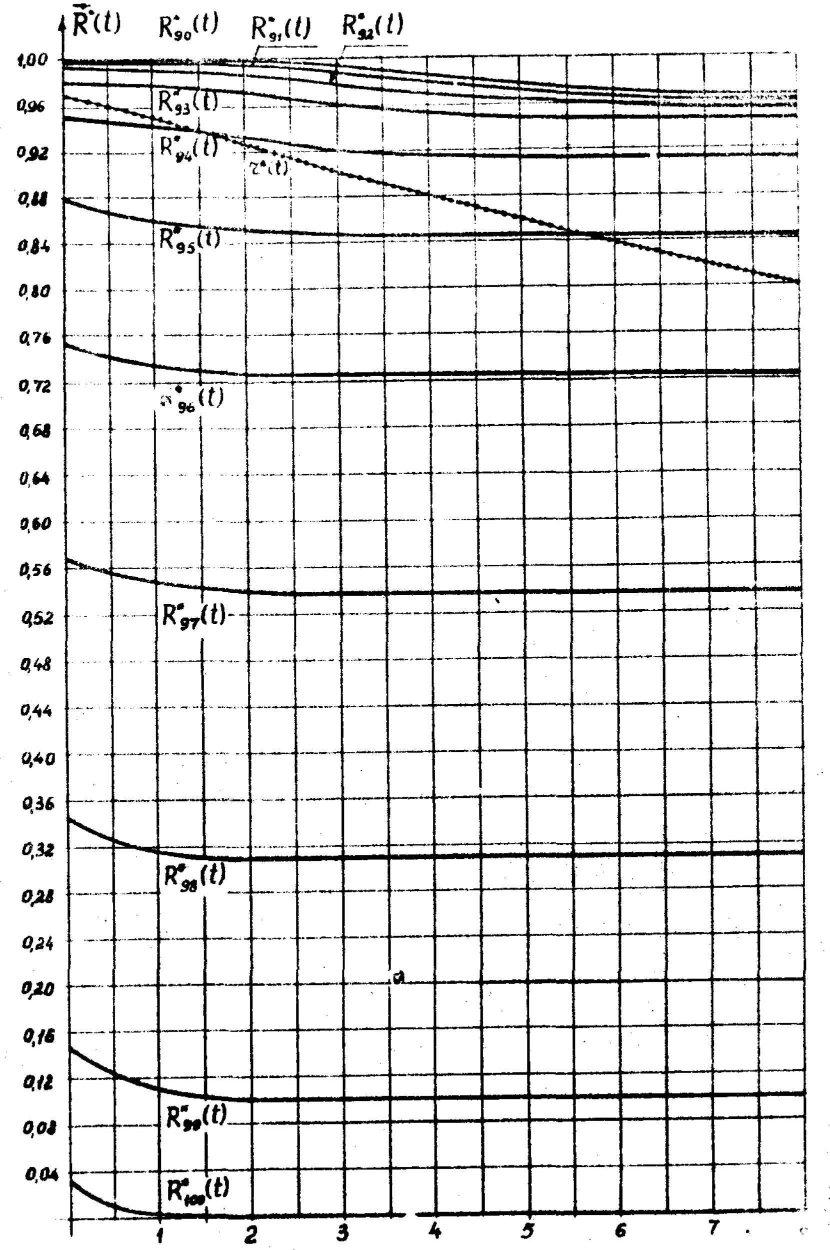

R*(t)
R*₉₀(t)
R*₉₁(t)
R*₉₂(t)
R*₉₃(t)
R*₉₄(t)
R*₉₅(t)
R*₉₆(t)
R*₉₇(t)
R*₉₈(t)
R*₉₉(t)
R*₁₀₀(t)
1,00
0,96
0,92
0,88
0,84
0,80
0,76
0,72
0,68
0,64
0,60
0,56
0,52
0,48
0,44
0,40
0,36
0,32
0,28
0,24
0,20
0,16
0,12
0,08
0,04
1
2
3
4
5
6
7

Рис.7

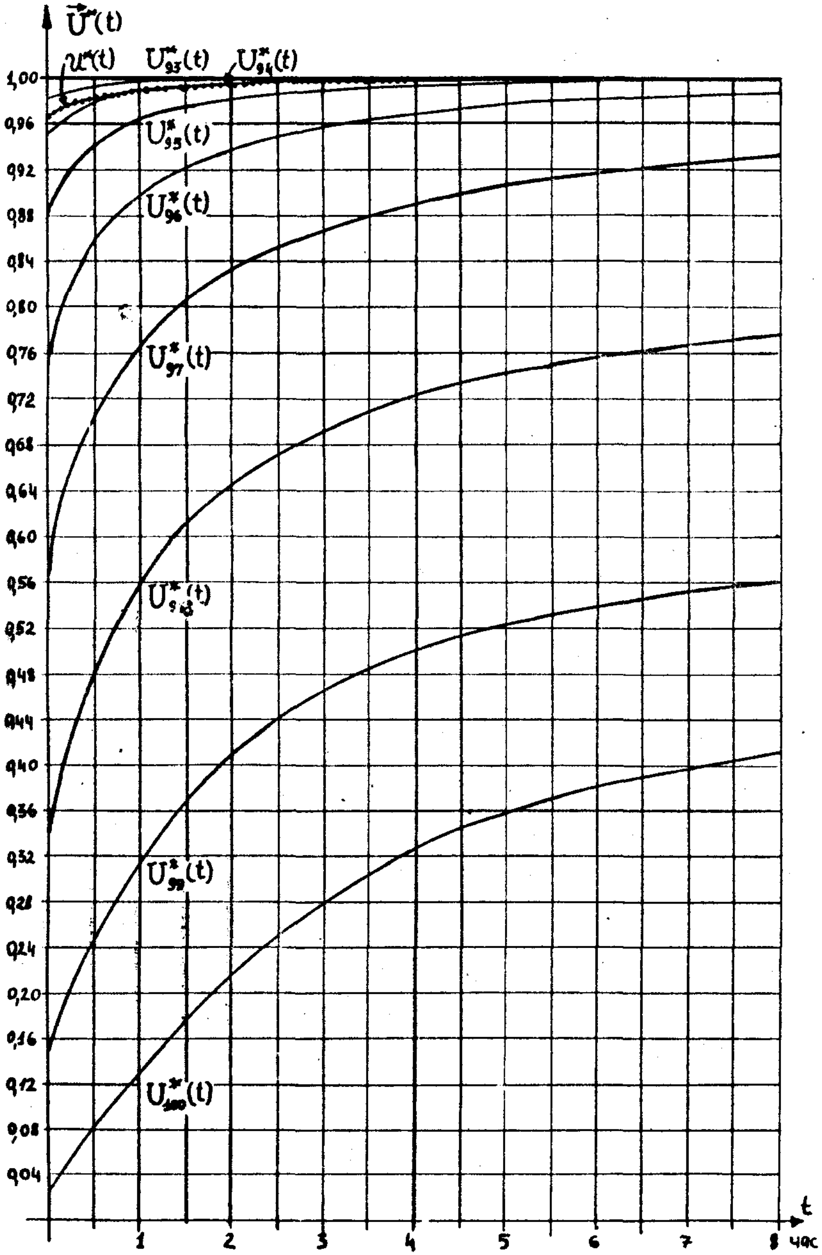


Рис.8

рис. 7. Кроме того, на рис. 7 представлена стационарная функция надежности $\tau^*(t)$ элементарной машины.

7. Для УВС "Минск-222", $N = 100$, $n = 93$, $m = 10$, стационарная вектор-функция восстановимости представлена на рис.8.Здесь же изображена стационарная функция восстановимости $u^*(t)$ элементарной машины.

Приведенные результаты позволяют сделать вывод: однородные универсальные вычислительные системы высокой производительности и высокой надежности могут быть синтезированы на базе существующих электронных вычислительных машин.

Л и т е р а т у р а

1. Э.В. ЕВРЕИНОВ, Ю.Г. КОСАРЕВ. Однородные универсальные вычислительные системы высокой производительности. Новосибирск, Изд-во "Наука", Сибирское отделение, 1966.
2. А. КОФМАН. Методы и модели исследования операций. М., Изд-во "Мир". 1966.
3. Е.С. ВЕНТЦЕЛЬ. Введение в исследование операций. М., Изд-во "Сов. радио", 1964.
4. В.Г. ХОРОШЕВСКИЙ. Некоторые вопросы надежности однородных универсальных вычислительных систем. - Вычислительные системы,Новосибирск, Изд-во "Наука", Сибирское отделение, 1966. вып. 23. стр. 69-89.
5. Б.В.ГНЕДЕНКО,Ю.К. БЕЛЯЕВ, А.Д. СОЛОВЬЕВ. Математические методы в теории надежности. М., Изд-во "Наука", 1965.
6. J.U.LECHNER. Simplified reliability calculations for complicated systems. IEEE Trans. Syst. Sci. and Cybernet., 1965. vol.1, No. 1, p.31-36.
7. Г. СЕГЕ. Ортогональные многочлены. М., Физматгиз, 1962.
8. П.В. МЕЛЕНТЬЕВ. Приближенные вычисления. М., Физматгиз, 1962.
9. В.Г. ХОРОШЕВСКИЙ. Некоторые вопросы стоимости однородных универсальных вычислительных систем. - Вычислительные системы, Новосибирск, Изд-во "Наука", Сибирское отделение 1968. вып. 31. стр. 41-54.
10. Г.П. БЕЗНОСОВ, Б.П. ЗЕЛЕНЦОВ. Частотный метод анализа надежности систем с восстановлением, состоящих из однотипных элементов. - Известия СО АН СССР, Серия технических наук, вып. 1. № 2, 1966. стр. 106-111.
11. Э.В. ЕВРЕИНОВ, Г.П. ЛОПАТО. Универсальная вычислительная система "Минск-222". - Вычислительные системы, Новосибирск, Изд-во "Наука", Сибирское отделение, 1966,вып.23, стр. 13-20.

Поступила в редакцию
1.IV.1967г.