

Работоспособные ресурсы в ВС выявляются с помощью средств контроля и диагностики.

**Контроль** системы позволяет установить факт работоспособности или неработоспособности проверяемых ресурсов.

**Диагностика** позволяет определить, какой из ресурсов системы неработоспособен.

Для контроля и диагностики можно выделить **контрольно-диагностическое ядро**. При этом необходимым условием будет *работоспособность ядра*.

Проверка работоспособности ядра выполняется специальными средствами. Остальная часть ЭМ проверяется с помощью контрольно-диагностических тестов, выполняемых ядром.

- Эффективность средств контроля и диагностики тем выше, *чем меньше объём ядра* по отношению к проверяемой части.
- По отношению к ВС допустимо использование терминов **«самоконтроль»** и **«самодиагностика»**.
- Для самоконтроля ВС могут быть применены как универсальные, так и проблемно-ориентированные контрольные тесты. Последние учитывают специфику сферы применения ВС, структуру решаемых задач.
- Проблемно-ориентированные тесты существенно проще универсальных.
- Состояние (не)работоспособности ресурсов устанавливается после сравнения результатов выполнения контрольного теста в нескольких подсистемах (ЭМ).

В какие моменты должен производиться (само)контроль ВС?

Выбор моментов (само)контроля находится в прямой зависимости от надёжности ВС (параметры  $N, n, \lambda, \Lambda, t, \mu$ ).

Число работоспособных ЭМ может быть долгое время не меньше  $n$ , но среди отказавших могут быть машины, участвующие в решении сложной задачи. Поэтому контроль правильности работы не должен проводиться через очень большие промежутки времени.

Контроль правильности работы ЭМ ВС будет достаточно эффективным, если он будет проводиться через время  $\Theta$  безотказной работы.

Уровни надёжности ЭМ и ЭВМ имеют один порядок:

$$\lambda^{-1} = 10^{-5} \dots 10^{-8} \text{ ч.}$$

Если число ЭМ в подсистеме  $n = 10 \dots 10^6$ , то

$$\Theta = 10^{-1} \dots 10^7 \text{ ч.}$$

Т.о. через время  $\Theta$  в каждой машине ВС должен запускаться контрольный тест.

Удовлетворительным для практики будет время  $\Delta\Theta \leq 0.001\Theta$  реализации контрольных и диагностических тестов, или

$$\Delta\Theta \leq 10^{-4} \dots 10^4 \text{ ч.}$$

Чем больше скорость тестов, тем выше не только интенсивность восстановления  $\mu$  ЭМ, но и производительность ВС.

- В качестве ядра могут быть использованы любые работоспособные ЭМ.
- Заключение о (не)работоспособности отдельных ЭМ принимается коллективно всеми машинами на основе составления их индивидуальных заключений о работоспособности соседних с ними машин.
- Достоверность такого заключения достигается при условии  $\varepsilon \leq [(N - 1)/2]$  , где  $\varepsilon$  – максимальное число неработоспособных ЭМ в системе;  $[x]$  – целая часть числа  $x$ .
- При современном уровне ВТ последнее неравенство удовлетворяется почти всегда.

**Целью численного исследования** надёжности ВС является выявление зависимости их показателей качества функционирования от параметров:  $N$ ,  $N - n$ ,  $\lambda$ ,  $t$ ,  $\mu$ ,  $i$ .

При численном анализе надёжности переходного режима функционирования ВС будем использовать функции  $R(t)$ ,  $U(t)$ ,  $S(t)$  надёжности, восстановимости и готовности ВС.

Методика вывода расчётных формул сложна. Ранее была изложена *схема для расчётов*.

Изучение начнём с простейших ВС, завершим его системами с массовым параллелизмом.

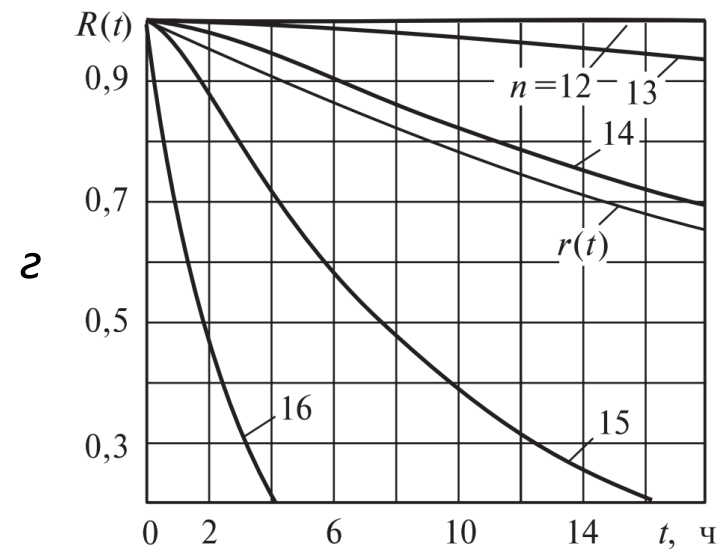
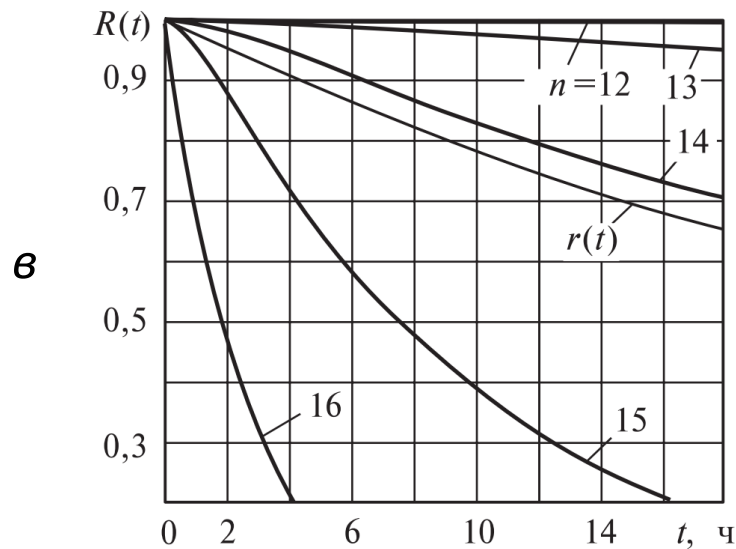
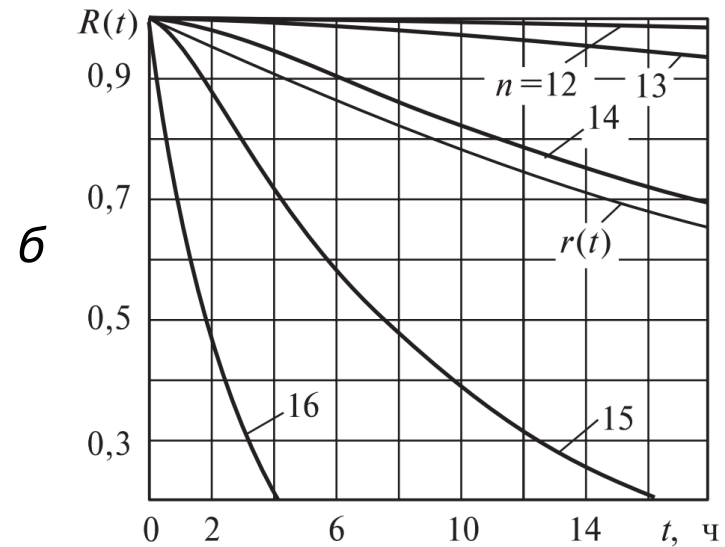
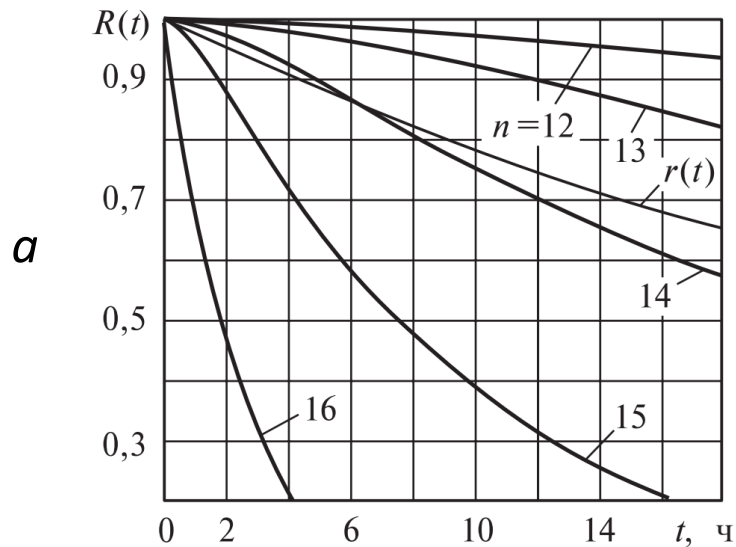
«Минск-222» конфигурировалась из ЭВМ 2 поколения «Минск-2» («Минск-22»). Результаты анализа функционирования ВС позволяют

- установить потенциальные пределы снизу для показателей надёжности ВС
- ответить на вопрос: могут ли быть созданы высоконадёжные системы из низконадёжных ЭМ и какова цена достижения уровня надёжности ВС, *который не ниже надёжности одной из ЭМ*

Числовые значения показателей надёжности ЭВМ «Минск-2»:  $\lambda = 0.024 \frac{1}{\text{ч.}}$ ,  $\mu = 0.7 \frac{1}{\text{ч.}}$ .

Если учитывались только отказы УУ, АЛУ и ОЗУ, то:  $\lambda = 0.0084 \frac{1}{\text{ч.}}$ ,  $\mu = 0.91 \frac{1}{\text{ч.}}$ .

# Функция надёжности ВС «Минск-222»



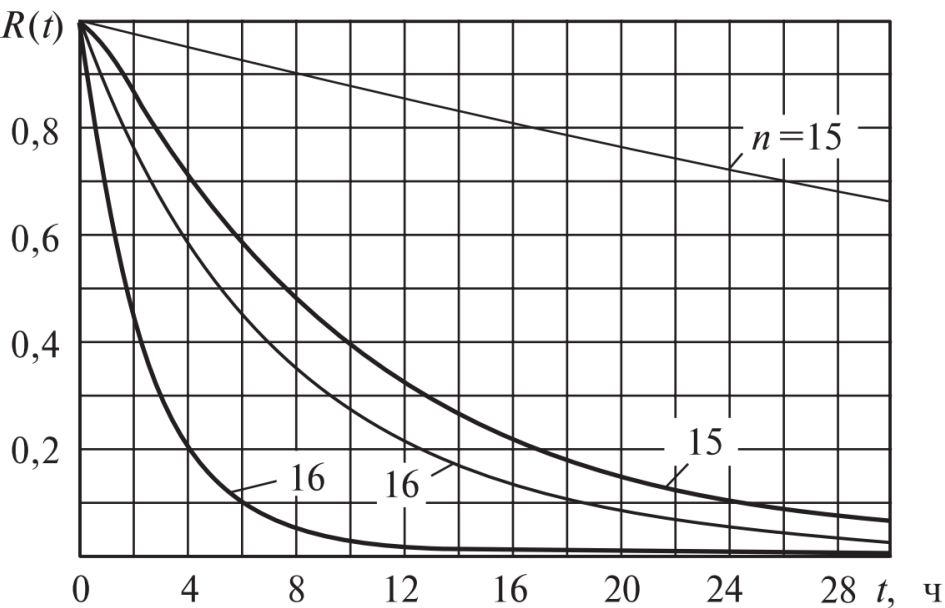
$a - m = 1, б - m = 2, в - m = 3, г - m = 16;$

$N = i = 16; n = 12, \dots, 16; \lambda = 0.024 \text{ 1/ч}, \mu = 0.7 \text{ 1/ч}$



- Ценой невысокой избыточности ( $N - n \leq 3$ ) и даже при  $m = 1$  можно было достичь в ВС «Минск-222» значений вероятности безотказной работы, превышавших значения функции надёжности «Минск-2»
- Даже при использовании низконадёжных ЭМ существует предел в наращивании количества восстанавливающих устройств, после которого надёжность ВС повышается практически несущественно.

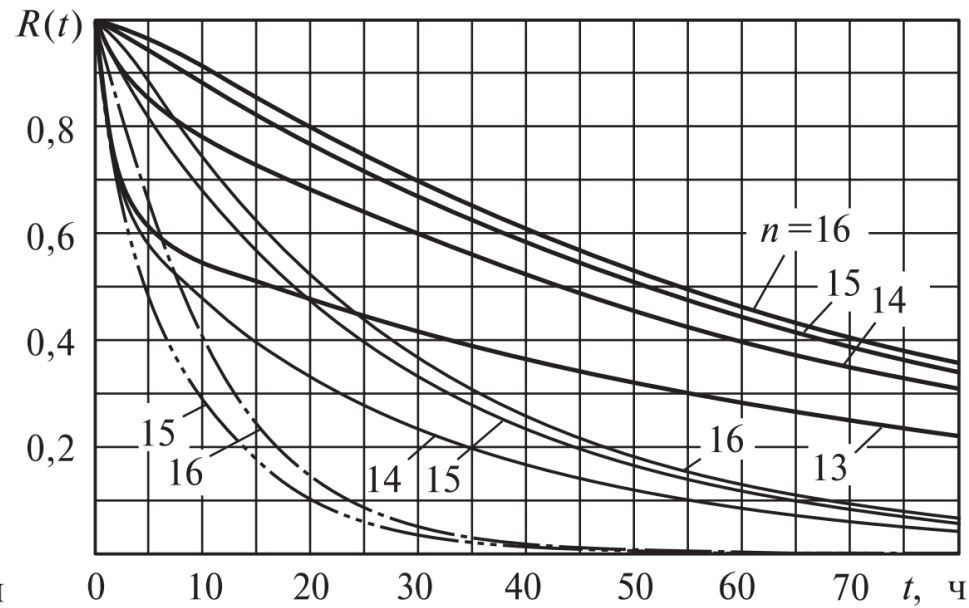
# Функция надёжности ВС «Минск-222»



Функция надёжности ВС  
«Минск-222»:  $N = i = 16$ ;  
 $n = 15, 16; m = 1$

— —  $\lambda = 0.0084 \text{ 1/ч}, \mu = 0.91 \text{ 1/ч}$

— —  $\lambda = 0.024 \text{ 1/ч}, \mu = 0.7 \text{ 1/ч}$



Зависимость функции надёжности  
от начального состояния:

$N = 16, \lambda = 0.024 \text{ 1/ч}, \mu = 0.7 \text{ 1/ч}$

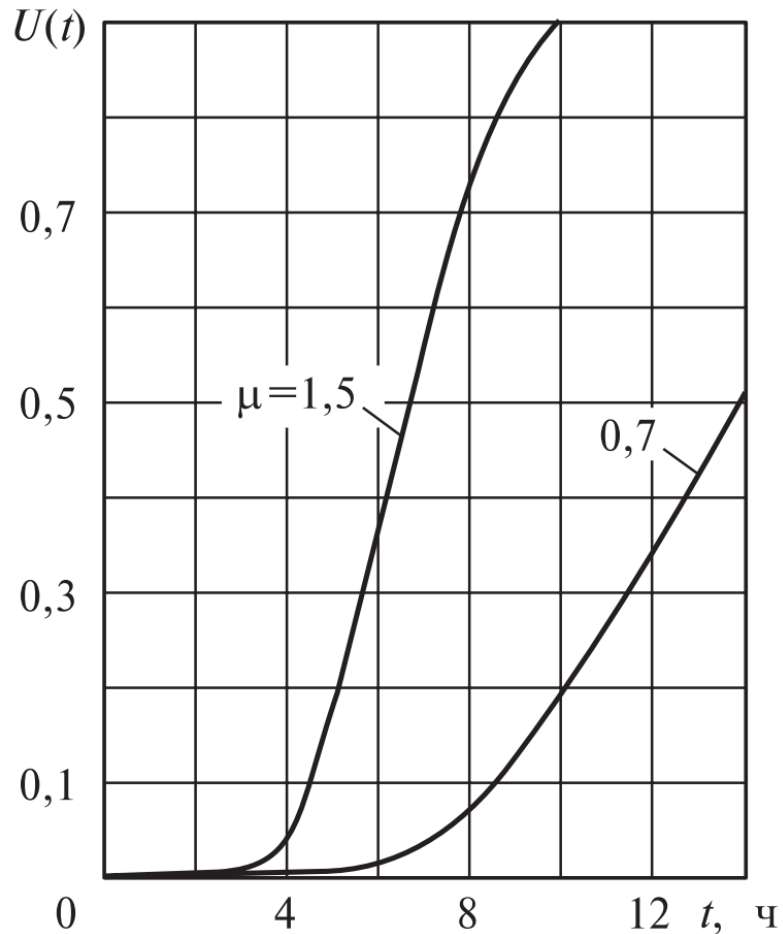
— —  $n = 13, m = 1, i = 13 \dots 16,$

— —  $n = 14, m = 1, i = 14 \dots 16,$

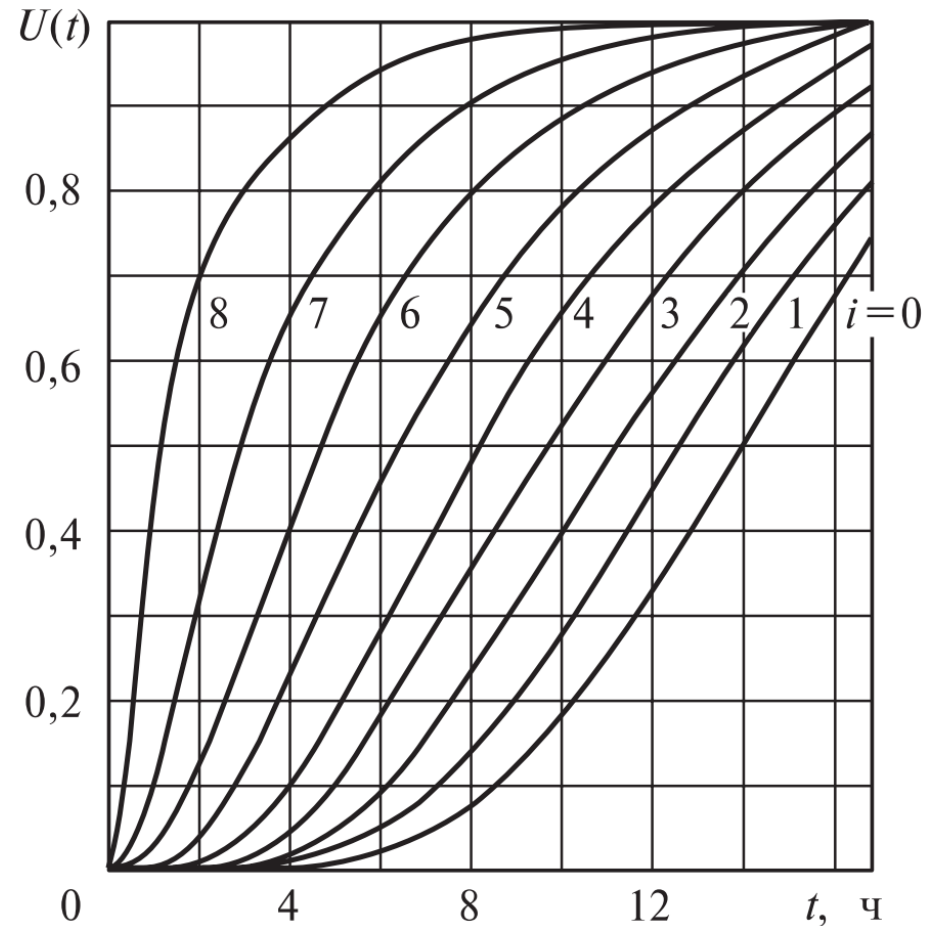
--- —  $n = 15, m = 1, i = 15, 16,$

- Увеличение среднего времени  $\lambda^{-1}$  безотказной работы ЭМ и интенсивности  $\mu$  восстановления отказавших машин приводит к заметному повышению надёжности ВС.
- Надёжность ВС резко падает во времени, если в момент начала функционирования *количество отказавших ЭМ было близко к количеству машин, составляющих избыточность.*

# Функция восстановимости ВС «Минск-222»



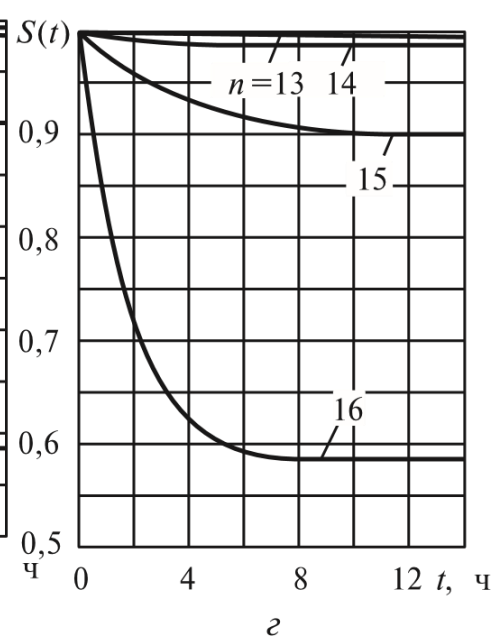
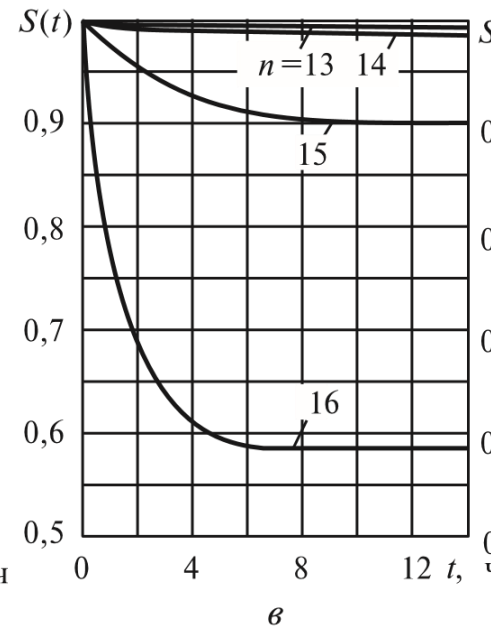
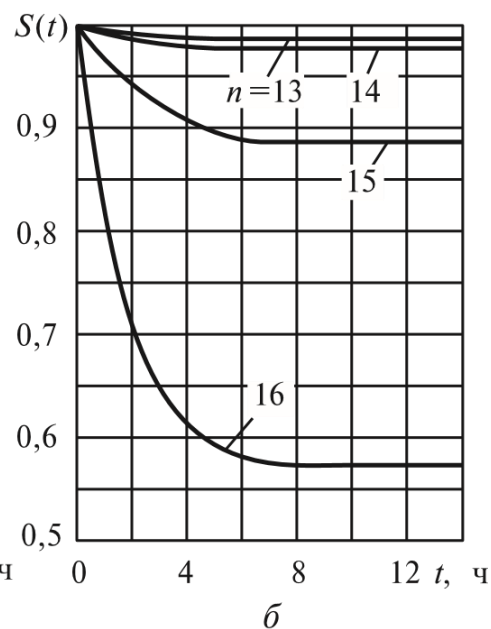
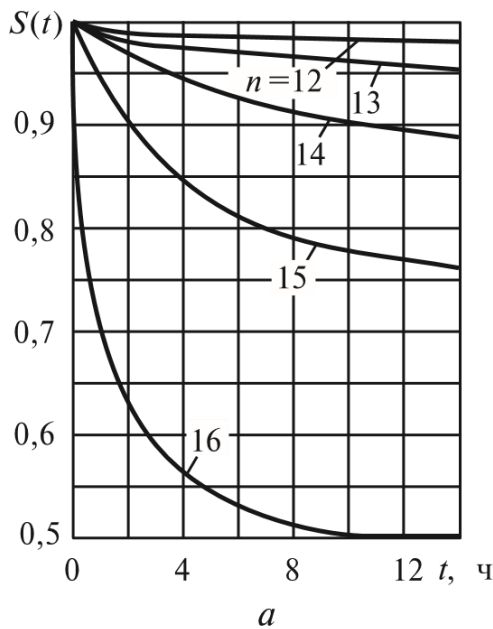
Функция восстановимости  
«Минск-222»:  $N = 10, n = 9,$   
 $m = 1, i = 0, \lambda = 0.024 \text{ 1/ч}$



Зависимость функции  
восстановимости ВС «Минск-222»  
от начального состояния:  
 $N = 10, n = 9, m = 1, i = 0..8,$   
 $\lambda = 0.024 \text{ 1/ч}, \mu = 0.7 \text{ 1/ч}$

- Анализ кривых позволяет выявить наличие **границы для наращивания числа ВУ** ( $m \rightarrow N$ ), начиная с которой значения функции надёжности ВС увеличиваются незначительно.
- Анализ функции  $U(t)$  убеждает в том, что в распределённых ВС легко обеспечить практически приемлемые значения показателей восстановимости.

# Функция готовности ВС «Минск-222»



Функция готовности ВС «Минск-222»:

$a - m = 1, б - m = 2, в - m = 3, г - m = 16$

$N = i = 16; n = 12 \dots 16; \lambda = 0.024 \text{ 1/ч}; \mu = 0.71 \text{ 1/ч}$

- ВС могут иметь относительно высокий уровень готовности, даже если они сконфигурированы из низконадёжных ЭВМ. Кроме того, системы достаточно быстро входят в стационарный режим.

Таблица значений функции готовности

$n$	$m$					
	1	2	3	4	...	16
16	0,485	0,577	0,582	0,583	...	0,583
15	0,751	0,894	0,902	0,903	...	0,903
14	0,887	0,975	0,985	0,985	...	0,985
13	0,953	0,995	0,998	0,998	...	0,998
12	0,982	0,999	1,000	1,000	...	1,000
11	0,993	1,000	1,000	1,000	...	1,000

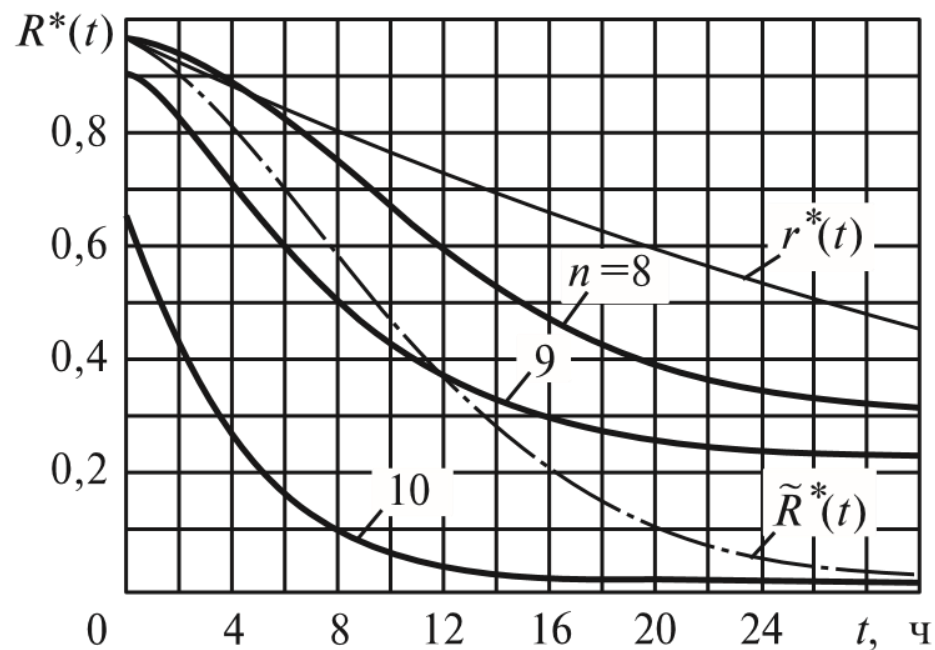
Для распределённых ВС на базе ЭВМ 2 поколения:

$$m \leq ]0.1N[, \quad (N - n) \leq ]0.1N[, \quad (1)$$

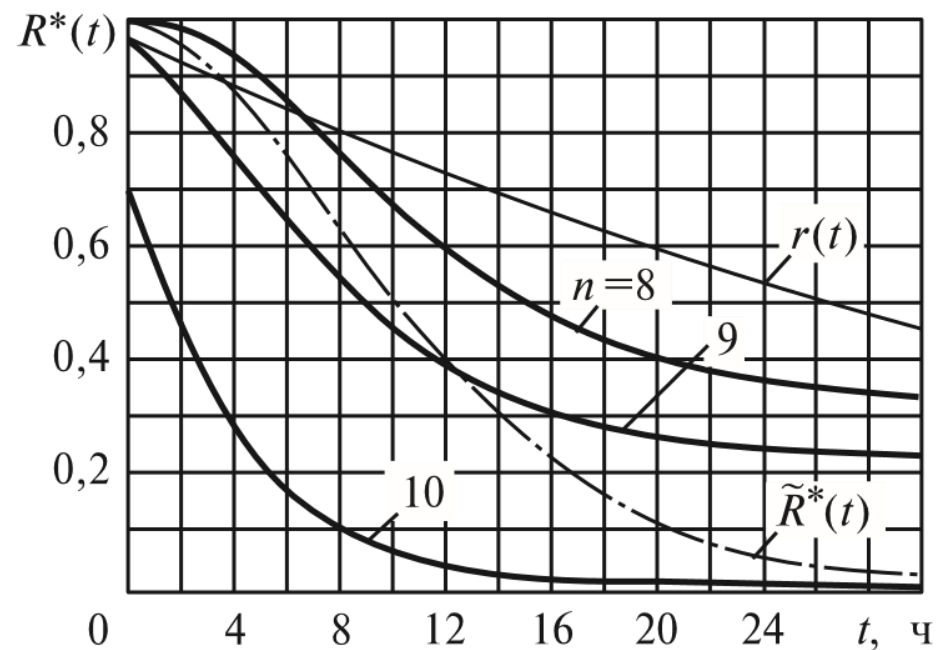
где  $]x[$  - такое ближайшее к  $x$  целое число, что  $]x[ \geq x$ . Это следует из того, что устанавливать числа  $m$  и  $(N - n)$  более  $]0.1N[$  экономически нецелесообразно, т.к. увеличение от  $]0.1N[$  до  $N$  и  $N - 1$  не приводило к существенному повышению надёжности ВС.



# Функции оперативной надёжности и восстановимости



*a*



*б*

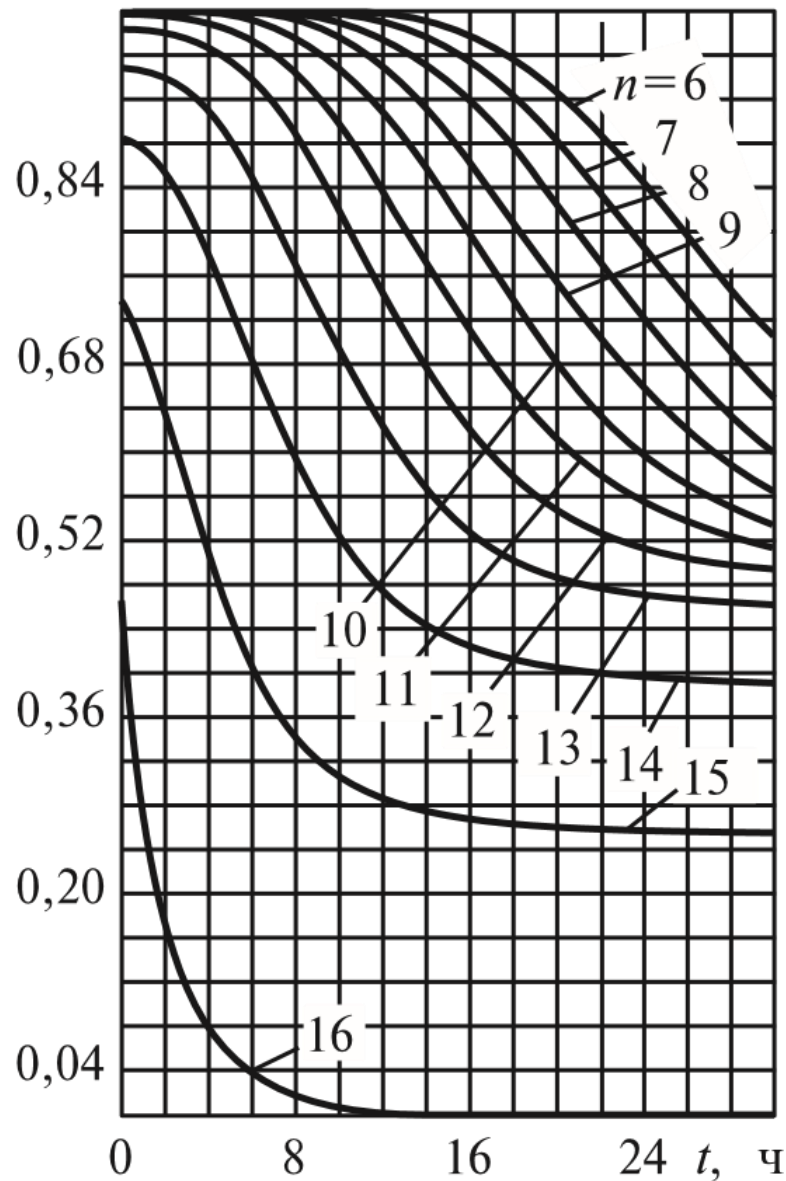
Функция оперативной надёжности ВС «Минск-222»

$a - m = 1, б - m = 10;$

$N = 10; n = 8 \dots 10$

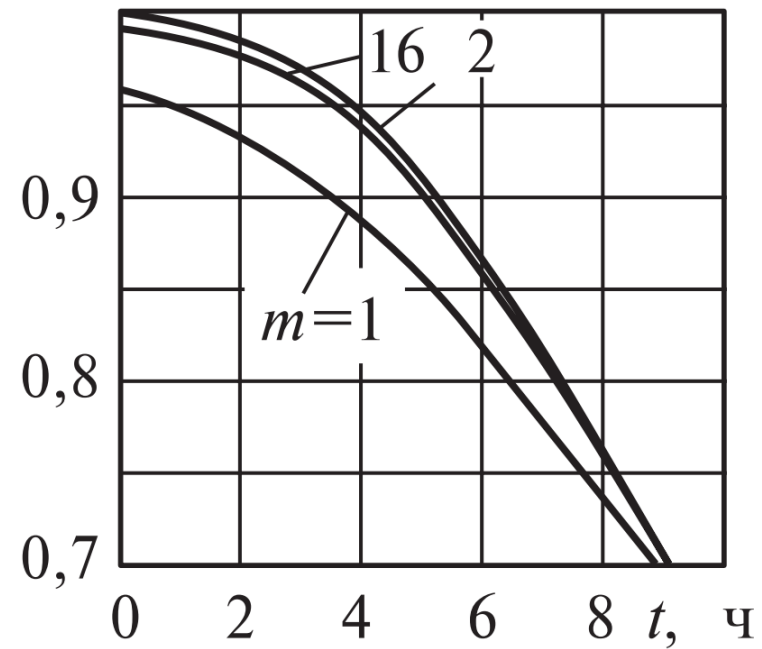
# Функции оперативной надёжности и восстановимости

$R^*(t)$



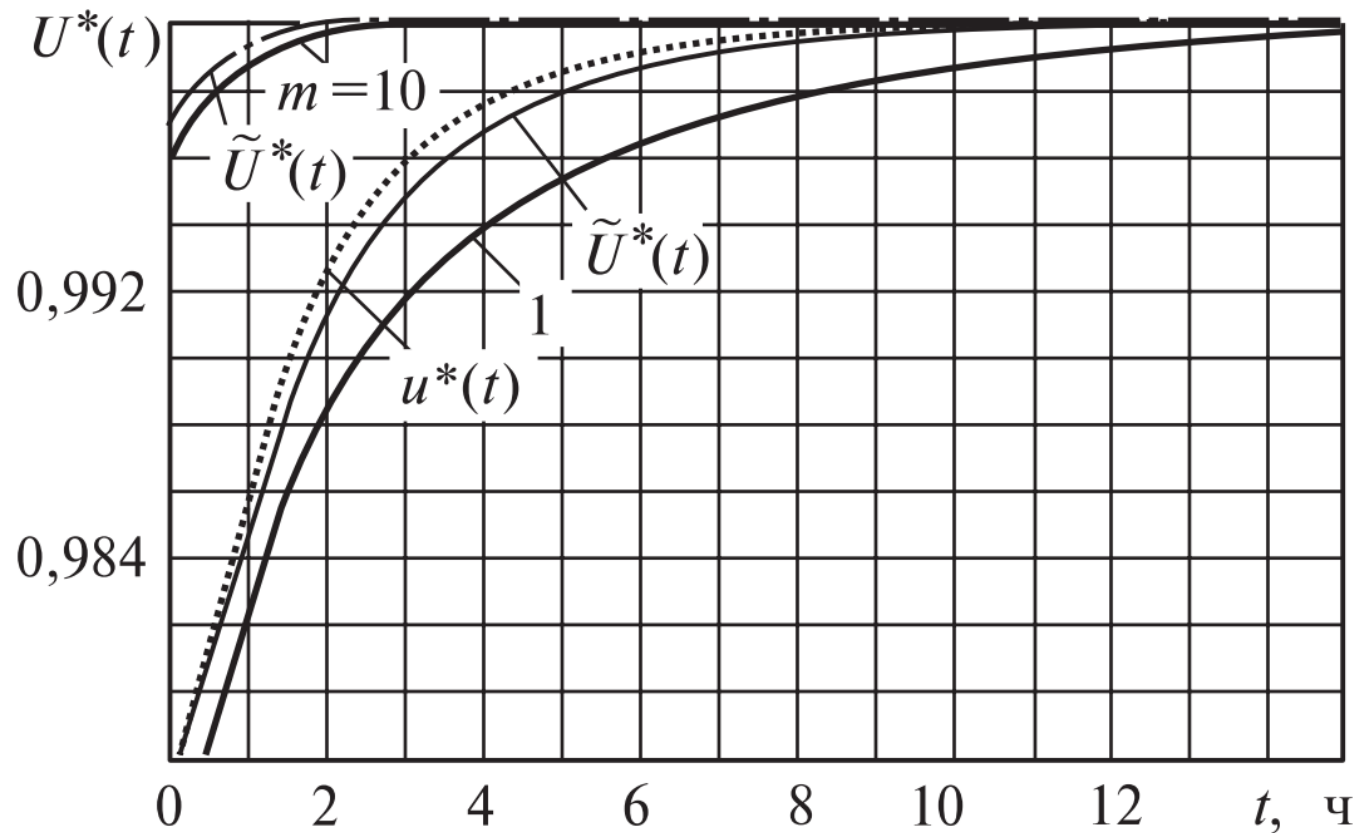
Функция оперативной надёжности ВС «Минск-222»  
 $N = 16; n = 6 \dots 16; m = 1$

$R^*(t)$



$N = 16; n = 13; m = 1 \dots 16$

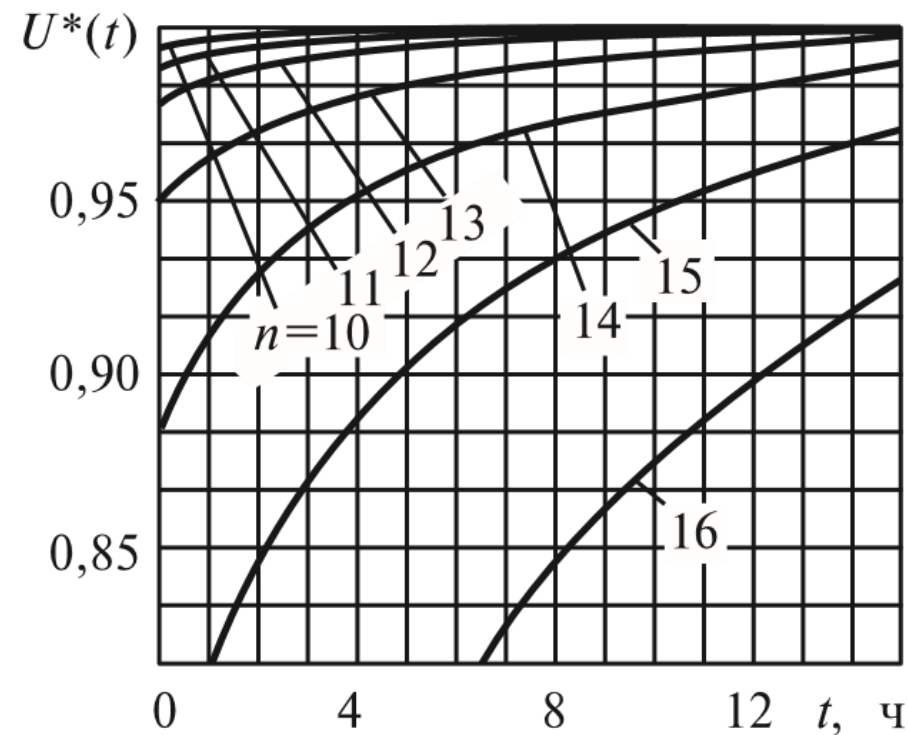
- Число  $m$  ВУ влияет на  $R^*(t)$  незначительно.
- Практически в распределённых ВС выбирать пределы сверху для числа  $m$  и величины избыточности  $(N - n)$  при существующих параметрах  $\lambda$  и  $\mu$  можно по формулам (1).



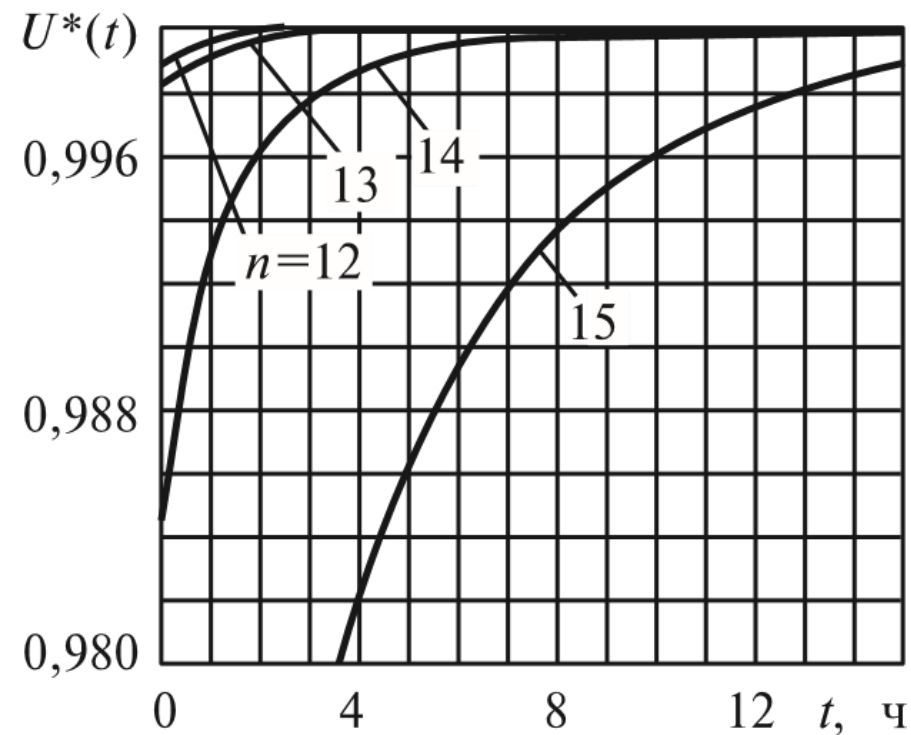
Функция оперативной восстановимости ВС «Минск-222»

$$N = 10; n = 8$$

# Функции оперативной надёжности и восстановимости



*a*

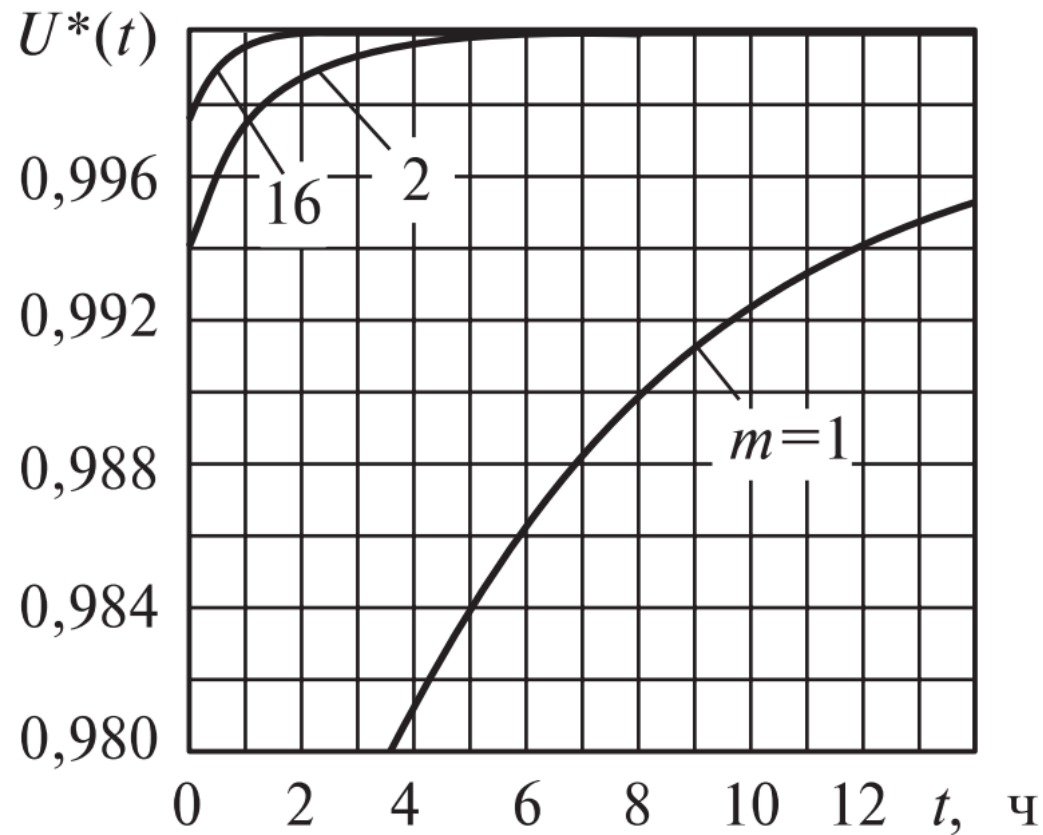


*б*

Функция оперативной восстановимости ВС «Минск-222»

$$a - m = 1; б - m = 16;$$

$$N = 16; n = 10 \dots 16$$



Функция оперативной восстановимости ВС «Минск-222»  
 $N = 16; n = 13; m = 1 \dots 16$

- $\tilde{U}^*(t)$  несущественно отличается от  $U^*(t)$ . Поэтому в практических расчётах можно использовать формулу (9.44) для расчёта  $\tilde{U}^*(t)$ , которая проще формулы (9.43) для расчёта  $U^*(t)$ .
- Восстановимость одной ЭМ выше, чем у систем при  $m = 1$ , однако меньше восстановимости систем, у которых количество ВУ равно количеству ЭМ ( $m = N$ ) и у которых имеется избыточность.
- Графики подтверждают справедливость формул (1).
- ВС в стационарном режиме могут обладать высокой восстановимостью.

К мини-ВС относятся ВС С.ттр, МИНИМАКС, СУММА. **Мини-ВС** – это системы, конфигурируемые из средств мини-машинной техники.

ЭМ ВС МИНИМАКС формировались из мини-ЭВМ М-6000, а ЭМ ВС СУММА – из машин «Электроника-100И». Системы имели одни и те же показатели надёжности:

$$\lambda = 10^{-2} \dots 10^{-3} \text{ 1/ч}; \mu = 0.1 \dots 1.0 \text{ 1/ч}$$

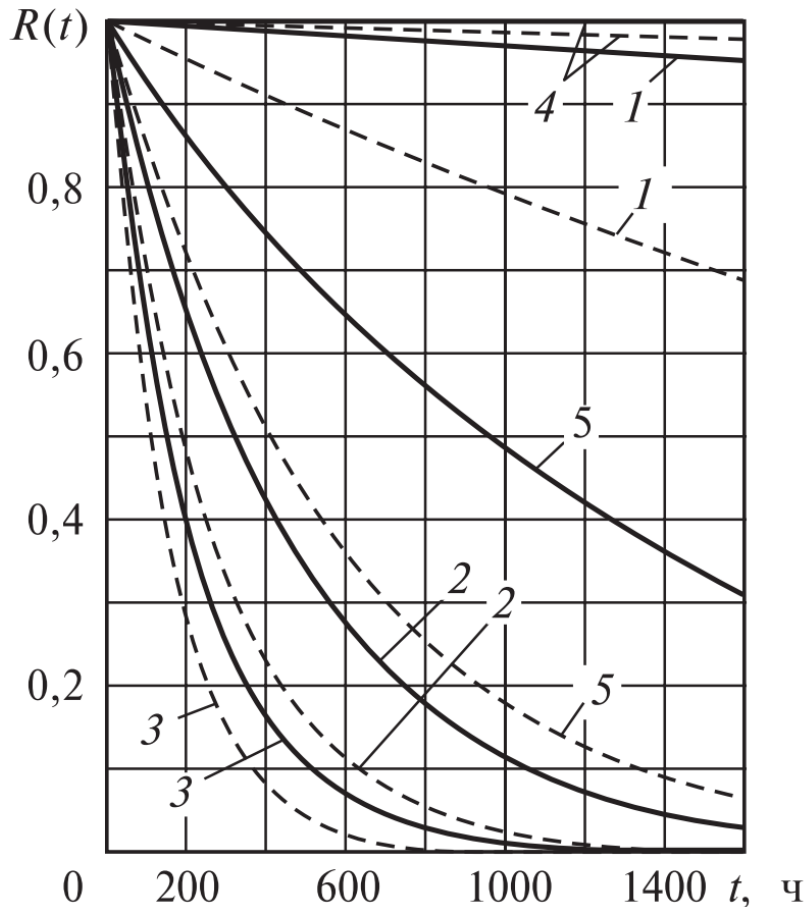
Диапазоны значений для  $\lambda$  и  $\mu$  установлены в результате анализа существовавших возможных вариантов компоновки ЭМ.



В микроЭВМ, в отличие от мини-ЭВМ, использовались интегральные схемы. Это привело к миниатюризации машин и удешевлению, но показатели производительности и надёжности остались в тех же диапазонах, что и для мини-ЭВМ.

К микроВС относится ВС МИКРОС.

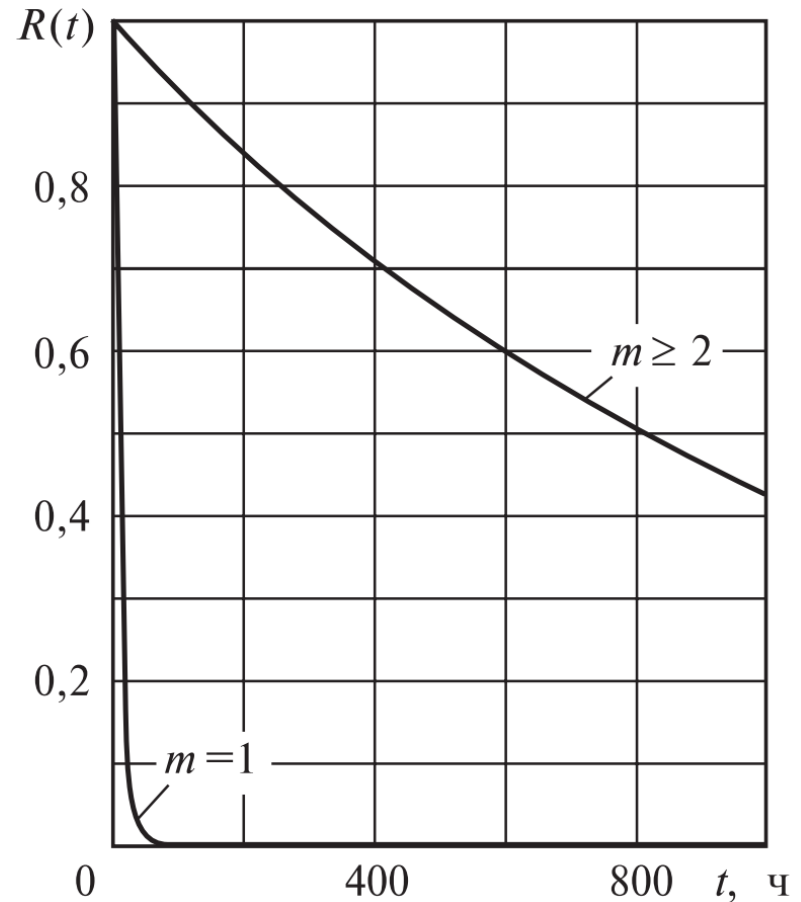
# Надёжность мини-ВС и микроВС



Функции надёжности ВС  
МИКРОС-1:  $m = 1$

-----  $-N = i = 16, n = 15$

—  $-N = i = 32, n = 30$



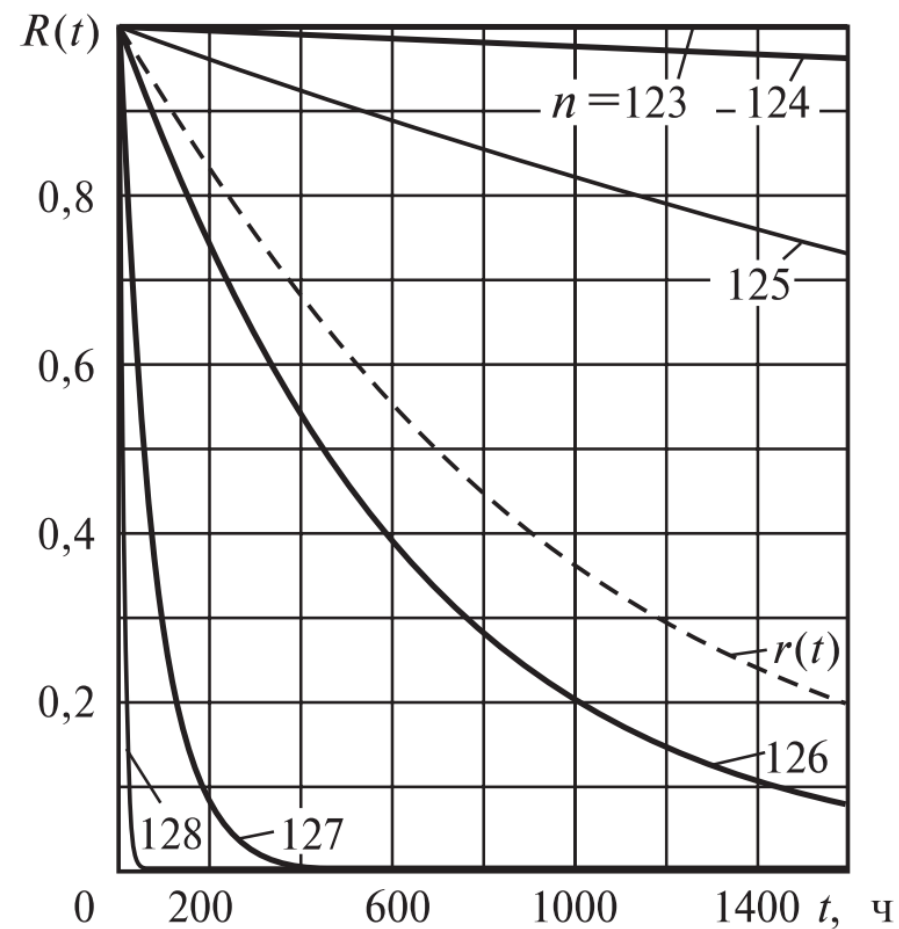
Функция надёжности ВС  
МИКРОС-1:

$N = i = 128; n = 126;$

$m = 1 \dots 128;$

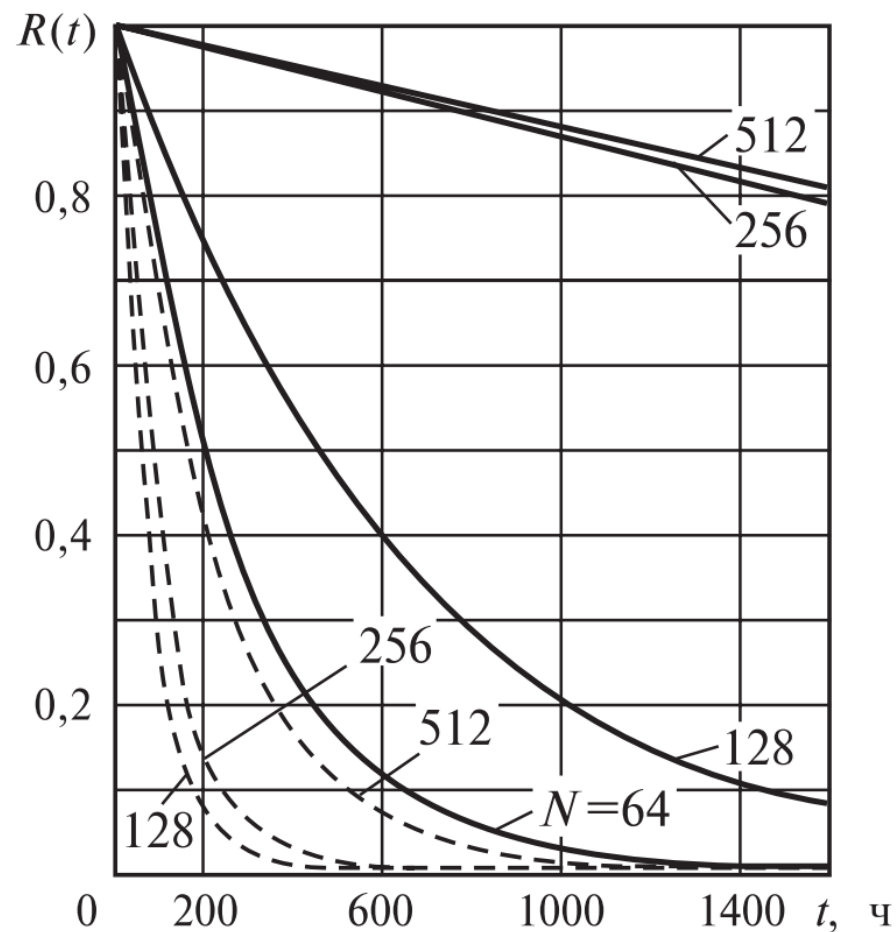
$\lambda = 0.001 \text{ 1/ч}; \mu = 1.0 \text{ 1/ч}$

# Надёжность мини-ВС и микроВС



Функции надёжности ВС  
МИКРОС-1:

$N = i = 128; m = 1;$   
 $n = 123 \dots 128, \lambda = 0.001 \text{ 1/ч},$   
 $\mu = 1.0 \text{ 1/ч}$



Функция надёжности ВС  
МИКРОС-1:

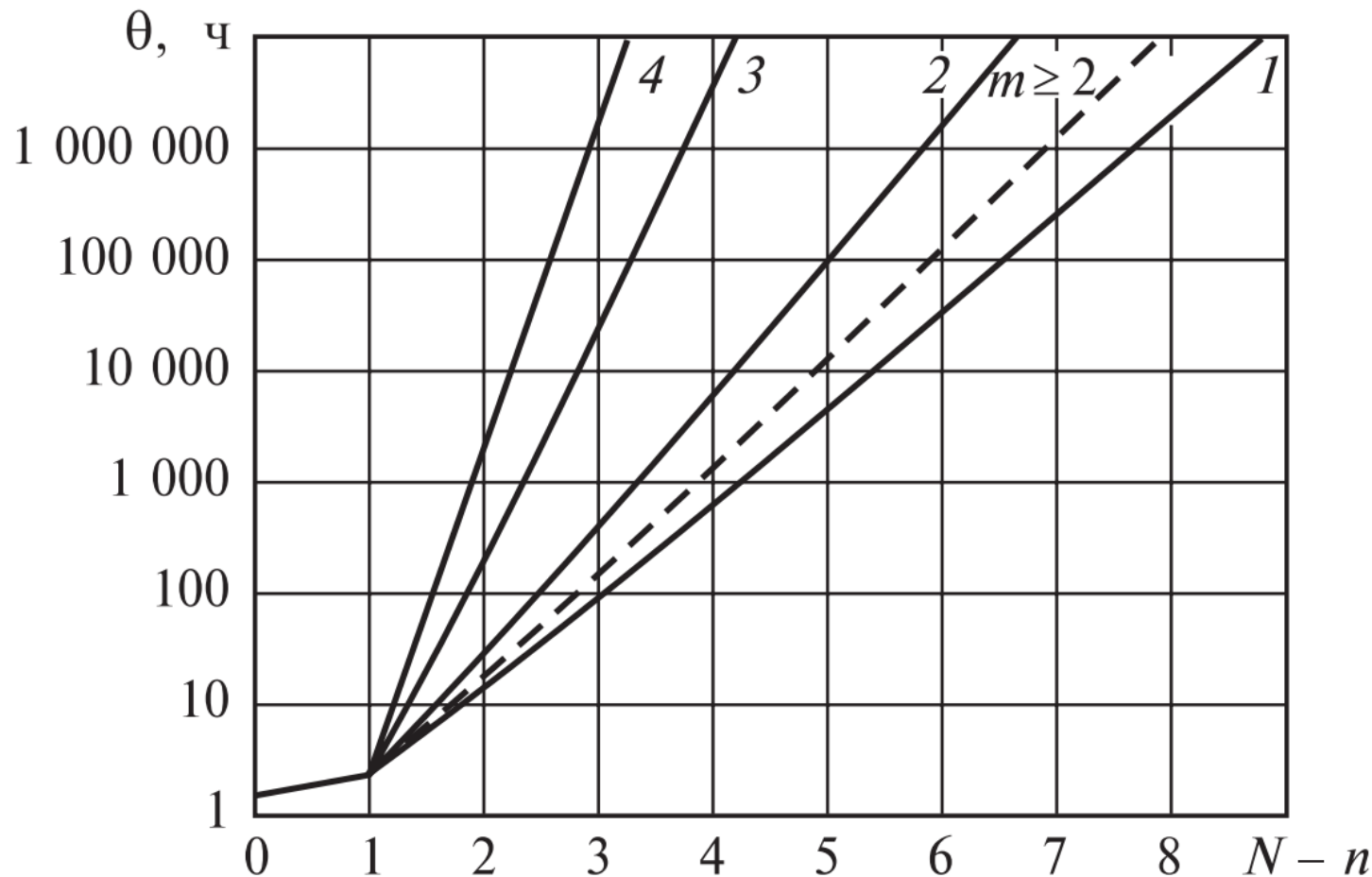
$N = i = 64, 128, 256, 512; m = 1;$   
 -----  $-(N - n) \leq 0.01N,$   
 —————  $-(N - n) \leq 0.02N.$

- Очевидно, что введение избыточности существенно повышает надёжность ВС. Анализ графиков не только подтверждает справедливость (1), но и усиливает их.
- При фиксированной относительной избыточности надёжность ВС повышается с увеличением общего числа ЭМ.

- Таким образом, и 16-машинные, и 32-машинные конфигурации ВС обладали достаточно высокой надёжностью (для 70-х годов 20 в.).
- Усложнение состава ЭМ снижало надёжность ВС в целом, но она оставалась достаточной для параллельного моделирования и решения задач, не доступных для отдельно взятой микроЭВМ.
- Система МИКРОС-1 не уступала по надёжности ВС С.ттр и Ст\*. Вместе с этим ВС МИКРОС-1 обладала большей архитектурной гибкостью, способностью к наращиванию вычислительных ресурсов.

- $N \leq 10^7$  . Как достичь уровня надёжности, характерного для отдельной ЭМ? ( $\vartheta = \lambda^{-1}$ )
- Надёжность микропроцессорных БИС:  $\vartheta = 10^5 \dots 10^8$  ч.
- Параметры для ЭМ:  $\lambda = 10^{-5} \dots 10^{-8}$  1/ч;  $\mu = 0.001 \dots 0.25$  ч.
- При анализе будем оценивать  $\Theta$

# Надёжность большемасштабных распределённых ВС



Среднее время безотказной работы большемасштабных ВС

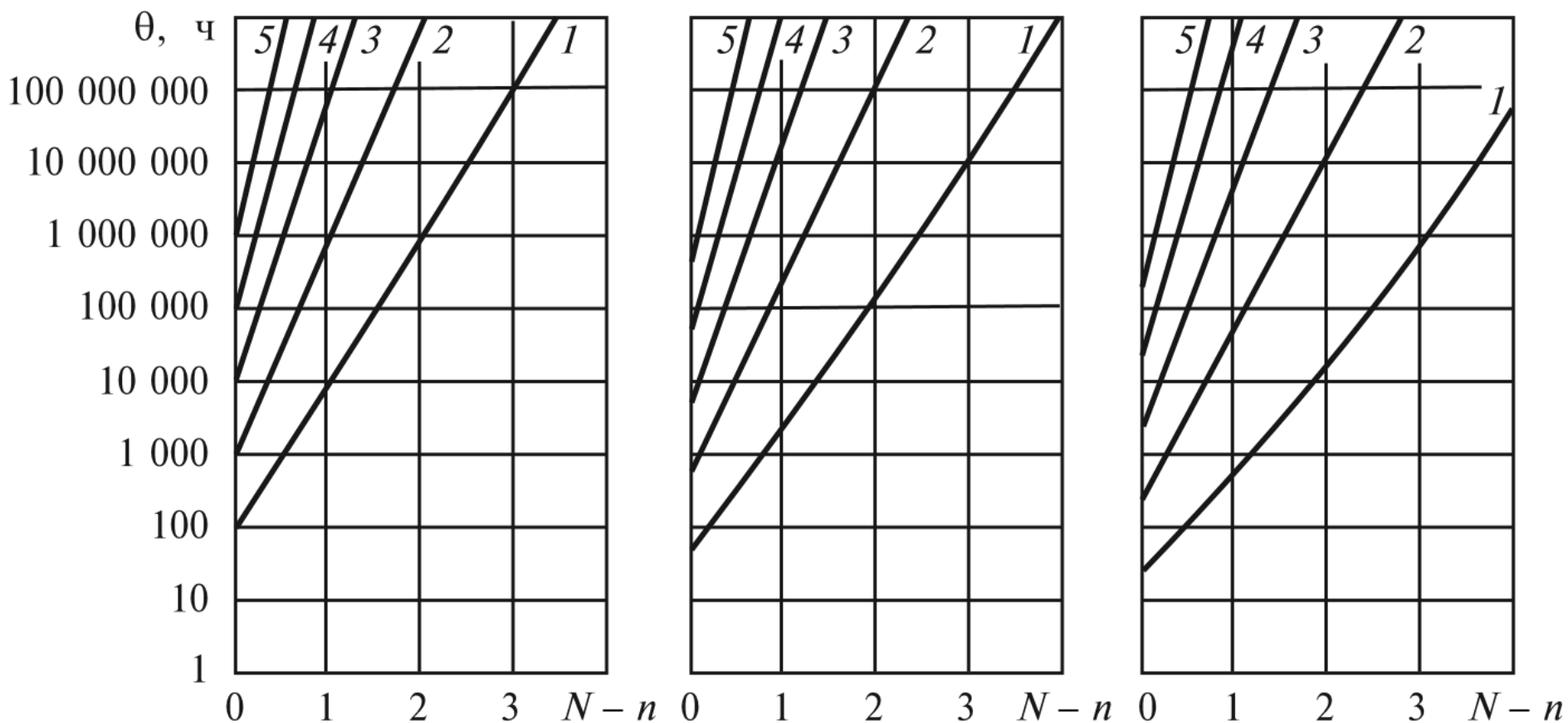
$$N = 65536; m \geq 1; \lambda = 10^{-5} \text{ 1/ч}$$

$$1 - \mu = 4 \text{ 1/ч}; 2 - \mu = 10 \text{ 1/ч}; 3 - \mu = 100 \text{ 1/ч}; 4 - \mu = 1000 \text{ 1/ч};$$

- Варьирование  $\mu$  в промежутке от 4 1/ч до 1000 1/ч даже при  $m = 1$  приводит к существенному улучшению качества функционирования ВС с большим количеством ЭМ.
- При количествах избыточных ЭМ  $(N - n) \geq 6$  (т.е. при избыточности 0.009%) достигается уровень надёжности ВС, который не ниже, чем для одной ЭМ.
- Имеется нижняя граница для количества ВУ, после которой увеличение  $m$  приводит к незначительному росту среднего времени безотказной работы.



# Надёжность большемасштабных распределённых ВС



Среднее время безотказной работы большемасштабных ВС

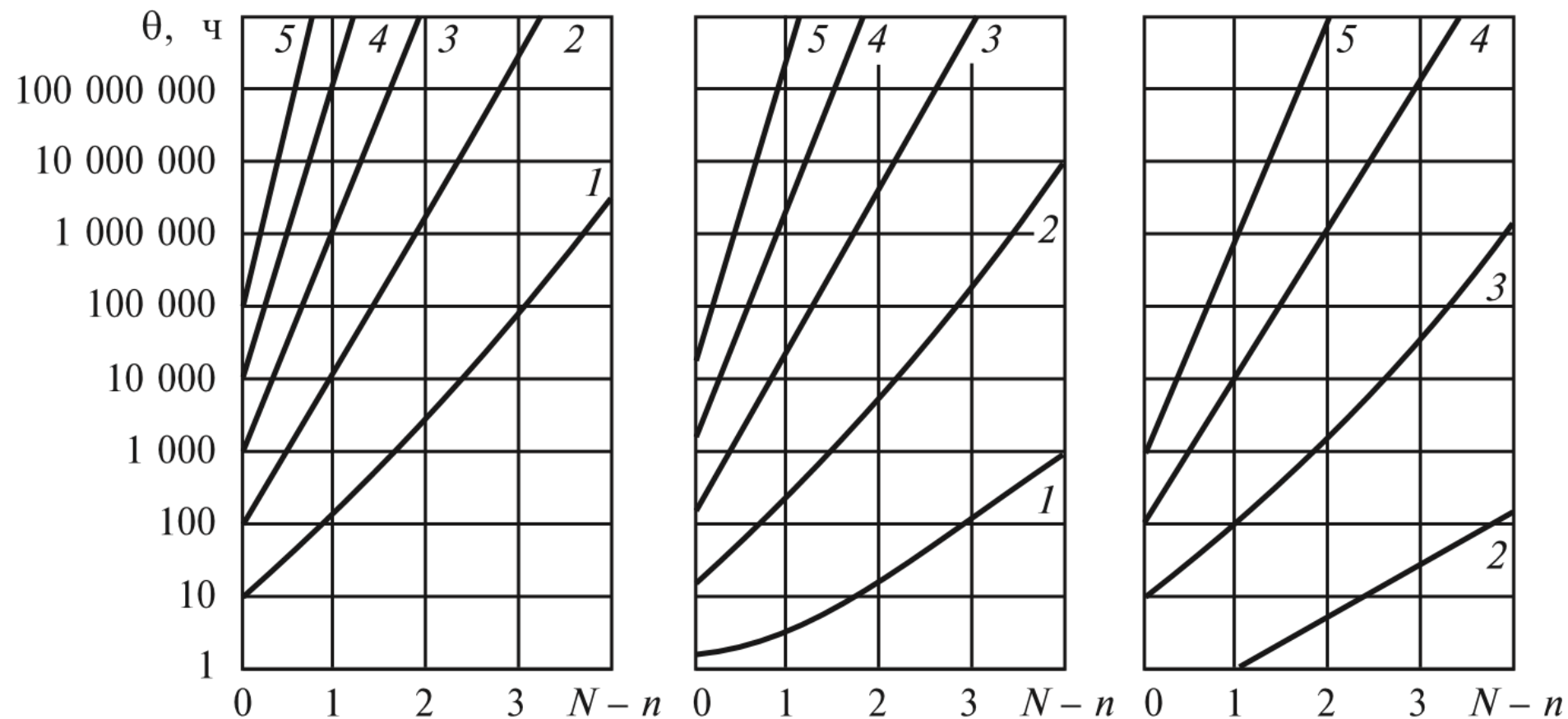
$$m = 1; \lambda = 10^{-5} \dots 10^{-9} \text{ 1/ч}; \mu = 4 \text{ 1/ч}$$

$$a - N = 1024; б - N = 2048; в - N = 4096;$$

$$1 - \lambda = 10^{-5} \text{ 1/ч}; 2 - \lambda = 10^{-6} \text{ 1/ч}; 3 - \lambda = 10^{-7} \text{ 1/ч};$$

$$4 - \lambda = 10^{-8} \text{ 1/ч}; 5 - \lambda = 10^{-9} \text{ 1/ч}$$

# Надёжность большемасштабных распределённых ВС



Среднее время безотказной работы большемасштабных ВС

$$m = 1; \lambda = 10^{-5} \dots 10^{-9} \text{ 1/ч}; \mu = 4 \text{ 1/ч}$$

$$a - N = 8192; b - N = 65536; v - N = 1048576;$$

$$1 - \lambda = 10^{-5} \text{ 1/ч}; 2 - \lambda = 10^{-6} \text{ 1/ч}; 3 - \lambda = 10^{-7} \text{ 1/ч};$$

$$4 - \lambda = 10^{-8} \text{ 1/ч}; 5 - \lambda = 10^{-9} \text{ 1/ч}$$

Анализ результатов численного исследования показывает, что для большемасштабных ВС выбор следует осуществлять по формулам:

$$1 \leq m \leq [\log N]; \quad 1 \leq (N - n) \leq [\log N] \quad (2)$$

где  $N$  – количество ЭМ в системе;  $[\log N]$  – число, округлённое до ближайшего к целого числа.

Формулы (2) гарантируют уровень надёжности большемасштабной ВС *не ниже надёжности одной ЭМ*. При этом с ростом  $N$  число ВУ и избыточных ЭМ относительно  $N$  асимптотически уменьшается.

1. При современном уровне микропроцессорной техники практически возможно построения высоконадёжных ВС с числом ЭМ  $10 \dots 10^7$ .
2. Для обеспечения надёжности большемасштабной ВС не менее уровня надёжности одной ЭМ требуется избыточность, не превышающая десятичного логарифма общего числа ЭМ.
3. Для выполнения восстановительных работ в распределённых ВС, как правило, достаточно иметь одной ВУ независимо от количества ЭМ. Среднее время восстановления системы с избыточностью имеет тот же порядок, что и среднее время восстановления одной ЭМ.