

ТРЕБОВАНИЯ К НАДЕЖНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ ТЕЛЕМЕХАНИКИ

С. Ф. Ахундов, А. И. Коекин

Киев

Требования к надежности аппаратуры промышленных систем телемеханики определяются ГОСТ 11323-65 [1]. Согласно ГОСТу системы телемеханики по условиям эксплуатации разбиваются на три группы и указанные требования устанавливаются в зависимости от принадлежности системы к одной из этих групп (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Эксплуатационные условия	Среднее время между повреждениями, ч (не менее)
Постоянное наблюдение специализированным персоналом, по технологии контролируемого производства допускаются кратковременные перерывы в работе системы телемеханики	1500 ÷ 2500
То же при отсутствии постоянного наблюдения	3000 ÷ 5000
Перерывы в работе системы телемеханики недопустимы, аппаратура установлена в труднодоступных местах	Свыше 5000

В данной работе рассматривается иной подход к требованиям по надежности систем телемеханики. ГОСТ 11323-65 не предусматривает дифференцирования требований к надежности в зависимости от объема информации, сложности системы и величины потерь, связанных с отказом системы, а по эксплуатационным условиям разделяет системы на два класса: допускающие и не допускающие перерыв в работе. Такое деление явно недостаточно. Так, согласно ГОСТу две системы телемеханики, которые существенно отличаются по сложности и выполняемым функциям, должны иметь равную надежность, если они установлены в одинаковых эксплуатационных условиях.

Многообразие сфер применения систем телемеханики требует разработки аппаратуры, параметры которой существенно различаются. К важнейшим параметрам с точки зрения надежности относятся объем передаваемой и перерабатываемой информации, который в первую очередь определяет сложность системы, и экономический эффект, получаемый при внедрении системы телемеханики. Стало общепризнанным, что требования к надежности необходимо устанавливать, сопоставив такой экономический эффект с затратами на создание надежной аппаратуры.

Функция потерь и функция стоимости надежности

В основе рассматриваемого дифференцированного подхода к требованиям на надежность лежит использование понятия оптимальной надежности. Методы оптимизации надежности аппаратуры промышлен-

ной автоматики подробно изложены в работах [2, 3, 4, 5, 6]. Эти методы позволяют в каждом конкретном случае оптимизировать надежность по совокупности параметров системы, влияющих на надежность. Очевидно, что при задании общих требований к надежности унифицированных систем широкого назначения такая детализация затруднена. Поэтому в данной работе, как уже отмечалось выше, требования к надежности дифференцируются только по двум параметрам: объему информации и экономическому эффекту.

Оптимальной надежностью называется надежность, минимизирующая так называемые полные затраты [7], связанные с созданием и эксплуатацией системы управления. В общем виде полные затраты

$$W = C(R) + w(R) \cdot t_0, \quad (1)$$

где $C(R)$ — стоимость аппаратуры как функция ее надежности (функция стоимости надежности);

$w(R)$ — эксплуатационные расходы в единицу времени, связанные с ненадежностью аппаратуры (функция потерь);

t_0 — время использования системы управления;

R — надежность аппаратуры (вероятность безотказной работы).

Задача заключается в определении такого уровня надежности R , которое минимизирует функцию полных затрат [1]. Для ее решения необходимо знать аналитические зависимости $w(R)$ и $C(R)$.

В качестве функции потерь наибольшее распространение получил информационный критерий средних потерь [8]

$$w(R) = \int_{\Omega(H)} R(H) w(H) d\Omega(H) + w_p, \quad (2)$$

где $w(R)$ — функция потерь;

$R(H)$ — плотность вероятности различных искажений информации H ;

$w(H)$ — функция, определяющая величину потерь в зависимости от искажений информации;

$\Omega(H)$ — поле возможных искажений информации;

w_p — потери, не зависящие от искажений информации (затраты на ремонт и т. д.).

Для экспоненциального закона надежности, дискретного пуассоновского потока сообщений и линейной зависимости потерь во времени выражение (2) сводится к следующему:

$$w(R) = w_0 \frac{\lambda}{\mu}, \quad (3)$$

где w_0 — потери в единицу времени при отказе аппаратуры, связанные с ухудшением процесса управления и проведением ремонта;

λ — интенсивность отказов;

μ — интенсивность восстановления аппаратуры.

Гораздо труднее определить затраты на придание аппаратуре требуемой надежности. Многообразие факторов, оказывающих влияние на надежность, в большинстве случаев не позволяет определить аналитически функцию стоимости надежности $C(R)$. Поэтому применяются эмпирические зависимости между стоимостью и надежностью [2, 3, 4].

В качестве функции стоимости надежности используем зависимость вида

$$C = C_0 \left(1 + \log_a \frac{1-R}{1-R_0} \right), \quad (4)$$

Здесь a — параметр, характеризующий качество работ по повышению надежности, $0 < a \leq (1 - R_0)$.

Для расчетов параметр a удобно представить в форме

$$a = (1 - R_0)^r, \quad (5)$$

где $r \geq 1$ — новый параметр, не зависящий от значения исходной надежности.

При $r = 1$ зависимость (4) превращается в функцию стоимости при горячем резервировании.

Предварительный анализ статистических данных [9] не дает возможности определить форму кривой зависимости стоимости от надежности, однако позволяет судить о величине параметра r принятой функции стоимости надежности в реальных условиях. Для большинства случаев $r = 1 \div 2$.

В дальнейшем при расчете оптимальной надежности принимаем значение параметра $r = 1$, т. е. считаем, что функция стоимости эквивалентна по вероятности безотказной работы реальному методу повышения надежности способом горячего резервирования.

Оптимизация надежности по критерию полных затрат

С использованием зависимостей (2) и (4) в работе [6] получено следующее выражение оптимальной надежности:

$$T = - \frac{\ln(1 - R_0)^r t_0 w_0}{C_0 \mu}, \quad (6)$$

где T — оптимальное среднее время между отказами системы;

t_0 — срок использования ее;

w_0 — потери в единицу времени при отказе всей системы;

C_0 — стоимость системы;

μ — интенсивность восстановления;

R_0 — вероятность безотказной работы за единицу времени;

r — параметр функции стоимости надежности.

Для расчетов надежности сложных систем иногда удобнее пользоваться величиной, обратной среднему времени — интенсивностью отказов Λ . Соответственно для оптимальной интенсивности отказов имеем

$$\Lambda = - \frac{C_0 \mu}{\ln(1 - R_0)^r t_0 w_0}, \quad (7)$$

где Λ — оптимальная интенсивность отказов системы.

Необходимо выразить аргументы функции (6), (7) через количество информации H . Экономическая эффективность в явном виде уже входит в удельные потери w_0 .

Рассмотрим предварительно информационную структуру рассредоточенной системы телемеханики. Пусть система (рис. 1) имеет один диспетчерский пункт (ДП) и n контролируемых пунктов (КП). Объем информации, перерабатываемой в системе, равен H . Тогда объем информации, приходящийся на один КП, составляет $\frac{H}{n}$. Примем, что потери при полном отказе системы w_0 .

Назовем рассредоточенную систему системой с информацией местного значения, если потери при отказе одного КП соответственно определяются как w_0/n . Это тот случай, когда система предназначена для управления группой независимых в технологическом отношении объек-

тов. Если же потери при отказе одного КП равны максимальным потерям w_0 , то система относится к системам с информацией центрального значения.

Введем в рассмотрение также понятие приведенной системы. При-

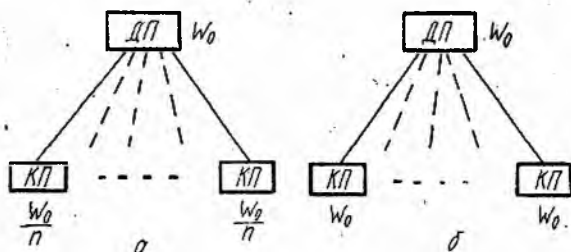


Рис. 1. Структура системы телемеханики:
а — с информацией местного значения; б — с информацией центрального значения.

веденной назовем систему, имеющую один ДП и один КП с объектом информации H . В этом случае отказ как ДП, так и КП приводит к полным потерям w_0 , т. е. приведенная система — это система с информацией центрального значения.

Перепишем теперь формулу (7) следующим образом:

$$\Lambda = \Lambda_{\text{ДП}} + n \Lambda_{\text{КП}}, \quad (8)$$

где $\Lambda_{\text{ДП}}$ — интенсивность отказов ДП;

$\Lambda_{\text{КП}}$ — интенсивность отказов КП,

или

$$\Lambda = - \left(\frac{C_{\text{ДП}}}{\ln(1 - R_{\text{ДП}}) t_0 w_{\text{ДП}}} + n \frac{C_{\text{КП}}}{\ln(1 - R_{\text{КП}}) t_0 w_{\text{КП}}} \right). \quad (9)$$

Положим далее $(1 - R) \cong \Lambda$ (вероятность R в функции стоимости надежности (4) удобно вычислять за единицу времени), а показатель r , как отмечалось выше, примем равным $r = 1$ [9]. Тогда получим

$$\Lambda = - \left(\frac{C_{\text{ДП}}}{\ln \Lambda_{\text{ДП}} t_0 w_{\text{ДП}}} + n \frac{C_{\text{КП}}}{\ln \Lambda_{\text{КП}} t_0 w_{\text{КП}}} \right). \quad (10)$$

Стоимость аппаратуры C и интенсивность отказов Λ выразим через объем информации H и удельный расход логических элементов m .

На основе обработки статистических данных, проведенных Институтом автоматики и телемеханики АН СССР совместно с НИПИ «Нефтехимавтомат», по системам в объеме справочника [10] средний расход логических элементов $m = 2 \div 5$ на одну двоичную единицу информации. В дальнейшем принимается $m = 3$.

Удельный расход элементов m можно представить в виде двух составляющих

$$m = m' + m'', \quad (11)$$

где m' — доля элементов, приходящихся на ДП;

m'' — доля элементов, приходящихся на все КП.

Значения величин m' и m'' зависят от числа КП в системе. Так, для системы 1ДП—1КП $m' = 0,7 m$, а для системы 1ДП—15КП $m' \approx 0,3 m$. Чтобы учесть этот фактор, введем аппроксимирующую зависимость удельного расхода элементов от числа КП в системе

$$m' = m \cdot e^{-\sqrt{n}} \quad (12)$$

и соответственно

$$m'' = m(1 - e^{-\sqrt[n]{n}}). \quad (13)$$

Коэффициент γ выбран равным 0,3.

Будем в дальнейшем ориентироваться на общепромышленную серию элементов автоматики типа ЭТ, имеющую следующие данные (в среднем):

а) интенсивность отказов одного элемента $\lambda_{03} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$;

б) стоимость одного элемента $C_{03} = 4 \text{ руб.}$

Тогда стоимость аппаратуры

$$C = \eta C_{03} mH, \quad (14)$$

где η — коэффициент, учитывающий расходы при изготовлении системы (увеличение стоимости системы в η раз по сравнению со стоимостью элементов). Коэффициент r принят равным 2.

С учетом (12), (13) и (14) оптимальная интенсивность отказов для системы с информацией центрального значения

$$\Lambda = - \left(\frac{\eta C_{03} m e^{-\sqrt[n]{n}} H \mu}{\ln [\lambda_{03} m e^{-\sqrt[n]{n}} H] t_0 \omega_0} + n \frac{\eta C_{03} m (1 - e^{-\sqrt[n]{n}}) \frac{H}{n} \mu}{\ln \left[\lambda_{03} m (1 - e^{-\sqrt[n]{n}}) \frac{H}{n} \right] t_0 \omega_0} \right). \quad (15)$$

а для системы с информацией местного значения

$$\Lambda = - \left(\frac{\eta_0 C_{03} m e^{-\sqrt[n]{n}} H \mu}{\ln [\lambda_{03} m e^{-\sqrt[n]{n}} H] t_0 \omega_0} + n \frac{\eta C_{03} m \left(1 - e^{-\sqrt[n]{n}} \right) \frac{H}{n} \mu}{\ln \left[\lambda_{03} m \left(1 - e^{-\sqrt[n]{n}} \right) \frac{H}{n} \right] t_0 \frac{\omega_0}{n}} \right). \quad (16)$$

Положив $n = 1$, получим оптимальную интенсивность отказов приведенной системы (выражения (15) и (16) в этом случае совпадут):

$$\Lambda = - \left(\frac{\eta C_{03} m e^{-\sqrt[n]{n}} H \mu}{\ln [\lambda_{03} m e^{-\sqrt[n]{n}} H] t_0 \omega_0} + \frac{\eta C_{03} m (1 - e^{-\sqrt[n]{n}}) H \mu}{\ln [\lambda_{03} m (1 - e^{-\sqrt[n]{n}}) H] t_0 \omega_0} \right). \quad (17)$$

Оптимальное среднее время между отказами T приведенной системы определится из формулы (17) как

$$T = 1/\Lambda.$$

Срок использования системы примем равным 10 годам, т. е. $t_0 = 87\,600 \text{ ч}$.

По эксплуатационным условиям, согласно ГОСТ 11323-65 разделим системы на три класса.

Класс А. Обслуживаемые. К этому классу отнесены системы, работающие с дежурным обслуживающим персоналом, восстанавливающим аппаратуру. Среднее время восстановления аппаратуры $\tau_b = (0,5 \div 1) \text{ ч}$.

Класс В. Необслуживаемые. Системы работают без дежурного персонала. Аппаратура расположена на расстоянии примерно до 20 км, и есть специальные средства передвижения для доставки ремонтной бригады и проведения профилактических осмотров. Среднее время восстановления $\tau_b = (3 \div 4) \text{ ч}$.

Класс С. Необслуживаемые труднодоступные. Аппаратура рассредоточена на значительные расстояния (свыше 20 км), установлена в труднодоступных местах (пустыни, бездорожье и т. д.). Среднее время

восстановления для этих систем обычно составляет не менее 10—15 ч. Количественные характеристики параметров восстановления для каждого класса систем приведены в табл. 2.

Таблица 2

Класс	Условия эксплуатации	Среднее время обслуживания, г	Интенсивность восстановления, 1/ч
А	Обслуживаемые	0,5—1	2—1
В	Необслуживаемые	3—4	0,33—0,25
С	Необслуживаемые труднодоступные	10—15	0,1—0,06

Подставив значения, приведенные в табл. 2, в формулу (17), получим следующие приближенные выражения для расчета оптимальной надежности приведенной системы. Для систем класса А

$$T = 3650 \frac{(14 - \ln H) w_0}{H} \quad (18)$$

Для систем класса В

$$T = 14600 \frac{(14 - \ln H) w_0}{H} \quad (19)$$

Для систем класса С

$$T = 54750 \frac{(14 - \ln H) w_0}{H} \quad (20)$$

По формулам (18)—(20) можно построить номограммы или таблицы для практического использования. Так, на рис. 2 приведена номограмма для систем класса А. Табл. 3 также соответствует системам класса А.

Таблица 3

$\begin{matrix} w_0 \\ H \end{matrix}$	5	10	20	30	50
10	$2,16 \cdot 10^4$	$4,3 \cdot 10^4$	$8,6 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^5$	$2,16 \cdot 10^5$
20	10^4	$2 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	10^5
30	$6,46 \cdot 10^3$	$1,28 \cdot 10^4$	$2,53 \cdot 10^4$	$3,88 \cdot 10^4$	$6,46 \cdot 10^4$
50	$3,7 \cdot 10^3$	$7,4 \cdot 10^3$	$1,48 \cdot 10^4$	$2,22 \cdot 10^4$	$3,7 \cdot 10^4$
100	$1,7 \cdot 10^3$	$3,4 \cdot 10^3$	$6,85 \cdot 10^3$	$1,03 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^4$
200	$7,9 \cdot 10^2$	$1,6 \cdot 10^3$	$3,06 \cdot 10^3$	$4,75 \cdot 10^3$	$7,9 \cdot 10^3$
300	$5,05 \cdot 10^2$	10^3	$2,02 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	$5,05 \cdot 10^3$
500	$2,83 \cdot 10^2$	$5,72 \cdot 10^2$	$1,14 \cdot 10^3$	$1,73 \cdot 10^3$	$2,83 \cdot 10^3$
1000	$1,28 \cdot 10^2$	$2,58 \cdot 10^2$	$5,3 \cdot 10^2$	$7,72 \cdot 10^2$	$1,28 \cdot 10^3$
2000	$5,78 \cdot 10^1$	$1,16 \cdot 10^2$	$2,3 \cdot 10^2$	$3,46 \cdot 10^2$	$5,78 \cdot 10^2$
5000	$2 \cdot 10^1$	$3,9 \cdot 10^1$	$8 \cdot 10^1$	$1,18 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^2$

Формулы (18)—(20) и построенные по ним номограммы и таблицы справедливы, если система по эксплуатационным условиям принадлежит к какому-нибудь одному классу. Однако на практике аппаратура рассредоточенных систем иногда находится в разных эксплуатационных условиях и, следовательно, подсистемы одной системы принадлежат к разным классам. Так, аппаратура диспетчерского пункта может быть обслуживаемой, а аппаратура контролируемых пунктов необслуживаемой.

Рассмотрим смешанные классы по следующему принципу: система принадлежит к классу АВ, если аппаратура диспетчерского пункта относится к классу А, а аппаратура контролируемых пунктов — к классу В. В соответствии с этим наиболее часто встречающимися классами являются АВ, АС, ВС. Получены приближенные формулы для оптимального среднего времени между отказами приведенной системы. Для систем класса АВ

$$T = 4730 \frac{(14 - \ln H) \omega_0}{H} \quad (21)$$

Для систем класса АС

$$T = 5120 \frac{(14 - \ln H) \omega_0}{H} \quad (22)$$

Для систем класса ВС

$$T = 18900 \frac{(14 - \ln H) \omega_0}{H} \quad (23)$$

Таким образом, по формулам (18) — (23) можно определить оптимальную надежность приведенной системы, т. е. системы, состоящей из одного ДП и одного КП информационной емкостью H .

В более общем случае функционально рассредоточенной системы, имеющей n контролируемых пунктов суммарной емкостью H , оптималь-

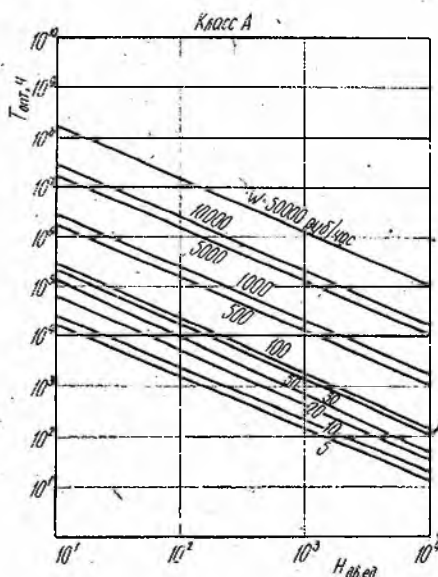


Рис. 2. Номограмма для систем класса А.

Продолжение табл. 3.

100	500	1000	5000	10000	50000
$4,3 \cdot 10^5$	$2,16 \cdot 10^6$	$4,3 \cdot 10^6$	$2,16 \cdot 10^7$	$4,3 \cdot 10^7$	$2,16 \cdot 10^8$
$2 \cdot 10^5$	10^6	$2 \cdot 10^6$	10^7	$2 \cdot 10^7$	10^8
$1,28 \cdot 10^5$	$6,45 \cdot 10^5$	$1,28 \cdot 10^6$	$6,46 \cdot 10^6$	$1,28 \cdot 10^7$	$6,46 \cdot 10^7$
$7,4 \cdot 10^4$	$3,7 \cdot 10^5$	$7,4 \cdot 10^5$	$3,7 \cdot 10^6$	$7,4 \cdot 10^6$	$3,7 \cdot 10^7$
$3,4 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^5$	$3,4 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^6$	$3,4 \cdot 10^6$	$1,7 \cdot 10^7$
$1,6 \cdot 10^4$	$7,9 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^5$	$7,9 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^6$	$7,9 \cdot 10^6$
10^4	$5,05 \cdot 10^4$	10^5	$5,05 \cdot 10^5$	10^6	$5,05 \cdot 10^6$
$5,72 \cdot 10^3$	$2,83 \cdot 10^4$	$5,72 \cdot 10^4$	$2,83 \cdot 10^5$	$5,72 \cdot 10^5$	$2,83 \cdot 10^6$
$2,58 \cdot 10^3$	$1,28 \cdot 10^4$	$2,58 \cdot 10^4$	$1,28 \cdot 10^5$	$2,58 \cdot 10^5$	$1,28 \cdot 10^6$
$1,16 \cdot 10^3$	$5,78 \cdot 10^3$	$1,16 \cdot 10^4$	$5,78 \cdot 10^4$	$1,16 \cdot 10^5$	$5,78 \cdot 10^5$
$3,9 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^3$	$3,9 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$	$3,9 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^5$

ное среднее время между отказами для системы с информацией центрального значения

$$T_{\alpha} = T_{\alpha}, \quad (24)$$

а для системы с информацией местного значения

$$T_{\beta} = T_{\beta}, \quad (25)$$

где T_{α} — оптимальное среднее время между отказами для системы с информацией центрального значения;

T_m — оптимальное среднее время между отказами для системы с информацией местного значения;
 α и β — поправочные коэффициенты на функциональную рассредоточенность для систем соответственно центрального и местного значения.

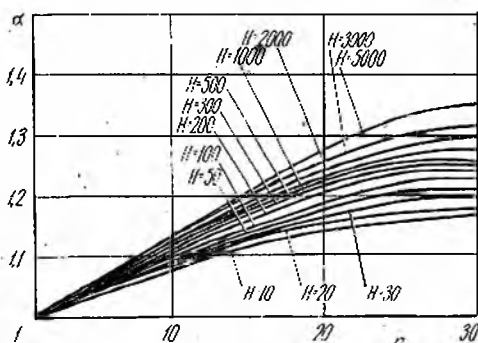


Рис. 3. Значения поправочного коэффициента α .

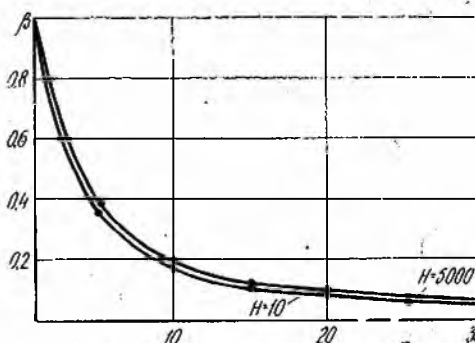


Рис. 4. Значения поправочного коэффициента β .

Поправочные коэффициенты α и β определены с использованием выражений (15), (16), (17). Значения коэффициентов α и β могут быть найдены по графикам, приведенным на рис. 3 и 4.

Настоящие требования разработаны на основе обобщенных статистических данных об удельном расходе и надежности типовых логических элементов, применяемых в системах телемеханики. В частности, за основу была принята общепромышленная серия логических элементов автоматики ЭТ.

Можно также утверждать, что требования остаются в силе и для систем, построенных на элементах других серий потенциального типа.

Требования не рассчитаны на системы, построенные на высокочастотных элементах (например, применяемых в вычислительной технике), и тем более системы, построенные на микромодулях и твердом теле.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 11323-65. Устройства и аппаратура телемеханики. Общие технические требования.
2. П. Р. Гилленхаал, Д. Е. Робинзон. Способ оптимизации соотношения между надежностью и стоимостью. Сб. «Проблемы надежности радиоэлектронной аппаратуры». Оборонгиз, 1960.
3. В. К. Бурцев, Д. В. Свечарник. О надежности и эффективности систем автоматического контроля и регулирования. «Приборостроение», № 6, 1963.
4. Н. Ф. Воллесер. О технико-экономически целесообразном уровне надежности. «Радиотехника», т. 20, № 5, 1965.
5. С. С. Брудник. Техничко-экономическая эффективность в приборостроении. «Приборостроение», 1962, № 5.
6. А. И. Коекин. Оптимизация надежности и структуры иерархических систем управления. «Автоматика и телемеханика», т. 23, № 6, 1962.
7. Б. С. Сотсков. К вопросу о технико-экономической оценке приборов или устройств при их выборе для схем автоматического управления. «Приборостроение», 1962, № 5.
8. Г. А. Шастова. Критерий средних потерь для оценки надежности систем управления. «Автоматика и телемеханика», т. 23, № 6, 1962.
9. E. I. Nalos, R. B. Schullz. Reliability and cost of avionics. «IEEE Trans, Reliabil», 1965, 14, № 2.
10. В. А. Ильин, А. А. Левин. Системы промышленной телемеханики. Справочник, ГОСИНТИ, 1963.