

ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ
СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В.А., Кондрашов, С.В. Макаров, В.А. Осипов,
А.В. Филатов

В в е д е н и е

Вопросы повышения надежности, долговечности, ремонтпригодности за последнее время становятся все более важными в практике проектирования современных судовых энергетических установок и особенно автоматизированных. Надежность приобретает еще большую актуальность в связи с необходимостью обеспечения централизации управления судовой энергетической установкой на расстоянии. В этом случае обеспечение надежности работы установки является основным и определяющим требованием.

В то же время до сравнительно недавнего прошлого обеспечение надежности судовых установок осуществлялось либо опытным путем, либо по интуиции проектировщика. Однако сложность современных судовых автоматизированных энергетических установок не позволяет на основании простых рассуждений без количественной оценки произвести выбор наиболее надежного варианта энергетической установки и ее автоматики. Этот вопрос усложняется также и тем, что надежность судовой энергетической установки обычно зависит еще и от режима ее работы. При этом для обеспечения наиболее простой автоматизации необхо-

димо предусмотреть такую схему энергетической установки, которая обеспечивала бы минимум переключений при переходе с одного режима на другой.

Минимум переключений можно обеспечить в том случае, если одни и те же элементы установки работают на всех ее режимах. Тогда процесс перехода с одного режима на другой осуществляется только органами регулирования. Однако, учитывая сравнительно низкую надежность механизмов, часть из них резервируется, чем увеличивается надежность схемы на определенном режиме, но усложняется система управления. В связи с этим приходится искать такое решение, которое удовлетворяло бы основным требованиям, предъявляемым ко всей автоматизированной установке.

Отсутствие в настоящее время систематизированных данных по опыту эксплуатации судовых энергетических установок приводит к тому, что единственно доступным методом анализа надежности того или иного варианта установки является расчет. В § 1 описан один из возможных методов расчета. В § 2 выводятся формулы, позволяющие получить исходные данные для расчета, отталкиваясь от наиболее распространенной статистической характеристики — средней частоты отказов.

§ 1. Метод расчета

Существующие методы расчета структурной надежности схем судовых энергетических установок сводятся к тому, что энергетическая установка на основании функционирования всех ее механизмов преобразуется в последовательно-параллельное соединение, к которому применяются известные формулы [1]

$$q_{cx} = q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_n, \quad (1)$$

$$q_{cx} = 1 - [(1 - q_1)(1 - q_2) \dots (1 - q_n)], \quad (2)$$

где q_{cx} — вероятность исправной работы схемы для последовательного (1) и параллельного (2) соединения элементов;

q_i — вероятность исправной работы i -ого элемента.

Однако указанные (1) и (2) позволяют определить надежность сравнительно простых установок, схемы которых легко преобразуются в последовательно-параллельное соединение. Структура схем современных судовых энергетических установок часто не

позволяет произвести ее преобразование в последовательно-параллельное соединение элементов. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Известно, что судовые энергетические установки работают как на полной, так и на частичной нагрузках. Для повышения надежности энергетической установки ее элементы, как правило, резервируются. Резервный элемент может быть рассчитан на работу в режиме 100%-ной или частичной нагрузки. В зависимости от нагрузки могут меняться количество элементов, обеспечивающих данный режим, и их функциональные связи. Если резервный элемент обеспечивает только частичную нагрузку, то при переходе с режима 100%-ной мощности на нагрузку, которую может обеспечить резервный элемент, меняется структурная схема установки, а следовательно, и надежность работы будет другая.

Предположим, что главный питательный насос, подающий воду в котел, резервируется насосом с 50%-ной производительностью. Структурная схема этого узла представлена на рис. 1,

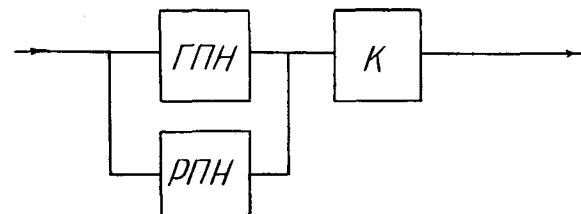


Рис. 1

где ГПН — главный питательный насос, РПН — резервный питательный насос, К — котел.

В этом случае вероятность получения 100%-ной производительности будет

$$q_{100} = q_{гпн} \cdot q_k,$$

а вероятность получения не менее, чем 50%-ной производительности

$$q_{50} = q_k [1 - (1 - q_{гпн})(1 - q_{рпн})].$$

Таким образом, этот простой пример показывает, что для всесторонней оценки надежности работы энергетической установки необходимо проанализировать все возможные режимы ее работы. На стадии проектирования необходимо определить такую схему энергетической установки, которая имела бы максимальную надежность на основном режиме.

Рассмотрим судовую энергетическую установку, схема которой не может быть преобразована в последовательно-параллельное соединение, и определим ее надежность. Пусть в состав энергетической установки входят следующие элементы (рис. 2):

- 1) Два котла - K_{T1}, K_{T2} . 2) Главная турбина - T .
- 3) Автономный турбогенератор - Γ_1 . 4) Дизель-генератор - Γ_2 .
- 5) Две секции главного конденсатора - X_1, X_2 . 6) Два циркуляционных насоса - $\mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2$. 7) Два конденсатных насоса - K_1, K_2 .
- 8) Питательный насос, навешенный на вал турбогенератора - Π_1 .
- 9) Резервный питательный насос - Π_2 .

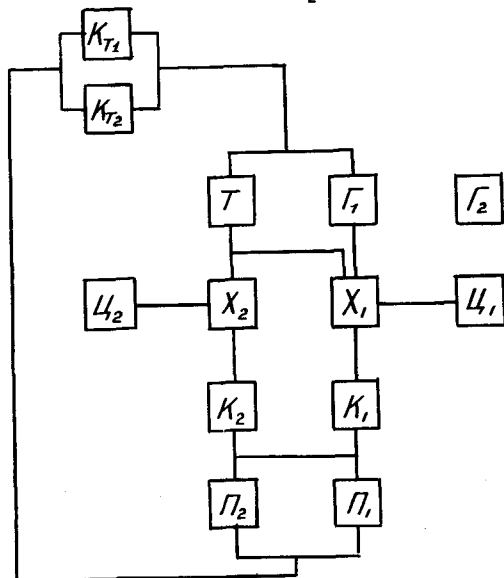


Рис. 2

Для получения 100%-ной мощности необходимо иметь в работе все элементы установки, кроме Γ_2 и Π_2 , которые рассчитаны на режим 50%-ной мощности. Блоки $X_1, \mathcal{L}_1, K_1$ и $X_2, \mathcal{L}_2, K_2$ также рассчитаны на режим 50%-ной мощности каждый, но, работая вместе, они обеспечивают 100%-ную мощность. Блок $X, \mathcal{L}, K$, кроме того, обеспечивает 100%-ную мощность автономного турбогенератора. Таким образом, схема энергетической установки на режиме 100%-ной мощности может быть преобразована в последовательное соединение элементов, а вероятность ее исправной работы на этом режиме определится по формуле

$$q_{1,x} = q_{K_{T1}} q_{K_{T2}} q_T q_{\Gamma_1} q_{X_1} q_{\mathcal{L}_1} q_{K_1} q_{X_2} q_{\mathcal{L}_2} q_{K_2} q_{\Pi_1}. \quad (3)$$

Теперь рассмотрим режим 50%-ной мощности. В этом режиме часть элементов резервируется: турбогенератор, главный питательный насос и блоки $X, \mathcal{L}, K$. Каждая секция главного конденсатора с обслуживающими ее механизмами, как отмечалось ранее, рассчитана на работу турбины в режиме 50%-ной нагрузки. С этой точки зрения совершенно безразлично, какая секция главного конденсатора принимает отработавший пар, но турбогенератор может работать только в исправном состоянии блока $X, \mathcal{L}, K$. Следовательно, если откажет какой-либо из элементов блока $X_2, \mathcal{L}_2, K_2$, то установка будет продолжать работу в режиме 50%-ной мощности за счет блока $X, \mathcal{L}, K$. Если же откажет любой элемент блока $X, \mathcal{L}, K$, то откажет и турбогенератор, который не может сбрасывать отработавший пар на вторую секцию главного конденсатора - X_2 . Таким образом, блок $X_2, \mathcal{L}_2, K_2$ резервируется блоком $X, \mathcal{L}, K$, обратного резервирования, т.е. блок $X_2, \mathcal{L}_2, K_2$ не может обеспечить работу турбины и турбогенератора в режиме 50%-ной мощности. С отказом турбогенератора связан отказ главного питательного насоса. Тогда, чтобы сохранить режим работы установки, включаются резервные элементы: дизель-генератор Γ_2 и резервный питательный насос Π_2 .

Такая "асимметрия" резервирования приводит к тому, что структурную надежность схем такого типа нельзя подсчитать по формулам (1) и (2), поскольку схему энергетической установки на режиме 50%-ной мощности невозможно представить параллельно-последовательным соединением. Примеры такого рода встречаются весьма часто при анализе надежности судовых энергетических установок.

Поэтому представляет интерес применить логико-вероятностный метод, разработанный для анализа надежности схем вычислительных машин [2]. Для этого необходимо прежде всего выявить функциональную взаимосвязь элементов установки и записать ее в виде эквивалентной логической схемы (состоящей из конъюнкций $\&$, дизъюнкций $\vee$ и отрицаний $\neg$), выражающей совокупность условий, при которых возможна работа установки. Исправное состояние элемента обозначается единицей, неисправное - нулем. Вероятность единицы на некотором входе эквивалентной логической схемы есть вероятность исправной работы соответствующего элемента. Отказы элементов установки будем считать не зависящими друг от друга. Тогда для анализа надежности схем энергетических установок могут быть применены методы вероятностных расчетов логических схем [2].

Для рассмотренного на рис. 1 примера эквивалентные логические схемы приведены на рис. 3. (а) - для режима 100%-ной мощности, б) - для режима 50%-ной мощности).^{х)}

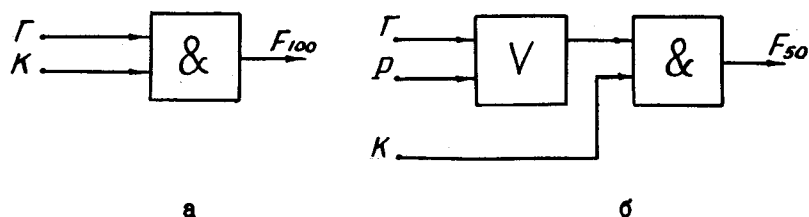


Рис. 3

На рис. 3 приняты обозначения: Γ - главный питательный насос, P - резервный питательный насос, K - котел.

Булевы функции схем а) и б) рис. 3 запишутся так:

$$F_{100} = \Gamma \& K,$$

$$F_{50} = K \& (\Gamma \vee P).$$

Вероятности исправной работы блока питательный насос - котел соответствует вероятность появления "1" на выходе эквивалентной логической схемы. Таким образом, вероятности получения 100%- и не менее чем 50%-ной паропроизводительности будут:

$$q_{100} = q_{F_{100}} = q_K q_\Gamma, \quad q_{50} = q_{F_{50}} = q_K (1 - p_\Gamma p_P),$$

где q_K, q_Γ - вероятности исправной работы элементов, p_Γ, p_P - вероятности отказов элементов.

Здесь для расчета вероятностей появления единицы на выходе конъюнкции и дизъюнкции с "n" входами использованы соотношения 2:

$$q = q_1 q_2 \dots q_n \text{ - для конъюнкции, } q = 1 - p, \quad (4)$$

$$p = p_1 p_2 \dots p_n \text{ - для дизъюнкции,} \quad (5)$$

^{х)} Здесь и далее, употребляя для краткости выражение "режим 50%-ной мощности", мы имеем в виду наличие либо режима 100%-ной, либо, по крайней мере, режима 50%-ной мощности. Следовательно, эквивалентная логическая схема, составленная "для режима 50%-ной мощности", выдает на своем выходе единицу как в том случае, когда выполнены условия отдачи 100%-ной мощности, так и в том случае, когда выполнены условия отдачи 50%-ной мощности.

где p_i - вероятность нуля на i -ом входе, q_i - вероятность единицы на i -ом входе.

Заметим, что схемы энергетических установок, допускающие преобразования в последовательно-параллельное соединение, в силу независимости исправной работы механизмов, имеют эквивалентные логические схемы типа дерева. В таких схемах характерно отсутствие разветвлений на выходах элементов. Именно независимость исправной работы механизмов энергетической установки позволяет пользоваться формулами (4) и (5) для расчета надежности.

Для рассмотренной на рис. 2 схемы судовой энергетической установки эквивалентная логическая схема, как нетрудно видеть из анализа работы ее механизмов на 50%-ной нагрузке, выглядит следующим образом (рис. 4).

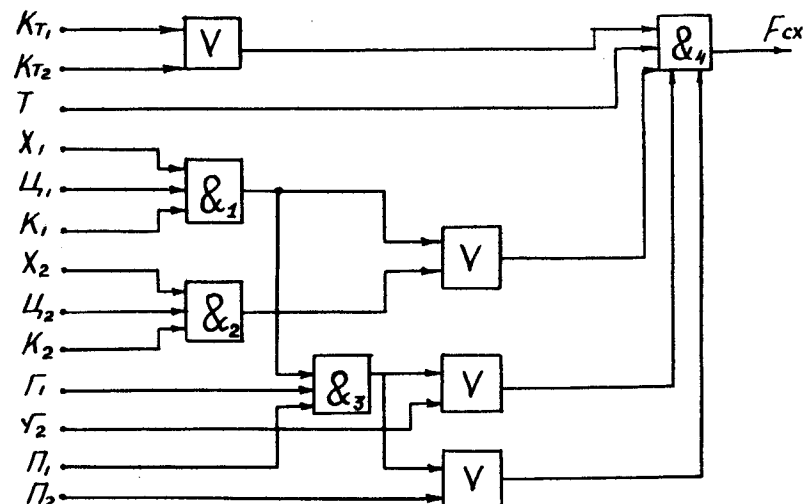


Рис. 4

Булева функция схемы, представленной на рис. 4, имеет вид:

$$F_{cx} = (K_{T1} \vee K_{T2}) T (X_1 U_1 K_1 \vee X_2 U_2 K_2) (X_1 U_1 K_1 \Gamma_1 \vee \Gamma_2) (X_1 U_1 K_1 \Gamma_1 \vee \Gamma_2).$$

Указанная ранее "асимметрия" резервирования блоков XU_K , не позволявшая преобразовать схему энергетической установки в последовательно-параллельное соединение ее элементов, обусловила наличие разветвлений на выходе элемента $\&$, эквивалентной логической схемы. Кроме того, получено разветвление на выходе элемента $\&_3$, вызванное в данном случае тем, что глав-

ный питательный насос навешен на вал турбогенератора. Для расчета вероятности появления единицы на выходе логической схемы формулы (4) и (5) в силу зависимости ее звеньев не могут применяться. В этом случае расчет выполняется методом разрезания операторной функции F_{cx} [2].

В качестве примера определим вероятность исправной работы схемы энергетической установки, которая представлена на рис. 2 в режиме 50%-ной мощности. Вероятность исправной работы каждого элемента примем равной 0,9 (Следовательно, вероятность единицы на каждом входе эквивалентной логической схемы $-F_{cx}$ - есть 0,9).

Произведем несколько последовательных разрезов функции F_{cx} , останавливаясь на булевых выражениях, в которые ни одна из переменных не входит более одного раза. Для таких выражений вероятность обращения в единицу определяется простейшим методом, как для схем типа дерева (см. 2). Приводим результаты:

$$X_1=0. \quad F_0=(K_7 \vee K_{72}) T X_2 U_2 K_2 \Gamma_2 \Pi_2, \quad P_1=P(F_0=1)=0,527;$$

$$X_1=1. \quad F_1=(K_7 \vee K_{72}) T (U_2 K_1 \vee X_2 U_2 K_2) (U_2 K_1 \Gamma_1 \vee \Gamma_2) (U_2 K_1 \Gamma_1 \vee \Pi_2);$$

$$U_2=0. \quad F_{10}=(K_7 \vee K_{72}) T X_2 U_2 K_2 \Gamma_2 \Pi_2, \quad P_2=P(F_{10}=1)=0,527;$$

$$U_2=1. \quad F_{11}=(K_7 \vee K_{72}) T (K_1 \vee X_2 U_2 K_2) (K_1 \Gamma_1 \vee \Gamma_2) (K_1 \Gamma_1 \vee \Pi_2);$$

$$K_1=0. \quad F_{110}=(K_7 \vee K_{72}) T X_2 U_2 K_2 \Gamma_2 \Pi_2, \quad P_3=P(F_{110}=1)=0,527;$$

$$K_1=1. \quad F_{111}=(K_7 \vee K_{72}) T (\Gamma_1 \vee \Gamma_2) (\Gamma_1 \vee \Pi_2);$$

$$\Gamma_1=0. \quad F_{1110}=(K_7 \vee K_{72}) T \Gamma_2 \Pi_2, \quad P_4=P(F_{1110}=1)=0,721;$$

$$\Gamma_1=1. \quad F_{1111}=(K_7 \vee K_{72}) T (\Pi_1 \vee \Gamma_2) (\Pi_1 \vee \Pi_2);$$

$$\Pi_1=0. \quad F_{11110}=(K_7 \vee K_{72}) T \Gamma_2 \Pi_2, \quad P_5=P(F_{11110}=1)=0,721;$$

$$\Pi_1=1. \quad F_{11111}=(K_7 \vee K_{72}) T, \quad P_6=P(F_{11111}=1)=0,829.$$

Так как вероятности событий $X_1=0$, $X_1=1$, $U_2=0$, $U_2=1$ и т.д. известны, то, применяя теоремы о произведении и сложении вероятностей для независимых событий, определим вероятность исправной работы схемы энергетической установки в ре-

жиме 50%-ной нагрузки:

$$q_{cx} = P_1 P + P_2 \cdot q \cdot P + P_3 q^2 P + P_4 q^3 P + P_5 q^4 P + P_6 q^5 = 0,757.$$

Вероятность отказа

$$P_{cx} = 1 - q_{cx} = 0,243.$$

Этим же методом можно подсчитать вероятность исправной работы схемы автоматического управления и регулирования, а потом и всей автоматизированной энергетической установки.

§ 2. Связь между локальными и интегральными характеристиками надежности

Пусть дана некоторая установка (комплекс) G , состоящая из элементов D_i ($i=1, 2, \dots, n$). Поскольку задача оценки структурной надежности G сведена к анализу эквивалентной однотактной логической схемы, исходными данными для описанного в § 1 метода являются вероятности единиц на входах эквивалентной схемы при произвольном однократном срабатывании схемы, или, что то же самое, вероятности q_i исправной работы элементов D_i в течение некоторого такта. Эти вероятности суть локальные характеристики надежности элементов $D_i \in G$ (ибо они формально относятся к одному такту, к однократному срабатыванию логической схемы). Под "тактом" мы можем понимать некоторый отрезок времени t (произвольной длительности), по отношению к которому оценивается надежность установки. В то же время статистика неисправностей дает интегральные характеристики надежности, основанные на подсчете количества отказов за некоторые, обычно достаточно продолжительные, периоды эксплуатации. Наиболее распространенными интегральными характеристиками надежности элемента являются средняя частота отказов λ или обратная ей величина - средняя продолжительность безотказной работы $\frac{1}{\lambda}$. Для получения связи между локальными и интегральными характеристиками надежности рассмотрим следующую задачу.

ЗАДАЧА. Дан отрезок $(0, T)$, на котором равномерно и независимо друг от друга распределены N частиц. Перенумеруем частицы слева направо:

$$1, 2, \dots, m, \dots, m+k, \dots, N.$$

Введем обозначения:

t_m - координата m -ой частицы;
 t_{m+k} - координата $(m+k)$ -ой частицы;
 dt_m и dt_{m+k} - малые интервалы с центрами;
в t_m и t_{m+k} , соответственно;
 $t = t(m, k) = t_{m+k} - t_m$ - расстояние между $(m+k)$ -ой и m -ой частицами;
 $dt = dt_{m+k}$ - приращение интервала $t(m, k)$ с закрепленным левым концом.

Требуется найти распределение величины t .

Рассмотрим событие dA , состоящее в следующем:

- 1) одна частица попала в интервал dt_m ;
- 2) одна частица попала в dt_{m+k} ;
- 3) $k-1$ частиц попали в интервал (t_m, t_{m+k}) (исключая области пересечений с dt_m, dt_{m+k}).

Тогда, очевидно, число частиц в $(0, t_m)$ есть $m-1$, а число частиц в (t_{m+k}, T) есть $N-m-k$ (см. рис. 5)



Рис. 5

Вероятность $dP(A/t)$ события dA при фиксированном значении t_m есть

$$dP(A/t_m) = k C_N^k m C_{N-k}^m t_m^{m-1} \left(\frac{1}{T}\right)^N t^{k-1} (t-t_m)^{N-m-k} dt dt_m \quad (6)$$

Принтегрировав (6) по dt_m , получим вероятность события dA безотносительно к значению t_m :

$$\begin{aligned} dP(A) &= k C_N^k m C_{N-k}^m t^{k-1} \left(\frac{1}{T}\right)^N dt \int_0^{T-t} t_m^{m-1} (T-t-t_m)^{N-m-k} dt_m = \\ &= (T-t)^{N-k} k C_N^k m C_{N-k}^m t^{k-1} \left(\frac{1}{T}\right)^N dt \int_0^1 u^{m-1} (1-u)^{N-m-k} du \end{aligned}$$

$$\int_0^1 u^m (1-u)^{N-k-m} du = \frac{1}{m C_{N-k}^m} ; \quad (8)$$

$$dP(A) = k C_N^k t^{k-1} (T-t)^{N-k} \left(\frac{1}{T}\right)^N dt. \quad (9)$$

Введя плотность вероятности P_k

$$P_k = \frac{dP(A)}{dt},$$

получим:

$$P_k(t) = k C_N^k t^{k-1} (T-t)^{N-k} \left(\frac{1}{T}\right)^N dt. \quad (10)$$

Отметим, что $P_k(t)$ не зависит от m .

Формула (10) является решением поставленной задачи.

Из (10) можно найти математическое ожидание длины интервала между m -ой и $(m+k)$ -ой частицами:

$$\begin{aligned} \overline{t(k)} &= \overline{t(k, m)} = \int_0^T t P_k(t) dt = \\ &= k C_N^k \int_0^T \left(\frac{1}{T}\right)^N t^{(k+1)-1} (T-t)^{N-(k+1)} dt = \\ &= k C_N^k T \int_0^1 u^{(k+1)-1} (1-u)^{N-(k+1)} du = \frac{T \cdot k}{N+1} \approx \frac{T \cdot k}{N}. \quad (11) \end{aligned}$$

Если λ - средняя плотность частиц в $(0, T)$, то, очевидно,

$$\lambda = \frac{N}{T} \quad (12)$$

и

$$\overline{t(k)} = \frac{k}{\lambda}. \quad (13)$$

Предположим, что $N \rightarrow \infty, T \rightarrow \infty$, причем $\lambda = \frac{N}{T} \text{ Const.}$ Тогда, как нетрудно показать, для любого конечного t формула (10) переходит в асимптотическую формулу:

$$P_k(t) \approx \frac{\lambda^k t^{k-1} e^{-\lambda t}}{(k-1)!}, \quad (14)$$

при $k=1$ получаем:

$$P_1(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}. \quad (15)$$

Интеграл

$$S_k(t) = \int_0^t p_k(u) du = \frac{\lambda^k}{(k-1)!} \int_0^t u^{k-1} e^{-\lambda u} du \quad (16)$$

есть вероятность того, что длина интервала между m -ой и $(m+k)$ -ой частицами (при любом m) не превосходит t . Интеграл (16) берется в конечном виде (см., например, [5]).

При $k=1$ имеем:

$$S_1(t) = \lambda \int_0^t e^{-\lambda u} du = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (17)$$

Дадим формулам (6) - (17) надежность интерпретацию. Рассмотрим некоторое устройство D , в котором могут возникать неисправности.

Пусть $(0, T)$ есть отрезок времени; N - число отказов (сбоев) в устройстве D за время t ; λ - средняя частота отказов; $\frac{1}{\lambda}$ - средняя продолжительность безотказной работы D (время простоев и ремонта во внимание не принимаем).

Тогда $p_k(t)$ есть распределение вероятностей длин интервалов времени, в течение которых происходит $k-1$ отказов. В частности, $p_1(t)$ есть распределение вероятностей длин беспробойных интервалов. Далее, $S_k(t)$ есть вероятность того, что для появления серии k последовательных отказов в D требуется не более t единиц времени. Если t фиксировано, то $S_k(t)$ есть не что иное, как вероятность наличия внутри интервала времени t более, чем $k-1$ отказов; в частности, $S_1(t)$ есть вероятность возникновения за время t хотя бы одного отказа.

Предположим, D является одним из элементов комплекса G от которого требуется надежная работа в течение времени t . Если устройство D и отказы в нем таковы, что единственный отказ выводит D из строя, то $S_1(t)$ будет (относительно данного интервала времени t) локальной характеристикой надежности, используемой в вышеизложенном логико-вероятностном методе анализа надежности. При таком подходе интервал времени t (сколь угодно большой) рассматривается как один такт срабатывания эквивалентной логической схемы комплекса G , а величина $S_1(t)$ есть вероятность единицы на входе D эквивалентной схемы. Если же устройство D таково, что для выхода его из строя требуется подряд не менее k внутренних неисправностей, то вероятность единицы на входе D эквивалентной логической схемы комплекса G равна $S_k(t)$.

Итак, при заданном интервале времени t , внутри которого исследуется надежность комплекса G , связь между интегральными характеристиками (величинами λ_i , определяемыми из опыта для элементов D_i комплекса G) и локальными характеристиками, необходимыми для расчетов по предлагаемому методу, задается формулами (16) и (17).

ЗАМЕЧАНИЕ. При выводе формул (16) и (17) предполагалось, что частицы (отказы) распределены внутри $(0, T)$ независимым образом; следовательно, формулами (16) и (17) можно пользоваться лишь при отсутствии существенной корреляции между неисправностями.

Выводы

Логико-вероятностным методом расчета при заданной вероятности исправной работы каждого элемента может быть получена количественная оценка структурной надежности данной судовой энергетической установки на различных режимах ее работы. Сравнивая структурные надежности различных функционально эквивалентных схем, можно выбрать схему, наилучшую по надежности. Задаваясь различными значениями вероятности исправной работы элементов выбранной схемы установки, можно судить о важности каждого элемента для схемы, а также делать вывод о том, как элементы установки следует резервировать в первую очередь. Исходные данные для применения логико-вероятностного метода могут быть получены из средней частоты отказов элементов установки.

Литература

1. Маликов И.М. Основы теории и расчета надежности. М., Судпромгиз, 1960.
2. Макаров С.В. Вероятностные расчеты одноконтурных схем. Вычислительные системы. Сб. трудов, 1962, вып. 4, 29-50 (Ин-т математики Сиб. отд. АН СССР).
3. Дружинин Г.В. Надежность устройств автоматики. М., "Энергия", 1964.
4. Белов Ф.Н. и Соловейчик Ф.С. Вопросы надежности радиоэлектронной аппаратуры. М., Госэнергоиздат, 1961.
5. Рыжик И.М. и Градштейн И.С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М., 1951.