Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
1987, т.110

УДК 622.648.; 622.693.4

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ГИДРОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ С НЕНАГРУЖЕННЫМ РЕЗЕРВОМ И ВОССТАНОВЛЕНИЕМ

Д.Г.ПОВОЛОЦКИЙ, О.Е.НИВОРОЖКИН

Рассматривается пульпонасосная система, в которой имеется несколько рабочих линий, состоящих из последовательно включенных насосов, и несколько резервных линий, которые включаются при отказе основных рабочих. Отказавшие элементы системы восстанавливаются и переходят в резерв, когда восстановление (ремонт) заканчивается. Отказом всей системы будем считать событие, когда в момент отказа последней рабочей линии резерв к работе не готов, т.е. еще не закончилось его восстановление. Время, протекшее с начала работы системы до момента ее отказа, есть время безотказной работы системы.

Задачу исследования надежности системы можно сформулировать как задачу исследования вероятностных свойств параметров системы, когда по заданным вероятностным характеристикам элементов, входящих в структуру системы, определяются вероятностные характеристики параметров системы в целом. Так как определение вероятностных характеристик, т.е. функционалов и функций распределения с помощью аналитических методов представляет известные трудности (особенно для немонотонных систем), то для решения поставленной задачи рекомендуется применение метода статистического моделирования.

Общую схему вычислений по методу статистических испытаний можно представить как схему решения такого рода задач, когда подлежащая определению величина представляется в виде математического ожидания функций случайных величин или функционала от случайного процесса и определяется приближенно как среднее значение на основе достаточно большого количества испытаний: 1) на основании выбранных критериев надежности формулируются вероятностные характеристики, определяющие надежность системы; 2) с помощью натурных испытаний или экспериментов выясняются характер и количественные значения вероятностных характеристик; 3) на множестве выборок реализаций случайных функций или значений случайных величин, являющихся параметрами элементов и входов системы, реализуется алгоритм определения ее параметров; 4) на совокупности решений (реализаций модели) строятся статистические оценки вероятностных характеристик системы.

Теоретической основой метода статистического моделирования является широко известный в теории вероятностей закон больших чисел, устанавливающий при определенных условиях предельное равенство среднего арифмети-

ческого случайной величины математическому ожиданию этой случайной величины при бесконечном увеличении числа опытов.

Одной из важнейших характеристик надежности системы является среднее время безотказной работы. Для определения этой величины необходимо знать структуру системы (наличие и состав резерва, способ переключения, возможности восстановления), а также вероятностные характеристики структурных элементов и процессов восстановления.

Общая блок-схема метода статистических испытаний для исследования надежности различных систем с восстановлением состоит из трех основных блоков. В блоке I происходит формирование случайных значений времени безотказной работы и времени восстановления отдельных элементов системы. Входной информацией в блок I являются законы распределения и их оценки, выходная информация - случайное время безотказной работы i-го элемента t_i и случайное время его восстановления t_{Bi} - поступает в блок 2, где формируются реализации формальной схемы функционирования системы. Выходная информация второго блока - случайное время безотказной работы системы t_c и случайное время восстановления системы t_{Bc}, полученные за одну реализацию, - поступает в блок 3 обработки и выдачи результатов.

В блоке 3 определяются характеристики надежности системы в результате некоторого (достаточно большого) числа реализаций. Ниже приводятся конкретные разработки блока 2 для формальных схем работы интересующих нас систем.

Рассмотрим сначала систему с общим резервированием с целой кратностью без восстановления, состоящую из несколько последовательно включенных элементов.

Время непрерывной работы системы

$$t_c = \sum_{j=1}^{m+1} \min_i t_{ij} ,$$

где m - число резервных подсистем; i - номер элемента; j - номер системы.

Усложним теперь нашу задачу. Предположим, что отказавшие подсистемы начинают восстанавливаться и включаются в работу в момент, когда резервные системы (подсистемы) оказываются исчерпанными. Тогда отказ всей системы может наступить только в том случае, когда к моменту отказа последней резервной (или основной) системы ни одна из остальных не успеет восстановиться. Предположим сначала, что в каждой линии, основной и в резервных, только один элемент, а потом вернемся к исходному варианту, используя уже полученные результаты.

Изобразим структуру системы (рис.I). Состояние системы от момента включения следующего восстановленного элемента будем именовать шагом работы системы q.

Рассмотрим случайную ситуацию, сложившуюся на нескольких первых шагах и изобразим в виде временной эпюры (рис.2,а):

$$C_1^{(1)} = t_1; \qquad C_2^{(1)} = t_1 + t_2; \qquad C_3^{(1)} = t_1 + t_2 + t_3$$

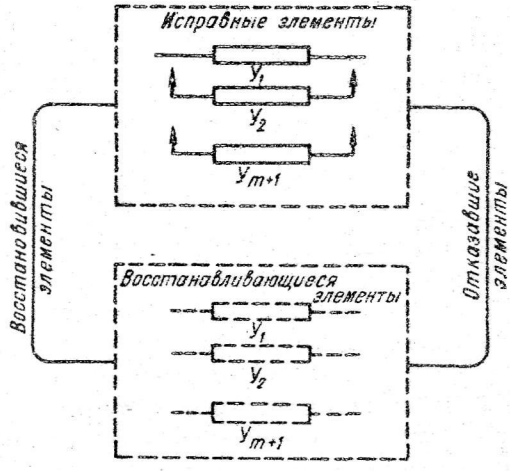


Рис.1. Структура системы с резервом и восстановлением

$$X_1^{(1)} = t_1 + t_{B1},$$
$$X_2^{(1)} = t_1 + t_2 + t_{B2},$$
$$X_3^{(1)} = t_1 + t_2 + t_3 + t_{B3}.$$

На этом и последующих шагах в работу будет включаться резервная система, успевшая восстановиться, т.е. имеющая наименьший момент окончания восстановления. Моментом отказа системы в целом будет, очевидно, тот момент времени, когда после отказа очередной работающей системы ни одна из ремонтируемых не успеет восстановиться и отказавшую нечем заменить.

После первого шага система перешла в новое рабочее состояние, в работу включается Y_2, успевший восстановиться:

$$X_2^{(1)} = \min_i X_i^{(1)}, \quad X_\alpha^{(1)} = X_2^{(1)}.$$

Необходимым условием продолжения работы является условие $X_\alpha^{(1)} < C_3^{(1)}$, где $C_3^{(1)}$ – момент отказа работы системы.

На втором шаге Y_2 (рис.2,б), проработав t_2, отказывает в момент C_3 и затем восстанавливается через t_{B2}. Таким образом, на втором шаге

$$C_3^{(2)} = C_3^{(1)} + t_2;$$

$$X_1^{(2)} = X_1^{(1)}; \quad X_2^{(2)} = C_3^{(2)} + t_{B2} = C_3^{(1)} + t_2 + t_{B2}, \quad X_3^{(2)} = X_2^{(1)}.$$

Так как $Y_\alpha^{(2)} = X_i^{(2)}$, то снова $X_\alpha^{(2)} < C_3^{(2)}$ и система перейдет в новое состояние.

Пропустим шаг 3 и 4 и перейдем к шагу 5 (рис.2,в):

$$C_3^{(5)} = C_3^{(4)} + t_2;$$

$$X_1^{(5)} = X_1^{(4)}, \quad X_2^{(5)} = C_3^{(5)} + t_{B2} = C_3^{(4)} + t_2 + t_{B2}, \quad X_3^{(5)} = X_3^{(4)}.$$

При этом $X_\alpha^{(5)} = X_1^{(5)}$, но $X_1^{(5)} > C_3^{(5)}$, т.е. ни одна из отказавших систем не успела восстановиться и происходит отказ системы в целом.

Запишем теперь алгоритм определения времени работы системы до отказа (безотказной работы):

$$t_c = C_{m+1} \quad \text{если} \quad C_{m+1}^{(q)} < X_\alpha^{(q)},$$

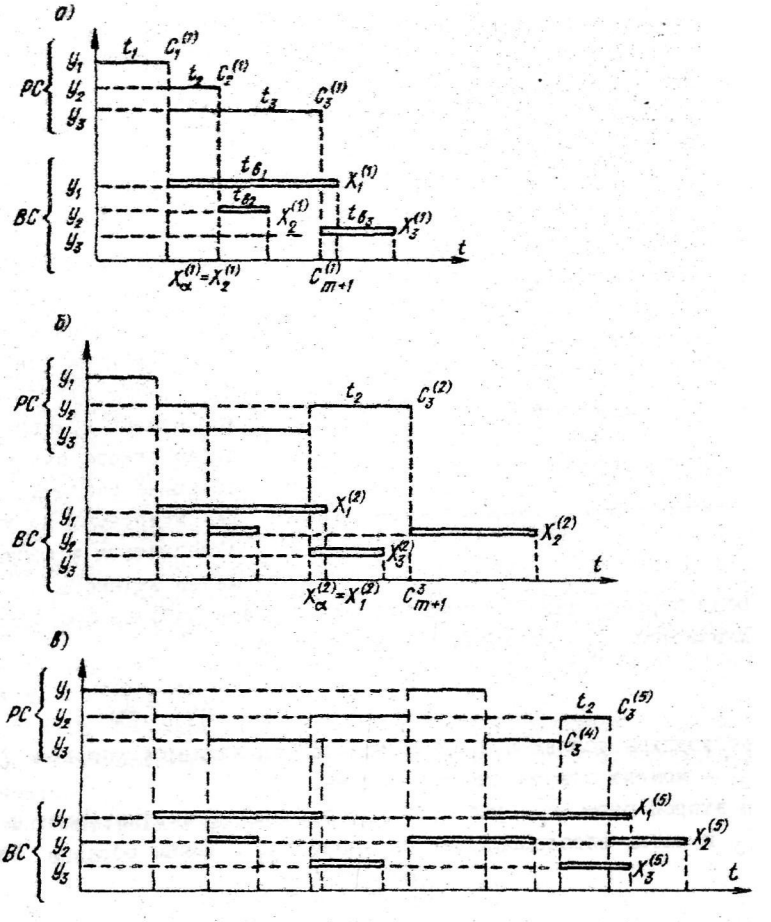


Рис.2. Временная эпюра случайной ситуации для системы с резервом и восстановлением: а – $q = 1$; б – $q = 2$; в – $q = 5$

где при $q = 1$

$$C_j^{(1)} = \sum_{i=1}^{j} t_i\,, \quad X_j^{(1)} = \sum_{\alpha=1} t_\alpha^{(1)} + t_{Bj}\,, \quad t_j^{(1)} = t_j\;;$$

при $q > 1$

$$C_{m+1}^{(q)} = C_{m+1}^{(q-1)} + t_j^{(q)}\;;$$

$$t_j^{(q)} = \begin{cases} 0 & \text{если } X_j^{(q-1)} \neq X_\alpha^{(q-1)} \\ t_j & \text{если } X_j^{(q-1)} = X_\alpha^{(q-1)} \end{cases}$$

$$X_j^{(q)} = \begin{cases} C_{m+1}^{(q-1)+t_{Bj}} & \text{если } X_j^{(q-1)} = X_\alpha^{(q-1)}, \\ X_j^{(q-1)} & \text{если } X_j^{(q-1)} \neq X_\alpha^{(q-1)}, \end{cases}$$

$$X_\alpha^{q} = \min_j X_j^{(q)}.$$

Возвращаясь к основной задаче, введем в алгоритм необходимые изменения и добавления.

Очевидно, что блок формирования случайного времени безотказной работы одного элемента мы должны заменить алгоритмом определения этой величины для группы последовательно соединенных элементов, причем только на первом шаге. На следующих шагах придется поступать иначе. Так как под нагрузкой находятся все элементы группы, то к моменту отказа одного из них остальные вырабатывают часть своего ресурса и хотя на данном шаге это не сказывается на отказе всей группы, но на следующем шаге повлиять может, момент отказа уже будет определяться случайным временем возникновения отказов (разыгрываемой величиной), полученной из закона распределения с другими параметрами. Чтобы учесть эту возможность, на каждом шаге, кроме первого, будем строить новый массив времен возникновения отказов следующим образом: если время возникновения отказа на предыдущем шаге составило более 20 % от среднего, то на новом шаге происходит разыгрывание случайной величины с прежним средним значением, если же это время не превысило 20 % среднего, то для отказавшего элемента ничего не меняется, а для остальных разыгрывается случайная величина со средним значением, равным 20 %, прежнего среднего значения (т.е. происходит сдвиг распределения). Дисперсию при этом будем считать неизменной. Естественно, что для этого следует иметь среди входной информации массив средних значений времен безотказной работы каждого из элементов системы и менять его после каждого шага.

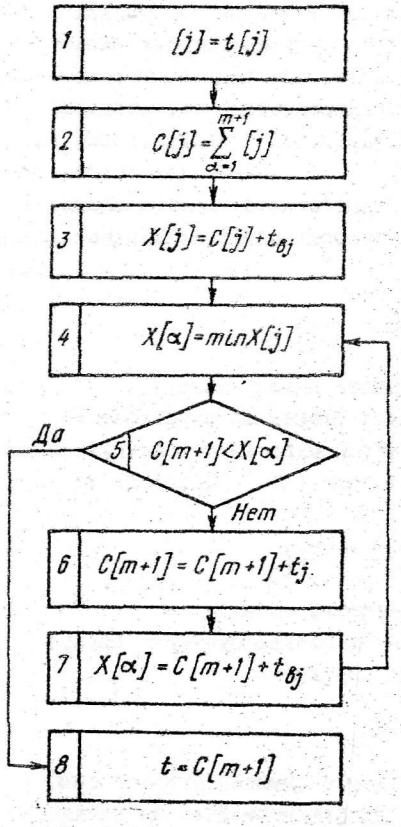


Рис.3. Блок-схема алгоритма определения времени безотказной работы системы

Выбирая наименьший элемент из этого массива, определим случайный момент отказа данной j-й группы. Пусть t_j – определенное таким образом случайное время работы j-й подсистемы, а t_{Bj} – случайное время ее восстановления. Тогда алго-

рим вычисления T - времени безотказной работы системы в целом можно показать на рис.3. На основе полученного алгоритма составлена программа, с помощью которой установлено, что для гидротранспортной системы с двумя последовательно включенными грунтовыми насосами резерв из двух спаренных насосов вполне достаточен.

Преимуществом данного метода является то, что с его помощью можно оценивать надежность систем с переменной интенсивностью отказов.