УДК 504.06

РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ТИПОВЫХ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ

Л. И. Зевин,
канд. техн. наук
leonid.zevin@gmail.com

Г. Г. Кроль

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины,
61046, Украина, г. Харьков, ул. Пожарского, 2/10

Представлен метод, разработанный для расчетов показателей структурной надежности систем с большим числом элементов. Метод основывается на использовании типовых структурных схем, отражающих принципиальную схему связей между элементами. Показано, как путем пополнения и объединения типовых структур можно создавать графологические структуры для выполнения расчетов показателей надежности. Подход может быть использован при разработке алгоритмов и программ решения на ЭВМ задач, базирующихся на оценках структурной надежности систем. К числу таких задач, в частности, относятся: оценки безопасности атомных блоков, планирование их ремонтов, оценки надежности направленных систем транспортировки сред, оценки остаточных ресурсов технических объектов. Для их решения разработаны различные частные методы. Однако стандартизировать расчеты показателей надежности не представляется возможным в силу разнообразия систем и условий их функционирования. Представленный подход ориентирован на автоматизацию расчетов показателей структурной надежности широкого класса технических систем. Он базируется на доказательстве существования алгоритма расчета на множестве типовых структурных схем. При этом предполагается, что на ЭВМ распознаваемы образы типовых структур в составе графологических образов систем. Содержание задачи состоит в следующем. Дана техническая система. Требуется построить графологический образ и рассчитать показатель ее структурной надежности. Предлагаемый метод расчета основывается на представлении графологического образа системы в виде композиции графологических образов типовых структур, показатели надежности которых вычислимы. Они заменяются отдельными элементами с вычисленными значениями показателя надежности. Замены дают возможность упростить первоначальный графологический образ системы за счет сокращения общего числа элементов и вычислить показатель надежности системы. Процедура вычисления и замены продолжается до тех пор, пока в графологическом образе системы не останется одна типовая структура, для которой показатель надежности вычислим. Количество элементов в системе ничем не ограничено, поскольку процедура замен осуществляется последовательно до образования одной типовой структуры. Существенное ограничение в применении метода к расчету структурной надежности широкого спектра сложных технических систем обусловлено ограниченностью множества типовых структур. Однако такой банк типовых структур может быть создан и использоваться при разработке соответствующих расчетных программ.

Ключевые слова*: алгоритм, система, структурная надежность, типовые схемы.*

Введение

Расчёты показателей надёжности систем по данным о надёжности элементов, входящих в системы, называют расчетами их структурной надёжности. Они могут быть выполнены с помощью различных методов, изложенных в [1–6].

К существующим основным методам оценки структурной надёжности систем относятся методы: логико-вероятностный, дискретных марковских процессов, имитационного моделирования. Они сложны, а их применение при большом числе элементов вызывает значительные трудности. В связи с этим представляют интерес и другие методы, облегчающие решение расчетных задач.

В силу многообразия и масштабности технических систем не существует и, по-видимому, не будет существовать универсального подхода к расчету их структурной надежности.

Один из подходов, применяемый в инженерных расчетах вручную для оценки структурной надежности большой системы, показан в [7]. Он состоит в укрупнении элементов структурной схемы – графологического образа (ГО) системы. Когда в системе много элементов, то вычисления становятся длительными. Еще более трудоемким становится этот процесс, если расчеты надо производить многократно при изменяющихся данных.

В настоящей статье описан метод расчета, частично разработанный в статьях [8, 9], который использует ГО как логическую модель отказового состояния системы.

В дальнейшем, для сокращения записей, значение показателя надежности (ПН) системы будет приписываться также и ГО системы.

Задача, которая рассматривается в статье, состоит в следующем. Дана техническая система. Требуется построить ГО системы и рассчитать показатель ее структурной надежности.

Предлагаемый метод расчета основывается на представлении ГО системы в виде композиции ГО специальных частей, которые заменяются отдельными элементами с вычисленными значениями ПН. Замены дают возможность упростить первоначальный ГО системы за счет сокращения общего числа элементов и вычислить ее ПН.

Основная часть

Пусть X – система. Расчет структурной надежности основывается на ее ГО. Однако создание ГО системы есть процесс неформализованный. Поэтому два независимых исследователя могут создать в каком-то смысле допустимые, но различающиеся ГО одной и той же системы. Поскольку число элементов системы конечно, число исследователей конечно, то можно считать, что для X существует конечное множество допустимых версий ГО $S_\nu, \nu = 1,2,...,\Psi$ этой системы. Значения ПН ГО $S_\nu, \nu = 1,2,...,\Psi$ должны быть одинаковыми, как у допустимых моделей отказового состояния одной и той же системы X

$$Q(S_\nu) = Q_S, \quad \nu = 1,2,...,\Psi, \tag{1}$$

где S представляет любой один ГО из множества $S_\nu, \nu = 1,2,...,\Psi$, а Q_S – значение его ПН.

В смысле (1) версии ГО $S_\nu, \nu = 1,2,...,\Psi$ эквивалентны, и пусть ГО S – их представитель. Для расчета показателя надежности ГО S вводятся простые элементы SE, обобщенные элементы G и виртуальные соединители, а также БГО – типовые базисные ГО $g_0, g_1, g_2,..., g_M$.

Предположение 1. В качестве простых элементов SE принимаются такие, которые в рассматриваемых ГО не допускают разделения на составные части. Для элементов SE определены значения их ПН или процедуры их вычисления.

Примерами SE в составе ГО системы могут быть такие элементы, как насос или подшипник насоса в зависимости от степени детализации ГО.

Также к элементам типа SE отнесены виртуальные соединители, которые предназначены для организации схемы ГО. Показателям надежности соединителей назначаются значения 0 или 1.

Предположение 2. В качестве обобщенных элементов, обозначаемых символом G, принимаются такие, которые в рассматриваемых ГО образованы совокупностью элементов типа SE и совокупностью БГО.

Предположение 3. БГО $g_0, g_1, g_2,..., g_M$ являются графологическими структурами, содержащими минимальное число простых элементов, определяющих принципиальную схему связей между ними. Для БГО определены процедуры расчета их ПН, например, вероятностей отказа (ВО) или вероятностей безотказной работы (ВБР) за время $[0,t]$.

БГО представимы на листе бумаги, на компьютере или ином носителе информации. С их помощью создаются все версии ГО $S_\nu, \nu = 1,2,...,\Psi$.

В качестве БГО могут быть рассмотрены структуры, отображающие: g_0 – единичный элемент; $g_1 = (e_1 \vee e_2)$ – последовательное соединение двух элементов; $g_2 = (e_1 \wedge e_2)$ – параллельное соединение двух элементов, g_3 – структуру, имеющую резерв времени на восстановление; резервированные системы с идеальными и неидеальными переключателями и другие ГО.

Предположение 4. Из базисных элементов типа SE, обобщенных элементов G, виртуальных соединителей, а также БГО $g_0, g_1, g_2,..., g_M$ создаются ГО систем. При этом каждый элемент должен иметь единственное вхождение в ГО системы и два любых элемента должны иметь только одну связь друг с другом. Во множестве элементов ГО системы определено множество конечных элементов, завершающих ГО.

Рассмотрим вычисление ПН БГО $g_1 = (e_1 \vee e_2)$. В качестве ПН R ГО g_1 выберем ВБР за время $[0,t]$. Тогда, по известной формуле [1], $R(g_1) = r(e_1) \cdot r(e_2)$, где r – ВБР элементов e_1, e_2 за время $[0,t]$.

Если к g_1 добавить последовательно еще элемент, например e_3, то допустим, что в перечне БГО $g_0, g_1, g_2, ..., g_M$ отсутствует вновь образованный ГО $(e_1 \vee e_2 \vee e_3)$. Тогда, по предположению 3, отсутствует процедура вычисления значения ПН R структуры $(e_1 \vee e_2 \vee e_3)$. Ситуацию можно изменить, если объявить элементом БГО g_1. Тогда получим обобщенный элемент (обобщенный ГО) из последовательного соединения двух элементов: $G_1 = (g_1 \vee e_3) = ((e_1 \vee e_2) \vee e_3)$. А для такой схемы уже применима формула расчета ПН: $R(G_1) = r(g_1) \cdot r(e_3) = r(e_1 \vee e_2) \cdot r(e_3) = r(e_1) \cdot r(e_2) \cdot r(e_3)$.

Поскольку для БГО $g_0, g_1, g_2, ..., g_M$ постулировано существование алгоритмов расчета их ПН, то в качестве элементов g_1 и e_3 из предыдущей формулы можно принимать любой БГО из $g_0, g_1, g_2, ..., g_M$. Тогда обобщенный элемент получит вид $G_1 = (g_k \vee g_m)$ и $R(G_1) = r(g_k) \cdot r(g_m)$, где $r(g_k), r(g_m)$ – ВБР БГО g_k, g_m за время $[0,t]$.

Структура $G_1 = (g_k \vee g_m)$ может быть пополнена другими БГО, например, так: $G_1 = ((g_k \vee g_i) \vee (g_m \vee g_j))$, где g_k, g_i, g_m, g_j – БГО из $g_0, g_1, g_2, ..., g_M$, т.е. обобщенный ГО G_1 представляет ГО g_1 с обобщенными элементами $(g_k \vee g_i), (g_m \vee g_j)$.

Однако обобщенные элементы $(g_k \vee g_i), (g_m \vee g_j)$ могут отсутствовать в составе БГО из числа $g_0, g_1, g_2, ..., g_M$. Следовательно, по предположению 3 для них не определена процедура расчета ПН. Чтобы преодолеть эту трудность, надо провести соответствующие вычисления, а именно $R(G_1) = r(g_k \vee g_i) \cdot r(g_m \vee g_j) = r(g_k) \cdot r(g_i) \cdot r(g_m) \cdot r(g_j)$. Распространяя этот прием на более общий случай, получим формулу вычисления ПН обобщенного элемента G_1, образованного последовательными соединениями БГО

$$R(G_1) = r[g_k \vee (\cdot) \vee ... \vee (\cdot) \vee g_i(\cdot) \vee ... \vee (\cdot)] \times r[g_m \vee (\cdot) \vee ... \vee (\cdot) \vee g_j(\cdot) \vee ... \vee (\cdot)]. \quad (2)$$

Поскольку формула (2) содержит БГО в качестве компонент, то каждая из них может быть дополнена БГО. Эту процедура осуществима многократно: она ничем не ограничена. Например, пусть БГО g_1 есть компонента в (2). Пополним g_1 БГО g_2. Получим $G_{1,2} = g_1 \vee g_2 = (e_1 \vee e_2) \vee (E_1 \wedge E_2)$. Пополнение формулы (2) обобщенным элементом $G_{1,2}$ сохраняет вычислимость ПН G_1.

Аналогичные, как и выше, рассуждения приводят к формуле вычисления ВО за время $[0,t]$ обобщенного элемента G_2, отражающего параллельные соединения БГО

$$Q(G_2) = q[(g_k \wedge (\cdot) \wedge ... \wedge (\cdot) \wedge g_i(\cdot) \wedge ... \wedge (\cdot)] \times q[g_m \wedge (\cdot) \wedge ... \wedge (\cdot) \wedge g_j(\cdot) \wedge ... \wedge (\cdot)], \quad (3)$$

где q – ВО аргументов за время $[0,t]$ в формуле (3).

Если ГО S содержит обобщенные ГО $G_1 \vee G_2$ или $G_1 \wedge G_2$, а также их комбинации, связанные знаками дизъюнкции $\vee$ и конъюнкции $\wedge$, то их ПН вычислим как ПН последовательно-параллельных структур.

Рассмотрим вычисление ПН БГО g_3. Представим его в виде формулы: $g_3 = g_3((A_3^1 \vee E_3 \vee A_3^2) \wedge A_3^3)$, где E_3 – рабочий компонент, представленный простым элементом типа SE в ГО системы X; компоненты A_3^1, A_3^2, A_3^3 – простые элементы ГО системы X, обеспечивающие работу E_3. Для g_3 в предположении 1 постулировано наличие алгоритма расчета его ПН.

Однако БГО g_3 в составе ГО системы X может быть пополнен переключателями (P), фильтрами (F), диагностическими приборами (D), средствами автоматики $U)$. Тогда БГО g_3 потеряет свой статус БГО и станет некоторой обобщенной структурой G_3, которую определим в виде зависимости

$$G_3 = G_3((A_3^1 \vee P \vee U \vee E_3 \vee F \vee D \vee A_3^2) \wedge A_3^3)\,. \tag{4}$$

Принимаем, что для ГО (4) алгоритм расчета его ПН не предусмотрен. Однако в силу простоты связей (последовательно-параллельное соединение) между элементами ГО (4) очевидным образом приводится к БГО $g_3 = g_3((A_3^1 \vee E_3 \vee A_3^2) \wedge A_3^3)$, и расчет его ПН, согласно предположению 3, выполним.

Допустим, что рабочий компонент E_3 БГО g_3 представляет собой ГО, для примера состоящий из подсистем ГО $E_{3,1}, E_{3,2},..., E_{3,m}$, которые, в свою очередь, состоят из подсистем ГО $E_{3,1,1},..., E_{3,2,1},..., E_{3,m,1},..., E_{3,m,m}$. Отражая это для наглядности в цепочке включений, получим

$$E_3 \supset [E_{3,1} \supset (E_{3,1,1}, E_{3,1,2},...)], [E_{3,2} \supset (E_{3,2,1}, E_{3,2,2},...)],...,[E_{3,,m} \supset (E_{3,m,1}, E_{3,m,2},..., E_{3,m,m})]\,. \tag{5}$$

Допустим, что подсистемы последнего уровня включения $E_{3,1,1},..., E_{3,2,1},..., E_{3,m,1},..., E_{3,m,m}$ состоят из БГО с простыми элементами и, соответственно, их ПН вычислим. Тогда ГО $E_{3,1}, E_{3,2},..., E_{3,m}$ формируются из простых элементов и если они состоят из БГО, то получаем вычислимость ПН $E_{3,1}, E_{3,2},..., E_{3,m}$, а затем, соответственно, и ПН рабочего компонента E_3.

Аналогично g_3 БГО $g_4, g_5,..., g_M$ также могут быть пополнены ГО подсистем с различным уровнем включения друг в друга. При этом БГО $g_4, g_5,..., g_M$ потеряют свой базисный статус. Тогда из них сформируются обобщенные элементы $G_4, G_5,..., G_M$. Если ПН включенных ГО подсистем будут вычислимы, то это приведет к БГО $g_4, g_5,..., g_M$ с простыми элементами и вычислимости их ПН.

Таким образом, пополнение БГО $g_0, g_1, g_2,..., g_M$ новыми элементами или обобщенными элементами с декомпозицией на подсистемы ГО, имеющими вычислимые ПН, будет приводить к новым структурам с вычислимыми ПН.

Проблемам расчета структурной надежности больших систем посвящены и другие работы. В частности, расчет методом вероятностного эквивалентирования изложен в статье [10], а методом Монте-Карло – в статье [11]. Также существуют и другие публикации, в которых под разными углами зрения и при различных условиях ограничительного характера рассматривается проблема расчета структурной надежности систем. Однако проблеме автоматизации расчетов не уделяется должного внимания. В этой связи полезной будет нижеприведенная теорема.

Теорема. Пусть задана система X и ее ГО S. Если ГО S составлен из базисных ГО $g_0, g_1, g_2,..., g_M$ с простыми элементами или из обобщенных ГО $G_1, G_2, G_3,..., G_M$ с вычислимыми ПН, то показатель надежности системы X вычислим.

Доказательство. Пусть ПН ГО S есть ВО $Q_S^*(t)$ за время $(0,t)$.

Если ГО S состоит из одного БГО $g_0, g_1, g_2,..., g_M$, составленного из простых элементов типа SE, то, по предположению 1, ПН ГО S вычислим и равен $Q_S^*(t)$ за время $(0,t)$.

Пусть ГО S образован из нескольких БГО и в нем существует БГО g_1 (последовательное соединение двух элементов). Вычислим его ПН. Допустим, это будет ВО $q_1^{(1)}(t)$ за время $(0,t)$. В ГО S заменим БГО g_1 на БГО g_0 с ПН $q_1^{(1)}(t)$. Тогда вместо ГО S получим новый ГО $S_1^{(1)}$. При этом ПН ГО S сохранит свое прежнее значение ВО ($Q(S) = Q(S_1^{(1)}) = Q_S^*(t)$) за время $(0,t)$.

В ГО $S_1^{(1)}$ может быть несколько БГО g_1. Найдем в составе ГО $S_1^{(1)}$ БГО g_1 и вычислим его ПН, допустим, это будет $q_1^{(2)}(t)$. Заменим в $S_1^{(1)}$ ГО g_1 на ГО g_0 с ПН $q_1^{(2)}(t)$. Получим новый ГО $S_1^{(2)}$ вместо ГО $S_1^{(1)}$, для которого $Q(S_1^{(2)}) = Q_S^*(t)$ за время $(0,t)$. Эту процедуру будем повторять до тех пор, пока в очередном ГО, допустим, это будет ГО $S_1^{(k)}$, не будет содержаться ни одного БГО g_1.

Предположим, что в составе ГО $S_1^{(k)}$ существуют БГО типа g_2 с простыми элементами. Вычислим его ПН, допустим, это будет $q_2^{(1)}(t)$. Заменим в ГО $S_1^{(k)}$ БГО g_2 на БГО g_0 со значением ПН $q_2^{(1)}(t)$. После замены получим вместо ГО $S_1^{(k)}$ новый ГО, который обозначим ГО $S_2^{(1)}$ и для которого ВО $Q(S_2^{(1)}) = Q_S^*(t)$ за время $(0,t)$.

Эти процедуры будем повторять до тех пор, пока преобразованный ГО S не будет содержать БГО g_1 и g_2. Обозначим преобразованный ГО S символом $S_2^{(k)}$, для которого ПН $Q(S_2^{(k)}) = Q_S^*(t)$ за время $(0,t)$.

Пусть ГО $S_2^{(k)}$ содержит БГО g_3. По предположению 3 ПН БГО g_3 вычислим. Примем, что он равен ВО $q_3^{(1)}(t)$ за время $(0,t)$. Заменим в ГО $S_2^{(k)}$ БГО g_3 на БГО g_0 со значением ПН $q_3^{(1)}(t)$. После замены получим вместо ГО $S_2^{(k)}$ новый ГО, который обозначим ГО $S_3^{(1)}$, для которого ВО $Q(S_3^{(1)}) = Q_S^*(t)$ за время $(0,t)$. Если ГО $S_3^{(1)}$ содержит еще БГО g_3, то, продолжая этот процесс его исключения, будем получать ГО $S_3^{(2)}, S_3^{(3)}, ..., S_3^{(k)}$, ПН которых ВО $Q(S_3^{(2)}) = Q(S_3^{(3)}) = ... = Q(S_3^{(k)}) = Q_S^*(t)$ за время $(0,t)$.

Модификации ГО $S_3^{(1)}$, $S_3^{(2)}, ..., S_3^{(k)}$ могли привести к появлению БГО g_1 и/или g_2, а также, возможно, и других БГО. Тогда, как и выше, повторяя действия с этими БГО, получим БГО, допустим, $S_M^{(k)}$, который будет содержать только один базисный ГО g_0 с вычисленным значением ПН ГО S: ВО $Q(S_M^{(k)}(t)) = Q_S^*(t)$.

Аналогичным образом можно получить вычислимость ПН ГО S для БГО $g_4, g_5, ..., g_M$ в составе ГО S.

Если ГО S содержит обобщенные ГО $G_1, G_2, G_3, ..., G_M$ или их комбинации с вычислимыми ПН, связанные знаками дизъюнкции и конъюнкции, то их ПН вычислим. Действительно, после вычисления ПН ГО $G_1, G_2, G_3, ..., G_M$ и замены их на соответствующие ГО g_0 обобщенные ГО превращаются в структуры БГО с простыми элементами, для которых постулирована вычислимость ПН.

Теорема доказана.

Заключение

В статье обосновывается один из возможных путей получения оценок показателей структурной надежности технических систем, содержащих большое число схем с большим числом элементов. Применение же универсального графоаналитического метода "дерева" отказов, базирующегося на теореме полной вероятности, вызывает значительные трудности как со стороны разработки алгоритма и программы, так и со стороны обучения пользователей.

Содержание статьи ориентировано на разработку алгоритмов и программ для расчетов показателей надежности теплоэнергетических объектов, таких, как АЭС, ТЭС, направленных систем транспортировки воды, нефти, газа и других носителей, а также и на решение практических задач безопасности, планирования ремонтов, обеспечение эффективности эксплуатации объектов.

В настоящее время разработано большое число формул, методов и вычислительных процедур расчета показателей надежности широко распространенных маломасштабных технических систем и их оборудования, что обусловило рассмотрение в статье метода типовых структур. Экспериментальная проверка на ЭВМ этого подхода показала его эффективность по ряду аспектов: быстрота подготовки данных, простота использования, широкое поле для развития и применения.

Литература

1. Острейковский В. А. Теория надежности. М.: Высш. шк., 2003. 463 с.
2. Гук Ю. Б. Анализ надёжности электроэнергетических установок. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. 224 с.
3. Нитушин В. Г. Надежность энергетических систем. М.: Высш. шк., 1984. 256 с.
4. Рябинин И. А., Черкесов Г. Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. М.: Радио и связь, 1981. 264 с.

5. Черкесов Г. Н. Анализ надёжности сложных систем при помощи вероятностной логики. *Основные вопросы теории и практики надёжности*. Сб. тр. семинара научного совета по проблемам надёжности отделения механики и процессов управления АН СССР. М.: Сов. радио, 1980. 328 с.
6. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности. С. Пб: БХВ-Петербург, 2006. 704 с.
7. Вентцель Е. С. Исследование операций. М.: Сов. радио, 1972. 550 с.
8. Зевин Л. И., Инкулис В. В., Зевин С. Л. Методика расчета и анализа структурной надежности блоков атомных станций. *Проблемы машиностроения*. 2002. Т. 5. № 2. С. 34–37.
9. Зевин С. Л. Распознавание структурных схем в задачах моделирования надежности энергоустановок. *Вестн. Нац. техн. ун-та "ХПИ"*. 2002. Т. 3. № 9. С. 33–38.
10. Обоскалов В. П. Проблемы расчета структурной надежности систем электроснабжения с использованием метода вероятностного эквивалентирования. *Электричество*. 2015. № 12. С. 4–12.
11. Бурмутаев А. Е. Сложность моделирования интервальных оценок показателей структурной надежности электротехнических комплексов методом Монте-Карло. *Вектор науки Тольяттин. ун-та*. 2011. № 3 (17). С. 72–75.

Поступила в редакцию 29.03.2019

Розрахунок показників надійності технічних систем методом типових структурних схем

Зевін Л. І., Кроль Г. Г.

[2] Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України,
61046, Україна, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10

Наведено метод, розроблений для розрахунків показників структурної надійності систем з великим числом елементів. Метод ґрунтується на використанні типових структурних схем, що відбивають принципову схему зв'язків між елементами. Показано, як шляхом поповнення та об'єднання типових структур можна створювати графологічні структури для виконання розрахунків показників надійності. Підхід може бути використаний під час розробки алгоритмів і програм розв'язання на ЕОМ задач, що базуються на оцінках структурної надійності систем. До числа таких задач, зокрема, належать: оцінки безпеки атомних блоків, планування їх ремонтів, оцінки надійності спрямованих систем транспортування середовищ, оцінки залишкових ресурсів технічних об'єктів. Для їх розв'язання розроблені різні окремі методи. Однак стандартизувати розрахунки показників надійності неможливо через різноманітність систем і умов їхнього функціонування. Поданий підхід орієнтований на автоматизацію розрахунків показників структурної надійності широкого класу технічних систем. Він базується на доказі існування алгоритму розрахунку на множині типових структурних схем. Водночас передбачається, що на ЕОМ розпізнавані образи типових структур в складі графологічних образів систем. Зміст задачі полягає в такому. Є технічна система. Потрібно побудувати графологічний образ і розрахувати показник її структурної надійності. Метод розрахунку, що пропонується, ґрунтується на зображенні графологічного образу системи у вигляді композиції графологічних образів типових структур, показники надійності яких обчислювальні. Вони замінюються окремими елементами з обчисленими значеннями показника надійності. Заміни дають можливість спростити початковий графологічний образ системи за рахунок скорочення загального числа елементів і обчислити показник надійності системи. Процедура обчислення і заміни триває доти, поки в графологічному образі системи не залишиться одна типова структура, для якої показник надійності обчислювальний. Кількість елементів в системі нічим не обмежена, оскільки процедура замін здійснюється послідовно до створення однієї типової структури. Істотне обмеження в застосуванні методу до розрахунку структурної надійності широкого спектра складних технічних систем обумовлено обмеженістю множини типових структур. Однак такий банк типових структур може бути створений і використовуватися під час розробки відповідних розрахункових програм.

Ключові слова: *алгоритм, система, структурна надійність, типові схеми.*