

*О.С. САВЕЛЬЕВА*, канд. техн. наук, Одесса, Украина

## **НЕТРАДИЦИОННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ЭКСПРЕСС-МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ С РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ**

Запропонована експрес-модель надійності складних технічних об'єктів в експлуатації, заснована на принципі подібності працездатності морфологічно однакових систем.

Предложена экспрес-модель надежности сложных технических объектов в эксплуатации, основанная на принципе подобия работоспособности морфологически одинаковых систем.

The express model of difficult technical objects in the operation reliability, based on a principle of morphology identical systems working capacity similarity is offered.

Параметры надежности в обязательном порядке присутствуют в перечне характеристик, входящих в техническое задание на создание сложных объектов ответственного назначения с резервированием [1]. Поэтому проблема моделирования надежности сложных технических систем (СТС) является одной из самых актуальных, особенно, на этапе их автоматизированного проектирования, когда математическая модель (ММ) становится единственным источником информации об особенностях реакции еще не существующего объекта на будущие условия эксплуатации.

Важным компонентом таких ММ является модель структурной надежности, в которой показатели последней находятся в функциональной зависимости непосредственно и исключительно от структуры объекта: теоретической, полученной в САПР, начальной, сложившейся в результате ошибок изготовления, и, наконец, последующей, переменной в результате изменения собственных характеристик и воздействий условий эксплуатации.

Одним из действенных методов повышения надежности динамической системы является структурное резервирование – введение дополнительных резервных элементов, которые при абсолютной надежности элементов исходной системы не являются функционально необходимыми [2].

Рассмотрим, как можно количественно оценить такой параметр надежности резервированного объекта, как работоспособность – состояние, при котором он способен выполнять заданную функцию с параметрами,

установленными требованиями технической документации, на протяжении расчетного срока службы [3].

Работоспособность объекта прекращается с его отказом. Отказ – событие, которое состоит в нарушении исправного состояния объекта. Критерии отказа – признаки нарушения работоспособного состояния объекта, установленные в нормативно-технической документации.

Так как работоспособность резервированных СТС – это вероятностная характеристика, – ее экспериментальная статистическая оценка существенно зависит от методики исследования. Оценки численных характеристик работоспособности существенно затрудняются в условиях постоянных повреждений, которые СТС получает во время своей эксплуатации.

Основной алгоритм проектирования надежных систем можно представить в виде некоторой схемы, которая включает следующие блоки: эвристический, аналитический, интеллектуальный (рис. 1). Эвристический блок «отвечает» за генерирование новых и корректировку существующих структур объекта проектирования, аналитический блок выполняет оптимизацию параметров элементов структур, интеллектуальный блок осуществляет прогнозирование надежности текущего варианта объекта и принимает решение об адекватности характеристик текущего варианта техническому заданию на проект.

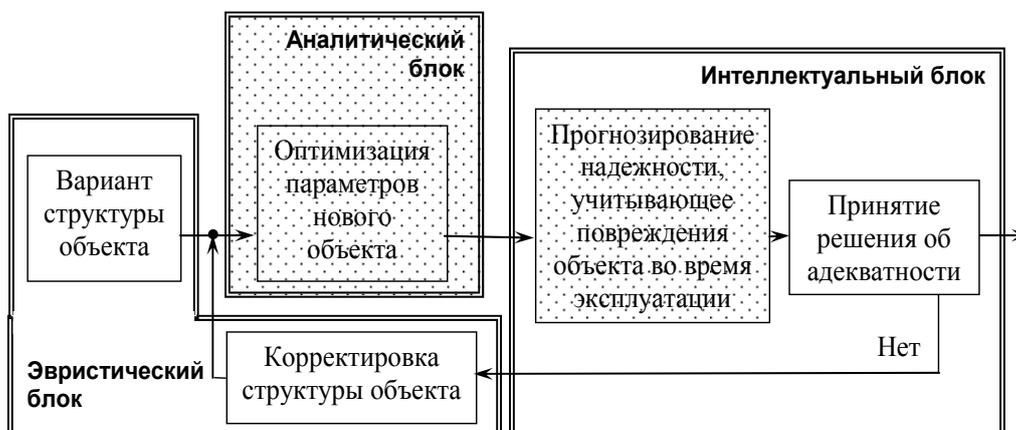


Рисунок 1 – Схема основного алгоритма проектирования надежных систем.

К сожалению, такой алгоритм обладает существенным недостатком: весь аналитический блок и подблок прогнозирования надежности интеллектуального блока работают крайне медленно по следующим причинам.

1. Огромный объем вычислений при многоцелевой многопараметрической оптимизации параметров элементов [4].

2. Огромный объем «ручной работы» по переналадке структуры моделей надежности в существующих предметных САПР, связанной с отходом повреждаемого объекта от его первоначальной (проектной) структуры [5]

3. Для осуществления его функции требуются отсутствующие на этапе проектирования исходные данные, для «добывания» которых приходится прибегать к экспериментам на моделях, мониторингу за эксплуатацией подобных СТС, экспертным оценкам и другим длительным методам, дающим к тому же, нечеткие результаты [6].

4. Существующие методы построения структурных систем надежности предназначены для применения, прежде всего, к системам без резервирования и системам, в которых появления отказов не имеет значения; в противном случае необходимо применять Марковские модели надежности [7]. В свою очередь, *эмпирико-статистические марковские модели*, работа которых построена на непосредственной оценке повреждений, произошедших в системе при ее стендовых и полигонных испытаниях [6], к сожалению, не позволяют оценить текущее состояние объекта в целом, тем более, идентифицировать его отказ. Полумарковские модели созданы для моделирования дискретных систем в непрерывном времени [8], однако для их обучения необходима информация, полученная при практических испытаниях объекта моделирования, что не всегда удобно на этапе проектирования.

В этих условиях он-лайн экспресс-оценка структурной надежности генерируемых вариантов будущего объекта становится невозможной из-за высокой временной сложности работы алгоритма, что, в итоге, отрицательно сказывается на качестве объекта в целом.

Поэтому **целью настоящей работы** является повышение надежности проектируемых объектов и снижение сроков автоматизированного проектирования путем разработки и внедрения математической экспресс-модели структурной надежности сложных систем с резервированием.

Моделированию структурной надежности может быть подвергнут любой объект физического мира. Для этого на начальных стадиях исследования его необходимо рассмотреть в виде черного ящика: некоторого преобразователя «вход  $\rightarrow$  выход», имеющего собственную внутреннюю структуру  $S$  в виде связанных определенным образом элементов, а также параметры последних  $P$ .

Построим ММ такого преобразования. Для этого рассмотрим проектируемый объект в виде операторного уравнения, превращающего вектор

входных переменных  $X$  (конструкция объекта + условия его эксплуатации) в вектор выходных  $Y$  (техническое состояние: работоспособность объекта) с помощью структурированного оператора  $\Omega$ :

$$Y \rightarrow \Omega(X, S_0, P_0). \quad (1)$$

Пусть значение  $X$  с помощью начального оператора  $\Omega(X, S_0, P_0)$  преобразуется в  $Y_0$ , принадлежащее к множеству работоспособных элементов  $M$  (рис. 2).

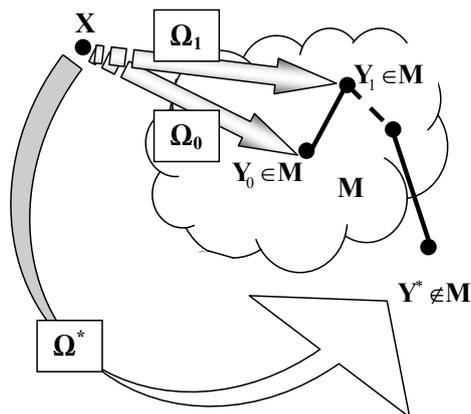


Рисунок 2 – Схема изменения значения выходного вектора  $Y_0$  операторного преобразования при последовательном «повреждении» структуры оператора  $\Omega$ .

Пусть теперь структура  $S$ , входящая в начальный оператор  $\Omega_0$ , изменена (повреждена) путем изъятия отдельных элементов или связей так, что оператор  $\Omega_0$  превращается в оператор  $\Omega_1$  (рис. 2). При этом результат операторного преобразования  $Y_1$ , как показано на рисунке, остается в множестве  $M$ . Можно утверждать, что по мере дальнейшего дискретного повреждения начального оператора  $\Omega_0$  до уровня  $\Omega^*$  вектор  $Y$  будет двигаться в множестве  $M$  и за несколько итераций повреждения выйдет за пределы этого множества, – объект со свойствами  $Y^*$  станет неработоспособным [9].

Для быстрой идентификации такого перехода был предложен новый алгоритм экспресс-проектирования (рис. 3) на основе предлагаемой нетрадиционной морфологической экспресс-модели (НМЭМ), отличающейся следующими свойствами.

Во-первых, на вход блока подается информация только об исходной структуре варианта объекта проектирования.

Во-вторых, при автоматическом построении и работе с этой моделью не выполняется оптимизация параметров элементов, – предполагается, что значения этих параметров автоматически настраиваются на некоторый скрытый многоцелевой квазиоптимум при обучении НМЭМ.

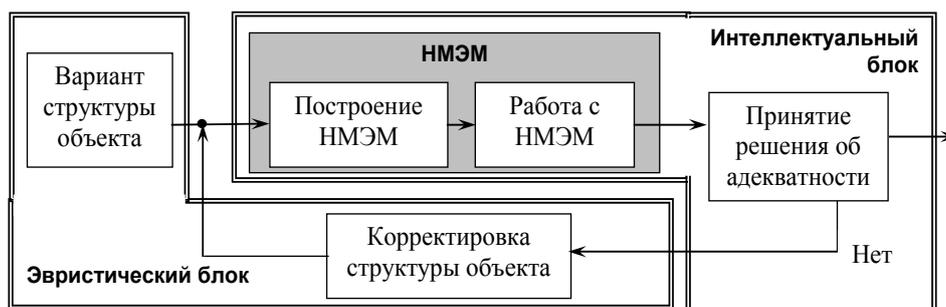


Рисунок 3 – Схема основного алгоритма проектирования с использованием нетрадиционной морфологической экспресс-модели (НМЭМ).

В-третьих, работа с моделью предполагает автоматическое выполнение набора косвенных стандартных компьютерных процедур с помощью предлагаемого быстродействующего инвариантного программного модуля, не связанного напрямую ни с одним свойством объекта, кроме его структуры.

В-четвертых, блок НМЭМ возвращает результат своей работы в виде числа, пригодного для непосредственного сравнения и ранжирования проектируемых вариантов объекта.

В-пятых, НМЭМ позволяют легко моделировать многочисленные стратегии технического обслуживания. Кроме того, в НМЭМ можно отразить порядок, в котором происходят многократные отказы [10], что по сути позволяет использовать ее в качестве *морфологической марковской модели*.

Перечисленным качествам НМЭМ обязана находящейся в ее структуре адаптивной ММ в виде интеллектуальной морфологической модели (ИММ) (рис. 4), которая представляет собой сеть интеллектуальных математических нейроподобных элементов с резервированием, соединенных математическими нейроподобными связями.

ИММ отличается от традиционной нейронной сети (НС) тем, что она автоматически «сама себя строит» и «сама себя повреждает», используя соответствующие настройки пользователя. Важной отличительной особенностью работы ИММ в НМЭМ является то, что она распознает образы, не имеющие структурного или параметрического отношения к проектируемому объекту (так, объектом проектирования может быть рама моста, а распознаваемыми образами – элементы рукописного шрифта) (рис. 5).

*Общее у них находится только в самой модели: между объектом и ИММ (что, собственно и делает ИММ математической моделью объекта) существует морфологическое равенство структур – матриц элементов и связей между ними!*

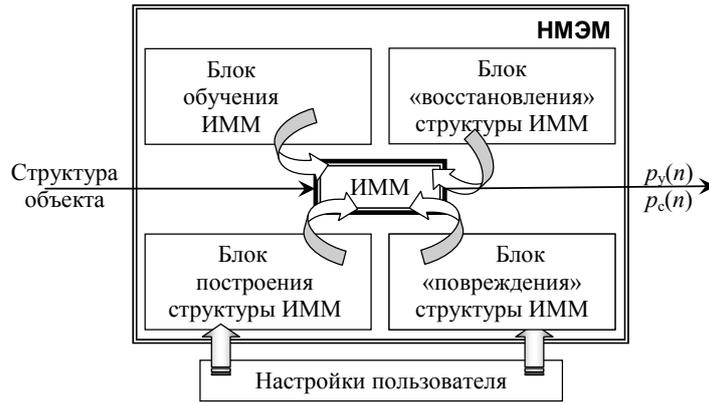


Рисунок 4 – Место ИММ в общей структуре НМЭМ.

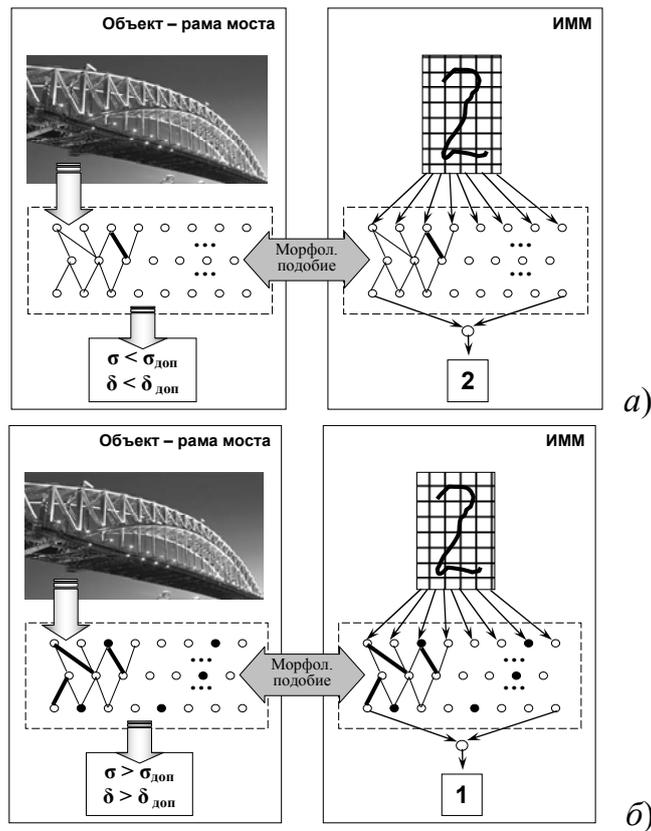


Рисунок 5 – Схема морфологического подобия между объектом и ИММ: *a* – модель регистрирует работоспособное состояние; *b* – модель регистрирует отказ.

В ИММ считается, что, если модель правильно распознает образ (рис. 5 *a*), то и моделируемый объект работоспособен, если же модель неправильно распознает образ (рис. 5 *b*), то моделируемый объект отказал.

Пусть сравниваются два объекта – I и II, которые принадлежат к разным типам: СТС и ИММ. Построим для них, соответственно, два операторных уравнения типа (1), у которых совпадает только структура  $\Omega_I$  и  $\Omega_{II}$ :

$$Y_I \rightarrow \Omega_I(X_I, S_I, P_I); \quad (2)$$

$$Y_{II} \rightarrow \Omega_{II}(X_{II}, S_{II}, P_{II}); \quad (3)$$

$$S_I \equiv S_{II} . \quad (4)$$

Совпадение (4) может быть естественным или искусственно созданным. Поскольку показатели надежности – количественные характеристики одного или нескольких свойств, определяющих надежность объекта, сформулируем такое **Утверждение**.

*Если между двумя начальными состояниями объектов с избыточной структурой существует изоморфизм, то при изоморфном разрушении этих объектов будет наблюдаться близость между статистическими оценками их работоспособности, независимо от типа объектов и задач, которые эти объекты решают.*

Под близостью будем понимать корреляционную связь или совпадение некоторых оценок в том смысле, что разность между ними не выходит за пределы установленного допуска.

Доказательство Утверждения с учетом вероятностно-статистического характера объекта было осуществлено экспериментально в соответствии со следующим алгоритмом, основанном на многократном ( $N \geq 300$ ) повторении итераций моделирования и сравнения.

**Шаг 1.** Построить математическую модель работоспособности СТС.

**Шаг 2.** Принять методику внесения повреждений в структуру СТС, моделирующую ее жизненный цикл.

**Шаг 3.** Выполнить моделирование работоспособности СТС и ИММ по мере внесения повреждений в ее структуру.

**Шаг 4.** Выполнить расчеты корреляционной зависимости между полученными компьютерным экспериментом трендами работоспособностей СТС и ИММ по мере внесения повреждений в их структуру.

**Шаг 5.** Выполнить расчеты параметров аналитических зависимостей, аппроксимирующих упомянутые тренды.

**Шаг 6.** Сравнить полученные результаты с заданным порогом.

**Шаг 7.** Повторить шаги 3 – 6  $N$  раз.

В настоящей работе эксперимент проводили на СТС в виде рамы, содержащей 34 узла и 48 связей между ними, построенной в пакете *Auto-desk Inventor*, и морфологически подобной НС, распознававшей рукописные цифры. В эксперименте принимали  $N = 300$ , при этом коэффициент корреляции в каждом цикле не опускался ниже 92,3 %.

Работа НМЭМ регламентируется следующими алгоритмами.

*Алгоритм создания модели.*

1. Вход: вариант структуры объекта.
2. Построение морфологически подобной ИММ.

3. Обучение ИММ на обучающих выборках.
4. Выход: обученная ИММ, морфологически подобная новому (без повреждений) объекту.

*Алгоритм испытания модели [11].*

1. Вход: обученная ИММ, морфологически подобная новому (без повреждений) объекту.
2. В ИММ формируются множества  $N_y$  «склонных к повреждению» узлов и  $N_c$  «склонных к повреждению» связей. «Повреждением» связи считается ее удаление из модели, а «повреждением» узла – удаление всех примыкающих к нему связей.
3. Количество повреждений узлов  $n_y = 1$ .
4. Количество повреждений связей  $n_c = 1$ .
5. В структуру ИММ случайным образом вносится  $n_y$  или  $n_c$  «повреждений», множества которых представляют сочетания  $C_{N_y}^{n_y}$  и  $C_{N_c}^{n_c}$ .
6. «Поврежденная» ИММ «нагружается» и запускается подпрограмма ее работы.
7. По результатам работы ИММ при условиях данной итерации фиксируется ее работоспособность или отказ (например, распознала или не распознала ИММ некоторый образ).

П.п. 5 – 7 повторяются статистически обоснованное количество раз, в результате на соответствующих графиках (рис. 6) отдельно для узлов и связей появляется точка с координатами  $n_y$  или  $n_c$  по оси абсцисс и значением отношения:

$$P_n = \frac{\text{количество правильных результатов работы ИММ}}{\text{количество итераций при текущем } n_y \text{ или } n_c} \quad (5)$$

по оси ординат, которое интерпретируется как статистическая вероятность безотказной работы ИММ при перебранных сочетаниях повреждений из  $N_y$  по  $n_y$  и  $N_c$  по  $n_c$ , соответственно.

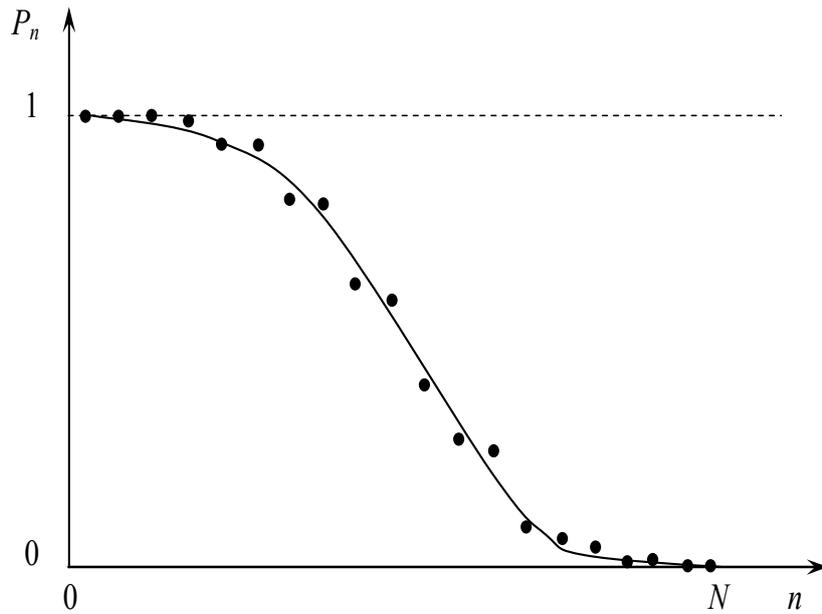


Рисунок 6 – Схема к построению зависимости  $P_n = f(n)$ ;  $1 \leq n \leq N$ .

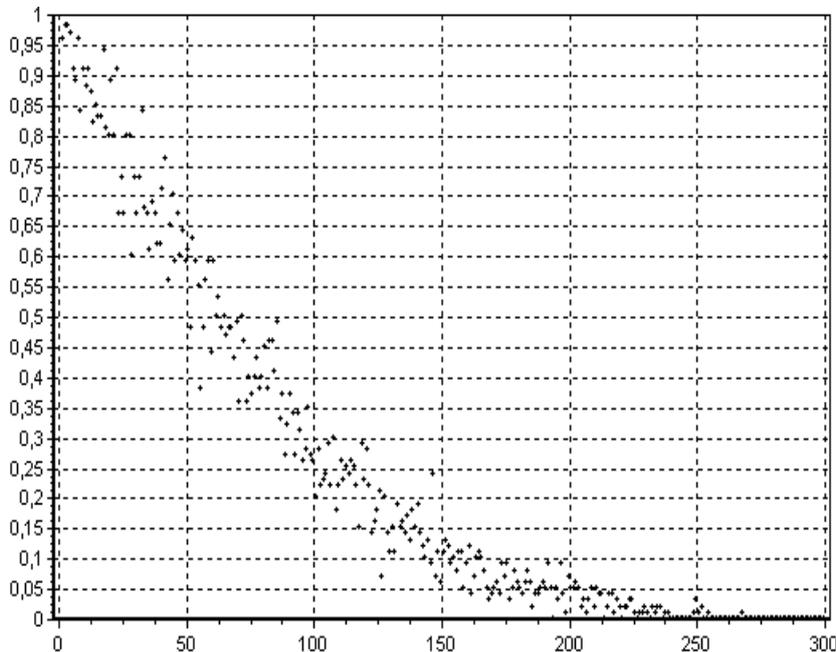


Рисунок 7 – Итоговое окно программного модуля ( $N = 300$ ).

1. «Количество поврежденных узлов  $n_y = n_y + 1$ .
2. Количество поврежденных связей  $n_c = n_c + 1$ .
3. Возврат к п. 5.
4. Выход из цикла и останов при  $n_y = N_y$  и  $n_c = N_c$ .

В итоге, когда  $n_y$  пробегает диапазон от 1 до  $N_y$  (или  $n_c$ , соответственно, диапазон от 1 до  $N_c$ ), в окне программного модуля появляется экспериментальная зависимость  $P_y(n)$  или  $P_c(n)$  в виде «облака» точек (рис. 7). При этом считали, что  $P_y(0) = P_c(0) = 1$ . «Облако» точек может быть сглажено аналитической функцией, например, логистической, сигмоидной, степенным рядом или другой. Коэффициенты таких функций после сведения

к одному числу могут служить мерой сравнения структурной надежности отдельных вариантов проектируемой конструкции. *Сравнительная характеристика методов проектирования надежных объектов и их ориентировочная временная сложность приведены в табл.*

В частности, для оценки и сравнения сложных технических систем, «поведение» которых имеет признаки стохастичности, приобретает все большее распространение использование энтропии [12]. В частности, нами предложен критерий, основанный на вычислении энтропийного критерия надежности:

$$K = -\sum_{j=1}^N [p_j \log_2 p_j + (1 - p_j) \log_2 (1 - p_j)], \quad (6)$$

где  $p_j$  – ордината  $j$ -ой точки в итоговом окне;  $Q$  – количество точек в итоговом окне.

Методы проектирования надежных объектов и их ориентировочная временная сложность

№№пп	Этап моделирования	Традиционный метод		С помощью НМЭМ	
		Метод	Временная сложность	Метод	Временная сложность
1	Генерирование варианта структуры	Эмпирический	1 час	Эмпирический	1 час
2	Многоцелевая оптимизация параметров элементов	Аналитический	8 час	Обучение ИММ	0,5 часа
3	Прогнозирование повреждения объекта во время эксплуатации	Марковская модель	30 час	НМЭМ	1 час
4	Определение критерия надежности	Autodesk Inventor	60 час	НМЭМ	1 час
5	Корректировка структуры объекта	Эмпирический	1 час	Эмпирический	1 час
	Итого:		100 час		4,5 часа

**Выводы.** Предложена нетрадиционная математическая экспресс-модель надежности сложных систем с резервированием, основанная на близости между статистическими оценками работоспособности различных, изоморфных по структуре объектов, независимо от их типа и решаемых задач.

Решена проблема информационной поддержки проектирования структурной надежности сложных технических систем с резервированием путем применения нетрадиционной морфологической экспресс-модели для прогнозирования жизненного цикла систем, а также для относительно быстрой текущей и интегральной оценок их отказоустойчивости на основе единого критерия.

Результаты работы прошли производственные испытания при модернизации систем аварийной защиты энергоблоков № 2 ОП «Хмельницкая АЭС» и № 4 ОП «Ровенская АЭС», в одесской фирме «ВИКТИ», в Одесском морском порту, на Одесском заводе строительных материалов с положительным технико-экономическим эффектом.

**Список использованной литературы:** 1. *Ястребенецкий М.А.* Безопасность атомных станций: Информационные и управляющие системы / *М.А. Ястребенецкий, В.Н. Васильченко, С.В. Виноградская* и др. – К.: Техніка, 2004. – 472 с. 2. *Острейковский, В.А.* Теория надежности. – М.: Высшая школа, 2003. – 408 с. 3. *Бобров В.И.* Надежность технических систем. – М.: МГУП, 2004. – 236 с. 4. *Штойер Р.* Многокритериальная оптимизация: теория, вычисления, приложения. – М.: Наука, 1982. – 402 с. 5. Семейство продуктов Autodesk Inventor [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.autodesk.ru/adsk/servlet/pc/index?siteID=871736&id=14569066>. 6. *Балан, С.А.* Статистические методы прогнозирования жизненного цикла сложных восстанавливаемых технических систем / *С.А. Балан, А.Л. Становский, Халиль Ягхи* // Тр. Одесск политехн ун-та. – Одесса: ОГПУ, 2000. – Вып. 3. – С. 95 – 98. 7. МЭК 61078:1991. – Метод структурной схемы надежности. 8. *Дышин О.А.* Полумарковские модели управления рисками в магистральных газонефтепроводных системах / *О.А. Дышин, И.А. Азизов* // Электронное моделирование. – 2010. – Т. 32. – № 2. – С. 15 – 30. 9. ГОСТ 27103-83. Надежность в технике. Критерии отказов и предельных состояний. Основные положения. 10. *Князева, Е.Н.* Законы эволюции и самоорганизации сложных систем / *Е.Н. Князева, С.П. Курдюмов*. – М.: Наука, 1994. – 236 с. 11. *Красножон С.Н.* Исследование стойкости регулярных конструкций / *С.Н. Красножон, О.С. Савельева, О.Е. Плачинда* // Труды XII семинара «Моделирование в прикладных научных исследованиях». – Одесса: ОНПУ, 2005. – С. 18 – 19. 12. *Хазен, А.М.* Введение меры информации в аксиоматическую базу механики. – М.: РАУБ, 1998. – 324 с.