

ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПРОЕКТНЫХ РАСЧЕТАХ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ

Нозик А.А.

ОАО "Специализированная инжиниринговая компания "СЕВЗАПМОНТАЖАВТОМАТИКА"

Реферат. Приведены результаты анализа и решения проблем проектного расчета надежности продукции на предприятии. Обоснована необходимость автоматизации процессов построения математических моделей для расчета надежности проектируемых систем. Обобщен опыт разработки и реализации в ОАО "Специализированная инжиниринговая компания "СЕВЗАПМОНТАЖАВТОМАТИКА" (СПИК СЗМА) методов методик и программных комплексов проектного расчета надежности продукции на основе технологии автоматизированного структурно-логического моделирования систем. Определены направления дальнейшего развития технологии автоматизированного моделирования на предприятиях отрасли.

Проектный расчет надежности является обязательным условием разработки высококачественных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП). Требования и общая организация проектных расчетов надежности определены многими отечественными и международными стандартами и руководящими документами [1-3]. Основными целями проектных расчетов надежности являются [2]:

- сравнительный анализ надежности вариантов схемно-конструктивного построения проектируемой системы для выработки и обоснования проектных решений;
- оценка технико-экономической эффективности предлагаемых мер по доработкам структуры, организации эксплуатации и технического обслуживания проектируемой системы, направленных на повышение ее надежности;
- определение достигнутого уровня надежности проектируемой системы и проверка его соответствия требованиям технического задания.

Реализация проектного расчета надежности на предприятиях осуществляется на основе методик, в которых должны учитываться общие требования руководящих документов, а также особенности организации производства и выпускаемой продукции. В настоящее время таких методик разработано большое количество. Наиболее характерными для большинства этих методик являются следующие этапы проектного расчета надежности систем.

1. Построение структурных моделей (схем) систем, обеспечивающих возможность применения выбранных методов для проектного расчета надежности.
2. Задание критериев реализации системой ее основных функций и/или возникновения исключительных ситуаций.
3. Определение исходных вероятностных и других параметров элементов и режимов работы системы, необходимых и достаточных для проектного расчета надежности.
4. Построение расчетных аналитических и/или статистических моделей для всех главных функций и исключительных ситуаций исследуемой системы;
5. Применение расчетных моделей для количественной оценки показателей надежности, решения задач оптимизации, синтеза и технико-экономического обоснования проектных решений.

Опыт последних лет показывает, что, не смотря на наличие большого числа даже хорошо теоретически проработанных методик, в проектном расчете надежности они практически не применяются. Рассмотрим основные причины такого положения дел.

Уровень автоматизации процессов выполнения указанных выше этапов проектного расчета надежности различный. В большинстве действующих методик предусматривается ручное выполнение основной содержательной части этапов 1-4. В наибольшей степени сейчас автоматизированы только процедуры расчетов системных показателей надежности, которые должны выполняться на этапе 5 с помощью разработанных на предыдущих этапах математических моделей различных свойств надежности проектируемой системы. Такого уровня автоматизации явно недостаточно. Возможности увеличения степени автоматизации зависят от содержания и особенностей этапов проектных расчетов надежности систем.

Постановка задач проектного расчета надежности (этапы 1-2) обычно осуществляется путем построения структурной схемы исследуемой системы. В зависимости от выбранного метода структурная модель надежности может представлять собой либо граф переходов состояний системы, либо схему функциональных связей состояний отдельных элементов. Последний вид схем имеет существенно меньшую размерность, и нашел преимущественное применение в методиках проектного расчета надежности. Наиболее широко используются схемы функциональных связей элементов в виде последовательно-параллельных соединений, деревьев событий, деревьев отказов, графов связности [5] и схем функциональной целостности [6-8]. Эти виды схем имеют разные возможности и ограничения, но построение любой из них всегда является сугубо творческой, т.е. не алгоритмизируемой задачей. В сущности, постановка задачи расчета надежности проектируемой системы всегда является новой исследовательской задачей. Автоматизации на этих этапах подлежат хотя и важные, но только сервисные информационно-редакторские функции. Поэтому, одной из главных проблем профессиональной постановки задач проектного расчета надежности на предприятиях является подготовка специалистов, способных разрабатывать структурные модели систем. Эти специалисты должны, с одной стороны, знать особенности проектируемой системы, а с другой, уметь корректно отображать их в структурных моделях и профессионально применять соответствующие методы проектного расчета надежности.

Определение вероятностных и других параметров надежности элементов проектируемой системы (этап 3) справедливо называют проблемой исходных данных. Необходимость ее решения возникает тогда, когда реализуется возможность осуществления проектного расчета надежности на предприятии. Поэтому заранее накопить исходные данные обычно не удается. В начальный период освоения технологий расчетов надежности определение исходных данных осуществляется одновременно с выполнением работ по проектированию систем. В дальнейшем эти данные должны накапливаться в соответствующих базах, для использования в последующих проектах. В СПИК СЗМА накоплен опыт определения исходных данных на основе стандартов и технических условий на составные части проектируемых систем, справочников и других банков данных по надежности элементов.

Накопленный практический опыт показал, что на основе современных информационных технологий моделирования можно выполнять эффективную проектную оценку безотказности и анализ отказоустойчивости объектов при наличии только частичной информации о вероятностных параметрах надежности элементов, и даже при ее полном отсутствии. Так например, в СПИК СЗМА многие проектные решения по обеспечению надежности проектируемых АСУТП были приняты на основе результатов детерминированного анализа отказоустойчивости, для которого не требуется знаний вероятностных параметров надежности элементов.

Ручная технология построения расчетных моделей (этап 4) является главной проблемой большинства существующих методик проектного расчета надежности сложных систем. Обычно ручная технология моделирования основывается на известном методе декомпозиции. Сначала исходная структурная схема системы разделяется на так называемые типовые фрагменты (части, подсистемы), расчетные формулы (модели) оценки показателей надежности которых известны. Затем эти фрагменты в структурной схеме заменяются соответствующими эквивалентными элементами, параметрами которых являются указанные формулы, модели или соответствующие

числовые характеристики. В определенных случаях указанный процесс декомпозиции позволяет свести исходную схему системы в один элемент, эквивалентная модель надежности которого (набранная формула или числовой показатель) и представляет собой искомую модель надежности всей исследуемой системы в целом.

Не смотря на достаточно глубокую теоретическую и методологическую проработку все методики ручной технологии моделирования, как правило, не применяются в практических проектных расчетах надежности. Главной общей причиной этого является непреодолимая (вручную) трудоемкость процессов построения расчетных моделей реальных систем. Она характеризуется несколькими составляющими:

- большим числом элементов современных систем (до сотен и тысяч элементов);
- экспоненциальной зависимостью роста размерности моделей от роста числа элементов (добавление одного элемента может в два раза увеличить размерность модели);
- высокой структурной сложностью реальных систем и ограниченностью наборов типовых фрагментов, что часто не позволяет осуществить полную декомпозицию исследуемой системы;
- динамичностью процессов практического моделирования, которая проявляется в том, что для проектного расчета надежности требуется построение не одной, а множества различных моделей надежности системы (определяется количеством функций, количеством показателей и количеством проектных вариантов структуры системы).

Указанные факторы действуют в совокупности, что многократно увеличивает трудоемкость и делает практически невозможным ручное построение моделей в проектном расчете надежности современных систем.

Автоматизированная технология построения расчетных моделей (этап 4) является единственным способом практического решения проблем трудоемкости и размерности в проектных расчетах надежности систем. В самом общем виде автоматизация моделирования предусматривает:

- полную формализацию и практическую реализацию способов машинного представления результатов постановки задач (этапы 1,2) структурных схем систем и критериев их функционирования;
- полную алгоритмизацию и программную реализацию всех процессов преобразования структурных схем и критериев в соответствующие расчетные математические модели надежности проектируемых систем.

В настоящее время известно несколько действующих образцов программных комплексов, реализующих указанную технологию автоматизированного моделирования.

- Программный комплекс Risk Spectrum вероятностного анализа надежности и безопасности систем Шведской фирмы Relcon. Первая разработка выполнена в 1985 г. Форма исходной структурной схемы системы – дерево отказов. Размерность системы до 100 000 элементов. Позволяет вычислять статические вероятности отказа (безотказной работы) и коэффициент неготовности (готовности) системы. Выполняет построение и анализ минимальных сечений. (Данные получены из Internet).
- Программный комплекс численного анализа надежности и риска для сложной системы на основе деревьев отказов [5] (автор Проурзин В.А, лаборатория надежности ИПМАШ РАН, г. Санкт-Петербург). Форма исходной структурной схемы – дерево отказов. Комплекс позволяет вычислять вероятность безотказной работы, коэффициент готовности системы и оптимизировать надежность системы по критерию суммарных затрат.
- Программный комплекс BUNKER моделирования и расчетов надежности и производительности технических систем с накопителями. (авторы Викторова В.С. и Степанянц А.С. ИПУ РАН, г.

Москва). Форма исходной структурной схемы – дерево отказов. Позволяет вычислять коэффициент готовности, математическое ожидание производительности, среднюю наработку на отказ, параметр потока отказов, вероятность безотказной работы системы. (Данные получены из Internet).

- Программный комплекс RAY логико-вероятностного моделирования и расчетов надежности и безопасности систем. (авторы Викторова В.С. и Степанянц А.С. ИПУ РАН, г. Москва). Форма исходной структурной схемы – граф связности. Позволяет вычислять коэффициент готовности, параметр потока отказов, вероятность безотказной работы, среднюю наработку до отказа с учетом полноты контроля и периодической профилактики. (Данные получены из Internet).
- Программа "Ризикон-Надежность" определения вероятности возникновения и развития аварии. (Научный центре изучения рисков "Ризикон", Украина, г. Северодонецк. Имеет лицензию Госгортехнадзора России 1995 г.). Форма исходной структурной схемы – деревья отказов и деревья событий. Определяет и выполняет анализ минимальных сечений отказов. (Данные получены из Internet).
- Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования ПК АСМ 2001 [6]. Форма представления исходной структуры системы – схема функциональной целостности. Позволяет автоматически формировать расчетные аналитические модели надежности систем и вычислять вероятность безотказной работы, среднюю наработку до отказа, коэффициент готовности, среднюю наработку на отказ, среднее время восстановления, вероятность отказа восстанавливаемой системы, вероятность готовности смешанной системы, а также значимости и вклады элементов в различные показатели надежность системы в целом. ПК АСМ позволяет также автоматически определять кратчайшие пути успешного функционирования, минимальные сечения отказов и любые немонотонные логические модели функционирования системы.

В основе практически всех указанных технологий и программных комплексов автоматизированного моделирования лежат логико-вероятностные методы (ЛВМ) системного анализа [7-9]. Это обусловлено тем, что по построению все этапы ЛВМ имеют высокую степень формализации, что позволяет автоматизировать процессы построения моделей систем.

Наиболее широкое применение получил Шведский программный комплекс Risk Spectrum. (в 36 стран продано 850 копий для 325 организаций). На предприятиях атомной энергетики он используется для вероятностного анализа безопасности объектов, сценарии возникновения аварий на которых представляются с помощью деревьев отказов. Большинство из указанных выше отечественных программных комплексов автоматизированного моделирования также основываются на представлении структур систем в виде деревьев событий, деревьев отказов или графов связности. Однако это методологическое направление имеет ряд ограничений. Отметим некоторые из них, важные для проектного расчета надежности.

- a) Структурные схемы в виде деревьев событий, деревьев отказов и графов связности позволяют корректно представить только так называемые монотонные процессы функционирования систем. Это не позволяет учесть в моделях надежности и безопасности качественной сложности проектируемых объектов (способности функционировать в разных состояниях с разной эффективностью) и неоднозначного (противоречивого) влияния некоторых внешних факторов.
- b) Постановка задач проектного расчета надежности систем в виде деревьев отказов бывает крайне затруднительной, так как требует мысленного перебора всех без исключения комбинаций и последовательностей событий, приводящих к отказу или аварии системы. Бывает значительно проще ту же задачу описать в виде противоположной модели работоспособности системы.

с) Структурные средства монотонного моделирования не реализуют всех возможностей основного аппарата моделирования - алгебры логики, что ограничивает возможность прогрессивного развития методов и средств автоматизированного моделирования систем.

Указанные недостатки ликвидированы в общем логико-вероятностном методе (ОЛВМ) [8, 9] и разработанном на его основе программном комплексе автоматизированного структурно-логического моделирования систем (ПК АСМ) [6]. В ОЛВМ в качестве исходной структурной схемы применяется универсальный графический аппарат схем функциональной целостности (СФЦ). В СФЦ уже на структурном уровне реализуются все возможности алгебры логики. Поэтому с помощью СФЦ можно представлять все известные виды монотонных структурных моделей (деревья событий, деревья отказов и графы связности), а также строить принципиально новый класс немонотонных структурных моделей сложных системных объектов и процессов. Эти положительные свойства, полная автоматизация процессов построения логических и расчетных вероятностных функций, а также открытость программной системы послужили основанием выбора технологии автоматизированного структурно-логического моделирования для проектных расчетов надежности АСУТП в СПИК СЗМА. К настоящему времени нашей компанией накоплен определенный опыт организации внедрения, практического использования и развития теории, технологии и ПК автоматизированного структурно-логического моделирования в проектных расчетах надежности [сайт <http://www.szma.com>].

Организация внедрения технологии АСМ основывалась на решении проблемы эффективной постановки задач проектного расчета надежности и использования полученных результатов. В СПИК СЗМА эта проблема была решена путем организации совместной работы специалистов проектного и научно-исследовательского отделов компании. На специалистов проектных отделов возлагается общая постановка задачи расчета надежности, описание и подготовка вариантов СФЦ, определение исходных параметров надежности элементов. Специалисты НИО выполняют окончательное построение СФЦ, ввод исходных данных в ПК АСМ, автоматизированное моделирование и расчеты показателей надежности и безопасности системы. Анализ результатов оценки надежности, выработка и обоснование проектных решений, и составление отчетной документации осуществляется указанными специалистами совместно.

Практическое использование технологии АСМ регламентировано Стандартом предприятия и организационно-методическими указаниями (методиками), утвержденными руководством компании и отрасли. В СПИК СЗМА осуществляется разработка новой, специализированной версии Программного Комплекса АСМ, ведется его подготовка к лицензированию и сертификации. Предполагается, что по многим показателям этот ПК АСМ превзойдет Шведский ПК Risk Spectrum.

Развитие теории, технологии и ПК АСМ осуществляется по следующим направлениям:

- организована плановая научно-практическая подготовка специалистов проектного и научно-исследовательского отделов, занимающихся проектными расчетами надежности продукции;
- осуществляется подготовка двух кандидатских диссертаций;
- в разрабатываемый ПК АСМ внедряются новые методы, которые позволят радикально увеличить размерность автоматически формируемых моделей, вычислять новые характеристики надежности систем, выполнять вероятностный анализ безопасности, риска функционирования систем и производить технико-экономическое обоснование проектов;
- осуществляется адаптация разрабатываемого образца ПК АСМ к особенностям организации проектирования АСУТП в СПИК СЗМА;
- обеспечивается возможность адаптации разрабатываемого ПК АСМ к особенностям технологических процессов других предприятий отрасли.

Пример проектного расчета надежности фрагмента АСУТП, выполненный в СПИК СЗМА с помощью ПК АСМ, приведен на рис.1. Здесь изображена СФЦ, представляющая условия

реализации одной (F-15) из 18 ее главных функций системы (общее число элементов 161). Модуль дискретного выхода DO (вершина 150) является элементом эпизодического включения с собственным работным временем не более 5 часов за год наработки. Вершина 178 представляет конъюнктивную кратную группу из трех не резервированных реле. Модули OSM представлены двумя группами размноженных вершин (7, 77)=7 и (71, 771)=71.

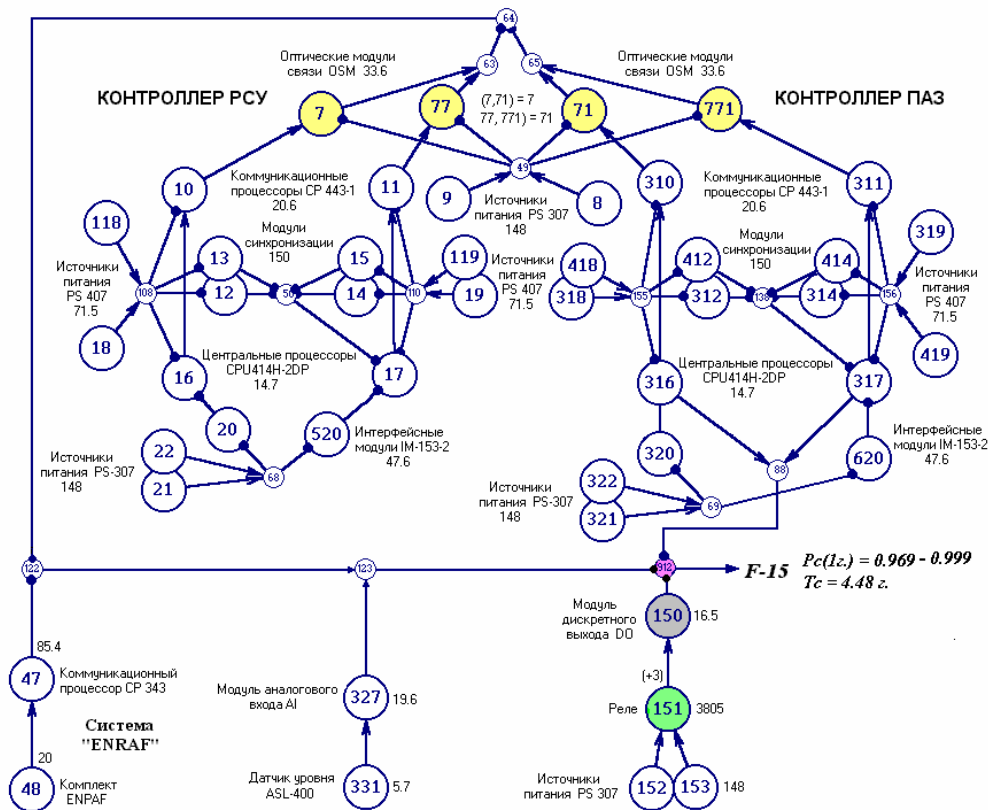


Рис.1. СФЦ условий реализации функции F-15 противоаварийной защиты проектируемой АСУТП

Около каждой функциональной вершины СФЦ записано наименование соответствующего элемента и значение его средней наработки до отказа в годах. В таблице 1 приведены результаты выполненного с помощью ПК АСМ построения моделей надежности и расчета показателей безотказности АСУТП по реализации функции F-15.

Расчеты надежности функций F-15

Таблица 1

Варианты расчетов	Размер ф. лог./ вер.	Результаты расчетов	Примечания
А без восстановления	600 / 3240	$P_{F-15}(1 \text{ год}) = 0.969$ $T_{oF-15} = 4.48 \text{ год}$	150 - эпизодического вкл. 5 ч. 151 - конъюнктивн. крат. (+3) {7,71}=7 - группа разм.эл. {77,771}=77 - группа разм.эл.
В с восстановлением		$KГ_{F-15} = 0.9999999548$ $T_{ноF-15} = 1260 \text{ Г.}$ $P_{вF-15}(1 \text{ год}) = 0.99921$	$T_{вi} = 0.5 \text{ час.}$

Логическая функция работоспособности АСУТП по функции F-15 составила 600 конъюнкций, а расчетная вероятностная функция – 3240 одночленов. На основе этой вероятностной функции

были вычислены значения вероятности безотказной работы $P_{F-15}(1_{\text{год}})$, средней наработки до отказа T_{oF-15} , коэффициента готовности $KГ_{F-15}$, средней наработки на отказ T_{hoF-15} и вероятности отказа $P_{вF-15}(1_{\text{год}})$ рассматриваемого фрагмента системы с учетом восстановления элементов.

Литература.

1. ГОСТ 27.001-95. Межгосударственный стандарт. Система стандартов "Надежность в технике". Основные положения. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. –3 с.
2. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. М.: Изд-во стандартов, 1997. – 15 с.
3. ГОСТ 24.701-86. Единая система стандартов автоматизированных систем управления. Надежность автоматизированных систем управления. Основные положения. М.: Издательство стандартов, 1987. – 17 с.
4. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. // М.: Гостехнадзор России, 2001. –20 с.
5. Проурзин В.А. Алгоритмы численного анализа надежности и риска для сложной системы на основе деревьев отказов. // Труды Международной Научной Школы "Моделирование и анализ безопасности, риска и качества в сложных системах" (МА БРК – 2001). СПб.: Издательство ООО "НПО "Омега", 2001, с.263-268.
6. Можаяев А.С. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем (ПК АСМ 2001). // Труды Международной Научной Школы "Моделирование и анализ безопасности, риска и качества в сложных системах" (МА БРК – 2001). СПб.: Издательство ООО "НПО "Омега", 2001, с.56-61.
7. Рябинин И.А. Надежность и безопасность сложных систем. // СПб.: Политехника, 2000. –248 с.
8. Можаяев А.С. Общий логико-вероятностный метод анализа надежности структурно-сложных систем. // Уч. пос. Л.: ВМА, 1988. – 68 с.
9. Можаяев А.С., Громов В.Н. Теоретические основы общего логико-вероятностного метода автоматизированного моделирования систем. Уч. пос. СПб.: ВИТУ, 2000. –143 с.