
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 615.47: 62.192

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СТРУКТУРНОГО МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ГАММА-ТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

© 2020 г. А. А. Васильев¹, А. А. Равин^{2,*}, О. В. Хруцкий²,
А. В. Батурин³, В. Н. Шевченко⁴

¹АО “Равенство”, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург, Россия

³Российский научно-исследовательский институт “Электронстандарт”,
Санкт-Петербург, Россия

⁴АО “ЦКБ МТ “Рубин”, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: ravinkl@mail.ru

Поступила в редакцию 18.04.2019 г.

Принята к публикации 31.01.2020 г.

В статье рассматривается опыт применения структурного метода для оценки надежности робототехнического комплекса медицинского назначения, предназначенного для направленного радиоактивного облучения злокачественных опухолей пациентов. Отмечены особенности структурной декомпозиции электромеханических систем гамма-аппарата и лечебного стола. Показаны результаты применения программного комплекса “Relex” для построения структурно-функциональных схем и расчета показателей надежности сложных объектов.

Ключевые слова: надежность, структурный метод, гамма-терапевтический комплекс, вероятность безотказной работы

DOI: 10.31857/S0235711920030141

Одним из важнейших показателей современной медицинской техники является ее надежность, от которой зависят качество, эффективность и безопасность [1]. Следствием отказа медицинской аппаратуры может быть снижение показателей эффективности работы лечебно-профилактических учреждений, а также нанесение вреда здоровью пациентов и персонала [2, 3]. Особое значение с точки зрения безопасности приобретает достоверная оценка вероятности внезапных отказов при эксплуатации гамма-терапевтических комплексов (ГТК), лечебное воздействие которых достигается за счет использования радиоактивных изотопов.

Рассматриваемая в статье методика была практически использована для проектной оценки надежности продукции АО “Равенство”, которое является единственным отечественным производителем дистанционных гамма-терапевтических комплексов и входит в мировую пятерку уникальных разработчиков и производителей медицинской техники такого класса.

1. Идентификация объекта (состав и основные функции ГТК). ГТК представляет из себя достаточно сложный электромеханический комплекс с компьютерным управлением, состоящий из лечебного стола, гамма-аппарата с диафрагмой и системы управления. Совместное использование этих конструктивных модулей обеспечивает последовательное выполнение лечебных процедур, приведенных в табл. 1.

Таблица 1. Укрупненный алгоритм применения ГТК

№	Процедура	Конструктивный модуль
1	Укладка и позиционирование пациента	Стол лечебный
2	Позиционирование радиационной головки	Гамма-аппарат
3	Открытие, выдержка, закрытие диафрагмы	Привод диафрагмы

Точное позиционирование пациента обеспечивается за счет того, что конструкция лечебного стола, электрические приводы и система управления обеспечивают несколько степеней свободы: вращение всей конструкции вокруг вертикальной оси, перемещение стола в вертикальном направлении, горизонтальное перемещение укладочного стола с пациентом (в продольном и поперечном направлениях). Гамма-аппарат является, по сути дела, сложным робототехническим комплексом с несколькими степенями свободы, обеспечивающими установку радиационной головки на нужном расстоянии от пациента и под углом, обеспечивающим попадание узконаправленного гамма-излучения именно на злокачественную опухоль в теле пациента.

Радиационная головка, внутри которой размещается капсула с радиоактивным кобальтом, обеспечивает формирование луча в заданном временном интервале и защиту пациента и медицинского персонала с помощью специальной диафрагмы с четырьмя перемещаемыми массивными защитными экранами — “камнями” (рис. 1, 2).

Перемещение и фиксация подвижных деталей ГТК обеспечивается системой электрических мотор-редукторов, усилителей и энкодеров, подключенных к компьютерной системе управления и контроля.

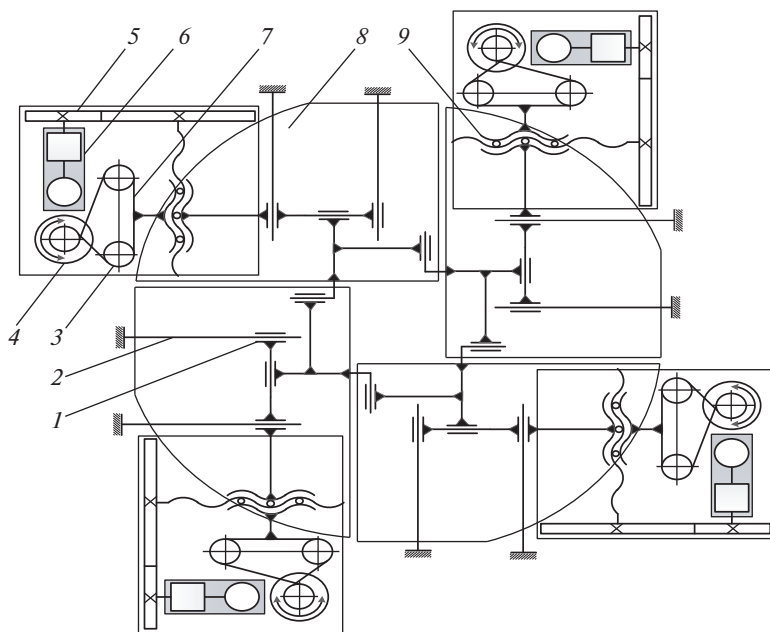


Рис. 1. Кинематическая схема привода диафрагмы. 1 – ползун; 2 – направляющая; 3 – шкив; 4 – энкодер; 5 – шестерня; 6 – мотор-редуктор; 7 – ременная передача; 8 – “камень”; 9 – шариковинтовая пара.

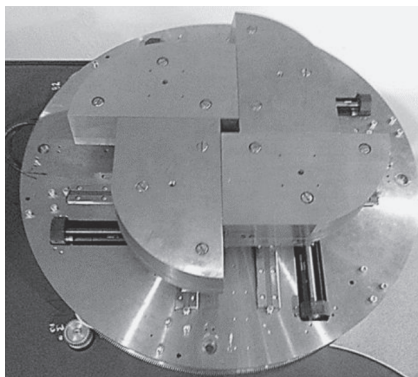


Рис. 2. Радиационная головка (вид со стороны диафрагмы).

Отказом ГТК считается невозможность правильного выполнения функций, указанных в табл. 1. Признак отказа — невыполнение хотя бы одной команды комплексной системы управления. В соответствии с приведенной в [4] классификацией, отказ ГТК следует считать *независимым, полным, явным, устранимым, внезапным*.

— *независимость* отказа обусловлена тем, что гамма-терапевтический комплекс является автономным, конструктивно и функционально обособленным агрегатом, способным функционировать без взаимодействия с другим оборудованием лечебного центра;

— *полным* отказ признается в связи с тем, что Инструкцией по эксплуатации не предусмотрена возможность дальнейшего использования аппарата даже при частичной утрате его работоспособности;

— *явность* отказа обусловлена тем, что конструкцией ГТК предусмотрена система обратной связи, предназначенная для пошагового контроля исполнения отдельных команд и остановки работы комплекса по факту неисполнения хотя бы одной команды;

— *устранимым* отказ признается в связи с тем, что в случае отказа ГТК может быть восстановлен в паузах между сеансами.

2. Выбор целей и задач расчета. Программой обеспечения надежности (ПОН) ГТК предусмотрена на стадии разработки расчетная оценка показателей надежности, и в частности, безотказности. В Техническом задании в качестве показателя безотказности указана средняя наработка на отказ, равная 2000 циклов использования.

Авторами также были выполнены оценки вероятностей безотказной работы ГТК в течение одного сеанса (10 минут) и одной смены (12 часов).

3. Выбор метода расчета. ГОСТ 27.301-95 предусматривает применение различных методов расчета безотказности объекта: метода прогнозирования, физического метода и структурного метода [6].

Метод прогнозирования мало пригоден для оценки безотказности единичного изделия, поскольку для его применения требуется наличие представительной выборки наработок на отказ во время эксплуатации или испытаний на надежность партии однотипных изделий. Изучение *физических моделей* деградации технического состояния объекта связано с выполнением длительных, трудоемких и дорогостоящих теоретических и экспериментальных исследований, проведение которых экономически оправдано только в условиях массового или крупносерийного производства анализируемых изделий.

Таблица 2. Основные этапы структурно-логического анализа

№	Содержание этапа	Метод выполнения, инструментарий
1	Структурная декомпозиция ГТК	Анализ конструкции и принципа действия основных компонентов ГТК
2	Формирование массива справочных значений интенсивностей отказов элементов λ_C	Анализ баз данных, содержащих значения λ_C для механических и электронных элементов
3	Формирование массива приведенных значений интенсивностей отказов элементов	Анализ режимов функционирования узлов ГТК и применение формул приведения
4	Разработка структурно-функциональных схем подсистем ГТК	Анализ функциональной взаимосвязи компонентов подсистем и оценка степени их резервирования, использование графического и математического аппарата программного комплекса RELEX
5	Расчет безотказности подсистем ГТК	
6	Разработка СФС ГТК	Анализ функциональной и конструктивной взаимосвязи подсистем ГТК, использование графического и математического аппарата программного комплекса RELEX
7	Расчет безотказности ГТК	

В рассматриваемой задаче целесообразно применение *структурных методов* расчета, основанных на представлении объекта в виде структурно-функциональной схемы (СФС), описывающей зависимость работоспособности объекта от состояний его элементов с учетом их взаимодействия и выполняемых ими функций в объекте.

4. Структурный анализ безотказности ГТК. Основные этапы примененного структурного метода и способы их выполнения представлены в табл. 2.

В связи с существенным различием баз справочных значений интенсивностей отказов и методик их приведения для механических и электронных элементов, п. 1–5 выполнялись параллельно для механических и электронных узлов ГТК с последующим объединением результатов в п. 6 и 7. Принимая во внимание специфику журнала, авторы далее рассматривают, в основном, анализ надежности механических компонентов ГТК. Результат декомпозиции механической составляющей ГТК приведен на рис. 3.

Источником справочных значений механических узлов и деталей послужила база данных [7]. Приведение справочных значений к условиям эксплуатации выполнялось путем умножения справочных значений на ряд поправочных коэффициентов

$$\lambda_i = \lambda_{Ci} d_k d_n d_3,$$

где λ_{Ci} – справочная интенсивность отказов i -го элемента изделия, 1/ч; d_k – коэффициент, учитывающий климатические факторы среды; d_n – коэффициент нагрузки; d_3 – коэффициент относительной занятости составной части ГТК.

Коэффициент d_k для всех узлов и деталей принят равным 1.0 в связи с тем, что ГТК предназначен для эксплуатации в нормальных комнатных условиях. Для коэффициента d_n в качестве исходного принято значение 1.0 в связи с тем, что при работе ГТК перегрузочные режимы не предусмотрены. Для спутников планетарного редуктора коэффициент уменьшен в 3 раза (по числу спутников), для ведомых зубчатых колес



Рис. 3. Результат структурной декомпозиции механической части ГТК.

принято пониженное значение коэффициента $d_{\text{н.кол.}}$ в соответствии с соотношением числа зубьев ведущей шестерни $Z_{\text{шест}}$ и ведомого колеса $Z_{\text{кол.}}$.

$$d_{\text{н.кол.}} = d_{\text{н.шест}} Z_{\text{шест}} / Z_{\text{кол.}} \quad (1)$$

Коэффициент относительной занятости механических элементов определялся с учетом того, что плановый режим загрузки ГТК предусматривает его активное использование по 12 часов в сутки (2 смены по 6 часов). Следовательно, коэффициент занятости ГТК в целом

$$K_{\text{з.и.}} = 12/24 = 0.5. \quad (2)$$

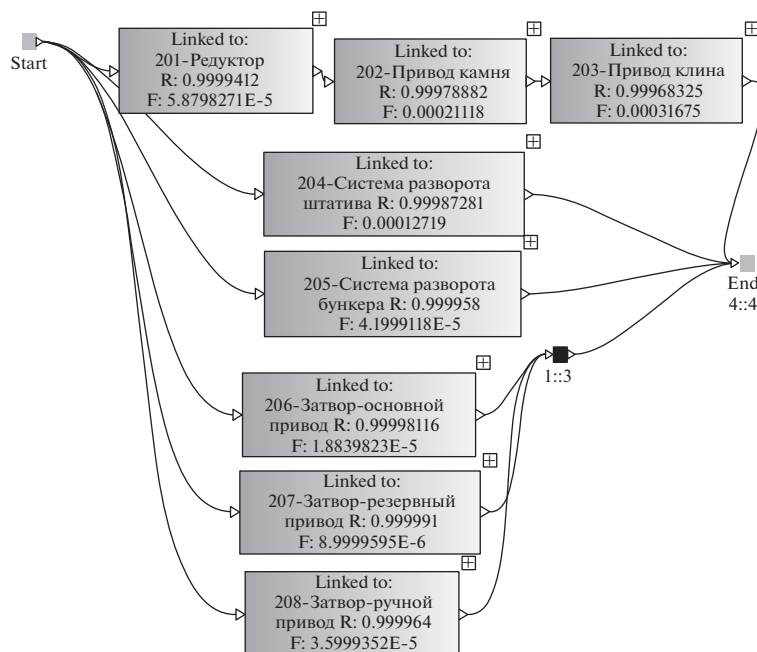


Рис. 4. Построение структурно-функциональной схемы (СФС) механической компоненты ГТК в среде Windchill Quality Solutions 10.1 (Relx).

Один цикл использования ГТК включает следующие фазы: переукладка пациента, позиционирование лечебного стола, позиционирование радиационной головки гамма-аппарата, облучение пациента. Поскольку в каждой из указанных фаз задействована определенная группа механических элементов ГТК, то коэффициент относительной занятости основных элементов может быть определен по формуле

$$d_3 = K_{з.и.}/4 = 0.125. \quad (3)$$

Исключение составляют компоненты резервного и ручного приводов диафрагмы, которые предполагается использовать только в аварийных случаях при отказах основного привода. При заданном ресурсе 10^5 циклов и наработке на отказ 2000 циклов коэффициент относительной занятости резервного и ручного приводов будет определяться соотношением

$$d_3 = 2000/10^5 = 0.02. \quad (4)$$

В табл. 3 показаны интенсивности отказов механических элементов гамма-аппарата (справочные и приведенные значения).

5. Результаты расчета надежности ГТК. Расчет безотказности механической части ГТК выполнен с использованием программного комплекса Windchill Quality Solutions 10.1 (Relx) (рис. 4).

При этом использовались результаты декомпозиции, приведенные данные об интенсивности отказов элементов и сформированные в программном комплексе структурно-функциональные схемы (СФС) механических блоков (с учетом отсутствия или наличия резервирования). При расчете все элементы ГТК рассматривались как невозстанавливаемые. Расчет безотказности электронной части ГТК выполнялся аналогич-

Таблица 3.

№	Наименования узлов и деталей	Кол. шт.	Справочные значения $\lambda_C \times 10^6, \text{ч}^{-1}$	Поправочные коэффициенты			Приведен- ные значения $\lambda_{\Pi} \times 10^6, \text{ч}^{-1}$
				d_K	d_H	d_3	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Редуктор планетарный	1					
	1.1. Солнечная шестерня	1	0.400	1.0	1.0	0.125	0.050
	1.2. Сателлиты	3	0.400	1.0	0.33	0.125	0.017
	1.3. Венец зубчатый	1	0.400	1.0	0.20	0.125	0.010
	1.4. Подшипники качения	7	0.500	1.0	1.0	0.125	0.063
2	Привод камня	4					
	2.1. Шестерня	1	0.400	1.0	1.0	0.125	0.050
	2.2. Зубчатое колесо	1	0.400	1.0	0.53	0.125	0.027
	2.3. Шариковинтовая пара SKF SD	1	0.100	1.0	1.0	0.125	0.013
	2.4. Ролик с подшипником качения	2	0.500	1.0	1.0	0.125	0.063
	2.5. Шнур 0.40Spider wire	1	1.00	1.0	1.0	0.125	0.125
3	Привод клина	1					
	3.1. Шестерня	1	0.400	1.0	1.0	0.125	0.050
	3.2. Зубчатое колесо	1	0.400	1.0	0.53	0.125	0.027
	3.3. Шариковинтовая пара SKF SD	1	0.100	1.0	1.0	0.125	0.013
	3.4. Каретка SGW 17TE-Z	9	1.500	1.0	1.0	0.125	0.190
	3.5. Каретка SGW 17TE CU-Z	8	1.500	1.0	1.0	0.125	0.190
4	Система разворота штатива	1					
	4.1. Цепь приводная	1	0.660	1.0	1.0	0.125	0.083
	4.2. Звездочка ведущая	1	0.600	1.0	1.0	0.125	0.075
	4.3. Звездочка ведомая	1	0.600	1.0	0.16	0.125	0.012
	4.4. Колесо с втулкой	1	0.500	1.0	1.0	0.125	0.063
	4.5. Подшипники качения оси	2	0.500	1.0	1.0	0.125	0.063
	4.6. Подшипники качения ДУП штатива	2	0.400	1.0	1.0	0.125	0.050
	4.7. Тормоза	2	2.400	1.0	0.5	0.125	0.150
5	Система разворота бункера	1					
	5.1. Венец зубчатый	1	0.400	1.0	0.1	0.125	0.005
	5.2. Шестерня привода бункера	1	0.400	1.0	1.0	0.125	0.050
	5.3. Шестерня ДУП бункера	1	0.400	1.0	1.0	0.125	0.050
	5.4. Подшипник качения оси бункера	1	0.500	1.0	1.0	0.125	0.063
	5.5. Подшипник качения привода бункера	2	0.500	1.0	1.0	0.125	0.063
	5.6. Подшипник ДУП бункера	2	0.400	1.0	1.0	0.125	0.050
6	Система управления затвором (ос- новная)	1					
	6.1. Зубчатое колесо	1	0.400	1.0	0.1	0.125	0.005
	6.2. Шестерня привода основная	1	0.400	1.0	1.0	0.125	0.050
	6.3. Подшипники затвора	2	0.500	1.0	1.0	0.125	0.063
	6.4. Пружины стопоров затвора	2	0.110	1.0	1.0	0.125	0.014
	6.5. Муфта	1	0.080	1.0	1.0	0.125	0.010

Таблица 3. Окончание

№	Наименования узлов и деталей	Кол. шт.	Справочные значения $\lambda_C \times 10^6, \text{ч}^{-1}$	Поправочные коэффициенты			Приведен- ные значения $\lambda_{\Pi} \times 10^6, \text{ч}^{-1}$
				d_k	d_n	d_3	
1	2	3	4	5	6	7	8
7	Резервный привод управления затвором	1					
	7.1. Полумуфта ведущая	1	0.120	1.0	1.0	0.02	0.002
	7.2. Полумуфта ведомая	1	0.120	1.0	1.0	0.02	0.002
	7.3. Пружина втягивающего соленоида	1	0.110	1.0	1.0	0.02	0.002
	7.4. Шестерня	1	0.400	1.0	1.0	0.02	0.008
8	Ручной привод управления затвором	1					
	8.1. Шестерня коническая	2	0.500	1.0	1.0	0.02	0.010
	8.2. Шестерня цилиндрич.	1	0.400	1.0	1.0	0.02	0.008
	8.3. Шестерня цилиндрич. привода шкалы	2	0.400	1.0	1.0	0.02	0.008
	8.4. зубчатое колесо привода шкалы	2	0.400	1.0	0.2	0.02	0.002

Таблица 4. Результаты расчетной оценки надежности ГТК

Время работы ГТК, час	Вероятность безотказной работы	Вероятность отказа	Средняя наработка до первого отказа	
			часов	циклов
0.17 (1 сеанс)	0.999968	0.000000	5298	31788
3.00	0.999434	0.000566		
6.00	0.998868	0.001132		
9.00	0.998303	0.001697		
12.00	0.997737	0.002262		

Таблица 5. Ранжирование блоков ГТК с наименее высокой надежностью

Элемент (блок) СФС ГТК	Вероятность отказа в течение 12 ч
Механика гамма-аппарата	0.000756
Механика лечебного стола	0.000256
Привод триммеров	0.000176
Привод коллиматора	0.000151
Механизм поворота диафрагмы	0.00008
Механизм вращения коллиматора	0.00008
Привод лечебного стола	0.00008

но. Результаты сводного расчета изменения вероятности безотказной работы ГТК в течение суток (2 смены по 6 часов) представлены в табл. 4.

Дополнительной задачей явилось выделение и ранжирование наименее надежных компонентов ГТК (табл. 5).

Приведенные в табл. 5 данные могут быть полезны при доработке и модернизации конструкции ГТК.

Заключение. Для оборудования, нарушение нормального функционирования которого может угрожать здоровью и жизни людей, важнейшим показателем надежности следует считать безотказность. В качестве примера такого объекта в статье рассмотрен гамма-терапевтический комплекс (ГТК), внезапные отказы которого во время проведения терапевтического сеанса могут привести к смертельно опасному для пациента отклонению направленности и продолжительности радиоактивного облучения. Показано, что для таких сложных, дорогостоящих и уникальных видов оборудования единственно возможным способом оценки безотказности является применение структурного метода для расчета вероятности безотказной работы объекта в течение установленных сроков эксплуатации. Отмечено, что решающим условием успешного решения таких задач для объектов со сложной механикой и электроникой является наличие представительных баз данных со справочными значениями интенсивностей отказов механических узлов и электронных элементов, а также необходимость тщательного изучения конструктивных и функциональных особенностей объекта для выполнения достаточно детальной декомпозиции. Показана целесообразность применения современных специализированных программных комплексов (ПК) для построения структурно-логических схем и вычисления показателей надежности (в статье рассмотрена оценка надежности ГТК с использованием ПК “Relax”). Рассмотренную в статье методику можно практически использовать для проектной оценки надежности сложных и уникальных электромеханических робототехнических систем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 50–707–91 Методические указания. Изделия медицинской техники. Требования к надежности. Правила и методы контроля показателей надежности. Издательство стандартов, 1992. 23 с.
2. Дудко А.В., Рачинских А.В., Тумашев А.К., Стрекаловская А.Д., Санеева Т.А. Основы надежности медицинской техники: учеб. пособие. Оренбургский гос. университет. Оренбург: ОГУ, 2017. 149 с.
3. Карякина О.Е., Красильников С.В., Мартынова Н.А., Басова Л.А., Лялина Ю.А. Оценка надежности медицинской техники лечебно-профилактических учреждений г. Архангельска. ФГАОУ ВПО Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова. Сборник научных трудов Sworld. 2012. № 2. С. 74.
4. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Термины и определения.
5. ГОСТ 27.003-90 Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.
6. ГОСТ 27.301-95 Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения.
7. Перечень интенсивностей отказов элементов судового машиностроения. Справочный материал. ЦАКИ. 360074.001, ЦНИИ ТС. 1990.
8. Войнов К.Н., Лавров В.Ю. Механика манипуляторов и обеспечение надежного функционирования робототехнических систем. Уч. пособие. СПб., ПГУПС, 2009.
9. Труханов В.М. Надежность изделий машиностроения: теория и практика. М. Машиностроение, 1996.