

УДК 519.718, 519.688
DOI 10.51955/2312-1327_2023_1_57

МЕТОДИКА И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ХАРАКТЕРИСТИК ИХ НАДЕЖНОСТИ НА ЭТАПАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ

*Сергей Михайлович Кривель^{1,2},
orcid.org/0000-0003-0569-4796,*

кандидат технических наук, доцент

¹Иркутский государственный университет,

ул. Карла Маркса, 1

Иркутск, 664003, Россия

²Иркутский национальный исследовательский

технический университет,

ул. Лермонтова, 83

Иркутск, 664074, Россия

krivel66@mail.ru

Анастасия Александровна Лебедева,

Иркутский государственный университет,

ул. Карла Маркса, 1

Иркутск, 664003, Россия

hell-sing13@mail.ru

Александра Борисовна Спасибко,

Иркутский государственный университет,

ул. Карла Маркса, 1

Иркутск, 664003, Россия

aleksbor@gmail.com

Аннотация. Работа посвящена созданию универсального программного обеспечения по разработке компьютерных моделей систем, позволяющих исследовать параметры и характеристики надежности систем на основе структурной схемы надежности, и методических принципов использования предлагаемого программного обеспечения при анализе эксплуатационных свойств систем при их проектировании. Программное обеспечение представляет собой приложение (Toolbox) системы динамического моделирования Simulink. Алгоритмы и программы являются унифицированными, сгруппированы по назначению, предназначены для формирования математических и компьютерных моделей сложных структурных систем надежности. Предлагаемое программное обеспечение позволяет выполнять вычислительный эксперимент по анализу характеристик надежности и оценку эффективности мероприятий по повышению надежности технических и технологических систем; достаточно просто модифицировать математические модели; организовывать программный интерфейс; обрабатывать результаты моделирования. Особенности программного обеспечения позволяют достаточно эффективно изменять как характеристики и параметры надежности элементов системы, так и структуру взаимосвязей элементов системы с точки зрения надежности всей системы в целом. В работе приводится пример использования программного обеспечения.

Ключевые слова: SIMULINK, MATLAB, надежность, методы расчета параметров надежности, структурные схемы надежности, надежность технических систем, надежность технологических систем, надежность машин.

METHODOLOGY AND SOFTWARE FOR MODELING THE FUNCTIONING OF SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT THE CHARACTERISTICS OF THEIR RELIABILITY AT THE STAGES OF OPERATION AND DESIGN

*Sergey M. Krivel^{1,2},
orcid.org/0000-0003-0569-4796,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
¹Irkutsk State University,
1, Karl Marx str.
Irkutsk, 664003, Russia
²Irkutsk National Research
Technical University,
83, Lermontova str.
Irkutsk, 664074, Russia
krivel66@mail.ru*

*Anastasia A. Lebedeva,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx str.
Irkutsk, 664003, Russia
hell-sing13@mail.ru*

*Alexandra B. Spasibko,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx str.
Irkutsk, 664003, Russia
alekspbbr@gmail.com*

Abstract. The work is devoted to the creation of universal software for the development of computer models of systems that allow studying the parameters and characteristics of the reliability of systems based on the structural scheme of reliability, and the methodological principles of using the proposed software in the analysis of the operational properties of systems in their design. The software is an application (Toolbox) of the Simulink dynamic modeling system. Algorithms and programs are unified, grouped by purpose, designed to form mathematical and computer models of complex structural reliability systems. The proposed software allows performing a computational experiment to analyze reliability characteristics and to evaluate the effectiveness of measures to improve the reliability of technical and technological systems; it is enough to simply modify mathematical models; organize a software interface; process simulation results. The features of the software make it possible to effectively change both the characteristics and reliability parameters of the system elements and the structure of the interrelationships of the system elements from the point of view of the reliability of the entire system as a whole. The paper provides an example of using the software.

Keywords: SIMULINK, MATLAB, reliability, methods for calculating reliability parameters, reliability block diagrams, reliability of technical systems, reliability of technological systems, reliability of machines.

Введение

Для решения задач оценки характеристик надежности систем на различных этапах их жизненного цикла от проектирования до окончания эксплуатации предлагается достаточно широкий круг специализированного программного обеспечения. Наиболее известны такие программные комплексы как программное средство АРБИТР («Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем») [Можаев, 2008]; программный комплекс ReliaSoft; пакет средств анализа Relex Studio и Risk Spektrum; программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования ПК АСМ; программный комплекс АСОНИКА-К [Расчет реальной..., 2011; Строгонов и др., 2007] и другие. Отдельного рассмотрения требуют различные информационные системы определения и анализа надежности систем на основе статистических данных.

Следует заметить, что большинство специализированных программных комплексов, как правило, ориентированы на определенный круг задач или систем, имеют закрытые алгоритм и код. Эти факторы делают невозможным их модернизацию на уровне алгоритмов и затрудняют приложение к решению «уникальных» задач без участия разработчика. Именно поэтому на практике обычно используются программы для ЭВМ уникальной разработки, созданные с использованием различных систем и языков программирования [Белова, 2013; Сервис-ориентированный..., 2017; Кирьянчиков и др., 2017; Савицкий, 2012; Федухин и др., 2011]. В настоящей работе предлагается общий подход к решению задач надежности на основе метода структурных схем надежности с использованием системы динамического моделирования Simulink (составляющей программного комплекса Matlab) [Гультияев, 2000]. По своей сути настоящая работа является развитием идей и методов работ [Кривель, 2018; Кривель, 2019; Кривель и др., 2021].

Метод определения характеристик надежности систем с использованием структурной схемы надежности получил самое широкое распространение. Основными достоинствами метода являются его относительная простота, высокая наглядность и информативность с точки зрения анализа надежности системы и влияния на нее различных факторов. В силу указанных достоинств методы на основе анализа структурной схемы надежности не только широко используются на практике, но и фактически приняты в качестве базовых в ряде учебных курсов по теории надежности систем (ГОСТ Р 51901.14-2005 / Менеджмент риска. Метод структурной схемы надежности, ГОСТ Р 51901.14-2007 / Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы, ГОСТ Р 51901.5-2005 / Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности) [Острейковский, 2003].

Общая характеристика программного комплекса

В работах [Кривель, 2018; Кривель, 2019] изложены общие теоретические и методические принципы построения приложения к Simulink, представляющего собой отдельное программное обеспечение решения широкого класса задач

моделирования функционирования систем и их проектирования с учетом характеристик надежности как отдельных элементов систем, так и систем в целом [Кривель и др., 2021].

Решение задач расчета характеристик надежности сводится к определению зависимости вероятности безотказной работы P (вероятности отказа Q) системы от времени. Исходными данными являются параметры, определяющие характер изменения вероятностей безотказной работы P или отказа Q отдельных элементов системы. Все остальные характеристики системы (например, средняя наработка на отказ, количество исправных систем и подсистем в заданный момент времени и т.д.) являются, в конечном итоге, производными от величин P или Q .

В соответствии с положениями работ [Кривель, 2018; Кривель, 2019; Кривель и др., 2021] все операции расчета и соответствующие им блоки Simulink разделены на три группы. Первая группа блоков объединяет операции расчета вероятностей безотказной работы элементов структурной схемы надежности на основе заданных исходных данных и математических моделей элементов. Вторая группа блоков объединяет операции расчета вероятностей безотказной работы групп элементов, образующих типовые схемные соединения. Третья группа объединяет операции расчета заданных к определению характеристик надежности для системы в целом, ее подсистем или отдельных элементов.

Математические и компьютерные модели расчета вероятностей безотказной работы элементов структурной схемы надежности

В случае параметрической оценки надежности элемента системы для расчета вероятности безотказной работы элемента $P_i = P_i(t)$ используются формулы, формируемые исходя из используемого закона распределения. Параметры закона распределения являются исходными данными для соответствующего блока. Закон распределения и его параметры определяются на основе статистических данных, гипотез или результатов специальных испытаний. Разработаны и представлены в пакете программ блоки, которые реализуют наиболее часто используемые законы распределения. Это блоки, реализующие экспоненциальное, нормальное, равномерное, логарифмически нормальное, биномиальное, DN-распределение, Вейбулла и Пуассона, а также оценку при смеси двух экспоненциальных распределений и при гамма-распределении. Могут использоваться и другие законы распределения, их композиции, а также многомерные распределения.

В качестве примера формирования блока Simulink представим методику формирования блока с гамма-распределением.

Гамма-распределение чаще всего является результатом смешения большого числа потоков, имеющих экспоненциальное распределение. Например, потоков отказов из-за коррозии, вибраций, статических нагрузок, ошибок персонала и т.д.

Функция плотности $f(t)$ гамма-распределения описывается формулой [Гнеденко и др., 1965]:

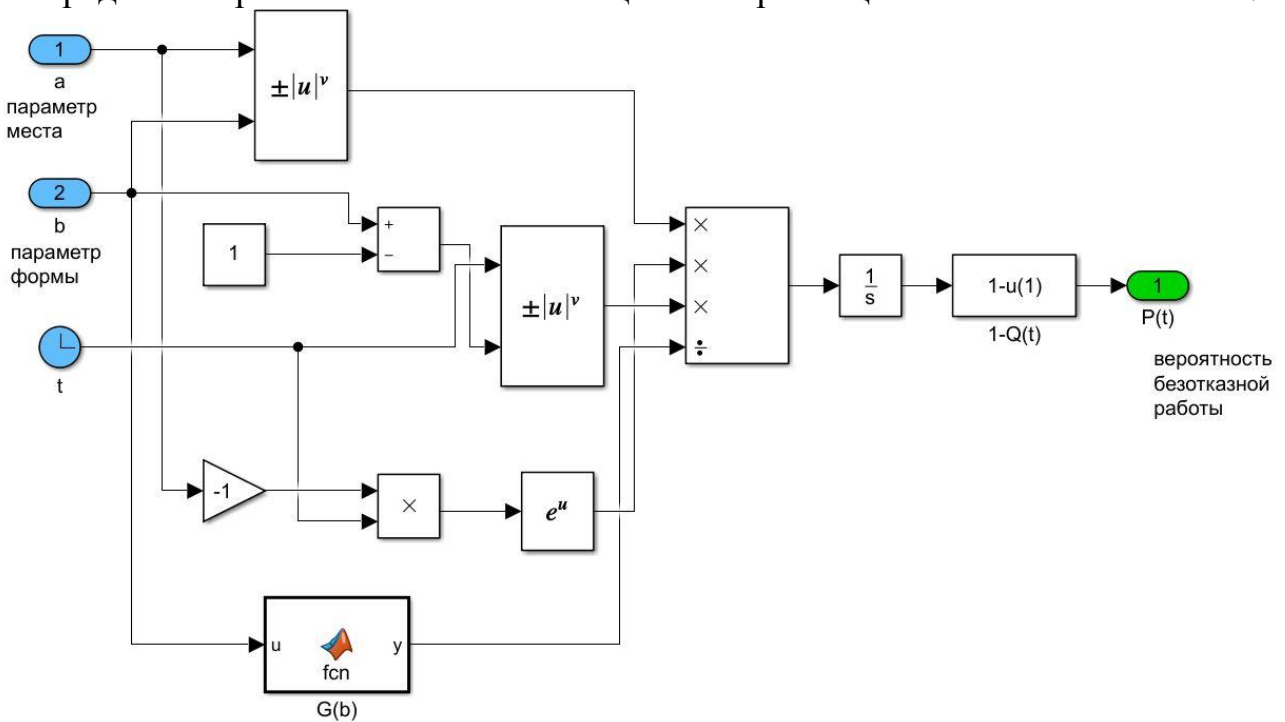
$$f(t) = \frac{a^b}{\Gamma(b)} e^{-at} t^{b-1}, \quad (1)$$

где a – параметр места; b – параметр формы; $\Gamma(b)$ – гамма-функция от b , заданная таблицей значений.

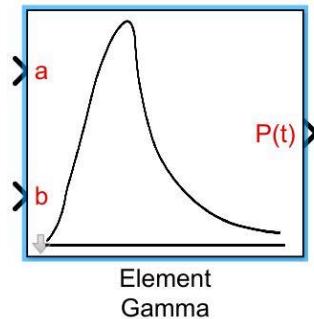
Вероятность безотказной работы $P(t)$ определяется выражением

$$P(t) = \int_0^t \frac{a^b t^{b-1} e^{-at}}{\Gamma(b)} dt. \quad (2)$$

В программе Simulink (рисунок 1) значение функции плотности гамма-распределения рассчитывается с помощью интерполяции табличных значений.



а)



б)

Рисунок 1 – Simulink-алгоритм (а) и вариант оформления элементарного блока (б) расчета вероятности безотказной работы элемента в случае гамма-распределения плотности вероятности отказа

Аналогичным образом построены программы и оформлены блоки для других вариантов параметрического задания характеристик надежности элемента системы. Следует заметить, что каждый блок оснащен подробным описанием с инструкцией по применению, оформленной с использованием возможностей оформления блоков Simulink.

Расчет вероятности безотказной работы элементов в случае непараметрического описания и в условиях недостатка априорной информации

Случай непараметрического описания вероятности безотказной работы элемента системы обычно используется, если известен закон распределения вероятности из априорной информации и нет возможности или необходимости представлять закон в параметрическом виде. То есть, непараметрические методы позволяют по результатам наблюдений оценивать неизвестные значения показателей надежности. Возможность анализировать данные без предположений о законе распределении времени отказов позволяет избежать многих потенциальных ошибок, связанных с неправильным выбором закона распределения вероятности отказа или безотказной работы. С другой стороны, такая оценка вероятности может содержать ошибку за пределами временного диапазона априорной информации об отказах объекта в процессе жизненного цикла [Расчет реальной..., 2011]. В любом случае, алгоритм и блок расчета вероятности безотказной работы представляют собой обработку и аппроксимацию данных, как правило, опытных и имеющих статистический характер.

Математические и компьютерные модели расчета вероятностей безотказной работы элементов, образующих типовые схемные соединения

Основой анализа структурной схемы надежности системы является группировка элементов по типовым соединениям и расчет вероятности безотказной работы элементов в составе групп. Основными типовыми соединениями элементов являются: последовательное соединение элементов; параллельное соединение двух и более элементов; мостиковая схема соединения элементов; схемы с переключателем (как одна из модификаций мостиковой схемы); соединение m из n элементов (ГОСТ Р 51901.14-2005 / Менеджмент риска. Метод структурной схемы надежности, ГОСТ Р 51901.14-2007 / Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы, ГОСТ Р 51901.5-2005 / Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности).

В работах [Кривель, 2018; Кривель, 2019] подробно рассмотрено построение блоков и их алгоритмов для случаев последовательного, параллельного, мостикового схем соединения.

Рассмотрим особенности построения блоков и алгоритмов схемы с переключателем и соединения m из n .

Очевидно, что структурная схема надежности мостикового соединения может быть представлена по методу минимальных путей последовательно-

параллельным соединением соответствующих элементов. Тогда программа расчета вероятности безотказной работы всей системы из пяти элементов может быть представлена алгоритмом на основе типовых блоков последовательного и параллельного соединений (рисунок 2). Входными данными для блока, описывающего мостиковое соединение пяти элементов, являются вероятности безотказной работы каждого элемента в отдельности $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$, $P_4(t)$, $P_5(t)$. Система представляет собой параллельное соединение четырех последовательных цепей: 1 и 2 элементы; 4 и 5 элементы; 1, 3 и 4 элементы; 4, 3 и 2 элементы.

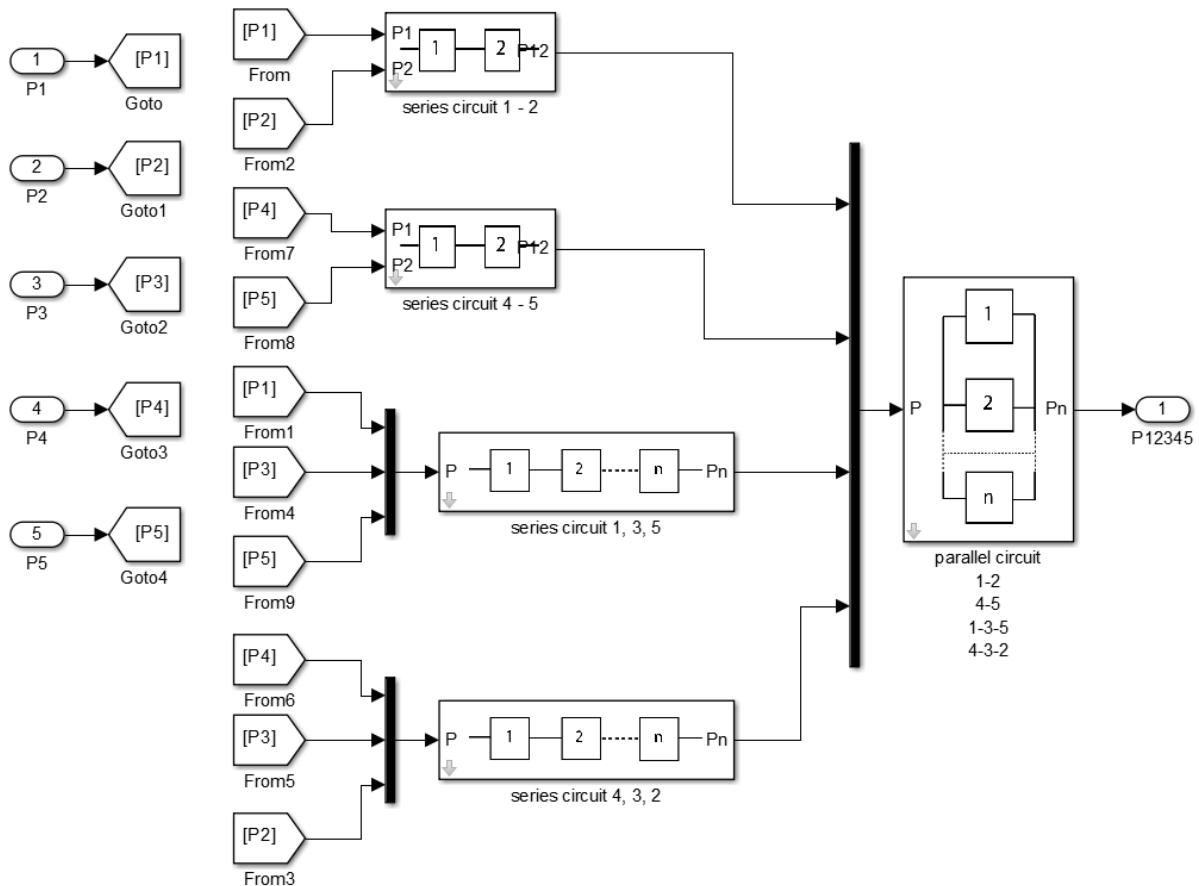


Рисунок 2 – Simulink-алгоритм расчета вероятности безотказной работы мостикового соединения для пяти элементов

В схемы с переключателем вводятся дополнительные условия на основе переключателей Simulink. Если переключатель включен, рассматривается алгоритм мостикового соединения (рисунок 2), в противном случае рассматривается схема соединения элементов как параллельное или параллельно последовательное соединение.

Наиболее сложным для моделирования является случай m из n . Тогда составной элемент системы, который состоит из n подсистем или элементов, считается отказавшим, если отказало m и более составляющих подсистем или элементов. В этом случае соединение элементов по схеме m из n заменяется системой параллельно соединенных путей каждой из n подсистем или элементов

с расчетом вероятности безотказной работы каждого из n элементов. Результаты расчета являются входными данными блока расчета вероятности безотказной работы составного элемента (вероятности того, что одновременно не отказали более чем $(n-m)$ подсистем или элементов).

Расчет вероятности безотказной работы составного элемента, в этом случае, выполняется по известным, основанным на теоремах сложения и умножения вероятностей формулам [Ануреев и др., 1967]. Так, для случая $m=2$ из $n=4$ для подсистем с вероятностями безотказной работы $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$, $P_4(t)$ вероятность безотказной работы составного элемента $P(t)$ определится выражением:

$$\begin{aligned}
 P = & P_1 P_2 P_3 P_4 + (1 - P_1) P_2 P_3 P_4 + P_1 (1 - P_2) P_3 P_4 + P_1 P_2 (1 - P_3) P_4 + P_1 P_2 P_3 (1 - P_4) + \\
 & + P_1 P_2 (1 - P_3) (1 - P_4) + P_1 (1 - P_2) P_3 (1 - P_4) + P_1 (1 - P_2) (1 - P_3) P_4 + \\
 & + (1 - P_1) P_2 P_3 (1 - P_4) + (1 - P_1) P_2 (1 - P_3) P_4 + (1 - P_1) (1 - P_2) P_3 P_4.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Следует заметить, что на практике значение n и m , как правило, не велико. Поэтому в предлагаемом программном разработаны блоки 2 из 3, 2 из 4, 3 из 4, 2 из 5, 3 из 5, 4 из 5, 2 из 6, 3 из 6, 4 из 6, 5 из 6. Кроме этого, разработан блок с произвольными m и n .

Таким образом, создание математической и компьютерной моделей сложной структурной схемы надежности представляет собой последовательную группировку элементов в виде типовых соединений. Следует заметить, что все типовые соединения в рамках предлагаемых алгоритмов сводятся к применению, в конечном итоге, исключительно последовательных и параллельных соединений.

Модель надежности восстанавливаемого элемента системы

В рамках решаемых задач под восстанавливаемым объектом будем понимать элемент системы, который может быть восстановлен или заменен (восстановлена его функция) в случае отказа.

Если элемент отказал, т.е. перешел в неработоспособное и нефункционирующее состояние, считается, что вероятность его безотказной работы равна нулю. Любое искусственное исключение элемента из работы системы считается его отказом. Под искусственным исключением, в том числе, понимается выполнение профилактических, ремонтных и других работ на элементе с его выключением. Эти работы рассматриваются как работы по восстановлению надежности элемента системы (повышению вероятности его безотказной работы).

Допускается, что элемент, который устанавливается вместо отказавшего, может иметь предварительную наработку или срок предварительного хранения. Этим постулируется тот факт, что начальная вероятность безотказной работы элемента может быть снижена (не равна единице). Кроме этого, есть возможность учета не полного восстановления надежности элемента при его

ремонте или выполнении работ по восстановлению надежности. Естественно, такое моделирование требует наличия априорных данных или ряда гипотез, принимаемых на основе целей моделирования.

Возможно исключение элемента из работы системы в соответствии с различными стратегиями его эксплуатации. Например, по наработке или по факту снижения вероятности его безотказной работы ниже заданного уровня. Могут быть заданы и другие правила исключения элемента и, соответственно, его включения.

Таким образом, в качестве исходных данных моделирования восстанавливаемого элемента системы могут быть заданы следующие параметры:

- закон распределения вероятности безотказной работы данного элемента $P(t)$;
- заданная вероятность безотказной работы P_3 , после которой объект подлежит восстановлению, или календарное время (наработка) отвода элемента на восстановление (в случае планово-предупредительной стратегии технической эксплуатации элемента);
- начальная наработка элемента $t_{нач}$;
- время восстановления элемента $\Delta t_{вос}$;
- доля деградации вероятности безотказной работы элемента системы ΔP , характеризующая неполное восстановление надежности элемента при ремонте или профилактических работах;
- время, после которого объект отправляется на капитальный ремонт (подлежит замене или полному исключению из системы) $t_{кап}$.

В этом случае, графическая модель изменения вероятности безотказной работы восстанавливаемого объекта в простейшем варианте может иметь вид, представленный на рисунке 3. На рисунке 4 представлен Simulink-алгоритм моделирования рассмотренного выше восстанавливаемого элемента. Используется Simulink-приложение StateFlow.

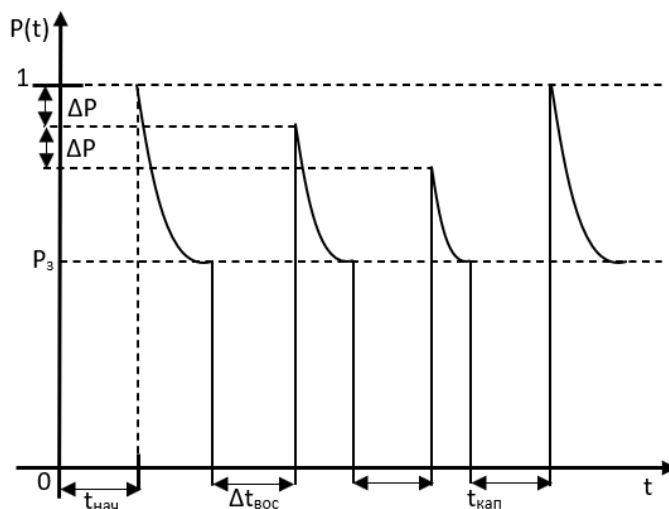


Рисунок 3 – Модель изменения вероятности безотказной работы восстанавливаемого объекта в процессе рассматриваемого промежутка времени

Входные:

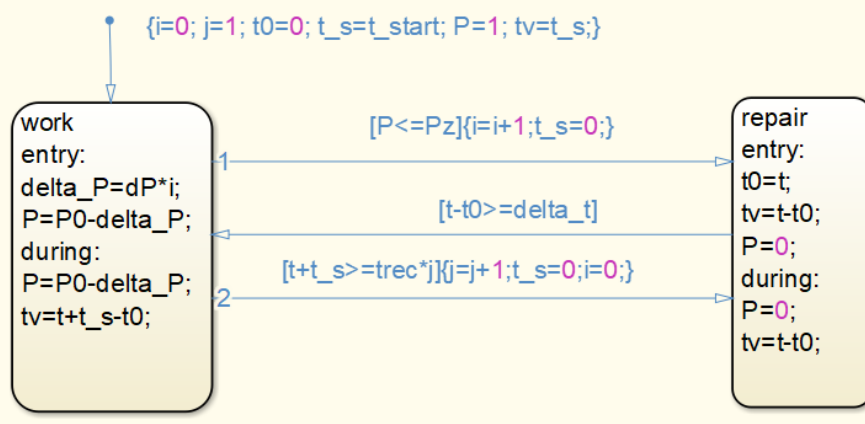
dP - доля деградации при каждой итерации по вероятности
 t - текущее время
 Pz - заданная вероятность
 P0 - вероятность, пересчитанная по времени
 delta_t - время востановления объекта
 trec - время капитального ремонта
 t_start - начальная выработка объекта

Локальные:

i - количество востановлений по вероятности (начинается с 0)
 j - количество капитальных востановлений (начинается с 1)
 delta_P - dP * i
 t0 - время, когда произошло восстановление (нужно для обнуления времени)
 t_s = начальная выработка объекта (обнуляется после восстановления)

Выходные:

tv - пересчитанное время
 P - пересчитанная итоговая вероятность



a)

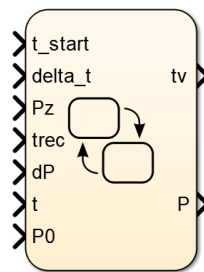


Chart1

б)

Рисунок 4 – Simulink-алгоритм (а) и вариант оформления элементарного блока (б) расчета вероятности безотказной работы восстанавливаемого элемента

Результаты исследований

В качестве демонстрации возможностей разработанного программного обеспечения рассмотрим моделирование и расчет характеристик надежности типового участка электроснабжения месторождения полезных ископаемых, отличающегося разнообразием типов источников электроэнергии.

Объектом исследования являются характеристики надежности типового участка автономного электроснабжения. Под характеристиками надежности понимаются прежде всего вероятность обеспечения потребителей

электростанции располагаемой (максимально возможной) мощностью электроэнергии.

На рисунке 5 представлена функциональная схема участка автономного электроснабжения месторождения.

В схеме участка автономного электроснабжения используются:

- 1) ПАЭС-2500 – передвижная автоматизированная газотурбинная электростанция, номинальной мощности 2,5 МВт;
- 2) УРАЛ-6000 – газотурбинная блочно-модульная электростанция (ГТЭС), номинальной мощности 6 МВт;
- 3) САТУРН (ГТА-6РМ) – газотурбинный агрегат, номинальной мощности 6 МВт;
- 4) ГТЭ-6/6,3 – газотурбинная электростанция (ГТЭС), номинальной мощности 6 МВт;
- 5) ЭГ-12 (ГТЭС-12П) – газотурбинная блочно-модульная электростанция, номинальной мощности 12 МВт;
- 6) ЗРУ-6кВ – закрытое распределительное устройство, номинальное входное напряжение 6 кВ;
- 7) ВЩ – входные щиты;
- 8) ГРУ – главное распределительное устройство;
- 9) Переключатель;
- 10) ТП-6/35 – передвижная трансформаторная подстанция;
- 11) ЗРУ-35кВ – закрытое распределительное устройство, номинальное напряжение 35 кВ.

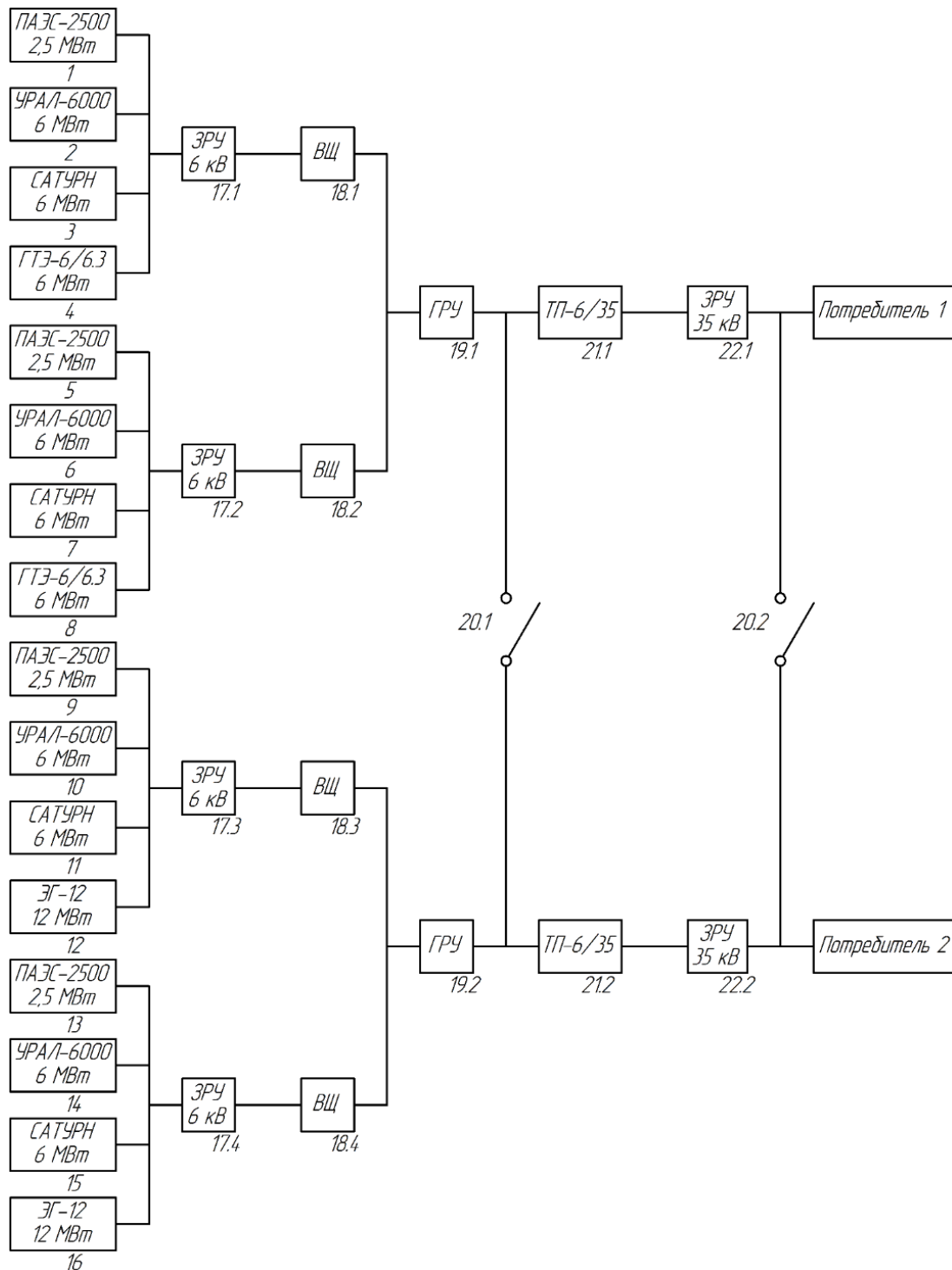


Рисунок 5 – Функциональная схема участка автономного электроснабжения месторождения

Компьютерная модель системы состоит из 3 основных групп блоков, описывающих работы системы (рисунок б):

- 1) группа блоков расчета вероятности безотказной работы восстанавливаемых элементов (объектов);
- 2) группа блоков расчета вероятности безотказной работы невосстанавливаемых элементов (объектов);
- 3) блок расчета вероятности безотказной работы всей системы (структурной схемы надежности).

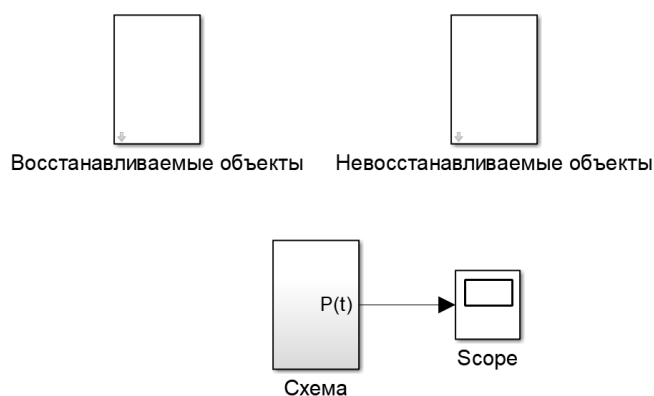


Рисунок 6 – Общая структура компьютерной модели

В данной программе восстанавливаемыми считаются первые 5 объектов (собственно источники электроэнергии). Каждый такой объект состоит из блока нормального и экспоненциального распределений, соединенных последовательно. Нормальный закон был выбран исходя из известных данных по плановой замене и обслуживанию оборудования (таблица 1), а экспоненциальный учитывает случайные факторы, приводящие к отказу. Предоставленные авторам данные по надежности (отказам) элементы системы позволили выбрать параметры законов распределения вероятностей безотказной работы электрогенераторов. Параметры объектов представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Сроки плановой замены и обслуживания электростанций

Название объекта	Наработка выхода на плановое обслуживание, час	Длительность планового обслуживания, час	Наработка выхода на плановую замену (ресурс до ремонта), час
ПАЭС	500	22	5000
УРАЛ	1500	120	8000
САТУРН	1500	120	8000
ГТЭ	2500	120	8000
ЭГ-12	2500	192	8000

Таблица 2 – Параметры восстанавливаемых объектов

Название объекта	Параметр экспоненциального распределения	Параметр нормального распределения	Мат ожидание нормального распределения	Доля деградации объекта	Заданная вероятность	Время восстановления	Время капитального ремонта	Начальная наработка
ПАЭС	0.0008664	100	800	0.005	0.68	22	5000	100
УРАЛ	0.0002888	300	2400	0.005	0.7	120	8000	50
САТУРН	0.0002888	300	2400	0.005	0.8	120	8000	200
ГТЭ	0.0001733	500	4000	0.005	0.6	120	8000	20
ЭГ-12	0.0001733	500	4000	0.005	0.5	192	8000	0

На рисунке 7 представлен Simulink-алгоритм моделирования одного генератора. Модели различных генераторов отличаются только величинами параметров.

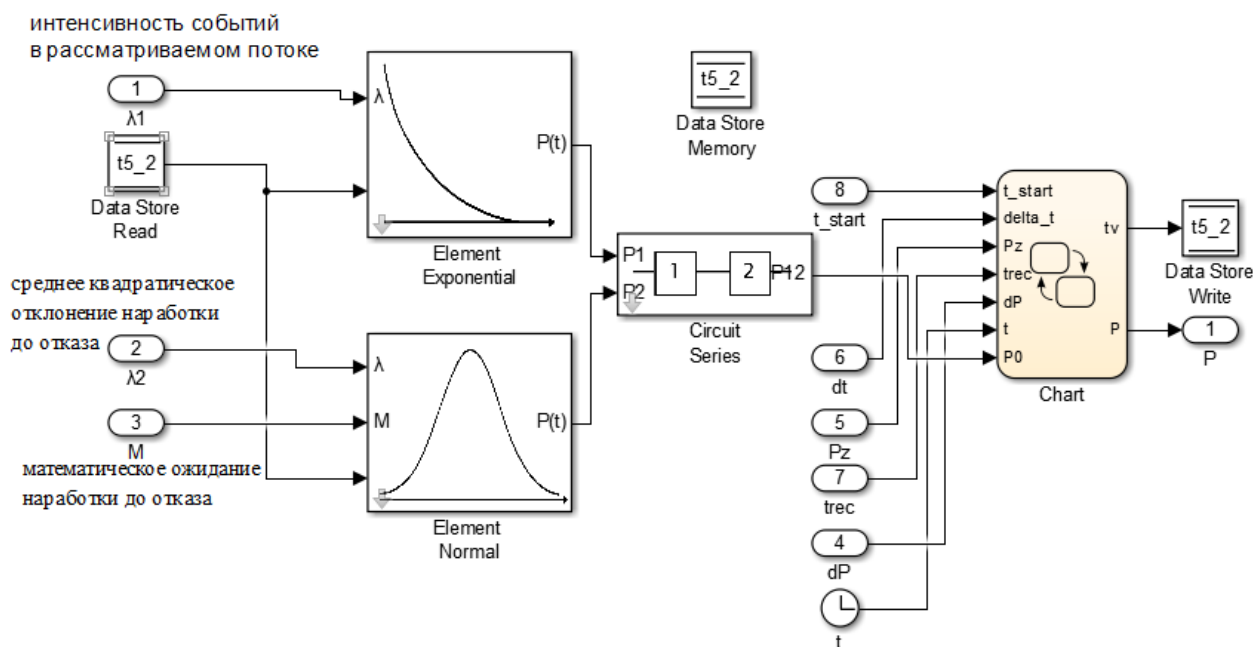
При формировании математической модели генератора использовался подход к описанию закона распределения вероятности отказа (безотказной работы), предложенный в работе [Кривель, 2019]. Он основан на следующих положениях. В таком сложном элементе могут возникать отказы самой различной природы и формы проявления. Полный закон распределения вероятности безотказной работы такого элемента безусловно не является простым и может описываться «классическими» законами распределения плотности вероятности безотказной работы или отказа с неудовлетворительной достоверностью. Попытки подобрать адекватный закон распределения приводят к созданию все более сложных типовых законов, которые, однако, не решают проблему в принципе.

Делается допущение, что все отказы, характерные для такого элемента системы можно условно разделить на группы по физическим причинам и, соответственно, по приближениям к каким-либо законам распределения плотности вероятности безотказной работы или отказа. Так, отказы по причине износа элементов системы с высокой степенью достоверности могут быть описаны нормальным законом распределения. На основе такого подхода вводятся понятия – назначенный ресурс и срок службы изделия. Отдельно выделяются внезапные отказы, которые возникают по широкому спектру трудно идентифицируемых или не рассматриваемых отдельно причин. В этом случае вероятность безотказной работы системы обычно аппроксимируют с помощью экспоненциального закона распределения плотности вероятности безотказной работы.

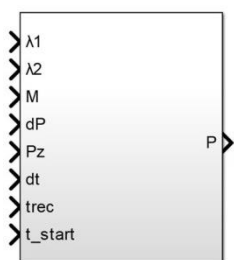
Сделаем допущение об отсутствии зависимости между вероятностью появления отказов по причинам одной группы от появления или характеристик законов распределения отказов по причинам других групп.

В этом случае, на структурной схеме надежности рассматриваемый элемент системы может быть представлен в виде последовательного соединения условных элементов, каждый из которых определяет вероятность возникновения отказа $P_{G1}(t)$ и $P_{G2}(t)$ первой и второй групп соответственно. Таким образом, постулируется, что рассматриваемый элемент (например, элемент с номером 1) системы является отказавшим, если возникает отказ любой группы данного элемента. Тогда, вероятность безотказной работы рассматриваемого элемента определится выражением:

$$P_1(t) = P_{G1}(t) \cdot P_{G2}(t) \quad (4)$$



а)



б)

Рисунок 7 – Simulink-алгоритм (а) и вариант оформления элементарного блока (б) расчета вероятности безотказной работы электрогенератора

Все прочие объекты системы считаются невозстанавливаемыми. Надежность этих элементов описывается экспоненциальным законом

распределения. Параметры конкретных элементов определены на основе предоставленных априорных данных (таблица 3).

Таблица 3 – Параметры невосстанавливаемых объектов

Название	ЗРУ-6	ВЩ	ГРУ	ТП	ЗРУ-35
Параметр экспоненциального распределения	0.000024	0.000001	0.0000024	0.000072	0.000048

Полное представление о Simulink-алгоритме блока расчета вероятности безотказной работы всей системы дает информация, представленная на рисунке 8.

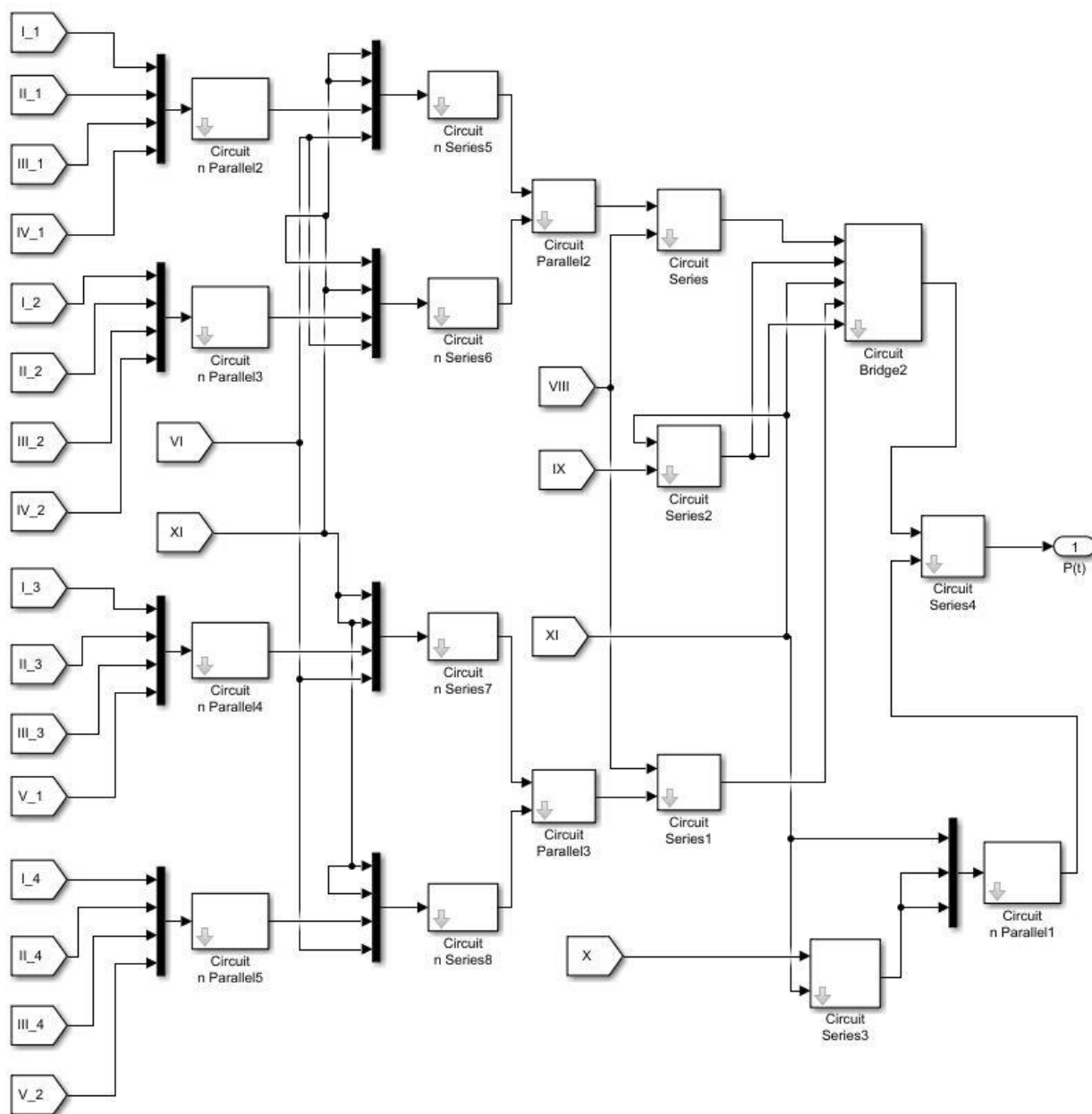


Рисунок 8 – Simulink-алгоритм блока расчета вероятности безотказной работы системы участка электроснабжения

На рисунках 9 и 10 представлены примеры расчета зависимостей вероятности безотказной работы системы в целом от времени работы для случая реализации восстановления элементов и без учета возможности восстановления.

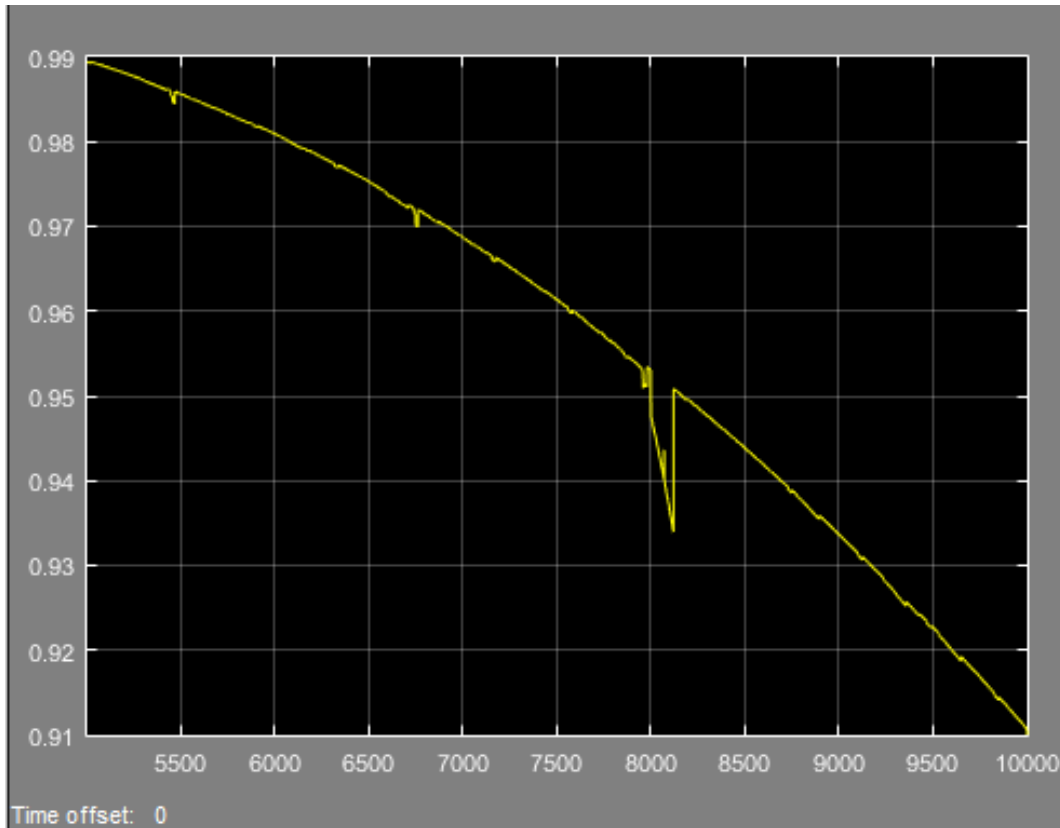


Рисунок 9 – Зависимость вероятности безотказной работы энергочастка с учетом восстановления элементов от времени наработки в часах

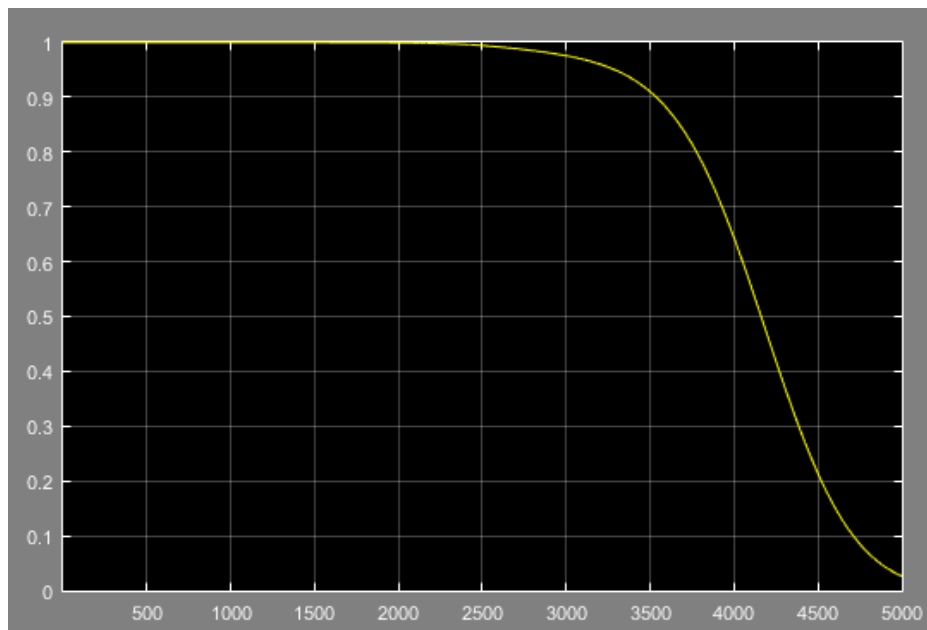


Рисунок 10 – Зависимость вероятности безотказной работы энергочастка без учета восстановления элементов от времени наработки в часах

Из этих графиков можно сделать вывод, что за 10000 часов наработки вероятность безотказной работы системы (обеспечения месторождения электроэнергией с полной располагаемой мощностью) не опускается ниже 0,91. Если не учитывать восстановление элементов системы, то вероятность безотказной работы практически снижается до нуля на 4000 часов наработки. Снижение вероятности до 0,9 наблюдается примерно за 3500 часов наработки. На рисунке 14 в момент времени 8000 можно увидеть некоторое «проседание» вероятности безотказной работы. Это происходит из-за того, что многие объекты после этого времени отправляются на капитальный ремонт, что в рамках этой модели означает их замену. Возможно, данная информация явится исходными данными для принятия решений в рамках производственного менеджмента. Постоянное снижение вероятности объясняется наличием невосстанавливаемых объектов, вероятность безотказной работы которых снижается и периодически не восстанавливается.

Следует заметить, что известная величина вероятности безотказной работы и характер ее изменения по времени позволяют определить практически любые характеристики системы, например, прогнозировать максимальную располагаемую мощность энергоучастка, с учетом надежности как элементов системы, так и всей системы энергоснабжения в целом.

Заключение

Таким образом, разработанное программное расширение системы динамического моделирования Simulink позволяет значительно повысить эффективность и качество разработки математических и компьютерных моделей систем и процессов по определению характеристик надежности этих систем и процессов с использованием метода структурных схем надежности.

Библиографический список

- Ануреев И. И.* Применение математических методов в военном деле / И. И. Ануреев, А. Е. Татарченко. М.: Воениздат, 1967. 242 с.
- Белова В. В.* Возможности применения современных программных комплексов моделирования надежности систем для решения задач оценки надежности изделий ракетно-космической техники на этапе электрических испытаний // Космонавтика и ракетостроение. 2013. №1 (70). С. 118-122.
- Гнеденко Б. В.* Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ / Б.В. Гнеденко, В.К. Беляев, А.Д. Соловьев. М.: Наука, 1965. 524 с.
- Гультияев А.* Визуальное моделирование в среде MATLAB. СПб.: Питер, 2000. 432 с.
- Кириячиков В. А.* Методика и программное средство оценки надежности вычислительных систем с помощью структурных схем надежности / В. А. Кириячиков, Л.К. Москвина // Известия СПбГТЭУ «ЛЭТИ». 2017. №8. С. 29-37.
- Кривель С. М.* Анализ структурной схемы надежности технических систем с использованием Simulink // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 6(137). С. 85-97. DOI 10.21285/1814-3520-2018-6-85-97.
- Кривель С. М.* Оценка надежности технических систем и технических процессов на основе структурной схемы надежности с использованием Simulink // Динамические системы, оптимальное управление и математическое моделирование : Материалы Международного симпозиума, посвященного 100-летию математического образования в Восточной Сибири и

80-летию со дня рождения профессора О. В. Васильева, Иркутск, 07-12 октября 2019 года. Иркутск: Иркутский государственный университет. 2019. С. 328-333.

Кривель С. М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021618135 Российская Федерация. Sim.Reliability1.0 «Программа исследования надежности систем методом структурных схем надежности» : № 2021616999 : заявл. 04.05.2021 : опубл. 24.05.2021 / С. М. Кривель, А. А. Лебедева ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет».

Можжаев А. С. Аннотация программного средства «АРБИТР» (ПК АСМ СЗМА) // Научно-технический сборник «Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика ядерных реакторов». М.: РНЦ «Курчатовский институт». 2008. Выпуск 2. С. 105-116.

Острейковский В. А. Теория надежности. М.: Высш. шк. 2003. 463 с.

Расчет реальной надежности машин. Методики, программные средства, примеры / В. Б. Альгин, А. В. Вербицкий, Д. В. Мишута, С. В. Сиренко // Механика машин, механизмов и материалов. 2011. № 2(15) С. 11-17.

Савицкий Р. С. Автоматизация расчетов надежности структурных схем резервирования // Решетневские чтения. Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий им. ак. М.Ф. Решетнева. 2012. Том 2. №16. С. 638-639.

Сервис-ориентированный распределённый программный комплекс для оценивания и многокритериального анализа показателей надёжности и живучести бортовой аппаратуры малых космических аппаратов: российский и белорусский сегменты / В. А. Зеленцов, С. А. Потрясаев, Б. В. Соколов [и др.] // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16, № 4. С. 118-129. DOI 10.18287/2541-7533-2017-16-4-118-129. EDN YLULUF.

Строгонов А. Обзор программных комплексов по расчету надежности сложных технических систем / А. Строгонов, В. Жаднов, С. Полесский // Компоненты и технологии. 2007. №5. С. 183-190.

Федухин А. В. Моделирование надежности систем средствами пакета программ RELIABmod / А.В. Федухин, В.П. Пасько // Математические машины и системы. Киев: Институт проблем математических машин и систем Национальной академии наук Украины. 2011. №1. Том 1. С. 176-182.

References

Algin V.B., Verbitsky A.V., Mishuta D.V., Sirenko S.V. (2011). Calculation of the real reliability of machines. Methods, software tools, examples. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*. 2 (15): 11-17. (In Russian)

Anureev I.I., Tatarchenko A.E. (1967). Application of mathematical methods in military affairs. Moscow: *Voenizdat*. 1967. 242 p. (In Russian)

Belova V.V. (2013). Possibilities of using modern software systems for modeling the reliability of systems for solving problems of assessing the reliability of rocket and space technology products at the stage of electrical tests. *Cosmonautics and rocket science*. 1 (70): 118-122. (In Russian)

Fedukhin A.V., Pasko V.P. (2011). Modeling of system reliability by means of the RELIABmod software package. *Mathematical machines and systems*. Kyiv: Institute of Problems of Mathematical Machines and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine. 1. Volume 1: 176-182. (In Russian)

Gnedenko B.V., Belyaev V.K., Soloviev A.D. (1965). Mathematical methods in the theory of reliability. The main characteristics of reliability and their statistical analysis. Moscow: *Nauka*. 1965. 524 p. (In Russian)

Gulyaev A. (2000). Visual modeling in MATLAB. St. Petersburg: *Peter*. 2000. 432 p. (In Russian)

Kiryanchikov V.A., Moskvina L.K. (2017). Methodology and software tool for assessing the reliability of computer systems using structural reliability schemes. *Izvestiya SPbGTEU "LETI"*. 8: 29-37. (In Russian)

- Krivel S.M. (2018). Analysis of the structural scheme of reliability of technical systems using Simulink. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. Vol. 22. 6(137): 85-97. DOI 10.21285/1814-3520-2018-6-85-97. (In Russian)
- Krivel S.M. (2019). Reliability assessment of technical systems and technical processes based on a structural reliability scheme using Simulink. *Dynamic systems, optimal control and mathematical modeling* : Proceedings of the International Symposium dedicated to the 100th anniversary of mathematical education in Eastern Siberia and the 80th anniversary of the birth of Professor O.V. Vasiliev, Irkutsk, October 07-12, 2019. Irkutsk: Irkutsk State University. 328-333. (In Russian)
- Krivel S.M., Lebedeva A.A. (2021). Certificate of state registration of the computer program No. 2021618135 Russian Federation. Sim.Reliability 1.0 "Program for the study of reliability of systems by the method of structural reliability schemes" : No. 2021616999 : application 04.05.2021 : publ. 24.05.2021; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Irkutsk state university". (In Russian)
- Mozhaev A.S. (2008). Abstract of the software "ARBITER" (PC ASM SZMA). *Scientific and technical collection "Issues of atomic science and technology. Series "Physics of nuclear reactors"*. Moscow: RSC "Kurchatov Institute". 2: 105-116. (In Russian)
- Ostreikovskiy V.A. (2003). Theory of reliability. Moscow: *Higher School*. 2003. 463 p. (In Russian)
- Savitsky R.S. (2012). Automation of reliability calculations of structural redundancy schemes. *Reshetnev Readings*. Krasnoyarsk: Siberian State University of Science and Technology named after M.F. Reshetnev. Vol. 2. 16: 638-639. (In Russian)
- Strogonov A., Zhadnov V., Polessky S. (2007). Review of software complexes for calculating the reliability of complex technical systems. *Components and technologies*. 5: 183-190. (In Russian)
- Zelentsov V.A. Shaken S.A., Sokolov B.V., Skobtsov V.Yu., Korenyako S.A., Kim D.S., Vakulchik E.N., Kulbak L.I., Nikolaenya E.D., Lapitskaya N.V., Saksonov R.V. (2017). Service-oriented distributed software package for evaluation and multi-criteria analysis of reliability and survivability indicators of onboard equipment of small spacecraft: Russian and Belarusian segments. *Bulletin of Samara University. Aerospace engineering, technologies and mechanical engineering*. Vol. 16. 4: 118-129. (In Russian)