

СТАТЬИ

УДК 621.3.019.3

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЦЕПЕЙ МАРКОВА
ДЛЯ ВЫБОРА НАИЛУЧШЕГО ТИПА РЕЗЕРВИРОВАНИЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ****¹Белоусова М.В., ²Булатов В.В.**¹*ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»,
Санкт-Петербург, e-mail: 27bmw1993@mail.ru;*²*ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, e-mail: bulatov-vitaly@yandex.ru*

Различные автоматизированные системы управления находят широкое применение во всех отраслях промышленности. Стоимость эксплуатации подобных систем зачастую значительно превышает стоимость разработки и изготовления. Поэтому логичным является направление финансовых средств на создание надежной аппаратуры. Применение резервирования является одним из основных способов повышения надежности автоматизированных систем. Структурное резервирование находит широкое применение для повышения надежности источников питания в промышленных системах, исключения узких мест в промышленных сетях Ethernet. Особое внимание следует уделять резервированию контроллеров, которые выполняют ответственную функцию. Применение дублированных программируемых контроллеров дает возможность повысить уровень надежности автоматизированной системы. Однако применение подобных систем является достаточно дорогостоящим. Помимо этого следует помнить, что введение дублирования, троирования или мажоритарной структуры типа «m из n» усложняет процесс вычисления надежности. В представленной статье рассматриваются структуры резервирования с контроллерами управления и блоками питания. Производится оценка показателей надежности на основе цепей Маркова. Решение систем дифференциальных уравнений Колмогорова производится методом Рунге – Кутты четвертого порядка и представлено графически. Проведенные расчеты дают возможность сравнить значения для того, чтобы выбрать оптимальную структуру резервирования с учетом требований производства.

Ключевые слова: автоматизированные системы, контроллеры, отказы, расчет надежности, цепи Маркова**PRACTICAL APPLICATION OF MARKOV CHAINS
TO SELECT THE BEST TYPE OF BACKUP OF AUTOMATED SYSTEM****¹Belousova M.V., ²Bulatov V.V.**¹*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, e-mail: 27bmw1993@mail.ru;*²*Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg,
e-mail: bulatov-vitaly@yandex.ru*

Various automated control systems are widely used in all industries. The cost of operating such systems often significantly exceeds the cost of development and manufacture. Hence, it is logical to direct financial resources to the creation of reliable equipment. The use of redundancy is one of the main ways to improve the reliability of automated systems. Structural redundancy is widely used to improve the reliability of power supplies in industrial systems, eliminating bottlenecks in industrial Ethernet networks. Particular attention should be paid to the redundancy of controllers that perform a critical function. The use of duplicated programmable controllers makes it possible to increase the level of reliability of the automated system. However, the use of such systems is quite expensive. In addition, it should be remembered that the introduction of duplication, tripling, or an “m out of n” majority structure complicates the reliability calculation process. This article discusses redundancy structures with control controllers and power supplies. Reliability indicators are estimated on the basis of Markov chains. The solution of Kolmogorov’s systems of differential equations is performed by the fourth-order Runge-Kutta method and is presented graphically. The performed calculations make it possible to compare the values in order to select the optimal redundancy structure, taking into account the requirements of production.

Keywords: automated systems, controllers, failures, reliability calculation, Markov chains

В настоящее время вопросам резервирования уделяется много внимания в различных отраслях промышленности.

Применение структурного резервирования в автоматизированных системах находит широкое применение. Согласно [1] резервирование – это способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств и/или возможностей сверх минимально необходимых для выполнения требуемых функций.

Наиболее востребованным является резервирование источников питания технической системы, например, резервирования компонентов в промышленной системе являются дублированные источники питания постоянного тока, проходящие через диодный модуль [2].

Другим примером является резервирование промышленных сетей Ethernet, т.е. добавление избыточных линий связи с целью избавления от узких мест (единствен-

ных каналов и узлов передачи данных), от работоспособности которых зависит функционирование промышленной сети.

Ну и конечно, одной из важных задач является резервирование программно-логических контроллеров, например дублированного программируемого контроллера Siemens Simatic S7-400H [3].

В современных контроллерах предусмотрены различные варианты резервирования, причем как отдельных компонентов, так и всего контроллера в целом В [4] выделены следующие варианты резервирования:

- общий горячий резерв всех компонентов контроллера в целом;
- троирование основных компонентов и/или контроллера в целом с «голосованием» результатов обработки сигналов всех контроллеров;
- работа системы по принципу «пара и резерв», когда параллельно работает пара контроллеров с голосованием результатов, а аналогичная пара находится в горячем резерве.

В [5] помимо резервирования контроллеров также представлены схемы резервирования модулей ввода/вывода и датчиков, предложены структуры систем аварийного

включения и отключения с дублированной сетью и ПЛК.

Известно, что снижение надежности приводит к возрастанию потерь при отказах, а повышение надежности – увеличивает стоимость системы и затраты на ее эксплуатацию. В [6] подробно рассматривается экономический аспект резервирования.

Однако до сих пор в литературе не находит отражения численная оценка показателей надежности различных типов резервирования при проектировании сложных технических систем.

На основе анализа марковских моделей произведен выбор наилучшего типа резервирования системы с точки зрения расчета надёжности.

Материалы и методы исследования

В автоматизированных системах поток отказов каждого узла формируется из суммы потоков отказов его составных элементов. Помимо этого возникновение отказа на определенном промежутке времени в целом не влияет на появление отказов в другом интервале, т.е. поток отказов автоматизированной системы можно рассматривать как пуассоновский.

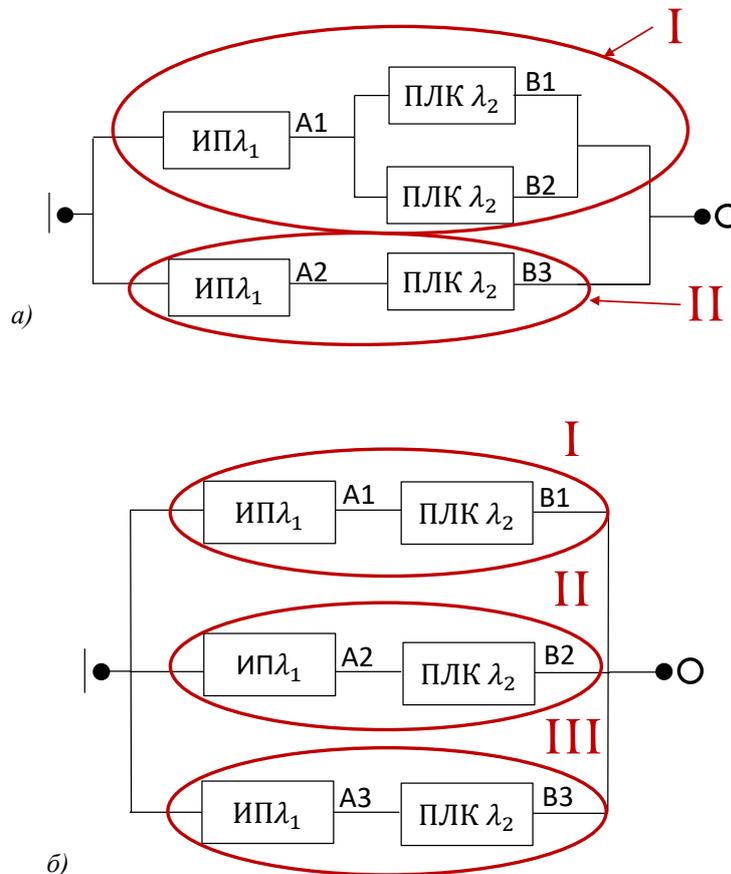


Рис. 1. Структурные схемы надежности

Экспоненциальное распределение типично для сложных объектов, состоящих из многих элементов с различным распределением наработки. Предположение о марковском характере переходов сложной системы обуславливается тем, что если каждый из элементов системы имеет приблизительно экспоненциальный закон распределения безотказной работы, то поведение всей системы может быть описано марковским процессом [7].

Сама методика моделирования по схеме непрерывных марковских процессов подробно описана в [8].

Предположим, что для обеспечения функционирования автоматизированной системы есть два варианта резервирования одного блока (рис. 1). В первом случае имеем смешанное резервирование с применением трех программно-логических контроллеров (ПЛК) и двух источников питания (ИП), а втором случае имеем троирование (три ПЛК и три ИП). В обоих случаях применяется горячее

резервирование. Значения интенсивностей отказов и интенсивностей восстановлений элементов будем брать по опыту эксплуатации систем с узлами-аналогами.

Представленные элементы (ПЛК и ИП) имеют одинаковые характеристики надежности внутри группы.

Составим графы переходов и состояний для каждой из представленных структур. Разобьем первую структурную схему (рис. 1, а) на два блока. Тогда граф для каждого из блоков будет выглядеть следующим образом (рис. 2).

Исходя из представленных графов, вероятность отказа блоков 1 и 2 можно представить как

$$Q_I = P_{011}(t) + P_{001}(t) + P_{100}(t) + P_{010}(t),$$

$$Q_{II} = P_{01}(t) + P_{10}(t).$$

Соответственно, вероятность безотказной работы первой структурной схемы будет равна $P = 1 - Q_I \cdot Q_{II}$.

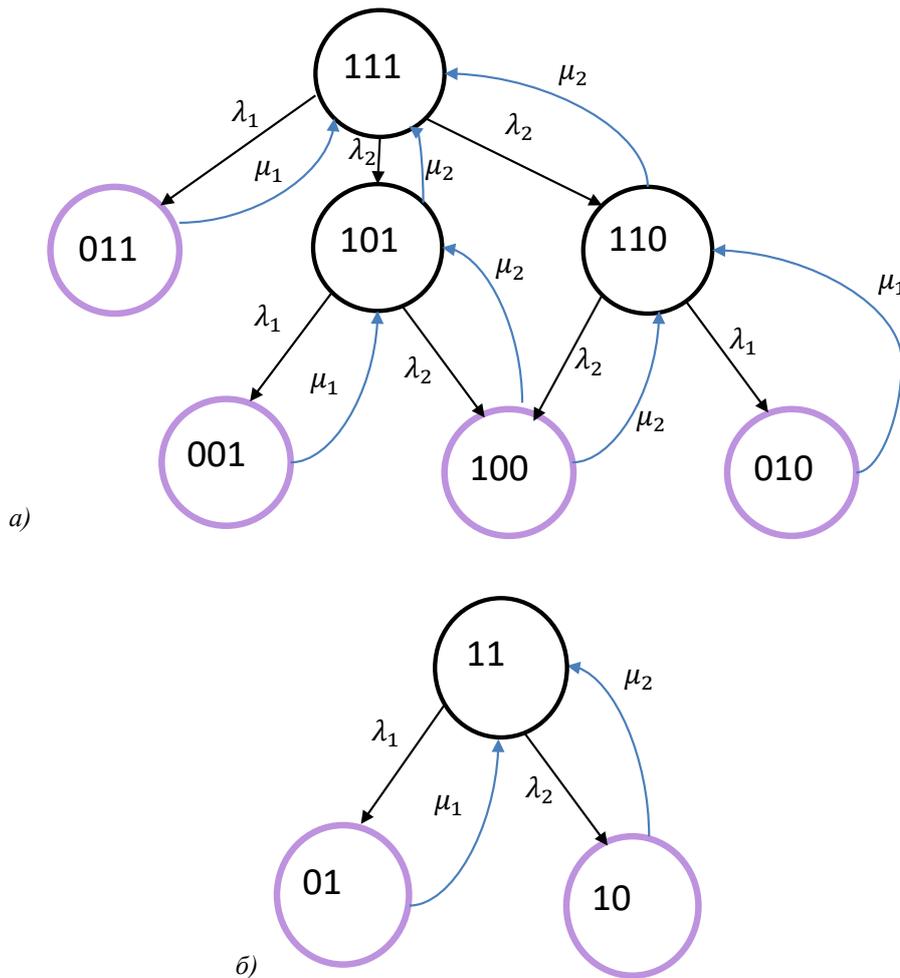


Рис. 2. Граф переходов и состояний для первой структурной схемы: а) блок I; б) блок II

Тогда система дифференциальных уравнений Колмогорова для блока 1 первой структурной схемы будет выглядеть следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_{111}(t)}{dt} = -(\lambda_1 + 2\lambda_2)P_{111}(t) + \mu_1 P_{011}(t) + \mu_2 P_{101}(t) + P_{011}(t) \\ \frac{dP_{011}(t)}{dt} = -\mu_1 P_{011}(t) + \lambda_1 P_{111}(t) \\ \frac{dP_{101}(t)}{dt} = -(\mu_2 + \lambda_1 + \lambda_2)P_{101}(t) + \lambda_2 P_{111}(t) + \mu_1 P_{001}(t) + \mu_2 P_{100}(t) \\ \frac{dP_{001}(t)}{dt} = -\mu_1 P_{001}(t) + \lambda_1 P_{101}(t) \\ \frac{dP_{100}(t)}{dt} = -2\mu_2 P_{100}(t) + \lambda_2 (P_{101}(t) + P_{110}(t)) \\ \frac{dP_{110}(t)}{dt} = -(\mu_2 + \lambda_1 + \lambda_2)P_{110}(t) + \lambda_2 P_{111}(t) + \mu_2 P_{100}(t) + \mu_1 P_{010}(t) \\ \frac{dP_{010}(t)}{dt} = -\mu_1 P_{010}(t) + \lambda_1 P_{110}(t) \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\begin{aligned} P_{111}(t) + P_{011}(t) + P_{101}(t) + P_{001}(t) + P_{100}(t) + P_{110}(t) + P_{010}(t) &= 1 \\ P_{111}(0) &= 1 \end{aligned}$$

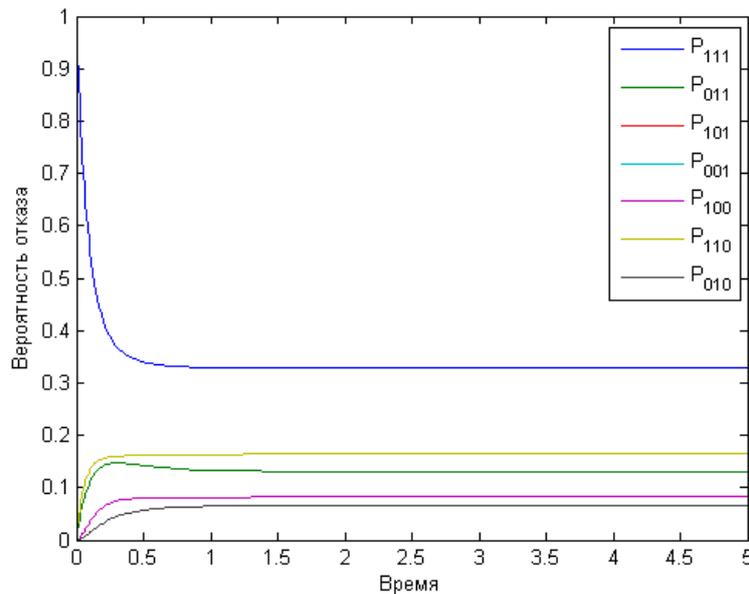


Рис. 3. Графическое решение системы (1) для блока 1 первой структурной схемы

Определим начальные условия:

$$\begin{aligned} P_{011}(0) &= P_{101}(0) = 0 \\ P_{001}(0) &= P_{100}(0) = 0 \\ P_{110}(0) &= P_{010}(0) = 0 \end{aligned}$$

Для приведённой системы дифференциальных уравнений зададим значения пара-

метров интенсивности отказа и восстановления: $\lambda_1 = 2$, $\lambda_2 = 3$; $\mu_1 = 5$, $\mu_2 = 6$.

Решение осуществим в математическом пакете моделирования, используя численные методы. Графически решение на рис. 3.

Составим систему дифференциальных уравнений Колмогорова для блока 2 первой структурной схемы для нахождения вероятностей системы.

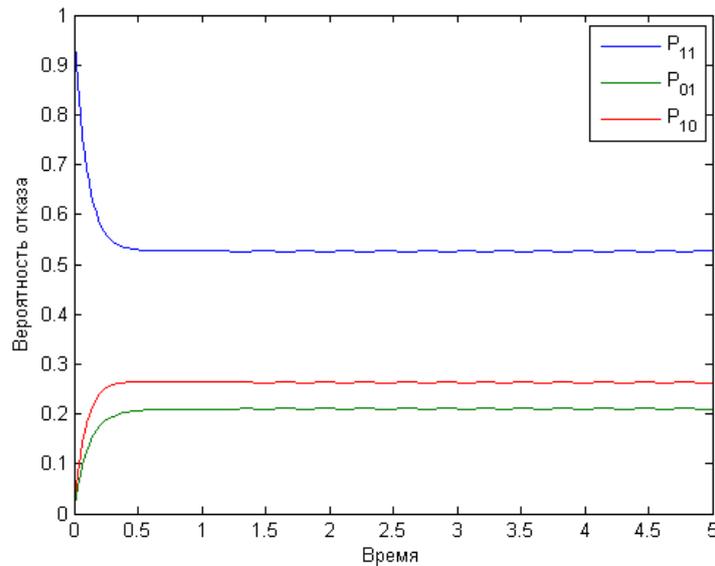


Рис. 4. Графическое решение системы (2) для блока 2 первой структурной схемы

$$\begin{cases} \frac{dP_{11}(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \lambda_2)P_{11}(t) + \mu_1 P_{01}(t) + \mu_2 P_{10}(t) \\ \frac{dP_{01}(t)}{dt} = -\mu_1 P_{01}(t) + \lambda_1 P_{11}(t) \\ \frac{dP_{10}(t)}{dt} = -\mu_2 P_{10}(t) + \lambda_2 P_{11}(t) \end{cases} \quad (2)$$

$$P_{11}(t) + P_{01}(t) + P_{10}(t) = 1.$$

Определим начальные условия:

$$P_{11}(0) = 1; P_{01}(0) = P_{10}(0) = 0.$$

Тогда при тех же исходных данных получим следующее графическое решение системы уравнений (2) (рис. 4).

Рассмотрим вторую структурную схему (рис. 1, б). Данную схему целесообразно разбить на три блока. Для всех блоков получится одинаковый граф состояний (рис. 2, б). Получим идентичную систему уравнений второму блоку первой структуры (2).

Произведем расчет вероятности безотказной работы первой и второй структурной схемы.

Вероятность безотказной работы структурной схемы 1: $P1 = 1 - Q_I \cdot Q_{II} = 0,837$.

Вероятность безотказной работы структурной схемы 2:

$$P2 = 1 - Q_I \cdot Q_{II} \cdot Q_{III} = 1 - Q_I^3 = 0,9592.$$

Результаты исследования и их обсуждение

Таким образом, получаем наглядную разницу в значениях вероятности безотказ-

ной работы двух схем резервирования. Выбор той или иной структуры должен базироваться на всестороннем анализе объекта управления, который будет учитывать все факторы его функционирования.

В статье рассмотрен вопрос о возможных вариантах резервирования управляющих элементов автоматизированных систем. Проведен сравнительный анализ двух структурных схем управления технологическим процессом и осуществлен расчет надежности на базе марковских процессов, который дает возможность оценить уровень надежности проектируемой автоматической системы управления.

Список литературы

- ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 30 с.
- Reddy Bharadwaj Concept of Redundancy in Control Systems. URL: <https://instrumentationtools.com/concept-of-redundancy-in-control-systems/> (дата обращения: 16.09.2022).
- Голубев А.В. Автоматизированные информационно-управляющие системы электростанций: учебное пособие. М. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 180 с.
- Шишов О.В. Технические средства автоматизации и управления: учебное пособие. М.: ИНФРА-М, 2020. 396 с.
- Денисенко В.В. Аппаратное резервирование в промышленной автоматизации // Современные технологии автоматизации. 2008. № 2 (20). С. 90–99.
- Бочкарев С.В., Цаплин А.И., Схиртладзе А.Г. Диагностика и надежность автоматизированных технологических систем. Старый Оскол: ТНТ, 2016. 616 с.
- Белюсова М.В., Булатов В.В., Смирнов Н.В. Оценка параметра потока отказов вагонокомплекта дверей пассажирского поезда // Надежность. 2021. № 3 (21). С. 20–26.
- Голинкевич Т.А. Прикладная теория надежности. М.: Высшая школа, 1977. 160 с.