

УДК 621.321

**АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМОЙ СИСТЕМЫ ПО  
УСЕЧЕННОМУ ГРАФУ СОСТОЯНИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ  
ANALYSIS OF THE RELIABILITY OF THE RESTORABLE SYSTEM  
BY A TRUNCATED STATE GRAPHS**

А.А. Бандюкевич, Г.Д. Козин

Научный руководитель – А. Л. Старжинский, к.т.н., доцент.

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

astarginsky@bntu.by

A. Bandziukevich, H. Kozin

Supervisor – A. Starzhinsky, Candidate of Technical Sciences, Docent

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в данной статье рассматриваются алгоритм и пример анализа надежности восстанавливаемой системы по усеченному графу состояний*

***Abstract:** this article discusses algorithm and example of analysis of the reliability of the restorable system by a truncated state graphs.*

***Ключевые слова:** энергетика, анализ, надежность, граф, метод.*

***Keywords:** energy, analysis, reliability, graph, method.*

### **Введение**

Анализ надежности восстанавливаемой системы по усеченному графу состояний находит применение в энергетике для оценки надежности различных энергетических систем, таких как электростанции, оборудование для передачи и распределения электроэнергии, системы электроосвещения и другие.

Например, применение анализа надежности по усеченному графу состояний позволяет определить наиболее вероятные участки сбоев и отказов в энергетических системах, а также наиболее эффективные методы и технические решения для улучшения их надежности.

Также использование данного метода позволяет производить комплексный анализ и оптимизацию надежности системы в целом, включая восстановительные механизмы, резервирование, мониторинг и диагностику.

В современных энергетических системах, которые часто работают в условиях переменных нагрузок и экстремальных условий, анализ надежности восстанавливаемой системы по усеченному графу состояний является необходимым инструментом для обеспечения безопасности и эффективности функционирования системы в целом.

### **Основная часть**

Пусть граф состояний состоит из  $N$  узлов и  $k$  уровней. Усечём граф до уровня  $n < k$ , сохранив во всех переходах интенсивности отказов и восстановлений. Выберем уровень  $n$  таким, чтобы в нём был как минимум один узел, который соответствует состоянию отказа системы. Усечение графа эквивалентно предположению, что все элементы, которые в результате отказов переводили систему на уровень  $n+1$ , являются идеальными ( $\lambda=0$ ). Тогда показатели надёж-

ности, вычисленные по усечённому графу, будут являться верхней оценкой надёжности системы.

Последовательность выполнения расчёта показателей по усечённому графу состояний системы:

1. Строится усечённый граф состояний до уровня  $n$ , в котором имеется хотя бы одно состояние отказа
2. Вычисляются показатели надёжности по усечённому графу. Они будут верхними оценками надёжности системы.
3. Все состояния уровня  $n$  принимаются за отказовые и вновь вычисляются показатели надёжности, которые будут нижними оценками надёжности системы.
4. Сравниваются между собой результаты вычислений, при значительных отличиях друг от друга, граф состояний увеличивается на один уровень и заново выполняются расчёты верхней и нижней оценок.

Когда разность между нижней и верхней оценками будет удовлетворять заданной точности расчётов, процедуру расчёта можно прекратить [1].

Рассмотрим данный метод анализа на конкретном примере.

Система состоит из 100 последовательно соединенных элементов, каждый из которых дублирован с постоянно включенным резервом (рисунок 1). Все элементы равнонадежны, интенсивности отказов и восстановления имеют значения :  $\lambda = 0,01 \text{ час}^{-1}$  ,  $\mu = 1 \text{ час}^{-1}$ . Систему обслуживает одна бригада. Необходимо определить коэффициент готовности системы и наработку на отказ.

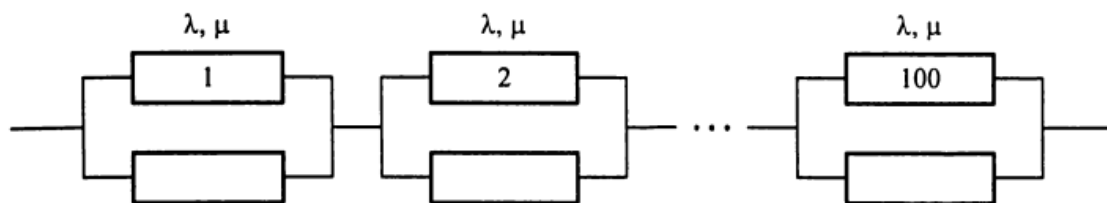


Рисунок 1 – Структурная схема системы

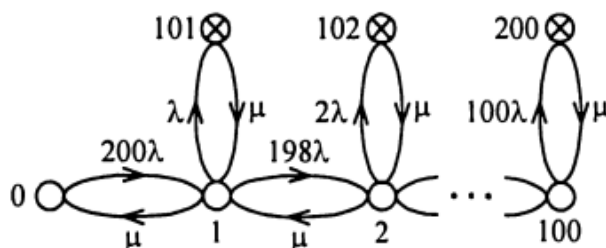


Рисунок 2 – Граф состояний системы

Система состоит из 201 состояния (рисунок 2). Определить точные значения  $K_r$  и  $T$  не просто из-за вычислительных трудностей. Воспользуемся методом усечения графа.

Усечём граф до 2-ого уровня, в котором находится узел 101, соответствующий состоянию отказа системы. Граф имеет вид, показанный на рисунке 3.

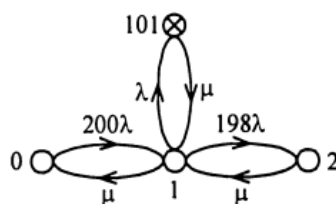


Рисунок 3 – Укороченный граф до второго уровня

Пользуясь топологическим методом, определим коэффициент готовности и наработку на отказ:

$$K_2 = p_0 + p_1 + p_2 = \frac{\mu^3 + 200\lambda\mu^2 + 200 \cdot 198\lambda^2\mu}{\mu^3 + 200\lambda\mu^2 + 200 \cdot 198\lambda^2\mu + 200\lambda^2\mu}$$

$$T = \frac{p_0 + p_1 + p_2}{\mu \cdot p_{101}} = \frac{\mu^3 + 200\lambda\mu^2 + 200 \cdot 198\lambda^2\mu}{200\lambda^2\mu^2}$$

Подставляя в эти выражения значения λ и μ, получим оценку показателей надёжности сверху:

$$K_2 = 0,997, T = 332 \text{ час.}$$

Принимая состояние (2) за отказовое, получим нижнюю оценку показателей надёжности:

$$K_2 = p_0 + p_1 = \frac{\mu^3 + 200\lambda\mu^2}{\mu^3 + 200\lambda\mu^2 + 200 \cdot 198\lambda^2\mu + 200\lambda^2\mu}$$

$$T = \frac{p_0 + p_1}{\mu \cdot p_2 + \mu \cdot p_{101}} = \frac{\mu^3 + 200\lambda\mu^2}{200 \cdot 198\lambda^2\mu^2 + 200\lambda^2\mu^2}$$

Подставляя в эти выражения значения λ и μ, получим:

$$K_2 = 0,43, T = 50 \text{ час.}$$

Диапазон значений  $K_T$  и  $T$  слишком большой. Укоротим граф до состояния третьего уровня. Принцип построения состояния графов и расчёты будут аналогичные.

Оценка показателей надёжности для графа, усечённого до третьего уровня следующая: верхняя:  $K_2 = 0,993, T = 148$  час., нижняя:  $K_2 = 0,98, T = 49$  час.

Из результатов расчёта можно заметить значительное сокращение диапазона  $K_T$ , однако диапазон  $T$  остаётся достаточно широким.

Укоротим граф до 4-ого уровня и получим следующие показатели надёжности:  $K_2 = 0,9889, T = 89$  час., а при усечении графа до 5-ого уровня, получим:

$K_2 = 0,982, T = 55$  час. Этот ответ можно принять за конечный, в связи со значительным сокращением диапазонов значений показателей надёжности.

Коэффициент готовности и наработка на отказ находятся в следующих диапазонах:  $K_2 = 0,98 \div 0,982, T = 49 \div 55$  час. При этом укороченный граф состояний имеет 10 узлов вместо 201 в полном графе.

**Заключение**

Анализ надёжности восстанавливаемой системы по усечённому графу состояний является важным инструментом в энергетике. Он позволяет оценить вероятность безотказной работы системы, учитывая возможность её восстановления, т.е. способность к быстрому восстановлению после сбоя или аварии. Использование усечённого графа состояний позволяет уменьшить количество вершин и рёбер графа, что значительно упрощает анализ и вычисления, не меняя при этом существенных характеристик системы.

Анализ надёжности восстанавливаемой системы по усечённому графу состояний позволяет выявить наиболее критичные для надёжности элементы и параметры системы, а также определить наиболее эффективные методы улучшения её надёжности.

#### Литература

1. Половко, А.М. Основы теории надёжности / А.М. Половко, С.В. Гуров. - СПб.: БХВ-Петербург, 2008.
2. Саульев, В. К. Математическая теория надёжности и восстановления / В.К. Саульев. - М.: МАИ, 1974.
3. Голинкевич, Т.А. Прикладная теория надёжности / Т.А. Голинкевич. - М.: Высшая школа, 1977.