

# ИНТЕРВАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СТРУКТУРНО-СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ БИНОМИАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЕЕ КОМПОНЕНТ

СТРУКОВ А.В.

ОАО "СПИК СЗМА", Санкт-Петербург. E-mail: info@szma.com

**Аннотация.** В статье описан статистический метод получения интервальных оценок показателей надежности структурно-сложной системы (ССС), не приводимой к последовательно-параллельной или параллельно-последовательной структуре. Показано, что применение к такой структуре метода подстановки для интервальной оценки вероятности безотказной работы значительно снижает достоверность получаемых интервальных оценок. Применение метода статистического моделирования (Монте-Карло) позволило доказать, что на точность интервальных оценок влияет вес (вклад) элементов. Статистическое моделирование проводилось с использованием ПК АРБИТР, позволяющим получить точное выражение для функции связи в виде вероятностного многочлена для монотонных систем любой сложности.

**Ключевые слова:** неопределенность, точечная и интервальная оценки, доверительная вероятность, статистическое моделирование, биномиальный план испытаний.

Экспериментальные методы оценки показателей надежности технических объектов играют важную роль в определении достигнутого уровня надежности или его составных частей, обосновании и проверке эффективности мер по доработкам конструкции, коррекции системы технического обслуживания и ремонта, решении различных оптимизационных задач [1].

Под экспериментальной оценкой надежности системы понимают точечную или интервальную оценку ее показателей надежности по результатам испытаний (эксплуатационных наблюдений) элементов [2,3].

Для вычисления точечной оценки показателей надежности объект представляется в виде логической (структурно-функциональной) схемы, описывающей зависимость состояний и переходов объекта от состояний и переходов его элементов с последующим описанием построенной структурной модели [1].

На основе структурной схемы надежности составляется функция связи показателей надежности  $R_c$  объекта с показателями надежности ее элементов, которая может быть представлена в виде функции

$$R_c = \varphi(R_1, \dots, R_i, \dots, R_n), \quad (1)$$

где  $R_i$  - показатель надежности  $i$ -го элемента;

$n$  - число элементов, входящих в систему.

Точечная оценка показателей надежности  $\bar{R}_c$  объекта вычисляется подстановкой оценок показателей надежности  $\bar{R}_i$  элементов объекта в функцию связи

$$\bar{R}_c = \varphi(\bar{R}_1, \dots, \bar{R}_i, \dots, \bar{R}_n), \quad (2)$$

где  $\bar{R}_i$  - оценка показателя надежности  $i$ -го элемента.

Учитывая, что точечная оценка показателя надежности представляет собой лишь частное значение случайной величины, рассчитываются интервальные оценки. Нахождение интервальной оценки показателя надежности сводится к нахождению такого интервала оценок, который с заданной доверительной вероятностью  $\gamma$  «накрывает» неизвестный параметр.

Для определения интервальной оценки надежности объекта по результатам испытаний его элементов могут быть использованы следующие расчетные методы [3]:

метод эквивалентного биномиального плана;

метод подстановки;

комбинированный метод;

метод эквивалентного слабейшего звена.

Указанные методы имеют свои преимущества, недостатки и ограничения. Одним из существенных ограничений применения перечисленных выше методов являются ограничения по

структуре. Единственным методом, который не имеет ограничений в классе монотонных структур, является метод подстановки. При этом явным недостатком данного метода является низкая эффективность интервальных оценок.

В ГОСТ 27-301 [1] отмечается, что «...*Универсальным методом для получения интервальной оценки показателей надежности для объектов любой структуры и при любых сечениях распределений наработок между отказами и времен восстановления элементов, при любых стратегиях и методах восстановления и профилактики служит метод статистического моделирования. <...> Метод статистического моделирования для расчета надежности применяют при отсутствии адекватных аналитических моделей...*».

Для сравнения интервальных оценок, полученных разными методами, будем использовать величину относительной ошибки оценки нижней доверительной границы вероятности безотказной работы (ВБР) [2]

$$\delta = \frac{\bar{R}(t) - \underline{R}(t)}{\bar{R}(t)} . \quad (3)$$

Исходными данными для интервальной оценки показателей надежности наиболее часто являются результаты испытаний элементов по биномиальному плану или для планов, сводимых к биномиальному:

$n_i$  – число отказов элемента за время испытаний (эксплуатации);

$m_i$  – число всех элементов.

В тех случаях, когда испытания проводились по различным планам или результаты испытаний представлены в виде точечной оценки ВБР элемента и количества элементов, поставленных на испытания, или в виде точечной и интервальной оценок ВБР, проводится предварительная обработка исходных данных и приведение их к виду  $n_i, m_i$  [3].

Метод определения интервальных оценок показателей надежности ССС может быть использован для решения задач анализа неопределенности расчетов надежности. Под анализом неопределенности здесь понимается перевод неопределенности в задании исходных параметров – показателей надежности элементов системы – в неопределенность результатов – оценки показателя надежности системы. Одним из результатов анализа неопределенности оценки показателей надежности ССС может быть обоснование дополнительных испытаний некоторых ее элементов.

В качестве численного примера интервальной оценки вероятности безотказной работы сложной системы рассмотрим схему судовой электроэнергетической системы (СЭС), известную как пример 35 [4]. Структурная схема СЭС представлена на рис.1. Аналитическое выражение для расчета вероятности безотказной работы СЭС в виде вероятностного многочлена получено с использованием ПК «АРБИТР» [5].

Выбор именно данной структуры объясняется двумя обстоятельствами:

1) попыткой оценить ее надежность статистическим методом в работе [6] при 200 000 опытах в 1999г.;

2) повторной оценкой в работе [7] в 2007 году при 1 000 000 опытов.

В первом случае авторы заявляли: «...неприводимые высоконадежные системы – это особенно твердые орешки: они не рассчитываются на аналитическим, ни статистическим методом».

Во втором случае авторы утверждали: «...Для рассматриваемого примера ( $t_3=8.76 \cdot 10^3$ (ч) и  $N=10^6$ ) оценка вероятности безотказной работы (P) СЭС  $P(t_3=8.76 \cdot 10^3) \approx 1$ , тогда как «точное» значение P, которое дают ПК АСМ и модули Relex Reliability Studio  $P(t_3=8.76 \cdot 10^3)=0.999703...$ ».

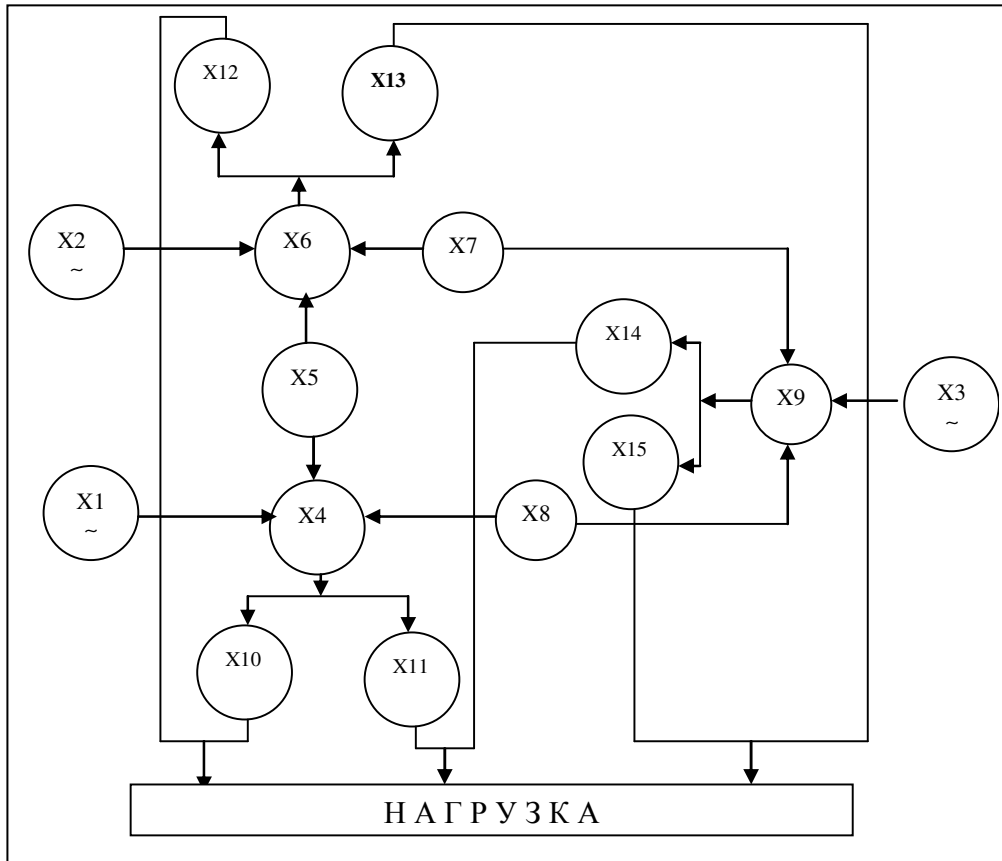


Рисунок 1 – Структурная схема СЭС с тремя генераторами

Соглашаясь с авторами [6] в части «твердых орешков», приведем многочлен аналитического выражения для безотказности безотказной работы СЭС ( $R_c$ ) через показатели надежности всех 15-ти элементов ( $p_i, q_i$ ), состоящий из 167 слагаемых:

$$\begin{aligned}
 R_c = & q_1 p_2 q_3 p_4 p_5 p_6 p_7 q_8 p_9 p_{10} p_{11} q_{13} p_{15} + q_1 q_2 p_3 p_4 p_5 p_6 p_7 q_8 p_9 p_{10} p_{11} q_{13} p_{15} + \\
 & + q_1 q_2 p_3 p_4 q_5 p_6 p_7 p_8 p_9 p_{10} p_{11} p_{13} q_{15} + q_1 p_2 q_3 p_4 q_5 p_6 p_7 p_8 p_9 p_{10} p_{11} q_{13} p_{15} + \\
 & + q_1 p_2 q_3 p_4 p_5 p_6 p_8 p_9 p_{10} q_{11} q_{13} p_{14} p_{15} + q_1 q_2 p_3 p_4 p_5 p_6 p_7 p_9 p_{10} q_{11} q_{12} p_{13} p_{14} + \\
 & + q_1 p_2 q_3 p_4 p_5 p_6 p_8 p_9 q_{10} p_{11} p_{12} q_{13} p_{15} + p_1 p_2 q_3 p_4 q_5 p_6 p_7 q_8 p_9 p_{10} p_{11} q_{13} p_{15} + \\
 & + p_1 q_3 p_4 p_5 p_6 p_7 q_8 p_9 p_{10} q_{11} q_{13} p_{14} p_{15} + p_1 q_3 p_4 p_5 p_6 p_7 q_8 p_9 q_{10} p_{11} p_{12} q_{13} p_{15} + \\
 & + p_1 p_2 q_3 p_4 q_5 p_6 p_8 p_9 p_{10} q_{11} p_{13} p_{14} q_{15} + p_1 p_2 q_3 p_4 q_5 p_6 p_8 p_9 q_{10} p_{11} p_{12} q_{13} p_{15} + \\
 & + p_1 q_3 p_4 p_5 p_6 p_8 p_9 q_{10} q_{11} p_{12} q_{13} p_{14} p_{15} + q_1 p_2 q_3 p_4 q_5 p_6 p_7 p_8 p_9 p_{10} p_{11} p_{13} + \\
 & + q_1 p_2 q_3 p_4 p_5 p_6 p_8 p_9 p_{10} q_{11} p_{13} p_{14} + q_1 p_2 q_3 p_4 p_5 p_6 p_8 p_9 p_{10} p_{11} q_{13} p_{15} + \\
 & + q_1 q_2 p_3 p_4 p_5 p_6 p_8 p_9 q_{10} p_{11} p_{12} p_{13} + p_1 q_3 p_4 p_5 p_6 p_7 q_8 p_9 p_{10} p_{11} q_{13} p_{15} + \\
 & + p_1 q_3 p_4 p_5 p_6 p_7 q_8 p_9 p_{10} q_{11} p_{13} p_{14} + p_1 q_2 p_3 p_4 q_5 p_6 p_7 p_9 p_{10} p_{11} p_{13} q_{15} + \\
 & + q_1 p_2 p_3 p_4 q_5 p_6 p_8 p_9 p_{10} p_{11} p_{13} q_{15} + q_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6 q_8 p_9 p_{10} p_{11} q_{13} p_{15} + \\
 & + p_1 q_3 p_4 p_5 p_6 p_8 p_9 p_{10} q_{11} p_{13} p_{14} q_{15} + p_1 q_3 p_4 p_5 p_6 p_8 p_9 q_{10} q_{11} p_{12} p_{13} p_{14} + \\
 & + p_1 q_3 p_4 p_5 p_6 p_8 p_9 q_{10} p_{11} p_{12} q_{13} p_{15} + q_1 p_3 p_4 p_5 p_6 p_8 p_9 q_{10} p_{11} p_{12} q_{13} p_{15} + \\
 & + q_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6 p_9 p_{10} q_{11} q_{12} p_{13} p_{14} + q_1 q_2 p_3 p_4 p_5 p_6 p_7 p_9 p_{10} p_{11} p_{13} + \\
 & + q_2 p_3 p_6 p_7 p_9 p_{12} q_{13} p_{14} p_{15} + p_1 q_3 p_4 p_8 p_9 p_{10} q_{11} p_{14} p_{15} + q_1 p_2 p_4 p_5 p_6 q_{10} p_{11} p_{12} p_{13} + \\
 & + q_1 p_3 p_4 p_8 p_9 p_{10} q_{11} p_{14} p_{15} + p_2 q_3 p_6 p_7 p_9 p_{12} q_{13} p_{14} p_{15} + p_1 p_2 p_4 q_5 p_6 q_{10} p_{11} p_{12} p_{13} + \\
 & + p_1 p_3 p_4 p_5 p_6 p_9 p_{10} q_{11} p_{13} p_{14} q_{15} + p_1 p_3 p_4 p_5 p_6 p_9 q_{10} p_{11} p_{12} q_{13} p_{15} + \\
 & + p_1 q_3 p_4 p_8 p_9 p_{10} p_{11} p_{15} + q_1 p_2 p_4 p_5 p_6 p_{10} p_{11} p_{13} + p_2 q_3 p_6 p_7 p_9 p_{12} p_{13} p_{14} + \\
 & + q_2 p_3 p_6 p_7 p_9 p_{12} p_{13} p_{14} + q_1 p_3 p_4 p_8 p_9 p_{10} p_{11} p_{15} + p_1 p_2 p_4 q_5 p_6 p_{10} p_{11} p_{13} + \\
 & + p_1 p_4 p_5 p_6 q_{10} p_{11} p_{12} p_{13} + p_1 p_3 p_4 p_9 p_{10} q_{11} p_{14} p_{15} + p_2 p_3 p_6 p_9 p_{12} q_{13} p_{14} p_{15} + \\
 & + p_1 p_4 p_5 p_6 p_{10} p_{11} p_{13} + p_1 p_3 p_4 p_9 p_{10} p_{11} p_{15} + p_2 p_3 p_6 p_9 p_{12} p_{13} p_{14} + \\
 & + p_1 p_2 p_3 p_4 q_5 p_6 p_9 p_{10} q_{11} q_{12} p_{13} p_{14} q_{15} + p_1 p_2 q_3 p_4 q_5 p_6 p_7 q_8 p_9 p_{10} q_{11} q_{12} p_{13} p_{14} + \\
 & + p_1 q_2 p_3 p_4 q_5 p_6 p_7 p_9 p_{10} q_{11} q_{12} p_{13} p_{14} q_{15} + p_1 q_2 q_3 p_4 q_5 p_6 p_7 p_8 p_9 p_{10} p_{11} p_{13} q_{15} + \\
 & + p_1 q_2 q_3 p_4 q_5 p_6 p_7 p_8 p_9 p_{10} q_{11} p_{13} p_{14} q_{15} + p_1 p_2 q_3 p_4 q_5 p_6 p_7 q_8 p_9 p_{10} q_{11} q_{12} q_{13} p_{14} p_{15} +
 \end{aligned}$$

+q1 p2 q3 p4 p5 p6 p7 q8 p9 p10 q11 q12 p13 p14+q1 p2 p3 p4 p5 p6 q8 p9 p10 q11 q12 q13 p14 p15+  
 +q1p2q3p4 p5 p6 p7 q8 p9 p10 q11 q12 q13 p14 p15+q1q2p3p4p5p6p7 q8 p9 p10 q11 q12 q13 p14 p15+  
 +q1 q2 p3 p4 p5 p6 q7 p8 p9 p10 p11 p13 q15+q1 q2 p3 p4 p5 p6 q7 p8 p9 p10 q11 p13 p14 q15+  
 +q1p2p3p4q5 p6 p8 p9 p10 q11 q12 p13 p14 q15+q1 q2 p3 p4 q5 p6 p7 p8 p9 p10 q11 q12 p13 p14 q15+  
 +q1p2q3 p4 q5 p6 p7 p8 p9 p10 q11 q12 p13 p14+q1 p2 q3 p4 q5 p6 p7 p8 p9 p10 q11 q12 q13 p14 p15+  
 +p1 q2 p3 p4 p5 p6 q7 p9 q10 q11 p12 p13 p14+ p1 q2 q3 p4 p5 p6 p7 q8 p9 q10 q11 p12 p13 p14+  
 + p1q2p3p4p5p6q7 p9 q10 q11 p12 q13 p14 p15+ p1 q2 q3 p4 p5 p6 p7 q8 p9 q10 q11 p12 q13 p14 p15+  
 +q1q2p3 p4 p5 p6 q7 p8 p9 q10 q11 p12 p13 p14+q1 q2 p3 p4 p5 p6 q7 p8 p9 q10 q11 p12 q13 p14 p15+  
 +q1 p2 p3 p4 q5 p6 p8 p9 q10 p11 p12 p13 q14+q1 p2 q3 p4 q5 p6 p7 p8 p9 q10 p11 p12 p13 q14 +  
 +p1 p2 q3 p4 q5 p6 q7 p8 p9 q10 q11 p12 p13 p14+ q1 p2 q3 p4 p5 p6 q7 p8 p9 q10 q11 p12 p13 p14+  
 +p1 p2 p3 p4 q5 p6 p9 q10 p11 p12 q13 q14 p15+ q1 p2 p3 p4 p5 p6 q8 p9 q10 p11 p12 q13 q14 p15+  
 +q1p2p3p4q5p6 p8 p9 q10 p11 p12 q13 q14 p15+p1 p2 q3 p4 q5 p6 q7 p8 p9 q10 q11 p12 q13 p14 p15+  
 +q1p2q3 p4p5p6q7p8 p9 q10 q11 p12 q13 p14 p15+p1 p2 q3 p4 q5 p6 p7 q8 p9q10p11p12 q13 q14 p15+  
 +q1p2q3p4 p5p6p7q8p9q10p11 p12 q13 q14 p15+q1 p2 q3 p4 q5 p6 p7 p8 p9 q10 p11 p12 q13 q14 p15+  
 +p1 q2 p3 p4 q5 p6 p7 p9 q10 p11 p12 p13 q14+ q1 q2 p3 p4 p5 p6 p7 q8 p9 q10 p11 p12 p13 q14+  
 +q1 q2 p3 p4 q5 p6 p7 p8 p9 q10 p11 p12 p13 q14+ p1 q2 p3 p4 q5 p6 p7 p9 q10 p11 p12 q13 q14 p15+  
 +q1q2p3p4p5p6p7q8 p9q10p11p12 q13 q14 p15+ q1 q2 p3 p4 q5 p6 p7 p8 p9 q10 p11 p12 q13 q14 p15+  
 +p1 q2 q3 p4 q5 p6 p7 p8 p9 q10 p11 p12 p13+ p1 q2 q3 p4 q5 p6 p7 p8 p9 q10 q11 p12 p13 p14+  
 +p1q2q3 p4 q5 p6 p7 p8 p9 q10 p11 p12 q13 p15+ p1 q2 q3 p4 q5 p6 p7 p8 p9 q10 q11 p12 q13 p14 p15-  
 -p1 p3 p4 p5 p6 p9 p10 p11 p13 p15-p1 p2 p3 p4 p5 p6 p9 p10 p11 p12 p13 p14 -  
 - p1 p2 p3 p4 p6 p9 p10 p11 p12 q13 p14 p15-p1 p2 p3 p4 p6 p9 p10 q11 p12 q13 p14 p15-  
 -p1 p2 p3 p4 p6 p9 p10 q11 p12 p13 p14 p15- p1 p2 p3 p4 p5 p6 p9 q10 p11 p12 p13 p14-  
 - p1 p2 p3 p4 q5 p6 p9 p10 p11 p13 p15- p1 p2 p3 p4 q5 p6 p9 p10 p11 p12 p13 p14-  
 -q1 p2 p3 p4 p6 p8 p9 p10 p11 p12 q13 p14 p15-q1 p2 p3 p4 q5 p6 p8 p9 p10 p11 p12 p13 p14 p15-  
 -q1 q2 p3 p4 q5 p6 p7 p8 p9 p10 p11 p12 p13 p14 p15- p1 q2 p3 p4 p5 p6 p7 p9 q10 p11 p12 p13 p14-  
 -p1 q2 p3 p4 p6 p7 p9 p10 q11 p12 p13 p14 p15- p1 q2 p3 p4 p5 p6 p7 p9 p10 p11 p12 p13 p14-  
 - p1 q2 p3 p4 p6 p7 p9 p10 p11 p12 p13 p14 p15+p1 q2 p3 p4 p5 p6 p7 p9 p10 p11 p12 p13 p14 p15-  
 - p1 p2 q3 p4 q5 p6 p7 p9 p10 p11 p12 p13 p14-p1 p2 q3 p4 p5 p6 p7 p9 q10 p11 p12 p13 p14-  
 - p1 p2 q3 p4 p5 p6 p7 p9 p10 p11 p12 p13 p14-q1 p2 q3 p4 p5 p6 p7 p9 p10 p11 p12 p13 p14-  
 -q1 p2 p3 p4 p5 p6 p8 p9 p10 p11 p13 p15-q1 p2 p3 p4 p5 p6 p9 p10 p11 p12 p13 p14 -  
 - p1 p2 q3 p4 p6 p7 p8 p9 p10 p11 p12 p13 p14 p15- p1 p2 q3 p4 q5 p6 p8 p9 p10 p11 p13 p15-  
 - p1 q3 p4 p5 p6 p8 p9 p10 p11 p13 p15+p1 p2 q3 p4 q5 p6 p7 p8 p9 p10 p11 p12 p13 p14 p15+  
 + p1 p2 q3 p4 p5 p6 p7 p8 p9 p10 p11 p12 p13 p14 p15- p1 p2 p3 p4 p5 p6 p9 q10 p11 p12 q13 p14 p15-  
 -p1 q2 p3 p4 p5 p6 p7 p9 p10 q11 p12 p13 p14 q15- p1 p2 p3 p4 p5 p6 p9 p10 q11 p12 p13 p14 q15-  
 - p1 p2 q3 p4 q5 p6 p7 p9 q10 p11 p12 p13 p14- p1 p2 p3 p4 q5 p6 p9 q10 p11 p12 p13 p14-  
 - p1 p2 q3 p4 p6 p7 p8 p9 p10 p11 p12 q13 p14 p15- q1 q2 p3 p4 p6 p7 p8 p9 p10 q11 p12 p13 p14 p15-  
 - q1 p2 p3 p4 p6 p8 p9 p10 q11 p12 q13 p14 p15- q1 p2 p3 p4 p6 p8 p9 p10 q11 p12 p13 p14 p15-  
 - q1 p2 q3 p4 p5 p6 p7 p9 q10 p11 p12 p13 p14- q1 p2 p3 p4 p5 p6 p9 q10 p11 p12 p13 p14-  
 - p1 p2 q3 p4 p6 p7 p8 p9 p10 q11 p12 q13 p14 p15- p1 p2 q3 p4 p6 p7 p8 p9 p10 q11 p12 p13 p14 p15-  
 -q1q2 p3 p4 p6 p7 p8 p9 p10 q11 p12 q13 p14 p15- p1 q2 p3 p4 p5 p6 p7 p9 q10 p11 p12 q13 p14 p15-  
 -q1q2 p3 p4 p6 p7 p8 p9 p10 p11 p12 q13 p14 p15- p1 q2 p3 p4 p6 p7 p9 p10 q11 p12 q13 p14 p15-  
 - p1q2 p3 p4 p6 p7 p9 p10 p11 p12 q13 p14 p15- q1 q2 p3 p4 p5 p6 p7 p9 p10 p11 p12 p13 p14-  
 - q1q2 p3 p4 p5 p6 p7 p8 p9 p10 p11 p13 p15- q1 p2 p3 p4 p5 p6 p8 p9 p10 q11 q12 p13 p14 p15-  
 -q1q2 p3 p4 p5 p6 p7 p8 p9 q10 p11 p12 q13 p14 p15-q1p2 p3 p4 p5 p6 p8 p9 q10 p11 p12 q13 p14 p15-  
 - p1 p2 q3 p4 p5 p6 p7 p8 p9 q10 p11 p12 q13 p14 p15-p1 p2 q3 p4 p5 p6 p7 p8 p9 q10 q11 p12 p13 p14-  
 -p1p2 q3 p4 p5 p6 p7 p8 p9 p10 q11 p12 p13 p14 q15-q1 p2 p3 p4 p5 p6 q8 p9 p10 p11 p12 q13 p14 p15-  
 -q1 p2 p3 p4 q5 p6 p8 p9 p10 p11 p12 p13 p14 q15- p1 q2 p3 p4 q5 p6 p7 p9 p10 p11 p12 p13 p14 q15-  
 -p1 p2 q3 p4 p5 p6 p7 q8 p9 p10 q11 p12 p13 p14-p1 p2 q3 p4 p5 p6 p7 q8 p9 p10 p11 p12 q13 p14 p15-  
 -q1 q2 p3 p4 p5 p6 p7 p8 p9 q10 p11 p12 p13 p14-q1 p2 q3 p4 p5 p6 p7 p8 p9 p10 p11 p12 q13 p14 p15-  
 -q1 p2 q3 p4 p5 p6 p7 p8 p9 p10 q11 p12 p13 p14-q1 p2 q3 p4 q5 p6 p7 p8 p9 p10 p11 p12 p13 p14-  
 -p1p2q3p4p5p6p7p8 p9 q10 q11 p12 q13 p14 p15- p1 p2 q3 p4 q5 p6 p7 p8 p9 q10 p11 p12 q13 p14 p15-  
 -p1p2q3p4q5p6p7 p8 p9 p10 q11 p12 p13 p14 q15-p1 p2 q3 p4 p5 p6 p7 q8 p9 q10 p11 p12 q13 p14 p15-  
 -p1p2q3p4p5p6p7 q8 p9 p10 q11 p12 q13 p14 p15-p1 p2 q3 p4 q5 p6 p7 q8 p9 p10 p11 p12 q13 p14 p15-  
 -q1p2q3p4p5p6p7 p8 p9 q10 p11 p12 q13 p14 p15-q1 q2 p3 p4 p5 p6 p7 p8 p9 p10 q11 q12 p13 p14 p15-  
 -q1p2q3p4p5p6p7 p8 p9 p10 q11 p12 q13 p14 p15-q1 p2 q3 p4 q5 p6 p7 p8 p9 p10 p11 p12 q13 p14 p15-  
 -q1q2p3p4q5p6p7 p8 p9 p10 p11 p12 p13 p14 q15-q1 q2 p3 p4 p5 p6 p7 q8 p9 p10 p11 p12 q13 p14 p15-  
 -q1 p2 q3 p4 p5 p6 p7 q8 p9 p10 p11 p12 q13 p14 p15

Подставив в (4) для всех элементов  $p_i=q_i=0.5$ , определим «вес» логической функции работоспособности

$$g_{yc(x_1, \dots, x_{15})} = 0.070861816406.$$

Умножив  $g_{yc(x_1, \dots, x_{15})}$  на число всех состояний  $2^{15}$ , получим число путей успешного функционирования равное 2322, из которых только 92 являются кратчайшими [8, стр.197].

Типовая схема статистического моделирования для интервальной оценки показателей надежности в случае наличия исходных данных в виде результатов биномиальных испытаний включает в себя блок генерирования биномиальных случайных чисел, расчетный модуль для вычисления системного показателя надежности в  $j$ -м опыте ( $j=1, \dots, NE$ ) с использованием точного аналитического выражения для функции связи – вероятностного многочлена (4) - и модуль накопления результатов моделирования в NS сериях.

Исходные данные для элементов структуры задавались в виде результатов биномиальных испытаний  $n_i, m_i$ .

Оценим вначале важности элементов структуры по их весам  $g_i$  и вкладам  $B_i$  [8, стр.155]. Для это всем элементам структуры назначалась одинаковая вероятность безотказной работы 0.5. В табл.1 представлены расчетные значения весов и вкладов элементов системы.

Как видно из табл.1, ранжирование групп элементов по весам и по вкладам в этом варианте задания исходных данных совпадает. Следует заметить, что при одинаковых показателях надежности элементов системы  $R_i=0.5$  веса элементов  $g_{xi}$  совпадают с их значимостями  $\xi_i$ . Вклад элемента равен произведению значимости на вероятность безотказной работы, то есть  $B_{xi} = \xi_i \cdot R_i$ .

Таблица 1 – Значимости и вклады элементов СЭС при равнонадежных элементах

Оборудование	№№ элемента	Ri	Вес элемента	Вклад элемента	Ранги	
					по весу	по вкладу
ГРЦ	4,6,9	0.5	0.09485	0.04742	1	1
ВРЦ	10-15	0.5	0.05603	0.02802	2	2
Генераторы	1-3	0.5	0.03992	0.01996	3	3
Переключки	5,7,8	0.5	0.02380	0.01190	4	4

Программа статистического моделирования включает в себя формирование NS=100 серий экспериментов. В каждой серии проводится NE=1000 опытов моделирования ВБР каждого элемента по биномиальной схеме с параметрами  $n_i/$  и  $m_i$ . Результаты оценки ВБР системы по данным 1000 опытов образуют вариационный ряд оценок. Значения 10%, 5% и 1% квантилей вариационного ряда оценок ВБР соответствуют нижней доверительной границы ВБР с двухсторонней доверительной вероятностью 0.80, 0.90 и 0.98. По результатам проведения 100 серий рассчитываются средние значения указанной интервальной оценки ВБР системы.

В таблице 2 представлены результаты статистического моделирования СЭС для различных объемов испытаний. Мерой оценки объема испытаний будем считать величину  $m_i$  – число испытаний  $i$ -го элемента. Оценки вероятности (частоты) отказов элементов в табл.2 представлены в виде отношения  $n_i/ m_i$ , откуда  $R_i = 1 - n_i/ m_i$ .

В строке « $g_{xi}$ » табл.2 представлены веса соответствующих групп элементов, в столбце «№ вар.» представлены номера вариантов задания параметров биномиального распределения.

Вариант №1 соответствует минимальному объему испытаний для  $R_i = 0.5$  ( $m_i=10$ ), вариант №8 – увеличению объема испытаний в 100 раз ( $m_i=1000$ ).

Анализ результатов табл.2 показывает, что наибольшее влияние на изменение неопределенности оценки ВБР системы оказывает изменение неопределенности наиболее значимых элементов. Другими словами, увеличение объема испытаний наиболее значимых (в смысле структурной значимости) элементов, например ГРЦ, снижает неопределенность оценки ВБР системы (в смысле снижения относительной ошибки вида (3)), то есть сужает границы интервальной оценки.

Таблица 2 - Результаты статистического моделирования надежности СЭС.  
I вариант задания исходных данных:  $R_i = 0.5$  ;  $R_c = 0.07086$ .

$g_{xi}$	Генераторы	ГРЦ	ВРЦ	Перем.	Нижние доверительные границы		
					Доверительная вероятность		
№ вар.					$\gamma_2=0.80$	$\gamma_2=0.90$	$\gamma_2=0.98$
1	5/10	5/10	5/10	5/10	0.0290	0.0224	0.0133
2	500/1000	5/10	5/10	5/10	0.0303	0.0236	0.0139
3	5/10	500/1000	5/10	5/10	0.0396	0.0332	0.0230
4	5/10	5/10	500/1000	5/10	0.0359	0.0291	0.0185
5	5/10	5/10	5/10	500/1000	0.0295	0.0230	0.0135
6	500/1000	5/10	5/10	500/1000	0.0309	0.0242	0.0142
7	5/10	500/1000	500/1000	5/10	0.0536	0.0487	0.0395
8	500/1000	500/1000	500/1000	500/1000	0.0650	0.0627	0.0709

В таблице 3 представлены результаты оценки относительной ошибки вида (3) для доверительной вероятности  $\gamma_2=0.80$ . Как видно из данных табл.3 наименьшая относительная ошибка  $\delta$  оценки нижней доверительной границы ВБР системы получена при увеличении объема испытаний ГРЦ, которые имеют первый ранг по весу и вкладу. Далее значения относительной ошибки  $\delta$  располагаются в соответствии с рангами по весу и вкладу.

Таблица 3 – Относительные ошибки оценки нижней доверительной границы ВБР системы при различных объемах испытаний элементов

№ вар.	Генераторы	ГРЦ	ВРЦ	Перекрышки	$\gamma_2=0.80$	$R_c$	$\delta$
1	5/10	5/10	5/10	5/10	0.0290	0.0709	59.1%
2	500/1000	5/10	5/10	5/10	0.0303	0.0709	57.2%
3	5/10	500/1000	5/10	5/10	0.0396	0.0709	44.1%
4	5/10	5/10	500/1000	5/10	0.0359	0.0709	49.4%
5	5/10	5/10	5/10	500/1000	0.0295	0.0709	58.4%

В табл.4 представлены сравнительные характеристики оценок нижней доверительной границы ВБР системы ( $\gamma_2=0.90$ ), полученные с использованием метода статистического моделирования и методом подстановки [3].

Данные табл.4 показывают, что чем выше неопределенность в задании исходных данных элементов, тем больше отличаются результаты статистического моделирования и метода подстановки. При этом, для рассматриваемой структуры при уменьшении неопределенности в задании показателей надежности элемента почти на порядок в процентном исчислении (с 46.5% до 4.1%), неопределенность оценки ВБР системы методом статистического моделирования снижается почти в 6 раз в процентном исчислении (с 68.4% до 11.6%). При этом неопределенность оценки ВБР системы,

рассчитанная методом подстановки снижается почти в 4 раза в процентном исчислении (с 99.0% до 27.1%).

Таблица 4 – Относительные ошибки оценки нижней доверительной границы ВБР системы при различных методах расчета и  $\gamma_2=0.90$

№ вар.	Статистическое моделирование		Метод подстановки	
	НДГ системы	$\delta$	НДГ системы	$\delta$
1	0.0224	68.4%	0.0007	99.0%
2	0.0236	66.7%	0.0015	98.0%
3	0.0332	53.1%	0.0020	97.2%
4	0.0291	59.0%	0.0031	95.6%
5	0.0230	67.6%	0.0007	99.0%
6	0.0242	65.9%	0.0015	98.0%
7	0.0487	31.2%	0.0146	79.3%
8	0.0627	11.6%	0.0517	27.1%

Таким образом, можно сделать вывод, что метод подстановки может быть использован для интервальной оценки показателей надежности СЭС только в случаях незначительной неопределенности исходных данных о показателях надежности элементов.

В другом варианте задания исходных данных показатели надежности элементов подбирались так, чтобы различались ранжирования групп элементов по весам и по вкладам.

В табл.5 представлены исходные данные по показателям надежности элементов, рассчитанные значения весов и вкладов групп элементов.

Как видно из табл. 5 ранжирование групп элементов по весам и по вкладам дают разные ранги этим группам.

Таблица 5 - Значимости и вклады элементов СЭС при разнонадежных элементах

Оборудование	№№ элемента	Ri	Вес элемента	Вклад элемента	Ранги	
					по весу	по вкладу
ГРЦ	4,6,9	0.8	0.20912	0.04183	1	2
ВРЦ	10-15	0.5	0.20193	0.10096	2	1
Генераторы	1-3	0.9	0.03116	0.00312	3	4
Переключки	5,7,8	0.7	0.01203	0.00361	4	3

В табл.6 представлены результаты статистического моделирования СЭС для различных объемов испытаний элементов. В столбце « $\delta$  ( $\gamma_2=0.80$ )» представлены значения относительной ошибки  $\delta$  вида (3) для случая  $\gamma_2=0.80$ .

Данные табл. 6 показывают, что наибольшее улучшение доверительных границ оценки ВБР в смысле уменьшения относительной ошибки  $\delta$  вида (3) наблюдается при увеличении объема испытаний ВРЦ, которые имеют первый ранг по вкладу и второй – по весу. Относительная ошибка интервальной оценки  $\delta$  вида (3) снижается с 41.3% для случая минимальных объемов испытаний (строка «1») до 21.9% (строка «4») при увеличении объемов испытаний ВРЦ.

Данные табл.6 также показывают, что увеличение объемов испытаний групп элементов, имеющих самые младшие ранги по вкладу, практически не влияют на неопределенность оценки ВБР системы.

Таблица 6 – Результаты статистического моделирования надежности СЭС.

II вариант задания исходных данных показателей надежности:

$R_i \Gamma = 0.9$  ;  $R_i \Gamma_{ГЩ} = 0.8$  ;  $R_i \Gamma_{ВГЩ} = 0.5$  ;  $R_i \Pi = 0.7$  ;  $R_c = 0.2796$

Вклады	Генераторы	ГРЩ	ВРЩ	Перем.	Нижние доверительные границы		
					Доверит. Вероятность		$\delta (\gamma_2=0.80)$
№ вар.					$\gamma_2=0.80$	$\gamma_2=0.90$	
1	1/10	2/10	5/10	3/10	0.1641	0.1390	41.3%
2	100/1000	2/10	5/10	3/10	0.1644	0.1390	41.2%
3	1/10	200/1000	5/10	3/10	0.1780	0.1530	36.4%
4	1/10	2/10	500/1000	3/10	0.2184	0.2008	21.9%
5	1/10	2/10	5/10	300/1000	0.1637	0.1380	41.5%
6	100/1000	2/10	5/10	300/1000	0.1640	0.1385	41.4%
7	1/10	200/1000	500/1000	3/10	0.2654	0.2609	5.1%
8	100/1000	200/1000	500/1000	300/1000	0.2679	0.2645	4.2%

Таким образом, можно сделать вывод, что при решении задачи уменьшения неопределенности оценки показателей надежности системы в первую очередь следует принимать меры по уменьшению неопределенности в задании исходных данных элементов, имеющих старшие ранги по вкладам.

В третьем варианте исходных данных для статистического моделирования показатели надежности элементов заимствованы из [6].

Параметры элементов заданы в следующем виде (в нашем обозначении):  $R_1=R_2=R_3=0.999$ ,  $R_4=R_6=R_9=0.998$ ,  $R_5=R_7=R_8=0.997$ ,  $R_{10}=\dots=R_{15}=0.995$ .

Проводился эксперимент, состоящий из  $N=200\ 000$  опытов. В каждом из  $N$  опытов состояние каждого  $i$ -го элемента разыгрывалось по случайной схеме:

$$\text{IF RANDOM} < p_i \text{ THEN } x_i:=1 \text{ ELSE } x_i:=0 \quad (5),$$

где  $\text{RANDOM}$  – независимое значение базовой случайной величины (БСВ).

Отказное состояние системы осуществилось 35 раз. Отсюда,  $\bar{Q}_c = 1.75 \cdot 10^{-4}$ . Точность оценки оценивалась в виде интервала  $\bar{Q}_c = (1.75 \pm 0.9) \cdot 10^{-4}$  [6].

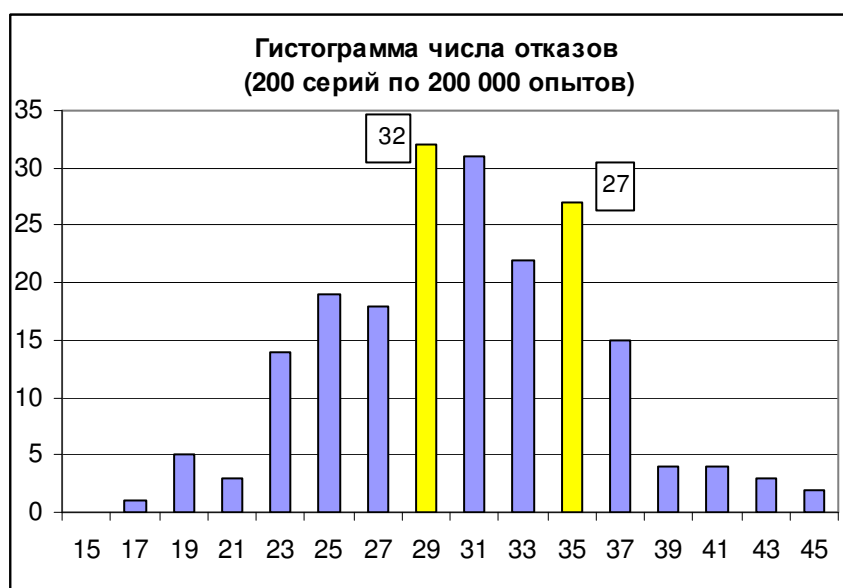


Рисунок 2 – Гистограмма результатов статистического эксперимента



По нашему мнению в работе приведена только некоторая точечная оценка одной серии экспериментов из 200 000 опытов. Нами было проведено 200 серий по 200 000 опытов по схеме, описанной в [6].

На рис.2 представлена гистограмма результатов проведения 200 серий. По оси абсцисс приведены частоты появлений отказовых состояний системы в одной серии. По оси ординат – число серий, в которых наблюдалось это число отказов. На рис.2 выделены цветом два столбца данных. Первый столбец показывает, что наиболее часто (32 раза) наблюдались серии, в которых фиксировалось 29 отказов системы. Указанное число отказов соответствует точечной оценки вероятности отказа СЭС  $Q=29/200000=1.45 \cdot 10^{-4}$ . Второй столбец соответствует частоте появления 35 отказовых состояний системы в серии. Такие серии наблюдались только 27 раз, при этом  $Q=35/200000=1.75 \cdot 10^{-4}$ , что соответствует значению, приведенному в [6].

Точное значение вероятности безотказной работы СЭС можно получить на основе приведенного выше многочлена (4)  $R_c=0.999854$ , при этом вероятности отказа

$$Q_c=1-R_c=1.46 \cdot 10^{-4} \quad (6).$$

Указанный в [6] интервал накрывает точную оценку показателя надежности (6), то есть

$$0.85 \cdot 10^{-4} \leq Q_c=1.46 \cdot 10^{-4} \leq 2.65 \cdot 10^{-4}.$$

В табл.7 приведены значения граничных оценок вероятности безотказной работы СЭС, полученные статистическим методом [6], методом минимальных путей и сечений и методом статистического моделирования с использованием точного аналитического выражения – вероятностного многочлена (4).

Исходные данные для статистического моделирования с использованием вероятностного многочлена

Таблица 7 – Граничные оценки вероятности безотказной работы СЭС ( $R_c=0.999854$ )

Метод расчета	Нижняя граница	Верхняя граница
Статистический метод [6]	0.999 735	0.9999 15
Метод минимальных сечений и путей	0.999 254	1.0
Метод статистического моделирования ( $\gamma_2=0.80$ )	0.999 834	0.9999 15
Метод статистического моделирования ( $\gamma_2=0.90$ )	0.999 827	0.9999 27
Метод статистического моделирования ( $\gamma_2=0.98$ )	0.999 814	0.9999 47

Как видно из табл.7, интервал оценок вероятности безотказной работы системы, полученный статистическим методом [6], частично совпадает с интервалами оценок, полученными методом статистического моделирования при различных доверительных вероятностях. При этом, границы оценки вероятности безотказной работы системы в [6] обусловлены погрешностью метода статистического моделирования. При увеличении числа серий среднее (по сериям) значение вероятности безотказной системы будет стремиться к точной оценке (6) при одновременном снижении вариации оценки.

В методе статистического моделирования с использованием вероятностного многочлена анализируется влияние неопределенности задания исходных данных – вероятностей безотказной работы элементов системы. В нашем случае показатели надежности элементов системы задавались в виде результатов биномиальных испытаний:

$$R_1=R_2=R_3=1-1/1000=0.999, \text{ то есть } n_1=n_2=n_3=1 \text{ и } m_1=m_2=m_3=1000;$$

$$R_4=R_6=R_9=1-2/1000=0.998, \text{ то есть } n_4=n_6=n_9=2 \text{ и } m_4=m_6=m_9=1000;$$

$$R_5=R_7=R_8=1-3/1000=0.997, \text{ то есть } n_5=n_7=n_8=3 \text{ и } m_5=m_7=m_8=1000;$$

$$R_{10} \dots R_{15}=1-5/1000=0.995, \text{ то есть } n_{10} \dots n_{15}=5 \text{ и } m_{10} \dots m_{15}=1000.$$

В качестве исходных данных  $p_i, q_i$  в многочлен (4) подставлялись случайные величины, полученные с использованием типовой схемы генерирования биномиальных случайных чисел.

Методу минимальных сечений и путей соответствуют весьма широкий диапазон граничных оценок, перекрывающий доверительный интервал оценок статистического моделирования даже при  $\gamma_2=0.98$ .

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Для структурно-сложных технических объектов, имеющих монотонную структуру, не приводимую к последовательно-параллельному или параллельно-последовательному соединению элементов, наиболее приемлемым методом интервальной оценки показателей надежности является метод статистического моделирования.

Для реальных высоконадежных технических объектов объемы испытаний обычно ограничены - число отказов  $n_i=0,1,\dots,5$  и число испытаний  $m_i<100$ . Для таких объемов испытаний применение метод подстановки согласно [3] имеет весьма низкую эффективность оценки.

2. В качестве функции связи объекта (функции связи показателей надежности элементов и показателей надежности системы) следует брать точное аналитическое выражение (например, вероятностный многочлен). В этом случае при анализе неопределенности результатов оценки показателя надежности системы учитывается только неопределенность задания исходных данных – показателей надежности элементов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения.
2. РД 50-690-89. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным.
3. РД 50-476-84. Методические указания. Надежность в технике. Интервальная оценка надежности технического объекта по результатам испытаний составных частей. Общие положения.
4. Рябинин И.А. Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем. Л.: «Судостроение»-1971.
5. Нозик А.А., Можяев А.С. Расчет надежности, безопасности и риска при проектировании и эксплуатации технических систем//«Теплоэнергоэффективные технологии», №3-4, 2007, с.35-43.
6. Кутузов О.И., Татарникова Т.М. Моделирование телекоммуникационных сетей. Учебное пособие. СПбГТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 1999.
7. Жаднов В.В., Жаднов И.В., Полесский С.Н. Современные проблемы автоматизации расчетов надежности//«Надежность», №2(21), 2007, с.3-12.
8. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПбГУ, 2007.