DOI: 10.17117/nv.2015.04.063

Поступила (Received): 08.12.2015

<http://ucom.ru/doc/nv.2015.04.063.pdf>

ugatu.ster@gmail.com

Кулаков П.А. Задача безотказной работы сложного технологического объекта

Kulakov P.A. The task of trouble-free operation of complex engineering

Рассмотрена задача синтеза математической модели надежности сложных систем. Проанализированы основные подходы к определению надежности и безотказности сложных систем. Проработано практическое применение предложенных методов для оценки конкретной технологической установки непрерывных динамических процессов на объектах нефтехимической промышленности. Рассмотрены системы с последовательным соединением элементов, с параллельным соединением элементов, соединение m из n , а также модели с ненагруженным резервом и системы с восстановлением. Проведено математическое описание Марковских моделей как системы взаимосвязанных дифференциальных уравнений, описывающих процесс в терминах вероятностей пребывания системы в predetermined состояниях. Рассмотрены варианты моделей резервированной системы с восстановлением с ненагруженным резервом и с нагруженным резервом. Для установки производства катионных нефтеполимерных смол произведен расчет надежности основного оборудования, а также средств измерения и автоматизации. В работе произведен анализ расчета надежности элементов с различной структурной компоновкой. Сделаны выводы о надежности существующей системы и предложены новые схемы компоновки оборудования и приборов автоматизированной системы управления технологическим процессом. Сформулирована целесообразность частичной замены приборов и предложены схемы резервирования

Ключевые слова: надежность, безотказность, Марковские модели, нефтехимия

The problem of synthesis of mathematical models of reliability of complex systems. Analyzed main approaches to determining the reliability and dependability of complex systems. After working for the practical application of the proposed methods for the assessment of the specific installation process of continuous dynamic processes at the facilities of the petrochemical industry. The systems with series-connected cells, the parallel connection of elements, a compound of m of n , and is also a model with Standby and system recovery. The mathematical description of Markov models as a system of interconnected differential equations describing the process in terms of the probability of the system being in predetermined so-stoyaniyah. The variants of models redundant system with recovery from the dormant and loaded reserve. To install the production of petroleum resins cationic calculated the reliability of main equipment, and means of measurement and automation. The paper analyzed the calculation of reliability of elements with different structural arrangement. The conclusions about the reliability of the existing system and the proposed new scheme of arrangement of equipment and devices Automated process control system. We formulate the feasibility of partial replacement of instruments and proposed redundancy scheme

Key words: reliability, reliability, Markov models, petrochemicals

Кулаков Петр Алексеевич

Кандидат технических наук, доцент
Уфимский государственный авиационный
технический университет (филиал)
г. Стерлитамак, ул. Химиков, 21

Kulakov Petr Alekseevich

Candidate of Engineering Sciences,
associate Professor
Ufa State Aircraft Technical University (branch)
Sterlitamak, Himikov st., 21

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-01-97032

Введение (Introduction)

Надежность [1] – свойство объекта сохранять способность выполнять заданные функции в заданном объеме при определенных условиях функционирования. Основы теории надежности изложены в следующих работах [1-7]

Одним из ключевых понятий является вероятностная оценка возникновения нежелательных событий, частота (интенсивность) отказов [7], а также взаимосвязь интенсивности (частоты) отказов и надежности.

Надежность сложных систем рассмотрена в работе [2]. Сложные системы состоящие из нескольких элементов можно представить в виде стандартных моделей. Также детально проработана теория надежности системы из последовательных элементов, независимы друг от друга и надежность системы параллельных элементов рассмотрены в работах [2, 7], а также автором в работах [8-11].

В данной работе проработано практическое применение предложенных методов для оценки конкретной технологической установки.

Материалы и методы (Materials and Methods)

Частота (интенсивность) отказов в общем виде определяется как изменение количества отказов в единицу времени на единицу работающего оборудования [7]:

$$z(t) = \frac{1}{N_{\text{oper}}(t)} \cdot \frac{dN_{\text{fail}}(t)}{dt} \quad (1)$$

где $N_{\text{oper}}(t)$, $N_{\text{fail}}(t)$ – количество работающих и отказавших единиц оборудования, соответственно.

Для установления взаимосвязи интенсивности (частоты) отказов и надежности используется функция надежности $R(t)$, определяемая как отношение количества работающих единиц оборудования $N_{\text{oper}}(t)$ к исходному количеству N [7]:

$$R(t) = \frac{N_{\text{oper}}(t)}{N} \quad (2)$$

или

$$R(t) = \frac{N_{\text{oper}}(t)}{N} = \frac{N - N_{\text{fail}}(t)}{N} = 1 - \frac{N_{\text{fail}}(t)}{N} \quad (3)$$

откуда получаем

$$\frac{dR(t)}{dt} = -\frac{1}{N} \cdot \frac{dN_{\text{fail}}(t)}{dt} \quad (4)$$

В результате

$$z(t) = -\frac{N}{N_{\text{oper}}(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt}, \text{ или } z(t) = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \quad (5)$$

На рис. 1 представлено типичное поведение надежности системы, или некоторого элемента системы во времени.

Рис. 4.1

Рис. 1. Поведение надежности системы

Таким образом, если функция интенсивности отказов $z(t)$ известна (теоретически или экспериментально), то можно вычислить надежность:

$$\frac{dR(t)}{dt} = -z(t) \cdot R(t) \quad (6)$$

Причем $R(0)=1$; $\lim_{t \rightarrow \infty} R = 0.4$

В общем случае [7]

$$R(t) = e^{-\int_0^t z(t) dt} \quad (7)$$

На практике исходят из тех разумных соображений, что после периода приработки и вплоть до начала старения интенсивность отказов $z(t)$ постоянна:

$$\frac{dR(t)}{dt} = -\lambda \cdot R(t) \quad (8)$$

Среднее время наработки на отказ определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTTF}} \quad (9)$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (10)$$

Сложные системы состоящие из нескольких элементов можно представить в виде стандартных моделей [2]:

1. Последовательное соединение элементов.
2. Параллельное соединение элементов.
3. Соединение m из n (считается, что m элементов из n должны работать система работала корректно).
4. Модели с ненагруженным резервом.
5. Системы с восстановлением.

Последовательная система работоспособна, если все элементы системы работоспособны. Надежность системы, состоящей из n последовательных элементов, каждый из которых необходим для функционирования системы, и отказы элементов не зависят друг от друга, равна [2, 8]:

$$R_{\text{series}}(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (11)$$

Предположение $\lambda = \text{Const}$ позволяет рассчитать частоту отказов линейной системы путем суммирования частот отказов индивидуальных элементов:

Если

$$R_{\text{series}} = e^{-\lambda_{\text{series}} t} = e^{-\sum_i \lambda_i \cdot t}, \quad (12)$$

то

$$\lambda_{\text{series}} = \sum_i \lambda_i \quad (13)$$

Для перехода к вероятности отказа последовательной системы произведем разложение в ряд Тейлора, ограничившись членами первого порядка:

$$R_{\text{series}} = e^{-\sum_i \lambda_i \cdot t} = 1 - \sum_i \lambda_i \cdot t \quad (14)$$

Тогда вероятность отказа последовательной системы может быть определена как дополнение надежности до единицы:

$$P_{\text{series}} = 1 - R_{\text{series}} = 1 - (1 - \sum_i \lambda_i \cdot t) = \sum_i \lambda_i \cdot t \quad (15)$$

При расчете надежности системы параллельных элементов можно выделить ряд моделей.

Система 1 из 2 [8].

Система работоспособна, если любой из элементов (каналов), или оба работоспособны (рис. 2)

Рис. 2 – Простая резервированная система 1оо2 без восстановления

$$R_{\text{parallel}} = R_1(1-R_2) + (1-R_1) R_2 + R_1 R_2 \quad (16)$$

При $R_1 = R_2 = R$

$$R_{\text{parallel}} = R_{1002} = 2 \cdot R - R^2 \quad (17)$$

Система 2 из 3 [8].

Система состоит из трех параллельно работающих элементов, «принимающих решение» по большинству голосов. Большинством, кроме единогласного

решения, естественно, являются два голоса из трех возможных. Таким образом, система 2оо3 работоспособна, если хотя бы два элемента системы работоспособны (рис. 3)

Рис. 3. Комбинаторное решение: система 2 из 3

При $R_1 = R_2 = R_3 = R$ определяется следующее выражение надежности системы 2 из 3, то есть вероятности того, что хотя бы 2 элемента системы находятся в рабочем состоянии:

$$R_{2оо3} = 3 \cdot R^2 - 2 \cdot R^3 \quad (18)$$

Если разложить это выражение в ряд Тейлора с точностью до членов второго порядка [8],

$$R_{2оо3} = 3 \cdot e^{-2\lambda t} - 2 \cdot e^{-3\lambda t} = 3 \cdot \left(1 - 2 \cdot \lambda t + \frac{(2 \cdot \lambda t)^2}{2} \right) - 2 \cdot \left(1 - 3 \cdot \lambda t + \frac{(3 \cdot \lambda t)^2}{2} \right) = 1 - 3 \cdot (\lambda t)^2 \quad (19)$$

то можно определить вероятность отказа системы 2 из 3:

$$P_{2оо3} = 3 \cdot (\lambda t)^2 \quad (20)$$

Вероятность отказа системы 2 из 3 в три раза выше, чем системы 1 из 2.

Приведем сравнение надежности 1оо1, 1оо2 и 2оо3

$$R_{1оо1} = R$$

$$R_{1оо2} = 2R - R^2$$

$$R_{2оо3} = 3R^2 - 2R^3$$

Общий случай резервирования для n параллельных элементов выглядит следующим образом. Найдем вероятность отказа и надежность системы из n параллельных элементов при условии, что только один из элементов должен работать, чтобы система сохранила работоспособность (рис. 4)

Рис. 4. Резервирование для n параллельных элементов

Проще всего надежность, как вероятность безотказной работы параллельной системы, определяется через дополнение к общей вероятности отказа. Вероятность отказа i -го элемента:

$$P_i(t) = 1 - R_i(t) \quad (21)$$

Тогда вероятность проявления n независимых событий – отказа n параллельных элементов – согласно теореме об умножении вероятностей независимых событий составляет

$$P_{\text{parallel}}(t) = \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (22)$$

Отсюда вероятность безотказной работы (надежность) параллельной системы определяется как

$$R_{\text{parallel}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (23)$$

Для n идентичных элементов

$$P_{\text{parallel}}(t) = [P_i(t)]^n = [1 - R_i(t)]^n, \text{ и} \quad (24)$$

$$R_{\text{parallel}}(t) = 1 - P_{\text{parallel}}(t) = 1 - [1 - R_i(t)]^n \quad (25)$$

Сведем полученные результаты воедино (таблицы 1):

Таблица 1. Результаты расчетов надежности последовательных и параллельных архитектур

Архитектура	Вероятность отказа
1oo1	λt
1oo2	$(\lambda t)^2$
2oo3	$3(\lambda t)^2$
«2oo4»	$4(\lambda t)^2$

Надежность резервирования m из n

Считается, что m из n элементов должны работать, чтобы вся система работала корректно:

- изначально n элементов параллельно выполняют функции, выполняемые каждым элементов в отдельности;
- m исправных элементов необходимо для получения правильного результата;
- $(n-m)$ элементов – избыточные.

Надежность системы (m из n) определится числом сочетаний i [$m \leq i \leq n$] исправных элементов при отказе $(n-i)$ элементов.

Вероятность отказа $(n-i)$ элементов равна

$$P_{n-i} = P^{n-i} = (1-P)^{n-i} \quad (26)$$

Тогда получаем

$$R_{\text{moon}} = \sum_{i=m}^n C_n^i \cdot R^i \cdot P^{n-i} = \sum_{i=m}^n C_n^i \cdot R^i \cdot (1-R)^{n-i} \quad (27)$$

С понятием надежности неразрывно связано среднее время наработки на отказ. Экспериментально среднего времени работы до отказа MTTF можно определить следующим образом [8]:

$$MTTF = \frac{\sum_{i=1}^N TTF_i}{N}, \quad (28)$$

где TTF_i – Время работы до отказа на i -том запуске системы,
 N – Общее количество отказов в течение тестового интервала.

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt \quad (29)$$

Алгоритм вычисления MTTF последовательной системы следует непосредственно из определений (2.23) и (2.38) [8]:

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i \cdot t} = e^{-(\sum_{i=1}^n \lambda_i) \cdot t} \rightarrow \quad (30)$$

$$MTTF = \int_0^{\infty} e^{-(\sum_{i=1}^n \lambda_i) \cdot t} \cdot dt = 1 / \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (31)$$

MTTF резервированной системы общего вида $MooN$

Соотношение (27) обладает универсальностью, и позволяет найти MTTF для систем произвольной архитектуры. MTTF системы общего вида из N однородных элементов, из которых M элементов необходимо для сохранения работоспособности, определяется непосредственным интегрированием выражения (22) надежности архитектуры $MooN$ [8]:

$$\begin{aligned} R_{moon} &= \sum_{i=m}^n C_n^i \cdot R^i \cdot P^{n-i} = \sum_{i=m}^n C_n^i \cdot R^i \cdot (1-R)^{n-i} \rightarrow \\ MTTF_{moon} &= \sum_{i=m}^n C_n^i \cdot \int_0^{\infty} R^i \cdot (1-R)^{n-i} \cdot dt = \\ &= \sum_{i=m}^n C_n^i \cdot \int_0^{\infty} e^{-i \cdot \lambda \cdot t} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t})^{n-i} \cdot dt \end{aligned} \quad (32)$$

Сумма интегралов не самая простая, но с помощью подстановки $x=e^{-\lambda t}$ она берется:

$$\begin{aligned} MTTF_{moon} &= \sum_{i=m}^n C_n^i \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \int_0^1 x^{i-1} \cdot (1-x)^{n-i} \cdot dx = \\ &= \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{i=m}^n C_n^i \cdot \frac{(i-1)!(n-i)!}{n!} = \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{i=m}^n \frac{1}{i} \end{aligned} \quad (33)$$

Хотя $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} = 0$, то есть необходимое условие сходимости ряда по теореме

Коши соблюдается, тем не менее гармонический ряд $1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n} + \dots$ является расходящимся.

Поэтому

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \text{MTTF}_{\text{moon}}(n) = \infty, \forall m = \text{Const} < n \quad (34)$$

Очевидно, что наилучшими МТТФ обладают архитектуры типа 100N, для любого $n \geq 2$, а из базовых образцов архитектура 1002.

Очевидно, что таковой будет архитектура 1002 и по отношению качества и цены (стартовая цена, цена запасных частей, цена обслуживания).

Сравнение среднего времени наработки на отказ для архитектур 1001, 1002, 2003 МТТФ для архитектуры 1001:

$$\text{MTTF}_{1001} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \cdot dt = \frac{1}{\lambda} \quad (35)$$

МТТФ для архитектуры 1002:

$$\begin{aligned} R_{1002} &= 2R - R^2 = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t} \\ \text{MTTF}_{1002} &= \int_0^{\infty} (2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}) \cdot dt = \frac{3}{2\lambda} \end{aligned} \quad (35)$$

МТТФ для архитектуры 2003:

$$\begin{aligned} R_{2003} &= 3R^2 - 2R^3 = 3e^{-2\lambda t} - 2e^{-3\lambda t} \\ \text{MTTF}_{2003} &= \int_0^{\infty} (3e^{-2\lambda t} - 2e^{-3\lambda t}) \cdot dt = \frac{5}{6\lambda} \end{aligned} \quad (37)$$

Расчет надежности системы с восстановлением. Модели с восстановлением описываются с помощью Марковских процессов.

Согласно гипотезе русского математика Маркова:

Вероятность выхода из данного состояния зависит только от текущего состояния, и не зависит ни от того, сколько времени система находится в этом состоянии, ни от того, как было достигнуто это состояние.

Состояния должны быть:

Взаимно исключающими,

Коллективно исчерпывающими.

Математическое описание Марковских моделей. В самом общем виде модель Маркова состоит из системы взаимосвязанных дифференциальных уравнений, описывающих процесс в терминах вероятностей $P_i(t)$ пребывания системы в предопределенных состояниях S_i , при заданных начальных условиях $P(0)$.

Пусть модель имеет N состояний, а интенсивность (частота) перехода из состояния S , в состояние S_i определяется, как X_{ci} . Тогда соответствующая этой модели система уравнений будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{dP_1}{dt} &= \lambda_{11} \cdot P_1 + \lambda_{12} \cdot P_2 + \dots + \lambda_{1N} \cdot P_N \\ \frac{dP_2}{dt} &= \lambda_{21} \cdot P_1 + \lambda_{22} \cdot P_2 + \dots + \lambda_{2N} \cdot P_N \\ &\dots \\ \frac{dP_N}{dt} &= \lambda_{N1} \cdot P_1 + \lambda_{N2} \cdot P_2 + \dots + \lambda_{NN} \cdot P_N \end{aligned} \quad (38)$$

Или в матричном виде:

$$\frac{d\bar{P}}{dt} = [\lambda] \cdot \bar{P}. \quad (39)$$

Одно из уравнений отбрасывается, а к оставшемуся (N-1) уравнению добавляется условие нормировки.

$$\sum_{i=1}^N P_i(t) = 1 \quad (40)$$

Стационарное решение может быть найдено в предположении, что в бесконечности изменение вероятности равно нулю. Далее решают Марковские уравнения с помощью преобразований Лапласа.

Можно выделить 2 варианта моделей резервированной системы с восстановлением: с ненагруженным резервом и с нагруженным резервом.

Для нагруженного резерва

$$R = e^{-t_0/T} \quad (41)$$

где T средняя наработка на отказ системы состоящей из k рабочих и n резервных элементов системы с нагруженным резервом

$$T = \frac{1}{k\lambda C_n^k \gamma^n} \quad (42)$$

Для ненагруженного резерва

$$R = e^{-t_0/T} \quad (43)$$

где T средняя наработка на отказ системы состоящей из k рабочих и n резервных элементов системы с ненагруженным резервом

$$T = \frac{1}{k\lambda(k\gamma)^n} \quad (44)$$

Результаты (Results)

С учетом предварительного анализа установки производства катионных нефтеполимерных смол [9-12] произведен расчет надежности средств измерения и автоматизации (таблица 2) по формуле

$$R_k(t) = e^{-\lambda_k t} \quad (45)$$

где λ_k – интенсивность отказа данного вида прибора.

Оценка надежности системы автоматизации.

Надежность системы автоматизации рассчитали по формуле

$$R_{sa} = R_d(t) \cdot R_n(t) \cdot R_p(t) \cdot R_i(t) \cdot R_c(t) \quad (46)$$

где $R_d(t)$ – надежность датчика,

$R_n(t)$ – надежность преобразователя,

$R_p(t)$ – надежность регулятора (регистратора),

$R_i(t)$ – надежность исполнительного механизма,

**Таблица 2. Оценка безотказности блоков
существующих средств измерения и контроля**

Наименование оборудования (тип, наименование аппарата, назначение)	Надежность системы	
1. Уровнемер	$R_{д1}$	0,933
2. Диафрагма камерная с импульсными трубками и запорными вентилями для трубопровода	$R_{д2}$	0,996
3. Датчик давления	$R_{д3}$	0,974
4. Термометр	$R_{д4}$	0,963
5. Дифманометр	$R_{п1}$	0,998
6. Измерительный преобразователь	$R_{п2}$	0,982
7. Электропневмопреобразователь	$R_{п3}$	0,937
8. Прибор вторичный пневматический	$R_{р1}$	0,971
9. Регулятор пропорционально-интегральный	$R_{р2}$	0,831
10. Клапан отсечной	$R_{и1}$	0,950
11. Клапан регулирующий с исполнительным механизмом	$R_{и2}$	0,940
12. Светозвуковая сигнализация	$R_{с1}$	0,982

В таблице 3 приведена методика расчета для каждой системы автоматизации.

Таблица 3. Безотказность блоков системы автоматизации

Наименование	Надежность	Произведение надежностей				
1. Регистрация и сигнализация уровня	R_{sa1}	$R_{д1}$	$R_{р1}$	$R_{с1}$		
2. Регистрация уровня	R_{sa2}	$R_{д1}$	$R_{р1}$			
3. Регулирование расхода	R_{sa3}	$R_{д2}$	$R_{п1}$	$R_{р2}$	$R_{и2}$	
4. Отсекатель уровня	R_{sa4}	$R_{д1}$	$R_{р2}$	$R_{с1}$	$R_{и2}$	
5. ЭПК по давлению на подаче в олигомеризатор	R_{sa5}	$R_{д3}$	$R_{п1}$	$R_{р2}$	$R_{и2}$	$R_{с1}$
6. Регистрация расхода	R_{sa6}	$R_{д2}$	$R_{п1}$	$R_{р1}$		
7. Регулирование температуры и сигнализация	R_{sa7}	$R_{д4}$	$R_{п2} R_{п3}$	$R_{р2}$	$R_{и2}$	$R_{с1}$
8. Регистрация, индикация температуры	R_{sa8}	$R_{д4}$	$R_{п2} R_{п3}$	$R_{р1}$		
9. Регистрация давления	R_{sa9}	$R_{д3}$	$R_{п1}$	$R_{р1}$		
10. Регулирование давления	R_{sa10}	$R_{д3}$	$R_{п1}$	$R_{р2}$	$R_{и2}$	
11. Регулирование уровня	R_{sa11}	$R_{д1}$	$R_{р2}$	$R_{и2}$		
12. Регулирование температуры	R_{sa12}	$R_{д4}$	$R_{п2} R_{п3}$	$R_{р2}$	$R_{и2}$	
13. Регулирование уровня и сигнализация	R_{sa13}	$R_{д1}$	$R_{р2}$	$R_{и2}$	$R_{с1}$	

Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Далее проведена оценка надежности технологической системы. В таблице 5 приведен алгоритм расчета для каждой системы автоматизации, а результаты – в таблице 6.

Таблица 4. Результаты расчетов безотказности блоков систем автоматизации

Наименование	Безот-ть	Произведение надежностей				
1. Регистрация и сигнализация уровня	0,8898	0,9331	1,0000	1,0000		
2. Регистрация уровня	0,9061	0,9331	1,0000			
3. Регулирование расхода	0,7766	0,9960	1,0000	1,0000	0,9964	
4. Отсекатель по уровню	0,7157	0,9331	1,0000	1,0000	0,9964	
5. ЭПК по давлению на подаче в олигомеризатор	0,6481	0,9740	1,0000	1,0000	0,9964	1,0000
6. Регистрация расхода	0,8393	0,9740	1,0000	1,0000		
7. Регулирование температуры и сигнализация	0,6799	0,9630	1,0000	1,0000	0,9964	1,0000
8. Регистрация, индикация температуры	0,8607	0,9630	1,0000	1,0000		
9. Регистрация давления	0,8205	0,9740	1,0000	1,0000		
10. Регулирование давления	0,6599	0,9740	1,0000	1,0000	0,9964	
11. Регулирование уровня	0,7288	0,9331	1,0000	1,0000		
12. Регулирование температуры	0,6923	0,9630	1,0000	1,0000	0,9964	
13. Регулирование уровня и сигнализация	0,7157	0,9331	1,0000	1,0000	0,9820	

Таблица 5. Безотказность блоков технологических системы

Блок	Безот-ть	Безотказность существующих блоков						
1. Подачи промотора	R_{s1}	R_{sa1}	R_{sa2}					
2. Подачи ацетона	R_{s2}	R_{sa1}	R_{sa2}					
3. Подачи катализатора	R_{s3}	R_{sa4}	R_{sa1}	R_{sa3}	R_{sa1}			
4. Подачи сырья	R_{s4}	R_{sa1}	R_{sa1}	R_{sa5}	R_{sa3}	R_{sa6}		
5. Олигомеризация I ст	R_{s5}	R_{sa7}	R_{sa7}	R_{sa8}	R_{sa9}	R_{sa5}		
6. Олигомеризация II ст	R_{s6}	R_{sa7}	R_{sa10}					
7. I ст дегазации	R_{s7}	R_{sa8}	R_{sa9}	R_{sa3}	R_{sa1}	R_{sa2}	R_{sa11}	R_{sa10}
		R_{sa13}	R_{sa2}	R_{sa10}	R_{sa7}	R_{sa3}	R_{sa3}	R_{sa1}
8. Дезактивации	R_{s8}	R_{sa8}	R_{sa3}	R_{sa8}	R_{sa11}			
9. II ст дегазации	R_{s9}	R_{sa12}	R_{sa10}	R_{sa8}	R_{sa3}	R_{sa9}	R_{sa13}	R_{sa13}
10. Линия освобождения аппаратов	R_{s10}	R_{sa1}	R_{sa1}	R_{sa1}				

Таблица 6. Результаты расчетов безотказности блоков технологических систем

Блок	Безот-ть	Безотказность блоков до модернизации						
1. Подачи промотора	0,81	0,8898	0,9061					
2. Подачи ацетона	0,81	0,8898	0,9061					
3. Подачи катализатора	0,441	0,7157	0,8898	0,7766	0,8899			
4. Подачи сырья	0,331	0,8898	0,8898	0,6481	0,7766	0,8393		
5. Полтмеризатор I ст	0,46	0,8607	0,8205	0,6481				
6. Полтмеризатор II ст	0,45	0,6799	0,6599					
7. I ст дегазации	0,03	0,8607	0,8205	0,7766	0,8898	0,9061	0,7288	0,6599
		0,7157	0,9061	0,6599	0,6799	0,7766	0,7766	0,8898
8. Дезактивации	0,42	0,8607	0,7766	0,8607	0,7288			
9. II ст дегазации	0,13	0,6924	0,6599	0,8607	0,7766	0,8205	0,7157	0,7157
10. Линия освобождения аппаратов	0,70	0,8898	0,8898	0,8898				

Повышение надежности установки проводили путем замены приборов с неудовлетворительной надежностью и применением систем резервирования.

С целью повышения надежности были подобраны новые приборы автоматизации и контроля, представленные в таблице 7 и произведен расчет.

Таблица 7. Оценка надежности подобранных средств автоматизации и контроля

Наименование оборудования (тип, наименование аппарата, назначение)	Безотказность	
1. Контроллер	$R_{дн1}$	0,8963
2. Датчик уровня	$R_{дн2}$	0,9679
3. Датчик давления	$R_{дн3}$	0,9913
4. Датчик контроля потока	$R_{дн4}$	0,8963
5. Датчик температуры	$R_{дн5}$	0,9783
6. Регулирующий клапан	$R_{дн6}$	0,9855
7. Отсекающий клапан	$R_{дн7}$	0,9956

После установки резервного контроллера и датчика контроля потока (из за его низкой безотказности) их безотказность становится равной 0,999999, с учетом, что безотказность остальных элементов значительно меньше 1, можно принять равной 1.

В таблице 8 представлен результаты расчета надежности технологических блоков с применением Марковских моделей.

Таблица 8. Результаты расчетов безотказности технологических систем

Блок	Безотказность блоков после модернизации
1. Поддачи промотора	0,94
2. Поддачи ацетона	0,94
3. Поддачи катализатора	0,90
4. Поддачи сырья	0,91
5. Полимеризатор I ст.	0,92
6. Полимеризатор II ст.	0,96
7. I ст. дегазации	0,45
8. Дезактивации	0,81
9. II ст. дегазации	0,73
10. Линия освобождения аппаратов	0,91

Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion)

В работе произведен анализ расчета надежности элементов с различной структурной компоновкой. Сделаны выводы о неудовлетворительной надежности существующей системы и предложены новые схемы компоновки оборудования и приборов автоматизированной системы управления технологическим процессом.

Большое количество приборов и оборудования снижает общую надежность отдельных блоков. Из таблицы 8 видно, что надежность системы автоматизации в системах I и II ступенях дегазации даже с применением Марковских моделей состояний и переходов имеет низкие показатели. Данная ситуация

объясняется большим числом вспомогательного оборудования обвязанного приборами автоматизации и контроля. Выход из строя одного из них существенно не повлияет на ход основного процесса и не переводит процесс в состояние «Аварийная ситуация».

Список используемых источников:

1. Беляев Ю.К., Богатырев В.А., Болотин В.В. и др. Надежность технических систем: справочник / Под ред. И.А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985. 608 с.
2. ГОСТ Р 51901.14-2005 Менеджмент риска. Метод структурной схемы надежности. М.: Стандартинформ. 28 с.
3. Острекровский В.А. Теория надежности. М.: Высш. шк., 2003. 463 с.
4. Глазунов Л.П., Грабовецкий В.П., Щербаков О.В. Основы теории надежности автоматизированных систем управления. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 208 с.
5. Атовмян И.О., Вайрадян А.С., Хетагурова Я.А. Надежность автоматизированных систем управления. М.: Высш. Школа, 1979. 287 с.
6. Ястребенецкий М.А. Надежность технических средств в АСУ технологическими процессами. М.: Энергоиздат, 1982. 232 с.
7. Федоров Ю.Н. Основы построения взрывоопасных производств. М.: СИНТЕГ, 2006. 720 с.
8. Кулаков П.А. Обеспечение безопасности технологической установки производства олигопипериленового синтетического каучука: Дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. 05.26.03: Казань, 2011. 121 с.
9. Попов Б.И., Шарафиев Р.Г., Ризванов Р.Г., Кулаков П.А. Анализ возможных опасностей при эксплуатации установки синтетического олигопипериленового каучука // Безопасность труда в промышленности. 2006. №12. С. 60-63.
10. Кулаков П.А., Шарафиев Р.Г., Ризванов Р.Г. Основные этапы анализа риска установки производства катионных нефтеполимерных смол и пути повышения безопасности // Безопасность жизнедеятельности. 2009. №5. С. 14-17.
11. Кулаков П.А., Шишкина А.Ф., Кулакова А.Ф. Адаптивный алгоритм управления дозированием реагентов при производстве катионных нефтеполимерных смол // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. URL: <http://www.science-education.ru/118-14172>
12. Кулаков П.А., Шишкина А.Ф., Карасев Е.М. Управление функционированием объектов нефтехимии на основе менеджмента риска // Современные проблемы науки и образования. 2014. №6. URL: <http://www.science-education.ru/120-16482>

References:

1. Reliability of technical systems: Handbook / Belyaev Y.K., Bogatyrev V.A., Bolotin V.V. M.: Radio and Communications, 1985. 608 p.
2. IEC 61078:2006 Analysis techniques for dependability – Reliability block diagram and boolean methods (MOD).
3. Ostrekovskij V.A. Reliability theory. M.: High school, 2003. 463 p.
4. Glazunov L.P., Graboveckij V.P., Shcherbakov O.V. Basic theory of reliability of automated control systems. L.: Energoatomizdat, 1984. 208 p.
5. Atovmyan I.O., Vajradyan A.S., Hetagurova Y.A. The reliability of automated control systems. M.: High school, 1979. 287 p.
6. Yastrebenekij M.A. The reliability of technical means in automation of technological processes. M.: Energoatomizdat, 1982. 232 p.
7. Fedorov Y.N. Fundamentals of hazardous areas. M.: SINTEG, 2006. 720 p.
8. Kulakov P.A. Ensuring the safety of the process plant production oligopiperilenovogo synthetic rubber: Dis. for the degree of PhD. tehn. Sciences. Kazan, 2011. 121 p.
9. Popov B.I., Sharafiev R.G., Rizvanov R.G., Kulakov P.A. Analysis of the potential hazards in the operation of the installation of synthetic rubber oligopiperilenovogo. Safety in industry. 2006. №12. P. 60-63.
10. Kulakov P.A., Sharafiev P.G., Rizvanov P.G. The main stages of risk analysis setting production cationic petroleum resins and ways to improve safety. Health and Safety. 2009. №5. P. 14-17.

11. Kulakov P.A., Shishkina A.F., Kulakova A.F. *The adaptive control algorithm dispensing of reagents in the production of petroleum resins cationic. Modern problems of science and education. 2014. № 4.*
URL: <http://www.science-education.ru/118-14172>
12. Kulakov P.A., Shishkina A.F., Karasev E.M. *Manage the operation of petrochemical-based risk management. Modern problems of science and education. 2014. №6. URL: http://www.science-education.ru/120-16482*

© 2015, Кулаков П.А.

*Задача безотказной работы сложного
технологического объекта*

© 2015, Kulakov P.A.

*The task of trouble-free operation of complex
engineering*