

Повышение надежности подсистемы контроля и управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива

К.К. Оспанов

Академия гражданской защиты им. М. Габдуллина МЧС Республики Казахстан

Аннотация: В работе представлены результаты расчета показателей надежности и анализа отказоустойчивости подсистемы контроля и управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива. Обоснована эффективность резервирования критических элементов для повышения функциональной безопасности.

Ключевые слова: надежность, отказоустойчивость, паровая завеса, трубчатая печь, гидроочистка, дизельное топливо, резервирование, функциональная безопасность.

Введение

Обеспечение пожаровзрывобезопасности на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях – приоритетная задача, в которой важную роль играют автоматические системы паровых завес трубчатых печей (ПЗТП), входящие в состав системы противоаварийной автоматической защиты.

В работе [1] были предложены математическая модель и алгоритм управления давлением пара в ПЗТП технологической установки гидроочистки дизельного топлива. Особенностью предложенного алгоритма является использование двойного скользящего среднего для фильтрации текущей ошибки регулирования, что обеспечивает непрерывное и эффективное функционирование паровых завес при резком увеличении потребления пара из паропроводной сети нефтеперерабатывающего комплекса.

Для реализации функций данного алгоритма требуется разработка комплекса технических средств, а также проведение оценки надежности создаваемой подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП технологической установки гидроочистки дизельного топлива (подсистема).

Основная часть

Комплекс технических средств создаваемой подсистемы включает в себя датчик давления пара, установленный в паропроводной линии ПЗТП, контроллер системы противоаварийной автоматической защиты, сетевые коммутаторы, соединенные со станцией оператора, а также блок управления регулирующим клапаном, обеспечивающим подачу пара на технологические нужды установки.

На рис.1 представлена структурная блок-схема комплекса технических средств подсистемы на базе контроллера Siemens S7–300, согласно [2].

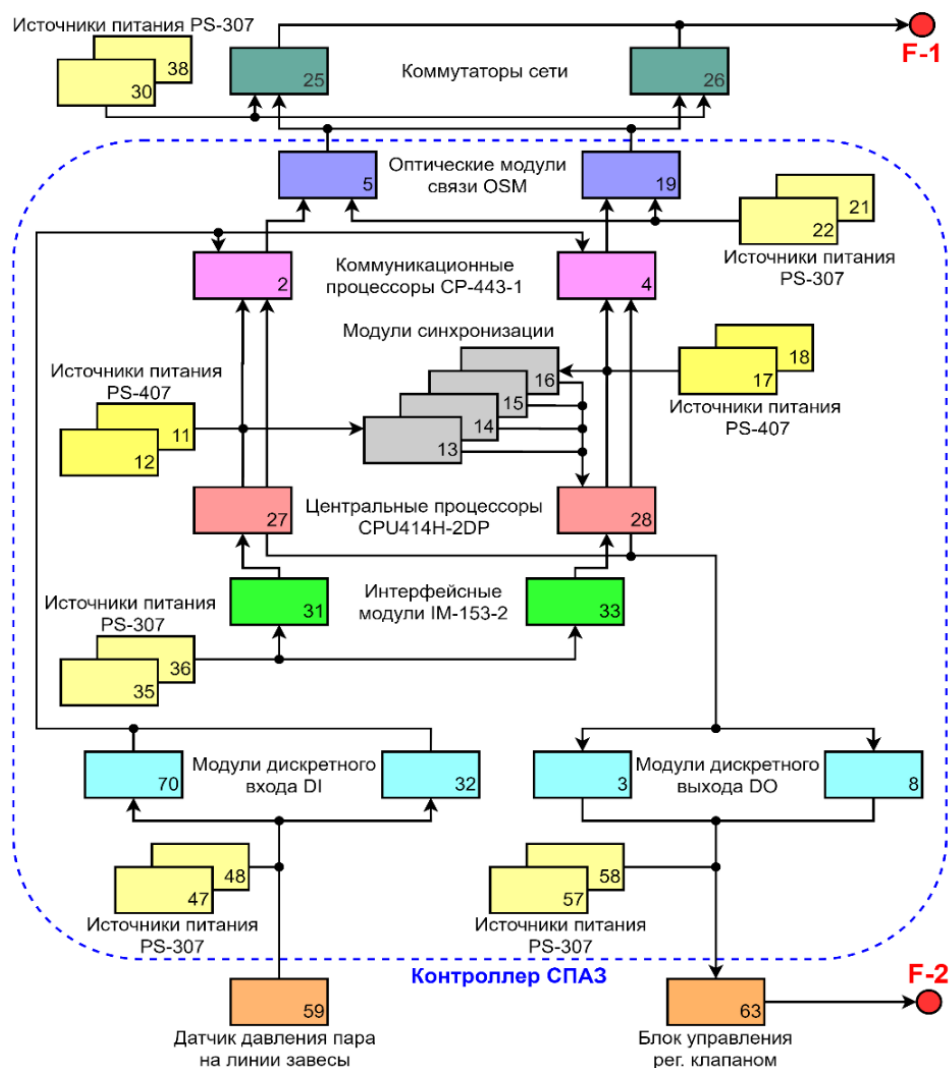


Рис.1 – Структурная блок-схема комплекса технических средств подсистемы на базе контроллера Siemens S7–300 [2]

Разрабатываемая подсистема является частью автоматизированной системы управления (АСУ) технологического процесса установки гидроочистки дизельного топлива и представляет собой структурно сложную систему [3]. Проектирование АСУ требует обязательного расчета показателей надежности и безопасности в соответствии с российскими и международными стандартами, а также руководящими документами, такими как Руководства по безопасности, утвержденные приказами Ростехнадзора России № 414 от 28.11.2022 г. и № 387 от 03.11.2022 г.

Согласно ГОСТ 27.301–95, основные задачи проектных расчетов надежности и безопасности включают сравнительный анализ схемно-конструктивных вариантов системы для выбора оптимального решения, оценку технической и экономической эффективности мероприятий по повышению надежности и безопасности, а также определение достигнутого уровня надежности и безопасности разрабатываемой системы.

Для оценки надежности технических систем применяются аналитические методы, включая теорию случайных процессов, экспертные оценки, декомпозицию и логико-вероятностный анализ [4]. На их основе были разработаны современные программные комплексы для моделирования надежности. Например, RISK SPECTRUM (Швеция), SAPHIRE (США), а также российские программы РИСК, CRISS–5.1 и CRISS–4.0 используют методы построения деревьев отказов и событий. Немецкие комплексы WINDCHILL FTA и WINDCHILL RBD основаны на применении деревьев успехов и блок-схемах. В то же время российский программный комплекс АРБИТР использует метод автоматизированного структурно-логического моделирования (АСМ).

Анализ, представленный в работе [5], показал, что методы, основанные на деревьях отказов, успеха или блок-схемах, не позволяют одновременно

решать прямые и обратные задачи моделирования, что ограничивает возможности расчета технического риска и прогнозирования ущерба.

Ограниченность одной технологией снижает гибкость анализа. Однако разработка общего логико-вероятностного метода [5] и внедрение АСМ позволили устранить эти ограничения. Применение схем функциональной целостности позволило корректно моделировать как традиционные (деревья отказов, событий), так и сложные немонотонные модели надежности [4].

Моделирование и расчет показателей надежности подсистемы, представленной на рис.1, выполнены в программном комплексе АРБИТР [6] с применением технологии АСМ в соответствии с методикой [2]. На рис.2 показана схема функциональной целостности, созданная в программном комплексе АРБИТР и соответствующая структурной блок-схеме подсистемы, представленной на рис.1.

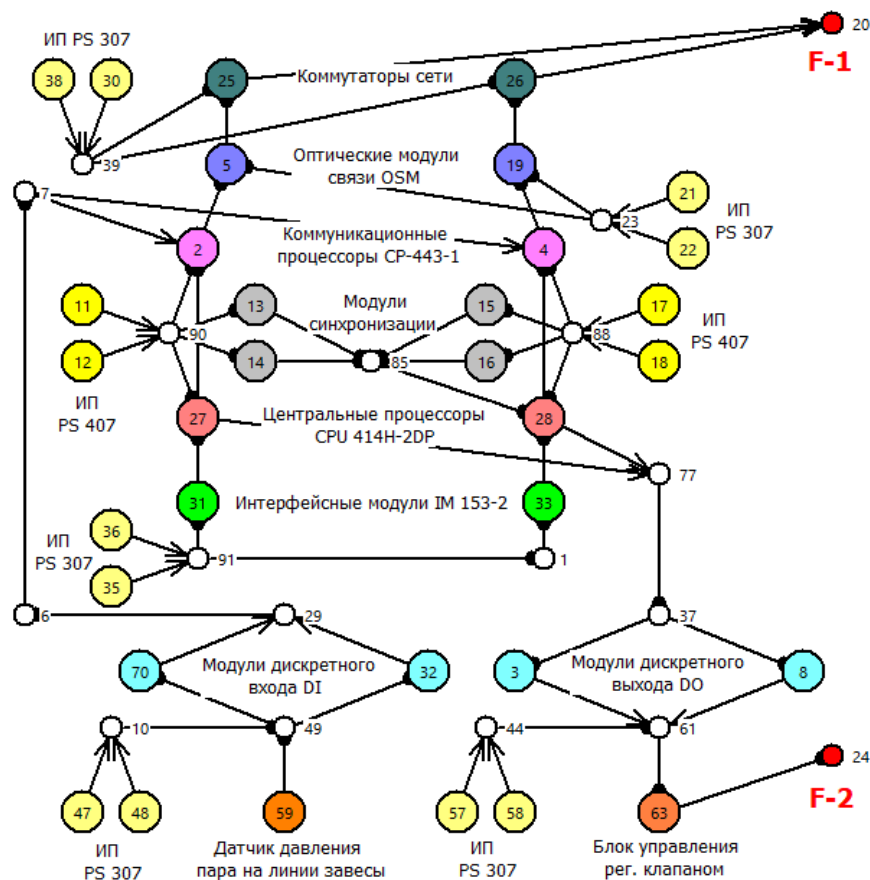


Рис.2. – Схема функциональной целостности подсистемы в среде АРБИТР

Представленная на рис. 1 и 2 подсистема выполняет следующие основные функции: «F-1» – выдача информации о давлении в трубопроводе линии ПЗТП на автоматизированное рабочее место оператора; «F-2» – выдача управляющих сигналов на блок управления регулирующими клапанами подачи пара на технологические нужды установки гидроочистки дизельного топлива.

Для проведения анализа в среде АРБИТР введены параметры элементов подсистемы, соответствующие таблице 1.

Таблица 1 – Параметры надежности элементов схемы функциональной целостности [2, 7]

№ эл.	Тип элемента	Обозначение на схеме	Кол-во, ед.	Средняя наработка элемента до отказа T_{oi} , год	Среднее время восстановления элемента T_{vi} , ч
1	Интерфейсный модуль IM 153-2	31, 32	2	47,6	2
2	Центральный процессор CPU414H-2DP	27, 28	2	14,7	4
3	Модуль синхронизации	13, 14, 15, 16	4	150	2
4	Коммуникационный процессор CP 443-1	2, 4	2	20,6	3
5	Оптический модуль связи OSM	5, 19	2	33,6	4
6	Коммутатор сети SICOM3000BA [8]	25, 26	2	43,86	2
7	Модуль дискретного входа DI SN 29500	70, 32	2	68,49	1
8	Модуль дискретного выхода DO SN 29500	3, 8	1	68,49	1
9	Датчик давления ПД100И 1x1-Exi [9]	59	1	57,07	2
10	Блок управления клапаном КР 25ч945нж [10]	63	1	1,14	2
11	Источник питания PS 307	47, 48, 57, 58, 35, 36, 21, 22, 30, 38	10	148	0,5
12	Источник питания PS 407	11, 12, 17, 18	4	71,5	0,5

Логическими критериями функционирования подсистемы являются:

$$y_{20} - \text{условие реализации функции «F-1»}; \quad (1)$$

$$y_{24} - \text{условие реализации функции «F-2»}. \quad (2)$$

Результаты АСМ подсистемы составляют следующее:

1) логическая функция работоспособности подсистемы по критерию (1) включает 192 кратчайших пути успешного функционирования, из которых ниже приведены первые пять наиболее значимых:

$$\begin{aligned} y_{20} = & x_{11} x_{27} x_{31} x_{35} x_{48} x_{59} x_2 x_5 x_{21} x_{32} x_{25} x_{38} \vee \\ & \vee x_{11} x_{27} x_{31} x_{36} x_{48} x_{59} x_2 x_5 x_{22} x_{32} x_{25} x_{38} \vee \\ & \vee x_{11} x_{27} x_{31} x_{36} x_{48} x_{59} x_2 x_5 x_{22} x_{32} x_{25} x_{30} \vee \\ & \vee x_{12} x_{27} x_{31} x_{35} x_{48} x_{59} x_2 x_5 x_{22} x_{32} x_{25} x_{38} \vee \\ & \vee x_{12} x_{27} x_{31} x_{35} x_{48} x_{59} x_2 x_5 x_{22} x_{32} x_{25} x_{30} \vee \dots, \end{aligned} \quad (3)$$

где x_i – представление реализации своей функции i -ым элементом в подсистеме на рис.2;

$x_i x_j$ – комбинация реализации своей функции i -ым и j -ым элементами в подсистеме на рис.2 с логической операцией «И»;

\vee – логическая операция «ИЛИ»;

2) многочлен расчетной вероятностной функции ($P_{F-1}(t)$) безотказности критерию (1) состоит из 320 одночленов, из которых ниже приведены первые пять наиболее значимых:

$$\begin{aligned} P_{F-1}(t) = & p_{11} q_{12} q_{13} q_{14} q_{15} p_{16} q_{17} p_{18} p_{27} p_{31} p_{35} q_{36} q_{70} q_{47} p_{48} p_{59} p_2 p_5 q_{21} p_{22} p_{32} q_{25} p_{26} p_{38} q_{30} + \\ & + p_{11} q_{12} q_{13} p_{14} q_{15} q_{16} q_{17} p_{18} p_{28} p_{33} p_{35} q_{36} q_{70} q_{47} p_{48} p_{59} p_4 p_{19} q_{21} p_{22} p_{32} q_{25} p_{26} p_{38} q_{30} + \\ & + p_{11} q_{12} q_{13} q_{14} q_{15} p_{16} q_{17} p_{18} p_{27} p_{31} p_{35} q_{36} p_{70} q_{47} p_{48} p_{59} p_2 p_5 q_{21} p_{22} q_{25} p_{26} p_{38} q_{30} + \\ & + p_{11} q_{12} q_{13} p_{14} q_{15} q_{16} q_{17} p_{18} p_{28} p_{33} p_{35} q_{36} p_{70} q_{47} p_{48} p_{59} p_4 p_{19} q_{21} p_{22} q_{25} p_{26} p_{38} q_{30} + \\ & + p_{12} q_{13} q_{14} q_{15} p_{16} q_{17} p_{18} p_{27} p_{31} p_{35} q_{36} q_{70} q_{47} p_{48} p_{59} p_2 p_5 q_{21} p_{22} p_{32} q_{25} p_{26} p_{38} q_{30} + \dots, \end{aligned} \quad (4)$$

где p_i – числовое значение вероятности безотказной работы i -го элемента;

q_i – числовое значение вероятности отказа i -го элемента.

3) все параметры $p_i = p_i(t)$, подставляемые в многочлен $P_{F-1}(t)$ являются функциями времени. Значение $t = 1$ год = 8760 ч одинаковое для

всех параметров и составляет заданное время работы всей подсистемы (наработку).

Результаты моделирования показателей надежности подсистемы по критериям (1) и (2), представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты АСМ по критериям (1) и (2)

Определяемый параметр	По функции $F-1$	По функции $F-2$
ФРС/ВФ	192/320	48/80
$K\Gamma_F$	0,99999	0,99997
T_{OF} , ГОД	56,93	11,4
T_{BF} , Ч.	1,99964	1,99997
$P_{BF}(t)$	0,98260	0,41594
$P_{AC}(t)$	$1,74 \cdot 10^{-2}$	$5,84 \cdot 10^{-1}$

Результаты моделирования, представленные в таблице 2, показывают, что показатели надежности подсистемы не соответствуют требуемому уровню полноты безопасности (УПБ 3) для технологических блоков I категории взрывоопасности согласно ГОСТ Р МЭК 61508-2-2012. В соответствии с данным стандартом вероятность отказа должна находиться в пределах 10^{-4} – 10^{-3} при низкой интенсивности запросов.

В этой связи проведен анализ отказоустойчивости модели по следующим критериям:

$$y''_{20} - \text{отказ функции «}F-1\text{»}; \quad (5)$$

$$y''_{24} - \text{отказ функции «}F-2\text{»}. \quad (6)$$

Полученные с помощью программного комплекса АРБИТР [6] логико-аналитические модели (функции работоспособности системы) содержат 57 конъюнкций для критерия (5) и 19 конъюнкций для критерия (6).

$$y''_{20} = \underline{x''_{59}} \vee x''_{27} x''_{28} \vee x''_{27} x''_4 \vee x''_{28} x''_2 \vee x''_{28} x''_5 \vee x''_{27} x''_{19} \vee x''_2 x''_4 \vee x''_2 x''_{19} \vee \\ \vee x''_4 x''_5 \vee x''_5 x''_{19} \vee x''_{27} x''_{26} \vee x''_{28} x''_{25} \vee x''_{27} x''_{33} \vee x''_{28} x''_{31} \vee x''_4 x''_{25} \vee \\ \vee x''_2 x''_{26} \vee x''_{31} x''_4 \vee x''_{33} x''_2 \vee x''_5 x''_{26} \vee x''_{19} x''_{25} \vee x''_{31} x''_{19} \vee x''_{33} x''_5 \vee \\ \vee x''_{16} x''_{27} \vee x''_{15} x''_{27} \vee x''_{13} x''_{27} \vee x''_{14} x''_{27} \vee x''_{25} x''_{26} \vee x''_{16} x''_2 \vee x''_{13} x''_2 \vee \\ \vee x''_{15} x''_2 \vee x''_{14} x''_2 \vee x''_{33} x''_{25} \vee x''_{31} x''_{26} \vee x''_{31} x''_{33} \vee x''_{16} x''_5 \vee x''_{14} x''_5 \vee \\ \vee x''_{15} x''_5 \vee x''_{13} x''_5 \vee x''_{14} x''_{25} \vee x''_{13} x''_{25} \vee x''_{16} x''_{25} \vee x''_{15} x''_{25} \vee x''_{15} x''_{31} \vee \\ \vee x''_{14} x''_{31} \vee x''_{13} x''_{31} \vee x''_{16} x''_{31} \vee x''_{70} x''_{32} \vee x''_{11} x''_{12} \vee x''_{47} x''_{48} \vee x''_{35} x''_{36} \vee \\ \vee x''_{30} x''_{38} \vee x''_{21} x''_{22} \vee x''_{17} x''_{18} x''_{27} \vee x''_{17} x''_{18} x''_2 \vee x''_{17} x''_{18} x''_5 \vee \\ \vee x''_{17} x''_{18} x''_{25} \vee x''_{17} x''_{18} x''_{31}; \quad (7)$$

$$y''_{24} = \underline{x''_{63}} \vee x''_{27} x''_{28} \vee x''_{28} x''_{31} \vee x''_{27} x''_{33} \vee x''_{14} x''_{27} \vee x''_{13} x''_{27} \vee x''_{16} x''_{27} \vee \\ \vee x''_{15} x''_{27} \vee x''_{31} x''_{33} \vee x''_{13} x''_{31} \vee x''_{14} x''_{31} \vee x''_{15} x''_{31} \vee x''_{16} x''_{31} \vee x''_3 x''_8 \vee \\ \vee x''_{11} x''_{12} \vee x''_{57} x''_{58} \vee x''_{35} x''_{36} \vee x''_{17} x''_{18} x''_{27} \vee x''_{17} x''_{18} x''_{31}, \quad (8)$$

где x''_i – условие невыполнения i -ым элементом своей функции;

$x''_i x''_j$ – условие невыполнения в комбинации i -ым j -ым элементами своих функций с логической операцией «И»;

\vee – логическая операция «ИЛИ».

Анализ конъюнкций (7) и (8) показывает, что для отказа функции « $F-1$ » требуется 57 комбинаций отказов, а для функции « $F-2$ » – 19 комбинаций отказов. Критичными элементами являются датчик давления пара (элемент 59) для функции « $F-1$ » и блок управления клапаном (элемент 63) для функции $F-2$, их отказ приводит к полной неработоспособности подсистемы. Внедрение резервирования этих компонентов значительно увеличивает устойчивость системы к отказам и способствует её стабильной работе. На рис.3 представлена схема функциональной целостности подсистемы в среде АРБИТР с резервированием элементов 59 и 63.

Проведенное АСМ создаваемой подсистемы позволило получить логико-аналитические и логико-вероятностные модели для расчета отказов и безотказной работы резервированной подсистемы. Результаты надежности и безопасности подсистемы с резервным датчиком (элемент 34) и блоком управления клапанами (элемент 9) приведены в таблице 3.

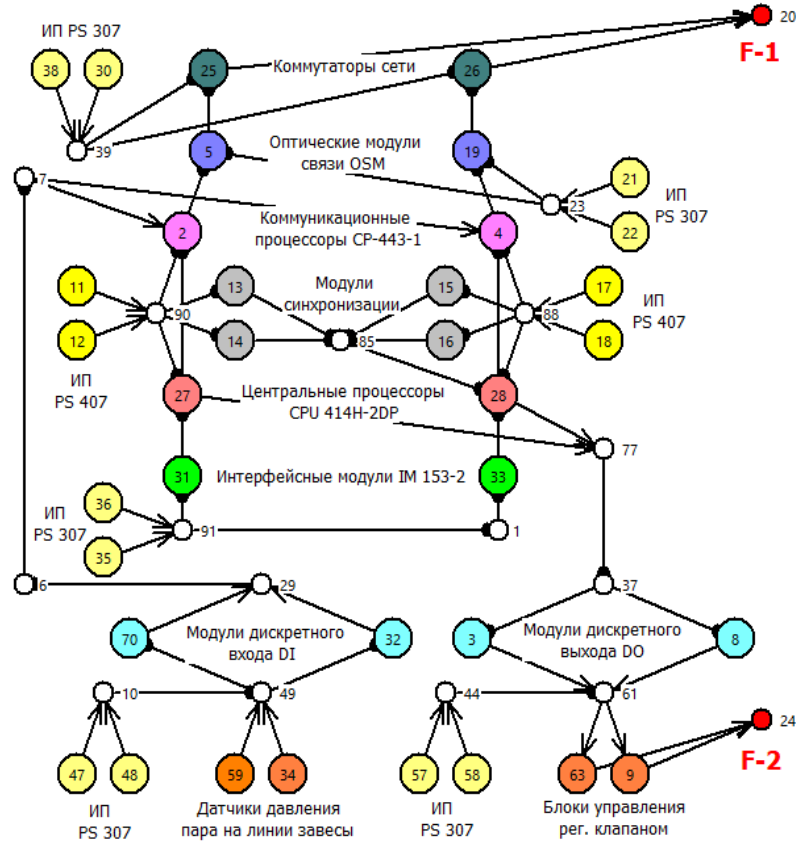


Рис.3. – Схема функциональной целостности подсистемы в среде АРБИТР с резервированием элементов 59 и 63

Таблица 3 – Результаты расчета с резервными элементами (датчик 34, блок управления 9) по критериям (1) и (2)

Определяемый параметр	По функции $F-1$	По функции $F-2$
ФРС/ВФ	384/640	96/160
$K\Gamma_F$	0,99999	0,99999
T_{OF} , ГОД	$4,4 \cdot 10^4$	$9,3 \cdot 10^4$
T_{BF} , ч.	1,7	1,4
$P_{BF}(t)$	0,99996	0,99964
$P_{AC}(t)$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$

Сравнительные расчеты (табл. 2 и 3) подтвердили эффективность резервирования датчика давления и блока управления клапанами. Это

повысило вероятность безотказной работы подсистемы: для функции «F-1» – в среднем на 2 %, для функции «F-2» – в 2,4 раза. В результате вероятность отказа снизилась, а показатели надежности соответствуют требованиям функциональной безопасности.

Выводы

Разработан комплекс технических средств подсистемы контроля и управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи установки гидроочистки дизельного топлива. С использованием автоматизированного структурно-логического моделирования построены логико-аналитические и логико-вероятностные модели, которые позволили выявить наиболее критичные узлы подсистемы и оценить их отказоустойчивость.

Установлено, что без резервирования ключевых элементов подсистема не соответствует требованиям уровня полноты безопасности, установленного ГОСТ Р МЭК 61508-2–2012, поскольку вероятность отказа превышает допустимые значения.

Внедрение резервирования датчика давления пара и блока управления клапанами подачи пара для технологических нужд повысило надежность подсистемы: вероятность безотказной работы по функции «F-1» увеличилась на 2 %, а по функции «F-2» — в 2,4 раза. В результате вероятность отказа снизилась, и показатели надежности стали соответствовать требованиям функциональной безопасности.

Литература

1. Оспанов К.К. Модель и алгоритм управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива // Инженерный вестник Дона, 2024, №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2024/9276.

2. Можаяев А.С. Автоматизированное структурно-логическое моделирование и расчет надежности и безопасности автоматизированных систем управления технологическими процессами и оборудованием на стадии проектирования // Методические рекомендации. – Спб. : СЗМА, 2003. – 35 с.

3. Минцаев М.Ш., Садулаев А.А.В., Исаева М.Р. Исследование и модернизация автоматизированной системы налива нефтепродуктов // Инженерный вестник Дона. 2024. № 9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2024/9481.

4. Конесев С.Г. Методы оценки показателей надежности сложных компонентов и систем // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–1. URL: science-education.ru/ru/article/view?id=17558.

5. Нозик А.А. Применение программного комплекса АРБИТР в задачах проектной оценки надежности структурно-сложных систем // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Международный научный семинар им. Ю.Н. Руденко, Санкт-Петербург, 30 июня 2014 года. СПб. : Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 2015. С. 624–633.

6. ПК АРБИТР. О программном комплексе. СПИК СЗМА : специализированная инжиниринговая компания. 2024. URL: szma.com/arbitr/.

7. Контроллер программируемый логический МКLogic200: руководство по эксплуатации. АО «Нефтеавтоматика». 2023. URL: nefteavtomatika.ru/ru/sup/industrial-automation-facilities-and-systems/plk/plk-serii-mklogic-200/?tab=mc_third.

8. Управляемый коммутатор L2 до 3 Гб и 6 Мб портов, на DIN-Rail SICOM3000BA: краткое описание. Компания ООО «ТМС». 2023. URL: kyland.ru/userfiles/product-files/datasheet-ru/148.pdf.

9. ПД100И, модель 1x1. Датчик, преобразователь давления измерительный повышенной надёжности для насосных, котельных, водоснабжения, агрессивных сред. ООО «Производственное Объединение ОВЕН». 2023. URL: owen.ru/product/pd100i_datchik_davleniya_s_uvelichennim_mezhpooverochnim_intervalom_dlya_teploschetchikov.

10. Клапан регулирующий КР 25с947нж с электроприводом Ду 15...300. ООО «Вся арматура». 2023. URL: all-armatura.ru/klapany/klapany-reguliruyuwie-s-elektroprivodom/klapan-reguliruyuwij-kr-25s947nzh-s-elektroprivodom-du-15-300-vr525/.

References

1. Ospanov K.K. Inzhenernyi vestnik Dona, 2024, №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2024/9276.
2. Mozhaev A.S. Avtomatizirovannoe strukturno-logicheskoe modelirovanie i raschet nadezhnosti i bezopasnosti avtomatizirovannykh sistem upravleniia tekhnologicheskimi protsessami i oborudovaniem na stadii proektirovaniia [Automated structural-logical modeling and calculation of reliability and safety of automated control systems of technological processes and equipment at the design stage]. Metodicheskie rekomendatsii. Spb. : SZMA, 2003. 35 p.
3. Mintsaeв M.SH., Sadulaev A.A.V., Isaeva M.R. Inzhenernyi vestnik Dona. 2024. № 9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2024/9481.
4. Konesev S.G. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia. 2015. № 1–1. URL: science-education.ru/ru/article/view?id=17558.
5. Nozik A.A. Metodicheskie voprosy issledovaniia nadezhnosti bolshikh sistem energetiki: Mezhdunarodnyi nauchnyi seminar im. IU.N. Rudenko, Sankt-Peterburg, 30-iiunia 2014 goda. SPb.: Institut sistem energetiki im. L. A. Melenteva Sibirskogo otdeleniia Rossiiskoi akademii nauk, 2015. pp. 624–633.

6. PK ARBITR. O programmnom komplekse [The ARBITER software package. About the software package]. SPIK SZMA: spetsializirovannaia inzhiniringovaia kompaniia. 2024. URL: szma.com/arbitr/.

7. Kontroller programmiruemyi logicheskii MKLogic200: rukovodstvo po ekspluatatsii [Programmable logic controller MKLogic200: user manual]. AO «Nefteavtomatika». 2023. URL: nefteavtomatika.ru/ru/sup/industrial-automation-facilities-and-systems/plk/plk-serii-mklogic-200/?tab=mc_third.

8. Upravliaemyi kommutator L2 do 3 GB i 6 Mb portov, na DIN-Rail SICOM3000BA : kratkoe opisanie [Managed L2 switch with up to 3 GB and 6 MB ports, on DIN-Rail SICOM3000BA : brief description]. Kompaniia OOO «TMC». 2023. URL: www.kyland.ru/userfiles/product-files/datasheet-ru/148.pdf.

9. PD100I, model 1x1. Datchik, preobrazovatel davleniia izmeritelnyi povyshennoi nadezhnosti dlia nasosnykh, kotelnykh, vodosnabzheniia, agressivnykh sred [PD100I, 1x1 model. Sensor, measuring pressure transducer of increased reliability for pumping, boiler rooms, water supply, aggressive media]. OOO «Proizvodstvennoe Obieedinenie OVEN». 2023. URL: owen.ru/product/pd100i_datchik_davleniya_s_ovelichennim_mezhpoverochnim_Intervalom_dlya_teploschetchikov.

10. Klapaн reguliruiushchii KR 25s947nzh s elektroprivodom Du 15...300 [Control valve KR 25c947nzh with electric drive DN 15...300]. OOO «Vsia armatura». 2023. URL: all-armatura.ru/klapany/klapany-reguliruyuwie-s-elektroprivodom/klapan-reguliruyuwij-kr-25s947nzh-s-elektroprivodom-du-15-300-vr525/.

Дата поступления: 19.01.2025

Дата публикации: 4.03.2025