УДК 621.3.019.34

Чистофорова Наталья Васильевна,

к.т.н., доцент, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов»,
 ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
 e-mail: ryabinak@mail.ru

Ушенин Захар Сергеевич,

магистрант кафедры «Автоматизация технологических процессов»,
 ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
 e-mail: zakhar.ushenin@yandex.ru

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЛЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕМБРАННОЙ УСТАНОВКИ

Chistoforova N.V., Ushenin Z.S.

RELIABILITY ANALYSIS OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM AND THE CONTROLLER EQUIPMENT OF THE MEMBRANE FACILITY

Аннотация. В статье приведен анализ надежности системы автоматического регулирования и контроллерного оборудования мембранной установки. Разработаны структурно-функциональные схемы надежности. Произведены соответствующие расчёты. Предложены решения по повышению уровня надежности. Построены графики сравнения показателей надежности.

Ключевые слова: водородосодержащий газ, мембранная установка, сепаратор, анализ надежности системы автоматического регулирования, анализ надежности контроллерного оборудования, контроллер.

Abstract. The article contains a reliability analysis of automatic control system and the controller equipment of the membrane facility. Reliability structural diagrams were developed. The corresponding calculations were given. Solutions to improve the level of reliability are proposed. The graphs of comparison of reliability indicators are built.

Keywords: hydrogen from hydrogen-containing gases, membrane facility, separator, analysis of automatic control system, reliability analysis of the automatic control system, reliability analysis of the controller equipment, controller.

На протяжении многих лет совершенствовались технологии извлечения и концентрирования, позволяющие получать водород из различных источников сырья. В результате ученым удалось создать оборудование, которое может извлекать водород из газовых смесей. Получая водород из топливных, остаточных и сбросных газов, можно значительно повысить экономическую эффективность процессов производства.

В настоящее время существуют два наиболее эффективных способа извлечения водорода из водородосодержащих газов (ВСГ): извлечение водорода с помощью адсорбционных установок и концентрирование водорода при помощи мембранных установок [1].

Выбор метода получения водорода зависит от состава сырья, необходимой чистоты водорода, а также от режима эксплуатации, производственной мощности и других факторов, связанных со спецификой работы конкретного предприятия.

К основным преимуществам мембранных установок, позволяющих концентрировать водород, можно отнести низкие расходы на техническое обслуживание, простое аппаратное оформление и длительный срок службы мембран. Стоит отдельно отметить, что мембранные установки отличаются высокой гибкостью, которая реализуется при создании модульных систем, позволяющих быстро изменять масштаб производства водорода [2]. Метод концентрирования водорода при помощи мембранных установок позволяет выделять водород из газовых потоков с минимальными потерями, поэтому было принято решение исследовать именно его.

Перед использованием мембранного способа концентрирования водорода был произведен синтез системы автоматического регулирования (САР), включающего в себя исследование установки, основанное на анализе материального и теплового балансов аппаратов. Однако, смешивание водорода с кислородом или воздухом взрывоопасно, в

этом случае образуется взрывоопасная смесь - гремучий газ. Следовательно, для работы с таким веществом необходимо иметь достаточно надежные САР [3].

Для достижения поставленной задачи произведём анализ надежности контура регулирования уровня в сепараторе (т.к. относительно других САР надежность данного контура является наименьшей). Так, уровень конденсата в нижней секции сепаратора регистрируется волноводным радаром, связанным по электрическому кабелю с контроллером, через станцию распределенного ввода-вывода. Контроллер, в свою очередь, управляет клапаном посредством преобразователя электрического сигнала в пневматический. Структурно-функциональная схема данного контура показана на рисунке 1.

Рисунок 1 – Структурно-функциональная схема контура регулирования уровня в сепараторе:

Д – датчик; ЭЛС – электрическая линия связи; СТ – станция распределённого ввода-вывода; ЭКС – электрический канал связи; К – контроллер; ЭПП – электропневматический преобразователь; ПЛС – пневматическая линия связи; ИУ – исполнительное устройство.

Данные для расчета [4]:

1) Волноводный радар «Rosemount 3300». Средняя наработка до отказа: $T_D = 100000$ ч.

2) Электрическая линия связи «кабель КВВГэ 4х1,5». Средняя интенсивность отказов: $\lambda_{ЭЛС} = 10^{-5}$ ч⁻¹.

3) Контроллер «Simatic S7-300». Средняя наработка до отказа: $T_K = 172000$ ч.

4) Станция распределённого ввода-вывода «Simatic ET 200M». Средняя наработка до отказа: $T_{СТ} = 289080$ ч.

5) Электропневмопреобразователь «DVC2000». Средняя интенсивность отказов: $\lambda_{ЭПП} = 4,7 \cdot 10^{-5}$ ч⁻¹.

6) Электрический канал связи «кабель Profibus». Средняя наработка до отказа: $T_{ЭКС} = 398723$ ч.

7) Пневматическая линия связи. Средняя наработка до отказа: $T_{ПЛС} = 73600$ ч.

8) Исполнительное устройство «FISHER GX». Средняя интенсивность отказов: $\lambda_{ИУ} = 3,9 \cdot 10^{-5}$ ч⁻¹.

Расчет вероятностей безотказной работы для всех элементов схемы [5].

Вероятность безотказной работы i -го элемента схемы надежности при экспоненциальном законе распределения времени до отказа определяется:

$$P_i(t) = e^{-\lambda_i t}, \quad (1)$$

где λ_i – интенсивность отказов i -го элемента, ч⁻¹; t – рассматриваемое время, (для расчета принимаем $t=2000$ часов).

Интенсивность отказов i -го элемента определяется:

$$\lambda_i = \frac{1}{T_i}. \quad (2)$$

1) Интенсивность отказов датчика «Rosemount 3300»:

$$\lambda_D = \frac{1}{100000} = 10^{-5} \text{ ч}^{-1}.$$

Вероятность безотказной работы датчика за 2000 часов:

$$P_D(2000) = e^{-1 \cdot 10^{-5} \cdot 2000} = 0,98.$$

2) Вероятность безотказной работы электрической линии связи «КВВГэ 4х1,5» за 2000 часов:

$$P_{ЭЛС}(2000) = e^{-10^{-5} \cdot 2000} = 0,98.$$

3) Интенсивность отказов контроллера «Simatic S7-300»:

$$\lambda_K = \frac{1}{172000} = 5,81 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Вероятность безотказной работы контроллера за 2000 часов:

$$P_K(2000) = e^{-5,81 \cdot 10^{-6} \cdot 2000} = 0,988.$$

4) Интенсивность отказов станции распределённого ввода-вывода «Simatic ET 200M»:

$$\lambda_{СТ} = \frac{1}{289080} = 0,346 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}.$$

Вероятность безотказной работы станции распределённого ввода-вывода за 2000 часов:

$$P_{СТ}(2000) = e^{-0,346 \cdot 10^{-5} \cdot 2000} = 0,993.$$

5) Вероятность безотказной работы электропневмопреобразователя «DVC2000»:

$$P_{ЭПП}(2000) = e^{-4,7 \cdot 10^{-5} \cdot 2000} = 0,91.$$

6) Интенсивность отказов электрического канала связи «кабель Profibus»:

$$\lambda_{ЭКС} = \frac{1}{398723} = 0,25 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}.$$

Вероятность безотказной работы электрического канала связи за 2000 часов:

$$P_{ЭКС}(2000) = e^{-0,25 \cdot 10^{-5} \cdot 2000} = 0,995.$$

7) Интенсивность отказов пневматической линии связи:

$$\lambda_{ПЛС} = \frac{1}{73600} = 1,36 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}.$$

Вероятность безотказной работы пневматической линии связи за 2000 часов:

$$P_{ПЛС}(2000) = e^{-1,36 \cdot 10^{-5} \cdot 2000} = 0,973.$$

8) Вероятность безотказной работы исполнительного устройства «FISHER GX»:

$$P_{ИУ}(2000) = e^{-3,9 \cdot 10^{-5} \cdot 2000} = 0,925.$$

Расчёт показателей надёжности контура в целом [6].

Вероятность безотказной работы системы с последовательной структурой элементов равна:

$$P_I(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (3)$$

где n – количество элементов, находящихся в последовательном соединении.

Вероятность безотказной работы контура регулирования уровня в сепараторе (F-01):

$$P_I(t) = P_D(t) \cdot P_{ЭЛС}^2(t) \cdot P_K(t) \cdot P_{ЭКС}^2(t) \cdot P_{ЭПП}(t) \cdot P_{СТ}^2(t) \cdot P_{ПЛС}(t) \cdot P_{ИУ}(t), \quad (4)$$

тогда:

$$P_I(2000) = 0,98 \cdot 0,98^2 \cdot 0,988 \cdot 0,995^2 \cdot 0,91 \cdot 0,993^2 \cdot 0,973 \cdot 0,925 = 0,745.$$

Интенсивность отказов при экспоненциальном законе распределения времени до отказа определяется по формуле:

$$\lambda_I = \left| \frac{\ln P_I}{t} \right|, \quad (5)$$

интенсивность отказов контура равна:

$$\lambda_I = \left| \frac{\ln(0,745)}{2000} \right| = 14,718 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}.$$

Средняя наработка до отказа контура:

$$T_I = \frac{1}{\lambda_I}, \quad (6)$$

тогда:

$$T_I = \frac{1}{14,718 \cdot 10^{-5}} = 6794 \text{ ч}.$$

Вывод: средняя наработка до отказа контура регулирования уровня в сепараторе равна 6794 часа, при этом вероятность безотказной работы за 2000 часов работы на уровне 0,745 является недостаточной, т.к. необходимый показатель равняется не менее 0,94. Следовательно, с целью повышения надёжности контура регулирования необходимо резервировать наиболее ненадежные элементы, которыми являются Д, ЭПП, ПЛС и ИУ. Однако, необходимо отметить, что здесь возможны два варианта, а именно поэлементное резервирование вышеперечисленных элементов, либо резервирование всей этой цепочки целиком. Выберем первое решение, которое упрощает переключения в случае возникновения неисправностей и в целом является более эффективным. В ре-

зультате чего необходимо будет проложить дополнительную ЭЛС от Д к СТ и от СТ к ЭПП.

Таким образом, скорректированная структурно-функциональная схема контура регулирования будет выглядеть следующим образом:

Рисунок 2 – Скорректированная структурно-функциональная схема контура регулирования уровня в сепараторе

В случае параллельного соединения элементов вероятность безотказной работы равна:

$$P_{II}(t) = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - P_i(t)), \quad (7)$$

где k – количество параллельно соединенных элементов.

Определим вероятность безотказной работы параллельно включенных Д, ЭЛС, ЭПП, ПЛС и ИУ.

Вероятность безотказной работы резервированного Д:

$$P_D(2000) = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - 0,98) = 0,9996.$$

Вероятность безотказной работы резервированной ЭЛС:

$$P_{ЭЛС}(2000) = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - 0,98) = 0,9996.$$

Вероятность безотказной работы резервированного ЭПП:

$$P_{ЭПП}(2000) = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - 0,91) = 0,992.$$

Вероятность безотказной работы резервированной ПЛС:

$$P_{ПЛС}(2000) = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - 0,973) = 0,9993.$$

Вероятность безотказной работы резервированного ИУ:

$$P_{ИУ}(2000) = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - 0,925) = 0,9944.$$

Таким образом, вероятность безотказной работы резервированного контура регулирования уровня равна:

$$P_{II}(2000) = 0,9996^2 \cdot 0,993^2 \cdot 0,995^2 \cdot 0,988 \cdot 0,9996 \cdot 0,992 \cdot 0,9993 \cdot 0,9944 = 0,95.$$

Интенсивность отказов контура равна:

$$\lambda_{II} = \left| \frac{\ln(0,9502)}{2000} \right| = 2,556 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}.$$

Средняя наработка до отказа контура:

$$T_{II} = \frac{1}{2,556 \cdot 10^{-5}} = 39120 \text{ ч.}$$

Вывод: вероятность безотказной работы технических средств в скорректированном контуре регулирования уровня ВСГ в сепараторе F-01 за 2000 часов составляет 0,9502, а средняя наработка до отказа равна 39120 часов, (тогда как в контуре с последовательным соединением элементов средняя наработка до отказа равна 6794 часа). Этот показатель достаточно высок, что объясняет использование резервирования элементов Д, ЭП, ПЛС и ИУ, как наименее надежных элементов, которые, в свою очередь, повлекли за собой дополнительную прокладку ЭЛС.

Анализ надёжности контроллера.

Структурная схема надёжности контроллера представлена на рисунке 3.

Рисунок 3 – Параллельная структурно-функциональная схема надёжности контроллера

Проведем расчет надёжности контроллера «Simatic S7-300» за 2000 ч., 8760 ч. (1 год) и 43800 ч. (5 лет).

Расчёт показателей надёжности контроллера без резервирования за 2000 часов.

Как уже было сказано выше, средняя наработка до отказа данного контроллера равна 172000 ч., интенсивность отказов составляет $5,81 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, а вероятность безотказной работы контроллера за 2000 часов равна 0,988.

Зная данные значения, рассчитаем вероятность отказа по следующей формуле:

$$Q_i(t) = 1 - e^{-\lambda_i t}. \quad (8)$$

Вероятность отказа за 2000 часов:

$$Q_{кII}(2000) = 1 - e^{-5,81 \cdot 10^{-6} \cdot 2000} = 12 \cdot 10^{-3}$$

Плотность вероятности отказа контроллера без резервирования найдем по формуле:

$$q_i = \lambda_i \cdot e^{-\lambda_i t}, \quad (9)$$

Плотность вероятности отказа контроллера за это же время:

$$q_{кII}(2000) = 5,81 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-5,81 \cdot 10^{-6} \cdot 2000} = 5,74 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Расчёт показателей надёжности контроллера с резервированием за 2000 часов.

Вероятность отказа в случае параллельного соединения элементов определяется по следующим формулам:

$$Q_i(t) = \prod_{i=1}^k (1 - e^{-\lambda_i t}). \quad (10)$$

Среднее время безотказной работы:

$$T_i = T_O \cdot \left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{k} \right). \quad (11)$$

Плотность вероятности отказа:

$$q_i = \frac{dQ_i}{dt}. \quad (12)$$

Интенсивность отказов:

$$\lambda_i = \frac{q_i(t)}{P_i(t)}. \quad (13)$$

Рассчитаем вероятность безотказной работы, вероятность отказа, среднее время безотказной работы и интенсивность отказов контроллера с резервированием за 2000 ч. по формулам (5), (10), (11), (13).

Вероятность отказа контроллера с резервированием за 2000 часов:

$$Q_{кII}(2000) = \prod_{i=1}^2 (1 - e^{-5,81 \cdot 10^{-6} \cdot 2000}) = 0,133 \cdot 10^{-3}.$$

Вероятность безотказной работы контроллера с резервированием за 2000 часов:

$$P_{кII}(2000) = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - e^{-5,81 \cdot 10^{-6} \cdot 2000}) = 0,999.$$

Среднее время безотказной работы:

$$T_{кII} = 172000 \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \right) = 2,58 \cdot 10^5 \text{ ч. (30 лет)}$$

Плотность вероятности отказа за 2000 часов:

$$q_{кII}(2000) = 0,1162 \cdot 10^{-4} \cdot (1 - e^{-5,81 \cdot 10^{-6} \cdot 2000}) \cdot e^{-0,581 \cdot 10^{-5} \cdot 2000} = 0,133 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Интенсивность отказов за 2000 часов для контроллера с резервированием:

$$\lambda_{кII}(2000) = \frac{1,33 \cdot 10^{-7}}{0,999} = 0,133 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Расчёт показателей надёжности контроллера без резервирования за 8760 часов (1 год).

Вероятность отказа контроллера за 8760 часов:

$$Q_{KI}(8760) = 1 - e^{-5,81 \cdot 10^{-6} \cdot 8760} = 50 \cdot 10^{-3}.$$

Вероятность безотказной работы контроллера за 8760 часов:

$$P_{KI}(8760) = e^{-0,581 \cdot 10^{-5} \cdot 8760} = 0,951.$$

Плотность вероятности отказа за 8760 часов:

$$q_{KI}(8760) = 5,81 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-5,81 \cdot 10^{-6} \cdot 8760} = 5,52 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Расчёт показателей надёжности контроллера с резервированием за 8760 часов (1 год).

Вероятность отказа контроллера с резервированием за 8760 часов:

$$Q_{KII}(8760) = \prod_{i=1}^2 (1 - e^{-5,81 \cdot 10^{-6} \cdot 8760}) = 2,465 \cdot 10^{-3}.$$

Вероятность безотказной работы контроллера с резервированием за 8760 часов:

$$P_{KII}(8760) = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - e^{-5,81 \cdot 10^{-6} \cdot 8760}) = 0,997.$$

Плотность вероятности отказа за 8760 часов:

$$q_{KII}(8760) = 0,1162 \cdot 10^{-4} \cdot (1 - e^{-5,81 \cdot 10^{-6} \cdot 8760}) \cdot e^{-5,81 \cdot 10^{-6} \cdot 8760} = 0,548 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Интенсивность отказов за 8760 часов для контроллера с резервированием:

$$\lambda_{KII}(8760) = \frac{0,548 \cdot 10^{-6}}{0,997} = 0,549 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Расчёт показателей надёжности контроллера без резервирования за 43800 часов (5 лет).

Вероятность отказа контроллера за 43800 часов:

$$Q_{KI}(43800) = 1 - e^{-5,81 \cdot 10^{-6} \cdot 43800} = 225 \cdot 10^{-3}.$$

Вероятность безотказной работы контроллера за 43800 часов:

$$P_{KI}(43800) = e^{-0,581 \cdot 10^{-5} \cdot 43800} = 0,775.$$

Плотность вероятности отказа за 43800 часов:

$$q_{KI}(43800) = 5,81 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-5,81 \cdot 10^{-6} \cdot 43800} = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Расчёт показателей надёжности контроллера с резервированием за 43800 часов (5 лет).

Вероятность отказа контроллера с резервированием за 43800 часов:

$$Q_{KII}(43800) = \prod_{i=1}^2 (1 - e^{-5,81 \cdot 10^{-6} \cdot 43800}) = 50 \cdot 10^{-3}.$$

Вероятность безотказной работы контроллера с резервированием за 43800 часов:

$$P_{KII}(43800) = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - e^{-5,81 \cdot 10^{-6} \cdot 43800}) = 0,949.$$

Плотность вероятности отказа за 43800 часов:

$$q_{KII}(43800) = 0,1162 \cdot 10^{-4} \cdot (1 - e^{-5,81 \cdot 10^{-6} \cdot 43800}) \cdot e^{-5,81 \cdot 10^{-6} \cdot 43800} = 2,02 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Интенсивность отказов за 43800 часов для контроллера с резервированием:

$$\lambda_{KII}(43800) = \frac{2,02 \cdot 10^{-6}}{0,949} = 2,133 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Сведем данные в таблицу 1 и построим графики зависимости вероятности безотказной работы и вероятности отказа одного элемента в системе с параллельной структурой резервирования в специализированном пакете MathCad (см. рисунки 4, 5, 6).

Таблица 1 – Показатели надёжности контроллера «Simatic S7-300»

Показатель	t, ч		
	2000	8760	43800
PKI(t)	0,988	0,951	0,775
PKII(t)	0,999	0,997	0,949
QKI(t)	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$22,5 \cdot 10^{-2}$
QKII(t)	$0,0133 \cdot 10^{-2}$	$0,2465 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$
$q_{KI}(t) \text{ ч}^{-1}$	$5,74 \cdot 10^{-6}$	$5,52 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$
$q_{KII}(t) \text{ ч}^{-1}$	$0,133 \cdot 10^{-6}$	$0,548 \cdot 10^{-6}$	$2,02 \cdot 10^{-6}$
$\lambda_{KI}(t) \text{ ч}^{-1}$	$5,81 \cdot 10^{-6}$	$5,81 \cdot 10^{-6}$	$5,81 \cdot 10^{-6}$
$\lambda_{KII}(t) \text{ ч}^{-1}$	$0,133 \cdot 10^{-6}$	$0,549 \cdot 10^{-6}$	$2,133 \cdot 10^{-6}$

Рисунок 4 – График вероятности безотказной работы контроллера

Рисунок 5 – График интенсивности отказов контроллера

Рисунок 6 – График плотности вероятности отказа контроллера

Вывод. Таким образом, за счет резервирования надежность контроллера удалось увеличить на 23 %, а полученная в итоге вероятность безотказной работы за 5 лет равняется 0,949, что является достаточным для данной системы показателем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванова Г.В. Автоматизация технологических процессов основных химических производств. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2003. – 134 с.
2. Кафаров В.В., Макаров В.В. Гибкие автоматизированные системы в химической промышленности: Учебник для вузов. – М.: Химия, 1990. – 320с.
3. Хапусов В.Г., Ершов П.Р. Автоматизация технологических процессов и производств: учеб. пособие. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. – 300с.
4. Шандуров Б.В. Технические средства автоматизации / Б.В. Шандуров, А.Д. Чудakov – М.: Академия, 2007. – 360 с.
5. Острейковский В.А. Теория надежности: Учебник для вузов / В.А. Острейковский. – М.: Высш.шк., 2003. – 463 с.
6. Ястребенецкий М.А. Надежность автоматизированных систем управления технологическими процессами: учеб. пособие / М.А. Ястребенецкий, Г.М. Иванова – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 264