

УДК 681.518.3

В.В. Довгаль <sup>(1)</sup>, доцент, к.т.н.

Н.А. Миняйло <sup>(1)</sup>, доцент, к.т.н.

В.К. Малый <sup>(2)</sup>, главный инженер проекта

## РЕЗЕРВИРОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ С ПОВЫШЕННОЙ ОПАСНОСТЬЮ НА ПАО «УКРАИНСКИЙ ГРАФИТ»

<sup>(1)</sup> Запорожская государственная инженерная академия,

<sup>(2)</sup> ПАО «Украинский графит», г. Запорожье

Розглянуто методи апаратного резервування систем автоматизації, які використовують на технологічних об'єктах з підвищеною небезпекою. Запропоновано структурну схему надійної системи автоматизації, що містить мінімальну кількість надлишкових елементів. Одержано аналітичні залежності для розрахунку вірогідності безвідмовної роботи резервованої системи автоматизації з послідовно-паралельною структурою елементів.

Ключові слова: система автоматизації, надійність, «гаряче» резервування заміщенням, ймовірність безвідмовної роботи, дублювання

Рассмотрены методы аппаратного резервирования систем автоматизации, используемых на технологических объектах с повышенной опасностью. Предложена структурная схема надежной системы автоматизации, содержащая минимальное количество избыточных элементов. Получены аналитические зависимости для расчета вероятности безотказной работы резервированной системы автоматизации с последовательно-параллельной структурой элементов.

Ключевые слова: система автоматизации, надежность, «горячее» резервирование замещением, вероятность безотказной работы, дублирование

The methods of the hardware reservation for the systems of automation, used on technological objects with an advanced danger are examined. The structural scheme of the positive system of automation, containing the minimum quantity of surplus elements, is offered. There are got analytical dependences for the calculation of probability of failure-free work of reserved automation system with the consistently-parallel structure of elements.

Keywords: automation system, positivity, «hot» reservation by substitution, probability of failure-free work, duplication

*Введение.* Резервирование является методом повышения надежности систем автоматизации для технологических объектов с повышенной опасностью и позволяет создавать высоконадежные автоматизированные системы управления [1]. Системы с резервированием характеризуются наличием основных элементов, отказ которых при отсутствии резервирования приводит к потере работоспособности системы, и резервных, предназначенных для обеспечения работоспособности системы в случае отказа основных элементов.

*Анализ методов резервирования.* В системах автоматизации широко используются два метода резервирования: «горячее» резервирование замещением и метод голосования [2]. При «горячем» резервировании основные и резервные элементы системы находятся в нагруженном состоянии. При резервировании замещением резервные элементы включают в работу системы автоматически либо человеком-оператором.

ром после отказа основных элементов. В системах резервирования с голосованием используют несколько одинаковых равноправных элементов, которые работают одновременно и выполняют одну и ту же функцию, а выбор сигнала осуществляет схема голосования. Различают общее резервирование (резервируют систему в целом) и раздельное (резервируют отдельные элементы системы).

В первую очередь резервируют процессорный модуль («процессор») и блок его питания системы автоматизации, так как его отказ приводит к отказу всей системы. Одновременно с процессором резервируют и промышленную сеть. Сложность резервирования процессоров состоит в том, что в момент замещения резервный процессор должен иметь внутреннее состояние, идентичное состоянию основного процессора для чего используют оптический канал синхронизации.

Контроль работоспособности процессоров выполняют на каждом контроллерном цикле, перед считыванием сигналов с модулей ввода и перед выводом сигналов на исполнительные устройства.

Для перехода в рабочее состояние резервный процессор должен иметь информацию об отказе основного процессора; возможность синхронизации с ним прикладной программы, накопленных данных, полученных со входов и отправленных на выходы, состояния ПИД-регуляторов и регистров, а также замещения основного процессора. Переключение процессоров обычно выполняют без коммутатора путем изменения их адреса в сетевых устройствах.

При резервировании промышленных сетей чаще всего резервируют линии связи. Для этого используют два сетевых порта, к одному подключают основную промышленную сеть, а к другому – резервную. Каждый контроллер имеет средства контроля работоспособности сети и в случае ее отказа переключает свой порт на резервную сеть. Основной проблемой резервирования сетей методом замещения служит обнаружение отказа, которое выполняется каждым участником сети автономно, что возможно только в сетях, имеющих специальные аппаратные средства контроля.

*Постановка задачи.* Требуется разработать структурную схему надежной системы автоматизации, содержащую минимальное количество избыточных элементов, позволяющей исключить простои заводского оборудования, вызванные ее неисправностью.

*Основная часть.* При разработке системы автоматизации утилизационной котельной для ПАО «Укрграфит» (г. Запорожье), которая относится к взрывоопасным технологическим объектам с высокой стоимостью простоя, использовали раздельное «горячее» резервирование замещением (рис. 1).

Данная система построена на аппаратной платформе фирмы «SIEMENS» с использованием программируемого логического контроллера S7-400H с резервированной структурой и станции распределенного ввода-вывода ET-200M с резервированными сетями PROFIBUS-DP, которые связаны при помощи дублированной полевой сети PROFIBUS-DP. Система является трехуровневой и территориально распределенной с централизованным управлением. При разработке программного обеспечения использовали инструментальный «SCADA-пакет WinCC» и «Softlogic-пакет STEP 7». Система автоматизации выполняет функции оперативного контроля и управления технологическими процессами котельной, сбора и хранения технологической информации, диагностики работоспособности оборудования и функционирует круглосуточно в режиме реального времени.

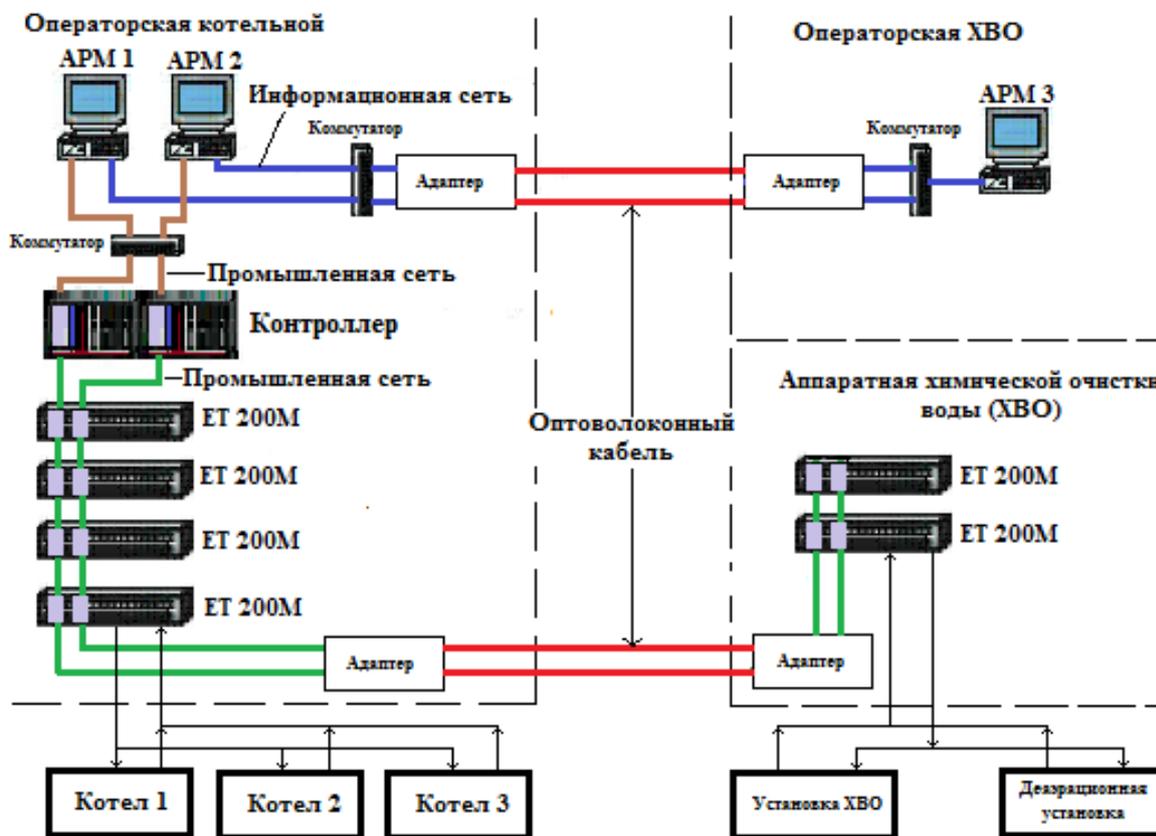


Рисунок 1 – Структурная схема АСУ ТП котельной ОАО «Укрграфит»

Оборудование системы размещается в здании котельной и здании установки химической очистки воды (ХВО). Обмен информацией между автоматизированным рабочим местом (АРМ) оператора и контроллером производится по дублированной сети «Industrial Ethernet», протокол ISO. Три АРМ (компьютеры в промышленном исполнении) связаны между собой сетью «Ethernet», протокол TSP/IP.

Резервированный контроллер SIMATIC S7-400H состоит из двух базовых блоков, имеющих центральный процессор и независимое внутреннее питание; двух модулей синхронизации на один центральный процессор для связи базовых блоков по оптоволоконной линии, а также модулей ввода-вывода в каждом блоке. Все резервные ресурсы постоянно находятся в работе и одновременно задействованы в выполнении задач управления. В двух центральных процессорах находится одинаковая программа пользователя, которая синхронно выполняется ними. «Резервная» подсистема всегда синхронизирована с событиями в «основной» подсистеме. Различие между основным и резервным процессорами заключается в обеспечении воспроизводимости реакции на ошибки. При отказе резервирующей связи резервный процессор переходит в состояние «STOP», тогда как основной остается в режиме «RUN».

Назначение процессоров (основной/резервный) изменяется в случаях, когда резервный процессор запускают раньше главного, основной процессор выходит из строя или переходит в состояние «STOP». Питание каждого из контроллеров осуществляется при помощи отдельных модулей питания PS 24В/10А.

Вероятность безотказной работы системы по статистическим данным оценивают с использованием выражения [3]:

$$P(t) = \frac{n(t)}{N}, \quad (1)$$

где  $P(t)$  – статистическая оценка вероятности безотказной работы элементов;  $n(t)$ ,  $N$  – соответственно количество элементов, не отказавших к моменту времени  $t$  и поставленных на испытания.

Для оценки вероятности отказа по статистическим данным справедливо соотношение

$$q(t) = \frac{N - n(t)}{N}, \quad (2)$$

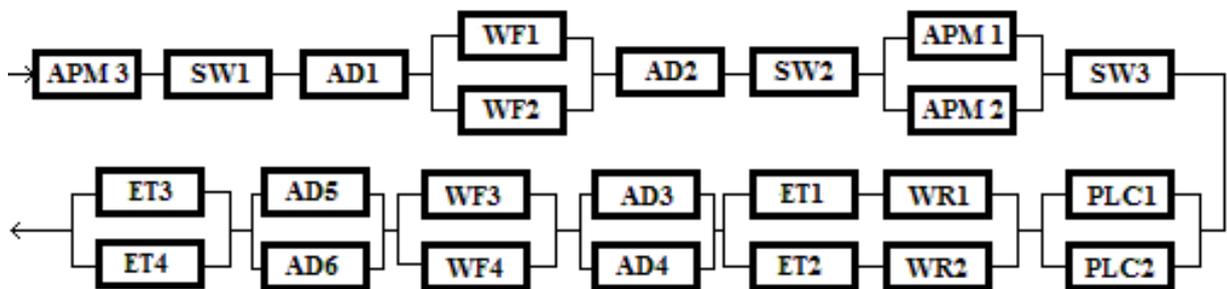
где  $q(t)$  – статистическая оценка вероятности отказа элементов;  $N - n(t)$  – количество элементов, отказавших к моменту времени  $t$ .

Каждый элемент резервирования уменьшает вероятность отказа узла в соответствии с формулой:

$$Q = \prod_{i=1}^m q_i, \quad (3)$$

где  $Q$  – вероятность отказа всех элементов;  $m$  – количество резервных элементов (кратность резервирования);  $q_i$  – вероятность отказа элемента  $i$ .

Для расчета надежности резервированной системы автоматизации утилизационной котельной использовали эквивалентную структурную схему (рис. 2), которая представляет собой последовательно-параллельную структуру.



**Рисунок 2** – Эквивалентная структурная схема системы автоматизации котельной: APM - автоматизированное рабочее место; SW - коммутатор информационной сети; AD - адаптер (преобразователь оптоволокно-медь); WF - волоконно-оптический кабель; ET - станция распределенного ввода-вывода; WR - медный кабель; PLC - программируемый логический контроллер

Вероятность безотказной работы системы управления определяют, используя типовые процедуры расчета для элементов, соединенных последовательно или параллельно.

Для случая последовательного соединения элементов система является работоспособной при работоспособности все ее элементов, то есть отказ только одного элемента приводит к отказу всей системы. Вероятность безотказной работы  $P_c(t)$  системы за время  $t$  определяется формулой:

$$P_c(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_n(t) = \prod_{i=1}^m P_i(t), \quad (4)$$

где  $P_i(t)$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента за время  $t$ ;  $n$  – количество последовательно соединенных элементов.

Если  $P_i(t) = P(t)$ , то можно записать

$$P_c(t) = P^o(t) . \quad (5)$$

При параллельном соединении элементов (дублировании) система остается работоспособной, если исправен хотя бы один элемент. В этом случае вероятность безотказной работы  $P_c(t)$  системы за время  $t$  определяется формулой:

$$P_c(t) = 1 - [1 - P(t)]^2 . \quad (6)$$

Используя формулы (5) и (6), получают выражение для расчета вероятности безотказной работы системы автоматизации котельной ПАО «Украинский графит»  $P_{\dot{A}\dot{N}\dot{O}}$ :

$$P_{\dot{A}\dot{N}\dot{O}} = P_{\dot{A}\dot{D}\dot{i}} \cdot P_{S\dot{W}}^3 \cdot P_{\dot{A}\dot{D}}^2 \cdot [1 - (1 - P_{\dot{W}\dot{F}})^2]^2 \cdot [1 - (1 - P_{\dot{A}\dot{D}\dot{i}})^2] \cdot [1 - (1 - P_{\dot{P}\dot{L}\dot{C}})^2] \cdot [1 - (1 - P_{\dot{E}\dot{T}} \cdot P_{\dot{W}\dot{R}})^2] \cdot [1 - (1 - P_{\dot{A}\dot{D}})^2]^2 \cdot [1 - (1 - P_{\dot{E}\dot{T}})^2] \quad (7)$$

где  $P_{\dot{A}\dot{D}\dot{i}}$ ,  $P_{S\dot{W}}$ ,  $P_{\dot{A}\dot{D}}$ ,  $P_{\dot{W}\dot{F}}$ ,  $P_{\dot{P}\dot{L}\dot{C}}$ ,  $P_{\dot{E}\dot{T}}$ ,  $P_{\dot{W}\dot{R}}$  – соответственно вероятность безотказной работы АРМ оператора, коммутатора, адаптера, оптоволоконного кабеля, контроллера, станции распределенного ввода-вывода и кабеля PROFIBUS DP.

**Выводы.** Минимальное количество избыточных элементов в разработанной системе автоматизации котельной ПАО «Укрграфит» обеспечено использованием поэлементного резервирования методом дублирования наиболее ответственных узлов, неисправность которых приводит к полному отказу данной системы. При этом существенно повышается живучесть системы и исключаются простои заводского оборудования, вызванные ее неисправностями.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Каштанов, В. А.* Теория надежности сложных систем. [Текст] : учеб. пособие / В. А. Каштанов, А. И. Медведев. – 2-е изд. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 606 с. – Библиогр. : с. 602-606. – ISBN 978-5-9221-1132-4.
2. *Денисенко, В.* Аппаратное резервирование в промышленной автоматизации (часть 2) / В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. – 2008. – № 3. – С. 94-98.
3. *Половко, А. М.* Основы теории надежности [Текст] / А. М. Половко, С. В. Гуров. – БХВ-Петербург, 2006. – 702 с. – Библиогр. : с. 699-702. – ISBN 5-94157-541-6.
4. *Острейковский, В. А.* Теория надежности. [Текст] / В. А. Острейковский. – М. : Высшая школа, 2003. – 463 с. – Библиогр. : с. 457-458. – ISBN 5-06-004053-4-9.

Стаття надійшла до редакції 10.04.2014 р.  
Рецензент, проф. А. М. Ніколаєнко

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука  
<http://www.zgia.zp.ua>