

УДК 004.415:681.3

К.Е. ГЕРАСИМЕНКО*Северодонецкое научно-производственное объединение «Импульс», Украина***МЕТОДЫ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
ОБОРУДОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ
ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС ПО ФУНКЦИИ ЗАЩИТ**

Изложены существующие подходы к решению задачи контроля и диагностирования скрытых неисправностей типа «несрабатывание» по функции защит в оборудовании управляющих систем безопасности (УСБ). Разработан и протестирован на прикладных примерах метод, отличительной особенностью которого является использование элементов защит, построенных на базе непрерывных функций, в отличие от существующих методов, использующих дискретные функции. Использование непрерывных функций обеспечивает выполнение непрерывного контроля состояния как каждого функционального элемента защит индивидуально, так и всего оборудования в целом.

Ключевые слова: *управляющие системы безопасности АЭС, оборудование защит, контроль и диагностирование, функциональные элементы защит, непрерывные и дискретные функции.*

Введение

В настоящее время, в управляющих системах безопасности (УСБ), как на действующих, так и на строящихся АЭС, ведется активное внедрение оборудования, реализующего функции защит и построенного на базе современных цифровых технологий [1 – 7]. Данное оборудование, как правило, представляет из себя функционально ориентированную конфигурацию (комплекс) технических и программных средств, обозначаемую одним из следующих наименований: «аппаратура», «программно-технический комплекс» или «система». Следует отметить, что несмотря на улучшение надежных характеристик и более развитые средства непрерывного автоматического контроля нового цифрового оборудования, по сравнению с оборудованием на базе нецифровых технологий (аналоговые средства измерения и сравнения, реле и т.п.), актуальным остается вопрос контроля и диагностирования скрытых неисправностей, комбинации которых в резервированных компонентах оборудования, могут приводить к отказам типа «несрабатывание по требованию» для УСБ в целом.

1. Постановка проблемы

Отказ «несрабатывание по требованию» является наиболее критичным из всех возможных видов отказов УСБ, в части влияния на безопасность АЭС. В общем случае, к отказам УСБ данного типа могут приводить комбинации как однотипных (от-

казы по общей причине), так и разнотипных видов скрытых неисправностей в резервированных компонентах УСБ, имеющие временную корреляцию [1 – 4, 8, 9].

В нормативных документах к скрытым неисправностям [10] обычно относят неисправности, которые не обнаруживаются штатными средствами непрерывного автоматического контроля.

Применительно к типовой структуре УСБ (в качестве примера взята 3-х канальная структура), приведенной на рис.1, наличие скрытых неисправностей на несрабатывание означает, что в элементах оборудования защит (электронных компонентах, блоках, программном обеспечении), реализующих дискретные функции (сравнение с уставкой, «2 из 3-х» и другие логические обработки), скрытая неисправность типа «несрабатывание по требованию» гарантировано может быть обнаружена не в момент ее возникновения, а только при появлении комбинации входных сигналов, соответствующих срабатыванию защиты.

Данная проблема актуальна для всех типов оборудования, реализующего дискретные функции, в независимости от используемой элементной базы и принципов построения: аналоговые приборы на транзисторах или реле, программно-логические интегральные схемы (ПЛИС), микропроцессоры с инструкциями в виде программного кода.

2. Анализ исследований и публикаций

Существующие методы решения данной проблемы, описаны [1, 10 – 14] и сводятся к тому, что

работоспособность элементов оборудования защит может быть определена только путем контроля их реакции на специальные тестовые воздействия, поскольку использование данных о рабочих воздействиях от объекта, как правило, недостаточно.

Существующие методы периодического контроля можно разделить на две основных группы:

а) реализация контроля работоспособности на срабатывание отдельных блоков и устройств, участвующих в реализации функции защит (пример – подача кратковременных тестовых сигналов на входе или выходе блока, не приводящих к инициированию защит, но позволяющих проверить работоспособность входного или выходного тракта блока);

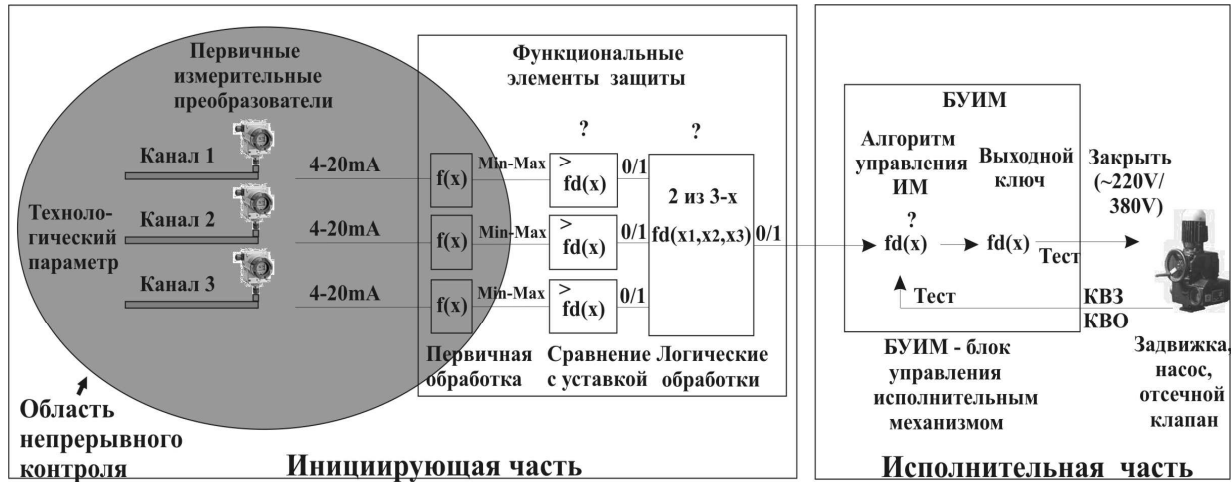


Рис. 1. Типовая структура оборудования защит УСБ:

$f(x)$ – непрерывная функция; $fd(x)$ – дискретная функция;

? – элементы, не охваченные непрерывным контролем;

Min-Max – диапазон изменения значения технологического параметра;

0/1 – дискретные значения (0 или 1) в элементах сравнения с уставкой и логической обработки;

Тест – элементы с непрерывным тестовым контролем

б) реализация контроля работоспособности на срабатывание всего оборудования защит или его части (как минимум иницирующей части защит), путем имитации определенных комбинаций входных сигналов, соответствующих пределам и условиям безопасной эксплуатации энергоблока.

Оба метода имеют ряд следующих недостатков:

а) контроль работоспособности на срабатывание отдельных блоков и устройств решает соответственно задачу проверки работоспособности отдельных элементов, но не всего оборудования в целом. Данный метод позволяет эффективно проверять работоспособность последовательной цепочки элементов (тракта) без наличия элементов демпфирования, например – ввод сигнала и его первичная обработка. Однако при наличии функции демпфирования в комбинации с пороговым элементом (сравнение с уставкой) данный метод реализовать уже достаточно сложно, поскольку достоверная проверка порогового элемента требует его сработки, а продолжительность задания входного сигнала в этом случае не может быть кратковременной, т.е. должна соответствовать условию срабатывания, что для схемы защит нежелательно, поскольку повышает вероятность ложной сработки. При обработке дискретного сигнала сравнения с уставкой в логических элементах, возникает

еще более сложная задача – необходимо организовать проверку всех (или значительной части) возможных комбинаций входных сигналов, соответствующих условиям срабатывания каждой из защит, при этом опять же, необходимо не допустить ложное срабатывание. В итоге, попытка реализовать данный метод на практике приводит к реализации схемы контроля, которая по сложности и трудоемкости в разы превышает схему защит, а значит сама становится основным источником скрытых неисправностей, в том числе на несрабатывание защит. Существующие прикладные приложения данного метода в оборудовании защит, сводятся, главным образом, к непрерывному (тестовому) контролю элементов входных и выходных трактов соответственно в блоках ввода и вывода;

б) контроль работоспособности на срабатывание всего оборудования защит, позволяет организовать проверки, как минимум в части инициирования защит (без проверки исполнительской части) и проверить срабатывание на различных комбинациях входных сигналов, но имеет ряд собственных недостатков:

– при проведении периодического контроля одного канала УСБ, оборудование защит выводится из работы (блокируются выходы в исполнительную часть), что понижает коэффициент готовности на срабатывание в целом всей УСБ;

– сложность достоверной оценки вероятности наличия в оборудовании конкретной УСБ скрытых неисправностей и как следствие сложность определения периода между проверками, гарантирующего заданные в ТЗ показатели надежности;

– наличие скрытых неисправностей, проявляющихся не при определенных комбинациях входных сигналов, а при определенных условиях эксплуатации, которые могут отсутствовать в момент проведения периодического контроля (пример – температура, влажность, параметры электропитания и др.).

Из вышеперечисленного можно сделать следующий вывод [1, 11, 14] – основным источником скрытых неисправностей в оборудовании защит любого типа (цифрового или аналогового), является использование функциональных элементов («сравнение с уставкой», «и», «или», «2/3» и др.), построенных на базе дискретных функций, с выходом, определяемым только двумя состояниями 0 (режим ожидания) или 1 (срабатывание защиты), что в принципе не позволяет обеспечить выполнение непрерывного контроля работоспособности данных элементов на срабатывание.

3. Результаты исследования

Одним из возможных решений данной проблемы могло бы стать использование функциональных элементов, построенных на базе непрерывных функций и обеспечивающих контроль прохождения изменения по любому входному сигналу через все оборудование – от входа до выходной команды защит. Основная идея данного подхода – функциональный элемент на базе непрерывной функции формирует значение в диапазоне от 0 до 1, при этом в нем отсутствуют какие-либо ветвления (условные переходы), определяющие отличия режима ожидания от режима сработки защит, то есть функция работает одинаково в обоих из этих режимов, что позволяет непрерывно контролировать работоспособность логического элемента («сравнение с уставкой», «и», «или», «2/3» и др.), использующего данную функцию (из структуры оборудования исключаются все дискретные элементы, кроме выходных пороговых элементов формирования выходных команд на ИМ, что связано с физическими принципами работы приводов ИМ).

Для реализации данного подхода, необходимо разработать функциональные элементы оборудования защит («сравнение с уставкой», «и», «или», «2/3» и др.), использующие только операции непрерывного типа (арифметические операции и операции присваивания) и не использующие операции отношения и логические операции, относящиеся к дискретному типу.

Рассмотрим пример использования операций непрерывного типа, при построении элемента защит, реализующего функцию «и» на два входа:

$$y = 0,5 * (x_1 + x_2), \quad (1)$$

где x_1 , x_2 – входные переменные; y – выходное значение элемента «и».

Тестовые значения для выражения (1) приведены на рис. 2. Из рис. 2 следует, что при использовании элементов защит различного типа («сравнение с уставкой», «и», «или», «2/3» и др.), построенных только с использованием операций непрерывного типа, имеется возможность проследить реакцию (отклик) оборудования защит на любую комбинацию входных сигналов, от входа до команды защит, при диапазоне изменения входных и выходных значений от 0 до 1.

№ теста	Значения		
	x_1	x_2	y
1	0	0	0
2	0,5	0	0,25
3	0,5	0,5	0,5
4	1	0,5	0,75
5	1	1	1

Рис. 2. Тестовые значения для функционального элемента «и» на базе операций непрерывного типа

При этом, контроль обеспечивается не только в статическом режиме, на одной комбинации входных сигналов, но и в динамическом режиме, за счет постоянного изменения значений сигналов, обусловленного наличием «технологического» и «электрического» шумов по измеряемым параметрам, как минимум в младшем разряде АЦП.

В ходе выполнения исследовательской работы, на базе операций непрерывного типа разработаны и автономно протестированы, в виде программных инструкций, основные функциональные элементы защит и ведется работа по комплексному тестированию данных элементов при реализации алгоритмов защит УСБ. На рис. 3-4 приведены примеры комплексного тестирования функциональных элементов оборудования защит САОЗ (система аварийного охлаждения активной зоны реактора) для 4-х канальной УСБ.

Заключение

Предлагаемый метод реализации функциональных элементов оборудования защит на базе операций непрерывного типа характеризуется следующими основными особенностями и преимуществами:

Датчики (или расчетные параметры)	min	max	ед. изм.	Значение от АЦП	Время демпфирования Тд, s	Значение после демпфирования	Уставка		Результат сравнения	Логическая обработка и иницирование команд в исполнительную часть	Исполнительная часть (блок управления ИМ)		Задвижки, механизмы		
							Знак	Знач.			Условие	Ком-да			
TQ30P04B1	0	1	кгс/см2	0,3000	2	0,3000	">="	0,3	1,0000	"ИЛИ"	0,99981	"=1"	0	TY10S02	
TQ30P05B1	0	1	кгс/см2	0,2999	2	0,2999	">="	0,3	0,9996		0,99970	0,99981	"=1"	0	TY10S03
TQ30P06B1	0	1	кгс/см2	0,2999	2	0,2999	">="	0,3	0,9996		0,99981	0,99981	"=1"	0	TR60S01
TQ30P07B1	0	1	кгс/см2	0,2999	2	0,2999	">="	0,3	0,9996		0,99981	0,99981	"=1"	0	TR60S01
YA11T15Q1	0	30	С°	10,000	2	10,000	"<="	10	1,0000	"ИЛИ"	0,99981	"=1"	0	TY10S02	
YA21T15Q1	0	30	С°	10,001	2	10,001	"<="	10	0,9999		0,99993	0,99981	"=1"	0	TQ13S30
YA31T15Q1	0	30	С°	10,001	2	10,001	"<="	10	0,9999		0,99981	0,99981	"=1"	0	TQ33S32
YA31T15Q1	0	30	С°	10,001	2	10,001	"<="	10	0,9999		0,99981	0,99981	"=1"	0	TQ33S33

Рис. 3. Сработка защиты по давлению >0,3 кгс/см2 и защиты по разности температур <10°С в одном из 4-х каналов; остальные каналы находятся в "крайнем" состоянии перед сработкой; команды на ИМ отсутствуют

Датчики (или расчетные параметры)	min	max	ед. изм.	Значение от АЦП	Время демпфирования Тд, s	Значение после демпфирования	Уставка		Результат сравнения	Логическая обработка и иницирование команд в исполнительную часть	Исполнительная часть (блок управления ИМ)		Задвижки, механизмы		
							Знак	Знач.			Условие	Ком-да			
TQ30P04B1	0	1	кгс/см2	0,3000	2	0,3000	">="	0,3	1,0000	"ИЛИ"	1,00000	"=1"	1	TY10S02	
TQ30P05B1	0	1	кгс/см2	0,3000	2	0,3000	">="	0,3	1,0000		1,00000	1,00000	"=1"	1	TY10S03
TQ30P06B1	0	1	кгс/см2	0,2999	2	0,2999	">="	0,3	0,9996		1,00000	1,00000	"=1"	1	TR60S01
TQ30P07B1	0	1	кгс/см2	0,2999	2	0,2999	">="	0,3	0,9996		1,00000	1,00000	"=1"	1	TR60S01
YA11T15Q1	0	30	С°	10,000	2	10,000	"<="	10	1,0000	"ИЛИ"	1,00000	"=1"	1	TY10S02	
YA21T15Q1	0	30	С°	10,000	2	10,000	"<="	10	1,0000		1,00000	1,00000	"=1"	1	TQ13S30
YA31T15Q1	0	30	С°	10,001	2	10,001	"<="	10	0,9999		1,00000	1,00000	"=1"	1	TQ33S32
YA31T15Q1	0	30	С°	10,001	2	10,001	"<="	10	0,9999		1,00000	1,00000	"=1"	1	TQ33S33

Рис. 4. Сработка защиты по давлению >0,3 кгс/см2 и защиты по разности температур <10°С в 2-х из 4-х каналах; команды на ИМ формируются

1) на выходе элементов формируется не пороговое значение 0 или 1, а непрерывное значение в диапазоне 0-1;

2) функциональные элементы строятся на базе операций непрерывного типа (арифметические операции, присваивание) и не содержат операции дискретного типа (операции отношения, логические операции);

3) в виду использования только операций непрерывного типа и отсутствия ветвлений (условных переходов), последовательность обработки входных переменных в функциональных элементах идентична, как для режима ожидания, так и для режима срабатывания защит, что позволяет реализовать непрерывный контроль и диагностирование по функции защит как для каждого функционального элемента индивидуально, так и для всего оборудования в целом, при этом обеспечивается контроль неисправностей на несрабатывание без выполнения вмешательства в штатную работу оборудования в виде имитации условий срабатывания защит (периодическое опробование), которое применяется в настоящее время;

4) использование данного метода позволяет «перевести» значительную часть скрытых неисправностей, которые теоретически могут быть в

оборудовании, из категории скрытых, в категорию обычных (явных) неисправностей, обнаруживаемых штатными средствами непрерывного контроля непосредственно в момент их появления;

5) контроль состояния оборудования защит, при его реализации на базе функциональных элементов непрерывного типа, может быть организован внешними, независимыми от производителя оборудования защит, системами диагностирования, как на самом энергоблоке, так и удаленно, что обеспечивает возможность реализации многоуровневого, независимого контроля.

Литература

1. *Безопасность атомных станций. Информационно-управляющие системы / М.А. Ястребенский, В.Н. Васильченко, С.В. Виноградская та ін. – К.: Техника, 2004. – 470 с.*
2. *Instrumentation and control systems important to safety in Nuclear Power Plants: Nuclear Energy Series / INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - Vienna.:IAEA, 2002. – No. NS-G-1.3 - 91p.*
3. *Safety of Nuclear Power Plants: Design, Safety Standards Series / INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - Vienna.:IAEA, 2000. – No. NS-R-1 - 125p.*

4. *Software for Computer Based Systems Important to Safety in Nuclear Power Plants: Safety Standards Series / INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - Vienna.:IAEA, 2000. – No. NSG-1.1. - 150p.*

5. *INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC) 60880 – 2004, Nuclear Power Plants — Instrumentation and Control Systems Important to Safety — Software Aspects for Computer-Based Systems Performing Category A Functions.*

6. *INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC) 60987 – 2007, Nuclear Power Plants — Instrumentation and Control Important to Safety — Hardware Design Requirements for Computer-Based Systems.*

7. *INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS(IEEE) 7-4.3.2 , Standard Criteria for Digital Computers in Safety Systems of Nuclear Power Generating Stations.*

8. *Макдональд Д. Промышленная безопасность, оценивание риска и системы аварийного останова / Д. Макдональд, перевод с англ. Л.О. Хвилевичко – М.: ИДТ, 2007. – 409 с.*

9. *Смит, Д. Безотказность, ремонтпригодность и риск; перевод с англ. Л.О. Хвилевичко – М.: ИДТ, 2007. – 432 с.*

10. *НП 306.2.141-2008. Общие положения безопасности атомных станций. – К: ГКЯРУ, 2008. – 42 с.*

11. *Protecting against common cause failures in Digital I&C Systems of Nuclear Power Plants: Nuclear Energy Series / INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – Vienna.: IAEA, 2009. – No. NP-T-1.5 – 65p.*

12. *Ястребенецкий М. Информационные и управляющие системы АЭС Украины: результаты и проблемы // Проблемы обеспечения безопасности информационных и управляющих систем АЭС. Сборник научных трудов / Под.ред. М.А. Ястребенецкого – Одесса: «Астропринт», 2010. – С.9-19.*

13. *Modern Instrumentation and Control for Nuclear Power Plants: Technical Reports Series / INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - Vienna.: IAEA, 1999. – No. 387 – P.629.*

14. *Application of the Single Failure Criterion: Safety Series / INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – Vienna.:IAEA, 1990. – No. 50-P-1 – P. 134.*

Поступила в редакцию 2.09.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедры компьютерных систем и сетей В.С. Харченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

МЕТОДИ НЕПРЕРИВНОГО КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ КСБ ЕНЕРГОБЛОКІВ АЕС ПО ФУНКЦІЇ ЗАХИСТУ

К.Є. Герасименко

Наведені існуючі підходи до рішення задачі контролю та діагностування скритих несправностей типу «не спрацьовування» по функції захисту в обладнанні керуючих систем безпеки. Виконана розробка та тестування на предметних прикладах методу, відмінною особливістю якого є використання елементів захисту, побудованих на базі неперервних функцій, на відмінність від існуючих методів, які використовують дискретні функції. Використання неперервних функцій забезпечує виконання неперервного контролю технічного стану як кожного функціонального елемента захисту індивідуально, так і усього обладнання у цілому.

Ключові слова: керуючі системи безпеки АЕС, обладнання захисту, контроль та діагностування, функціональні елементи захисту, неперервні та дискретні функції.

NPP SAFETY SYSTEM'S FAULT DETECTION AND DIAGNOSIS METHODS FOR PROTECTION FUNCTIONS

К.Е. Gerasymenko

The paper describes existing methods of “as-is condition” latent faults in safety system’s protection equipments in “waiting for an event” condition. New method is developed and tested. The main feature of new method is using continuous type protection elements, which does not contain discrete type operations. Using continuous functions provides continuous fault detection and diagnosis for every functional protection element and for overall protection equipment.

Key words: I&C safety systems, protection equipment, fault detection and diagnosis, protection functional elements, continuous and discrete functions.

Герасименко Константин Евгеньевич – заведуючий лабораторией АСУ ТП ЗАО «СНПО “Имппульс”», Северодонецк, Украина, e-mail: gerasymenko.k.e@yandex.ua.