

УДК 004.415:681.3

К.Е. ГЕРАСИМЕНКО

*Северодонецкое научно-производственное объединение «Импульс», Украина*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНЫХ ФУНКЦИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ ОБОРУДОВАНИЯ ЗАЩИТ АЭС ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ТИПА «НЕСРАБАТЫВАНИЕ ПО ТРЕБОВАНИЮ»

*Разработан и протестирован на прикладных примерах метод контроля и диагностирования оборудования защит из состава управляющей системы безопасности. Отличительной особенностью метода является использование элементов защит, построенных на базе непрерывных функций. Использование непрерывных функций обеспечивает выполнение задачи контроля и диагностирования неисправностей типа «несрабатывание по требованию» в режиме работы оборудования защит, соответствующему режиму «ожидания» исходного события, то есть до момента появления условий срабатывания системы безопасности.*

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

### Введение

Одним из основных показателей, характеризующих надежность оборудования защит из состава управляющих систем безопасности (УСБ) атомных электростанций (АЭС), является вероятность правильного выполнения дискретной функции по формированию последовательности команд защитных действий для отказов типа "несрабатывание". Критерием такого вида отказа является отсутствие команды защиты при наличии «исходного» события, то есть при появлении на входах оборудования защит УСБ любой совокупности данных, которая должна вызвать формирование команды.

### Постановка задачи исследования

В виду того, что отказ типа «несрабатывание» для УСБ в целом может являться причиной возникновения «запроектной» аварии, разработка методов контроля и диагностирования, позволяющих выявлять такого рода отказы является актуальной задачей и предметом различного рода исследований и конструкторских решений. В общем случае, к отказам УСБ данного типа могут приводить комбинации как однотипных (отказы по общей причине), так и разнотипных видов скрытых неисправностей в резервированных компонентах УСБ, имеющих временную корреляцию [1 – 9].

Применительно к типовой структуре УСБ, наличие скрытых неисправностей на несрабатывание означает, что в элементах оборудования защит

(электронных компонентах, блоках, программном обеспечении), реализующих дискретные функции (сравнение с уставкой, «2 из 4-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.

### Анализ исследований и публикаций

Существующие методы решения данной проблемы, описаны в [10 – 14] и сводятся к проверке работоспособности элементов оборудования защит, путем контроля их реакции на специальные тестовые воздействия, поскольку использование данных о рабочих воздействиях от объекта, как правило, недостаточно. Данные методы сводятся к контролю работоспособности на срабатывание либо отдельных блоков и устройств, участвующих в реализации функции защит, либо всего оборудования защит или его части (как минимум инициирующей части защит). Методы обоих типов имеют ряд существенных ограничений и недостатков подробно рассмотренных и проанализированных в [15].

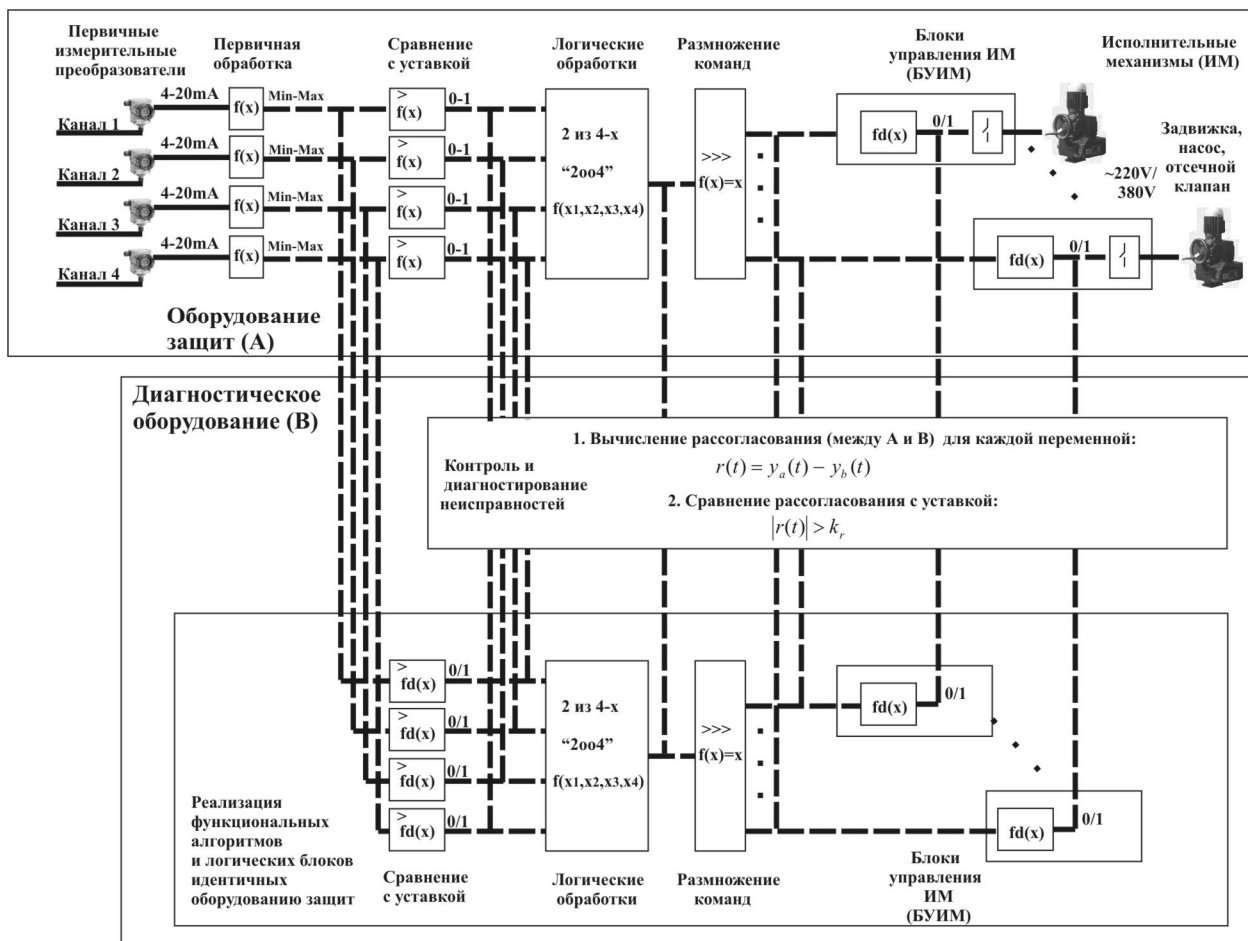


Рис. 1. Функциональная схема контроля и диагностирования оборудования защит УСБ на базе непрерывных функций:

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

Min-Max – диапазон изменения значения технологического параметра;

0-1 – диапазон изменения значений в логических элементах на базе непрерывных функций

0/1 – дискретные значения (0 или 1) в логических элементах на базе дискретных функций;

— — — — — цифровые каналы передачи данных и команд;

————— нецифровые каналы передачи данных и команд

При этом, основное ограничение вытекает из самой структуры элементов оборудования защит («сравнение с уставкой», «и», «или», «2 из 4-х» 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. Метод, предполагающий изменение структуры элементов защит, как средство повышения эффективности контроля и диагностирования скрытых неисправностей на несрабатывание, предложен в [15]. Основная идея данного метода – функциональный элемент защит на базе непрерывной функции формирует значение на всем диапазоне от 0 до 1, при этом, в нем отсутствуют какие-либо ветвления (условные переходы), определяющие отличия режима ожидания от режи-

ма сработки защит, то есть функция работает одинаково в обоих из этих режимов, что позволяет непрерывно контролировать работоспособность соответствующего логического элемента. Все функции, которые используются в логических элементах, строятся на базе операций непрерывного типа (арифметические операции, присваивание) и не содержат операций дискретного типа (операции отношения, логические операции), за исключением выходных пороговых элементов формирования команд на исполнительные механизмы (ИМ), что связано с физическими принципами работы приводов ИМ.

В настоящей статье представлены результаты дальнейшего исследования метода, предложенного в [15], в части разработки на его основе метода контроля и диагностирования оборудования защит, элементы которого построены на базе непрерывных функций.

### Результаты исследования

Функциональная схема разработанного метода представлена на рис.1. Основная идея метода – использование в диагностическом оборудовании (В) идентичных оборудованию защит (А) функциональных алгоритмов и логических элементов (блоков), реализованных в программном коде, при этом как в оборудовании защит, так и в диагностическом оборудовании поступают функционально идентичные входные данные (переменные). За счет использования непрерывных функций, обеспечивается возможность вычисления рассогласования по каждой выходной переменной в каждом логическом блоке, при этом рассогласование вычисляется в самом диагностическом оборудовании.

Математическая модель любого  $i$ -го элемента защит, реализуется в диагностическом оборудовании (В) в виде программной процедуры, аналитическая форма которой может быть представлена в виде:

$$y_i = f_i(x_{i1}, \dots, x_{ni}),$$

где  $y_i = f_i()$  – непрерывная функция, описывающая алгоритм работы  $i$ -го логического элемента оборудования защит.

Таким образом, предлагаемый метод контроля и диагностирования основывается на определении неисправности в любом логическом элементе с порядковым номером  $i$ , при появлении рассогласования  $r_i(t)$  между двумя идентичными выходными переменными данного элемента  $y_{ai}(t)$  (в оборудовании защит) и  $y_{bi}(t)$  (в диагностическом оборудовании).

С учетом того, что значения  $y_{ai}(t)$ ,  $y_{bi}(t)$  являются мгновенными значениями и следовательно, не могут использоваться для корректного сравнения состояний двух несинхронных типов оборудования в динамических режимах, целесообразно усреднять мгновенные значения  $y_{ai}(t)$ ,  $y_{bi}(t)$  перед их использованием в вычислении рассогласования  $r_i(t)$ , а сам признак наличия неисправности формировать в случае превышения значения рассогласования  $r_i(t)$  над значением уставки рассогласования  $k_{ri}$  в соответствии со следующим выражением:

$$|r_i(t)| > k_{ri},$$

где  $r_i(t) = \frac{\sum_{j-\Delta p}^j y_{ai}}{\Delta p} - \frac{\sum_{j-\Delta p}^j y_{bi}}{\Delta p}$  – значение рассогласования;

$k_{ri}$  – значение уставки рассогласования;

$i$  – порядковый номер логического элемента;

$j$  – текущий момент времени (номер текущего цикла ввода данных);

$\Delta p$  – время интегрирования (количество циклов за которое усредняются значения входных данных).

Методы определения значений настроечных параметров  $k_{ri}$  и  $\Delta p$  являются отдельным направлением исследования и будут рассмотрены в дальнейших работах. Далее, проведем анализ предлагаемого метода на примере одной из 4-х канальных защит САОЗ в соответствии с рис.2, в случае наличия неисправности в элементе оборудования, реализующем функцию мажоритарной обработки “2оо4” (2 из 4-х). Строки схемы, относящиеся к части А соответствуют значениям переменных в оборудовании защит, а аналогичные строки (с подстрокой рассогласования) в части В соответствуют значениям этих же переменных, но в диагностическом оборудовании. При этом, рассматриваемая неисправность в элементе мажоритарной обработки “2оо4” (2 из 4-х) характеризуется формированием выходного значения, несоответствующего входным значениям от 4-х каналов (формируемое значение на выходе 0,6256995 меньше номинального 0,8256995, то есть того, которое должно быть при соответствующей комбинации входных значений). Данный тип неисправности может привести к отказу оборудования защит типа «несрабатывание по требованию» при наличии исходного события и поэтому является наиболее критичным, в части влияния на безопасность. Как следует из рис. 2, признак неисправности “Fault”, сформирован до наступления исходного события, по результату рассогласования значений выходных переменных функционального блока мажорирования “2оо4” (2 из 4-х) в оборудовании защит (А) с одной стороны и оборудовании диагностирования (В) с другой.

Еще одним преимуществом, которое обеспечивает реализация оборудования защит на базе непрерывных функций, является возможность введения количественной оценки следующих показателей:

1) величины, характеризующей «запас до срабатывания защиты» – непрерывное значение в диапазоне от 0 до 1, соответствующее значению выходной команды защит (пример – выход элемента “2оо4” на рис.2);

2) величины, характеризующей «запас до неисправности» в каждом элементе защит – непрерывное значение в диапазоне от 0 до 1, соответствующее отношению значения рассогласования  $r_i$  к значению уставки рассогласования  $k_{ri}$ .

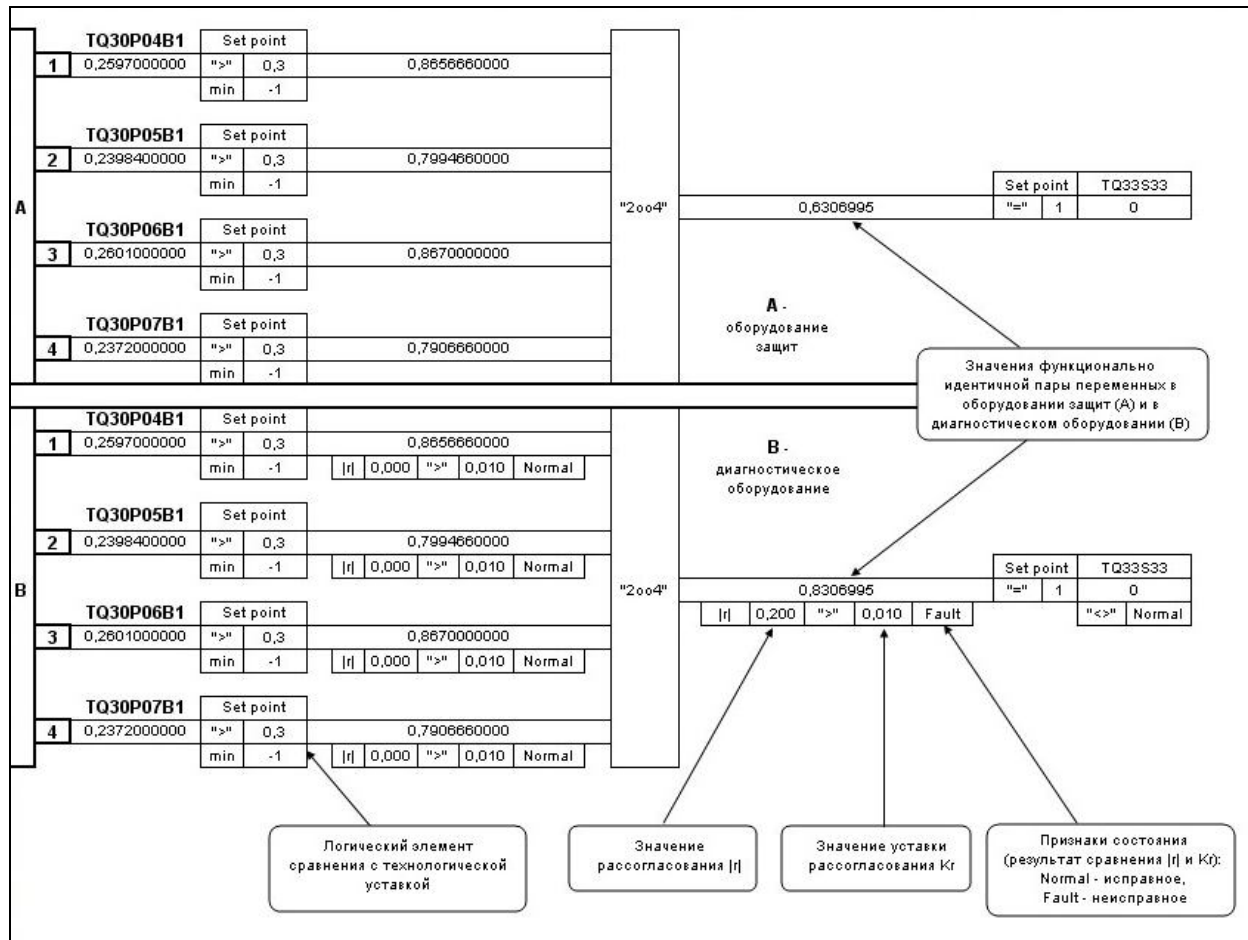


Рис. 2. Диагностирование неисправности типа «несрабатывание по требованию» в элементе «2oo4» (2 из 4-х) оборудования защит УСБ (4-х канальная защита САОЗ по давлению > 0,3 кгс/см<sup>2</sup>)

### Заключение

Разработанный функциональный метод контроля и диагностирования оборудования защит, построенного на базе непрерывных функций, характеризуется следующими особенностями:

1) обеспечивается контроль и диагностирование неисправностей типа «несрабатывание» в режиме работы оборудования защит, который соответствует режиму «ожидания» исходного события, то есть до момента возникновения условий срабатывания системы безопасности;

2) метод обеспечивает непрерывный контроль наличия неисправностей во всех логических элементах за счет определения рассогласования между значениями функционально идентичных переменных в оборудовании защит и в диагностическом оборудовании;

3) в отличие от существующих методов, которые позволяют определять неисправности типа «несрабатывание», главным образом, только при проведении периодических опробований с имитацией условий исходного события, разработанный метод позволяет определять аналогичные типы неисправно-

стей в непрерывном режиме. При этом, обеспечивается возможность контроля и диагностирования не только установившихся неисправностей, но и сбоев различной продолжительности и периодичности.

### Литература

1. *Безопасность атомных станций. Информационно-управляющие системы* / М.А. Ястребецкой, В.Н. Васильченко, С.В. Виноградская и др. – 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. – 91 p.
3. *Safety of Nuclear Power Plants: Design, Safety Standards Series / INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY*. – Vienna: IAEA, 2000. – No. NS-R-1. – 125 p.
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. – 150 p.

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: пер. с англ./ Д. Макдональд. - М.: ИДТ, 2007. – 409 с.

9. Смит Д. Безотказность, ремонтпригодность и риск: пер. с англ. / Д. Смит. - 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. – 65 p.

12. Ястребенецкий М.А. Информационные и управляющие системы АЭС Украины: результаты и проблемы / М.А. Ястребенецкий // Проблемы обеспечения безопасности информационных и управляющих систем АЭС.: сб. науч. тр. – 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. – 629 p.

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

15. Герасименко К.Е. Методы непрерывного контроля и диагностирования оборудования управляющих систем безопасности энергоблоков АЭС по функции защит / К.Е. Герасименко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – № 3 (44). – С. 152-156.

Поступила в редакцию 18.02.2011

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

#### ВИКОРИСТАННЯ НЕПЕРЕРВНИХ ФУНКЦІЙ В ЕЛЕМЕНТАХ ОБЛАДНАННЯ ЗАХИСТУ АЕС ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ ТИПУ «НЕСПРАЦЬОВУВАННЯ НА ВИМОГУ»

*К.Е. Герасименко*

Виконана розробка та тестування на предметних прикладах методу контролю та діагностування обладнання захисту зі складу керуючої системи безпеки. Відмінною особливістю методу є використання елементів захисту, побудованих на базі неперервних функцій, на відмінність від існуючих методів, які використовують дискретні функції. Використання неперервних функцій забезпечує виконання задачі неперервного контролю та діагностування несправностей типу «неспрацьовування на вимогу» у режимі роботи обладнання захисту, відповідному режиму «очікування» первинної події, до моменту появи умов спрацьовування системи безпеки.

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

#### USING CONTINUOUS FUNCTIONS IN NPP SAFETY SYSTEM'S PROTECTION ELEMENTS FOR "AS-IS CONDITION" FAULT DIAGNOSIS

*K.E. Gerasymenko*

New fault detection and diagnosis method for protection equipments of control safety systems is developed and tested. The main feature of new method is using continuous type protection elements (set point, OR, AND, "2oo4" and others) with continuous output range from 0 to 1, which does not contain discrete type operations with only two output condition 0 or 1. Using continuous functions provides continuous fault detection and diagnosis for "as-is condition" latent faults in "waiting for an event" condition for every functional protection element in control safety system's equipment.

**Key words:** control safety systems for nuclear power plants (NPP), protection equipment, fault detection and diagnosis, protection functional elements, continuous and discrete functions.

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