

---

**СИСТЕМА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ «СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА – ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ»****А.В. Сидоров, В.В. Третьяков, Д.Н. Баранов (Москва)****Введение**

Физико-энергетические установки (ФЭУ) представляют собой мультидисциплинарные сложные технические системы. Системы автоматики и управления ФЭУ состоят из электромеханических, механических, оптических, электронных и прочих приборов, соединенных между собой значительным количеством функциональных связей. Отличительной особенностью ФЭУ является разнородность информационных сигналов и различный временной масштаб протекающих физических процессов.

Процесс разработки ФЭУ предусматривает создание средств контроля их работоспособности. Контроль работоспособности проводится с использованием специализированной контрольно-измерительной аппаратуры (СКИА), осуществляющей проверку ФЭУ по программам контроля, написанным на специальном языке. Программы контроля состоят из набора операций, регистрирующих неисправности ФЭУ из заданного перечня контролируемых параметров путем:

- выдачи на ФЭУ воздействий;
- измерения отклика на выданные воздействия и оценки состояния ФЭУ.

Для каждого типа ФЭУ требуется разработка ряда программ контроля. Традиционно отладка программ контроля и оценка их диагностических свойств проводится с применением следующей материальной части:

- комплекса СКИА, подключенного к ЭВМ общего назначения;
- опытного образца ФЭУ;
- комплекта принадлежностей и оборудования, обеспечивающего электрическую связь между СКИА и ФЭУ;
- оборудования, имитирующего неисправности ФЭУ.

Такой подход к отладке и оценке их диагностических свойств программ контроля имеет ряд недостатков:

- отсутствие возможности проведения отладки программ контроля до изготовления опытного образца ФЭУ и выявления схемных ошибок на «ранних этапах» проектирования в цепях связи СКИА с ФЭУ;
- отсутствие возможности отладки программ на сколь угодно большом числе рабочих мест разработчика (ограниченное количество комплектов СКИА);
- сложность или невозможность физического моделирования параметрических отказов, обусловленные схемно-конструктивными особенностями ФЭУ и СКИА, что не позволяет достичь требуемой глубины и полноты диагностирования неисправностей;
- существенные временные затраты и расход ресурса дорогостоящих составных частей ФЭУ при многократных «прогонах» программы контроля.

Метод отладки контрольных программ и исследования их диагностических свойств с использованием системы имитационного моделирования системы «СКИА – ФЭУ» свободен от указанных недостатков.

Система имитационного моделирования «СКИА – ФЭУ» должна позволять решать следующие задачи:

- выявление алгоритмических ошибок разработчика программ контроля;
- проведение отладки программ контроля ФЭУ без использования материальной части;

– имитацию неисправностей ФЭУ для подтверждения диагностических свойств программ контроля ФЭУ.

### Структура системы моделирования «СКИА – ФЭУ»

Структурная схема системы моделирования «СКИА – ФЭУ» представлена на рис. 1 и состоит из:

- платформы моделирования;
- модели исполнения программ контроля ФЭУ комплексом СКИА;
- модели ФЭУ.

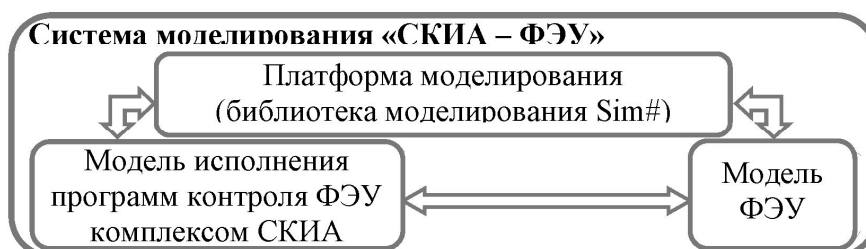


Рис. 1. Структура системы моделирования «СКИА – ФЭУ»

### Выбор технологии построения имитационной модели

В силу разнородности составных частей система «СКИА – ФЭУ» наилучшим образом описывается агрегативной математической схемой [1].

Основной целью системы моделирования «СКИА – ФЭУ» является отладка программ контроля, поэтому моделированию подлежат лишь те процессы, которые позволяют производить оценку состояния ФЭУ или приводят к его смене. Это утверждение позволяет исключить из моделей составных частей ФЭУ сложные расчеты переходных процессов, которые заменяются событиями, происходящими в дискретные моменты времени. Для реализации предложенного подхода наилучшим образом подходит технология дискретно-событийного моделирования.

### Модель исполнения программ контроля ФЭУ комплексом СКИА

На рис. 2 приведена агрегативная модель исполнения программ контроля ФЭУ комплексом СКИА.

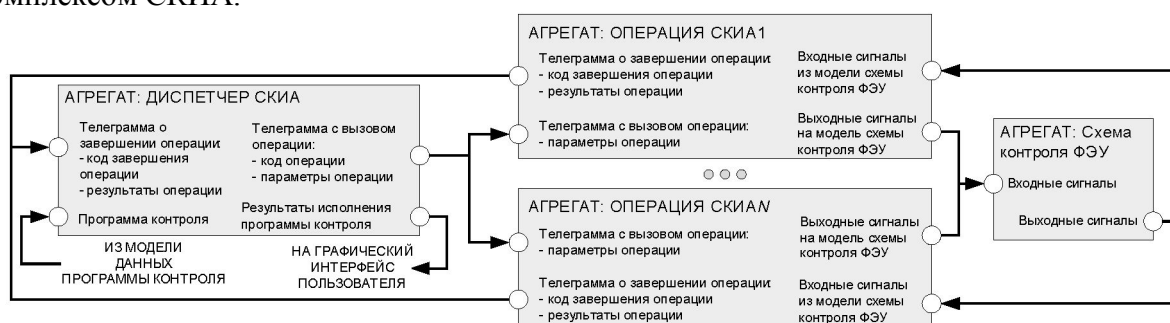


Рис. 2. Агрегативная модель исполнения программы контроля комплексом СКИА

Изображенная на рис. 2 модель состоит из агрегатов, моделирующих:

- диспетчер СКИА;
- операции СКИА;
- схему контроля ФЭУ.

Диспетчер СКИА – центральный агрегат, обеспечивающий вызов и согласование работы операций СКИА в соответствии с загружаемой в него программой контроля ФЭУ путем обмена телеграммами (сообщениями) установленного формата. Исполнение кон-

---

трольной аппаратурой операций приводит к изменению состояния схемы контроля ФЭУ, осуществляющей информационный обмен с моделью ФЭУ.

### Выбор средств моделирования

Для компьютерной реализации системы имитационного моделирования требуется осуществить выбор инструментальных средств.

Весь спектр компьютерных средств моделирования возможно разделить на группы [2]:

- системы, обладающие языками имитационного моделирования (ЯИМ);
- языки общего назначения (ЯОН).

Средства моделирования, принадлежащие первой группе, созданы для решения широкого класса задач, поэтому они обладают универсальностью и избыточны для решения специфической задачи. Универсальность не позволяет абстрагироваться от деталей реализации и работать в терминах проблемной области. Объекты модели в универсальных системах имеют абстрактные обозначения. Это заставляет разработчиков моделей заниматься дополнительной обработкой результатов и идентифицировать объекты в модели для последующего их анализа.

Современные ЯОН позволяют разработчику определять структуру своего приложения, обеспечивая тем самым компромисс между гибкостью, простотой и функциональностью. Парадигма объектно-ориентированного программирования, поддерживаемая практически всеми ЯОН, позволяет выстраивать иерархию классов в терминах проблемной области. Эти особенности использования современных ЯОН являются определяющими в случае создания системы моделирования «СКИА – ФЭУ» в силу ее высокой сложности, ответственности и узкой специфичности.

В соответствии с критериями выбора ЯОН для систем дискретного имитационного моделирования [3] в качестве инструментального средства реализации системы «СКИА – ФЭУ» выбран ЯОН С#.

### Библиотека моделирования Sim#

В настоящее время существуют специализированные библиотеки моделирования, разработанные для конкретного ЯОН и совмещающие «сильные» стороны специализированных пакетов моделирования с преимуществами ЯОН. Такие библиотеки выступают в роли платформы для разрабатываемой системы. Примерами могут служить C++Sim и SimPy, структура и принципы работы которых подробно описаны в [4,5].

В качестве платформы для создания системы моделирования «СКИА – ФЭУ» разработана библиотека Sim#, реализующая процессно-ориентированные принципы библиотеки SimPy, требуемый для системы моделирования «СКИА – ФЭУ» функционал и обладающая сравнительно с SimPy большим быстродействием.

В основе работы библиотеки Sim# лежит идея микропотоков исполнения – активных объектов, описывающих параллельно выполняющиеся процессы. В любой астрономический момент времени активен только один микропоток, исполняющий свой моделирующий алгоритм и планирующий события с привязкой к модельному времени. Микропоток может использовать как свои, так и чужие структуры данных, порождать и завершать другие микропотоки, планировать события. Продвижение модельного времени до следующего запланированного события происходит, когда все микропотоки в данный момент модельного времени исполнили свои моделирующие алгоритмы или перешли в состояние ожидания. Взаимодействие и вызов микропотоков исполнения обеспечивает диспетчер библиотеки.

Микропотoki исполнения реализованы при помощи возобновляемых функций – генераторов. Генератор позволяет:

- сохранив свое состояние, прервать исполнение и передать управление диспетчеру при помощи оператора yield;
- возобновить исполнение по требованию диспетчера с операции, следующей за прервавшим исполнение оператором yield.

После оператора yield указываются возвращаемые значения, представляющие собой элементы перечисления возможных действий:

- приостановить микропоток на заданное модельное время;
- приостановить микропоток до выполнения заданного условия;
- приостановить микропоток на заданное модельное время или до выполнения заданного условия;
- остановить микропоток.

### Моделирование исполнения программы контроля комплексом СКИА на примере фрагмента ФЭУ

На рис. 3 представлена схема фрагмента ФЭУ, контролируемая СКИА.

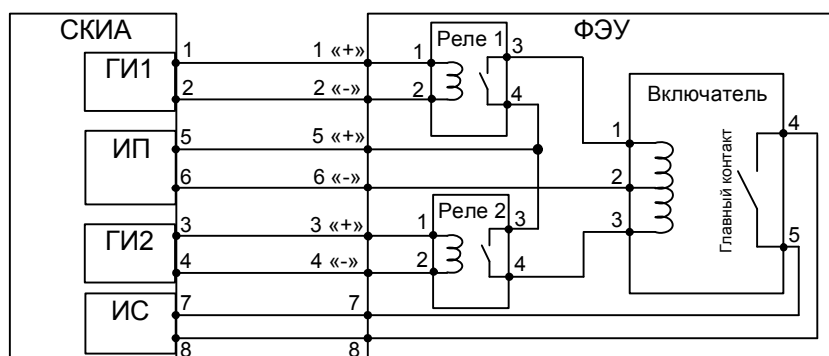


Рис. 3. Схема фрагмента ФЭУ

Кратко опишем работу схемы. Включатель имеет две обмотки управления (1-2 и 3-2) и главный контакт (4-5). Главный контакт замыкается при подаче на обмотки управления попеременно импульсов напряжения. Напряжение на управляющей обмотке появляется при замыкании контакта (3-4) соответствующего реле при условии, что на цепь 5-6 ФЭУ подано напряжение питания требуемой полярности от источника питания (ИП). Включение реле осуществляется через обмотки управления (цепи 1-2 и 3-4 ФЭУ соответственно) генераторами импульсов (ГИ1, ГИ2). Оценка состояния главного контакта включателя осуществляется измерителем сопротивления (ИС) (цепь 7-8 ФЭУ).

Агрегативная модель описанной схемы представлена на рис. 4. Интерфейсные агрегаты, приведенные на рис. 4, моделируют логику прохождения напряжения питания до обмоток включателя.

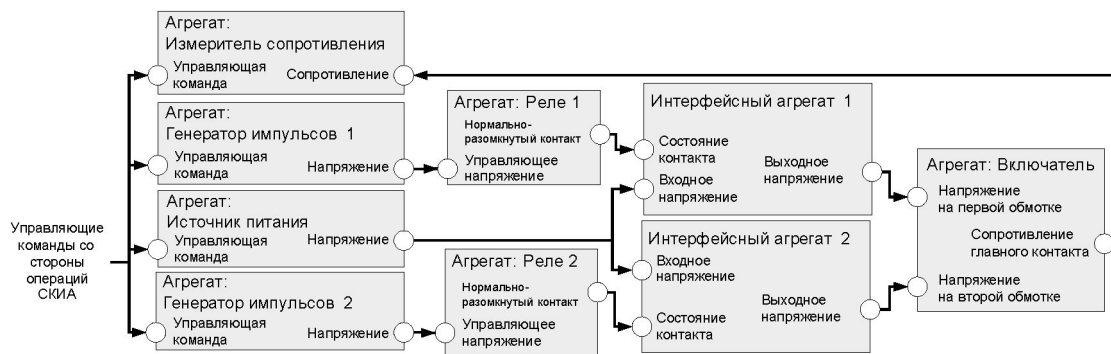


Рис. 4. Агрегативная модель схемы фрагмента ФЭУ, контролируемой СКИА

### Пример программной реализации модели генератора импульсов СКИА с использованием библиотеки Sim#

Библиотека моделирования Sim# позволяет выполнить программную реализацию агрегативных моделей:

- исполнения программ контроля ФЭУ комплексом СКИА (рис. 2).
- схемы фрагмента ФЭУ, контролируемой СКИА (рис. 4).

Определение микропотока содержится в абстрактном классе библиотеки Sim# – *MicroThread*. Для программной реализации агрегата, моделирующего некоторый процесс или составную часть СКИА и ФЭУ, с помощью микропотока требуется определить класс-наследник базового класса *MicroThread*, в котором описать структуры данных и моделирующий алгоритм в теле переопределяемого метода *IEnumerable<mtAction> ModelingFunction()*. Пример класса, моделирующего генератор импульсов СКИА, приведен в листинге 1.

Листинг 1. Моделирование генератора импульсов СКИА с помощью библиотеки Sim#

```
using SimSharp; // подключение библиотеки Sim#
namespace DeviceLibrary
{
    ///<summary> Агрегативная модель генератора импульсного напряжения </summary>
    public sealed class ImpulseGenerator : MicroThread
    {
        #region Модель данных агрегата
        const double MAX_VOLTAGE = 10.0; //Высокое напряжение на выходе – 10 В
        const double MIN_VOLTAGE = 0.02; //Низкое напряжение на выходе – 0.02 В
        readonly ulong IMPULSE_TIME = t.Ms(15); //Время выдачи импульса – 15 мс
        readonly ulong PAUSE_TIME = t.Ms(50); //Время паузы между импульсами – 50 мс
        WaitableDouble voltage = new WaitableDouble(MIN_VOLTAGE); //Напряжение выхода
        WaitableBool isWork = new WaitableBool(false); //Команда управления
        public void Start() { isWork.Value = true; } //Команда на выдачу импульсов
        public void Stop() { isWork.Value = false; } //Команда на останов
        #endregion

        #region Моделирующий алгоритм агрегата
        override IEnumerable<mtAction> ModelingFunction()
        {
            for (;;)
            {
                yield return WaitTrue(isWork); // ожидание команды на выдачу импульсов

                yield return Hold(PAUSE_TIME); // генератор ждет время паузы
                voltage.Value = MAX_VOLTAGE; // начало импульса (высокое напряжение)
                yield return Hold(IMPULSE_TIME); // генератор ждет время импульса
                voltage.Value = MIN_VOLTAGE; // конец импульса (низкое напряжение)
            }
        }
    }
}
```

### Отладка программ контроля ФЭУ с помощью системы моделирования «СКИА – ФЭУ»

Для отладки программы контроля ФЭУ с помощью системы моделирования «СКИА – ФЭУ» требуется создать имитационную модель ФЭУ, хранящуюся в динамически компонуемой библиотеке DLL. Для создания DLL-файла с моделью требуется:

- составить агрегативную модель схемы ФЭУ, в соответствии с приведенным примером;

- задать для каждого агрегата моделирующий алгоритм. В моделирующем алгоритме агрегата следует учитывать случаи неправильных входных воздействий, при наступлении которых регистрируется ошибка моделирования. Например, на входы агрегата «Включатель» запрещается одновременная подача управляющего напряжения. Таким образом система моделирования выявляет алгоритмические ошибки разработчика программ контроля, которые могут привести к физическому повреждению ФЭУ;

- выполнить программную реализацию агрегатов с помощью наследования от базового класса *MicroThread* библиотеки *Sim#*;

- создать экземпляры реализованных классов и связать их входные/выходные переменные в соответствии с агрегативной моделью;

- подключить экземпляры реализованных классов к диспетчеру библиотеки *Sim#* с помощью метода *AddMicroThread(MicroThread microThread)*.

- с помощью команды *build solution* создать DLL-файл с моделью.

Кроме отладки программы контроля с помощью системы моделирования возможно подтверждение диагностических свойств программы контроля путем внесения в имитационную модель ФЭУ возможных неисправностей и многократного «прогона» программ контроля.

Например, для приведенной на рис. 3 ФЭУ перечень неисправностей, которые должна выявлять программа контроля, включает в себя две неисправности главного контакта:

- неисправность типа «короткое замыкание»;

- неисправность типа «обрыв».

СКИА должна регистрировать неисправности на заданных операциях программы контроля ФЭУ. Неисправности вносятся в имитационную модель ФЭУ путем корректировки моделирующего алгоритма соответствующего агрегата. Таким образом создается набор DLL-файлов, содержащих имитационные модели ФЭУ с неисправностями.

Каждая библиотека с имитационной моделью ФЭУ подключается к системе моделирования «СКИА – ФЭУ», которая имитирует исполнение программы контроля, осуществляющей регистрацию неисправностей. На рис. 5 представлен графический интерфейс пользователя (GUI) системы моделирования «СКИА – ФЭУ», на котором отображена информация о зарегистрированной неисправности главного контакта ФЭУ типа «короткое замыкание». При регистрации неисправности переменная СЧ\_ДЕФ увеличивается на единицу.

Внедрение в практику предложенного способа и созданных инструментов моделирования позволяет упростить отладку и, в частности, подтверждение диагностических свойств программ контроля ФЭУ.

Система имитационного моделирования «СКИА – ФЭУ» позволяет выявлять алгоритмические ошибки разработчика программ контроля, тем самым уменьшая влияние человеческого фактора на разработку системы контроля ФЭУ.

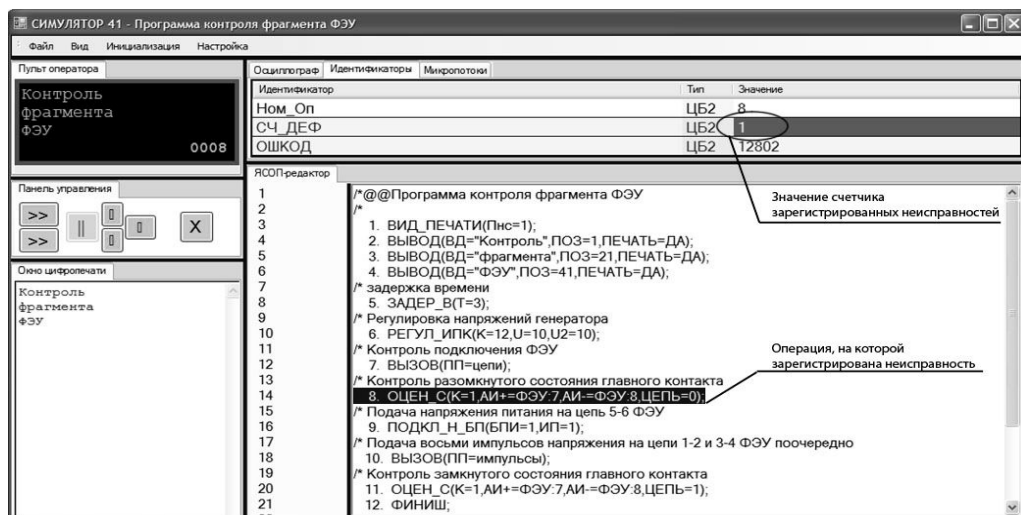


Рис. 5. GUI системы моделирования «СКИА – ФЭУ»

### Заключение

Для проведения отладки и подтверждения диагностических свойств программ контроля ФЭУ с помощью системы имитационного моделирования не требуется применение материальной части.

Работы по подтверждению диагностических свойств программ контроля ФЭУ разбиваются на два этапа:

- на первом этапе проводится имитация заданного перечня неисправностей ФЭУ на имитационной модели и подтверждаются диагностические свойства программы контроля с помощью системы моделирования «СКИА – ФЭУ» до изготовления опытных образцов ФЭУ;
- на втором этапе проводятся испытания отлаженной программы контроля на реальных ФЭУ.

Применение системы моделирования «СКИА – ФЭУ» совместно с контрольными испытаниями на реальных ФЭУ и СКИА позволяет значительно снизить временные и материальные затраты на разработку программ контроля (на практике срок разработки уменьшается более чем в 10 раз), повысить качество и надежность разрабатываемых ФЭУ в целом.

### Литература

1. Бусленко Н.П., Калашников В.В., Коваленко И.Н. Лекции по теории сложных систем. – М.: Изд-во «Советское радио», 1973. – 440 с.
2. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. И доп. – М.: Высш. Шк., 2001. – 343 с.
3. Родионов А.С. Разработка систем дискретного имитационного моделирования информационных сетей: автореф. дис. ... док. техн. наук. – Новосибирск, 2002.
4. Щетинин Д. В. Библиотека имитационного моделирования систем с дискретными событиями C++SIM // Первая всероссийская науч.-практич. конф. Опыт практического применения языков и программных систем имитационного моделирования в промышленности и прикладных разработках «ИММОД-2003» (Санкт-Петербург, 2003 г.): сб. докл. Т.1., с. 200–204.
5. SimPy Simulation Package [Электронный ресурс] // <http://simpy.sourceforge.net> (дата обращения 07.04.2013).