

## **ИНФОРМАЦИОННОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАБОТКИ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ АЛГОРИТМОВ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ**

Анализируются подходы к автоматизации тестирования управляющих программ систем промышленной автоматизации. Выделяются существующие недостатки и определены перспективные пути их устранения. Предлагается схема информационной технологии, обеспечивающей обработку, упорядоченное хранение и поиск временных рядов технологических сигналов для автоматизированного тестирования управляющих программ. Описывается метод классификации, распознавания и ускоренного поиска образов технологических сигналов. Разрабатывается алгоритм синтеза реакции динамического объекта управления на основании классифицированных образов.

**Ключевые слова:** пусконаладочные работы, АСУТП, идентификация, НПЛ.

### **1. Введение**

В настоящее время в сфере промышленной автоматизации инструментальные программные и аппаратные средства достигли высокой степени совершенства. Это позволяет сократить временные и трудовые затраты при решении типовых задач автоматизации технологических процессов. К ним можно отнести:

- контроль параметров технологического объекта с заданной точностью;
- подключение датчиков и исполнительных устройств к управляющим устройствам;
- ввод-вывод дискретных и аналоговых сигналов, их обработка в реальном времени;
- проверка логических условий и блокировок, формирование дискретных управляющих сигналов;
- расчет аналоговых и дискретных управляющих воздействий по стандартным алгоритмам регулирования (П-, И-, ПИ-, ПИД-контроллеров);
- формирование питающего напряжения и управление скоростью и перемещением исполнительных приводов;
- интеграция средств автоматизации в сетевую структуру и обеспечение прохождения информационных потоков;
- решение интерфейсных задач (взаимодействие с пользователями);
- протоколирование сигналов и событий.

Большинство технологических установок, для которых проектируются системы автоматического управления, имеют свои особенности, которые необходимо учесть при составлении управляющих алгоритмов. На итоговое качество работы также влияет множество факторов, которые невозможно учесть заранее:

- нелинейность реакции объекта управления;
- нестабильность работы отдельных технических компонент;
- особенности настройки и работы программных компонент управляющих контроллеров;
- логические ошибки и непроработанность отдельных ситуаций в проектных алгоритмах, которые можно обнаружить только в процессе пуско-наладочных работ на объекте;
- требования заказчика на реализацию дополнительных функций, облегчающих решение технологических задач.

### **2. Анализ литературных источников и постановка задач исследования**

В настоящее время можно выделить несколько подходов к тестированию и наладке промышленных систем управления, включающих в свой состав программируемые логические контроллеры (ПЛК).

Прежде всего – это компьютерное имитационное моделирование объекта управления и реализация функций расчета управляющих воздействий в специализированных программных пакетах. Подход отличается низкими издержками и универсальностью, однако требует соответствующей компетентности для синтеза моделей, отсутствием связи с программной и аппаратной частью реальной системы управления технологическим процессом (АСУТП). Также идеализация объекта управления и его сигналов не позволяет до проведения основных пуско-наладочных работ решить проблемы обработки сигналов системой управления и точно настроить управляющие алгоритмы.

Следующий подход можно рассматривать как один из этапов разработки программного обеспечения, заключающийся в эмуляции работы ПЛК на рабочей станции для исправления синтаксических ошибок и наиболее общей проверки работоспособности программы. Имеется возможность просматривать и модифицировать состояние программных переменных, что позволяет выполнить простые тесты, хотя и с большими затратами труда разработчиков.

Более совершенен подход с использованием специализированных средств эмуляции объектов управления FAT – Factory Acceptance Test simulator (симулятор для заводской приёмки), которые имеют различные свойства с точки зрения степени достоверности симуляции и хорошо интегрируются со средой разработки и эмуляции программ ПЛК. К ним можно отнести средства разработки – WinMOD, Mynah MiMiC, Siemens SIMIT, APROS, Process Simulator [1]. Преимуществом является более высокая достоверность тестирования сложных систем управления и приближенность тестируемого исходного кода к конечному релизу. Недостаток подхода – идеализация объекта управления и высокая трудоемкость разработки моделей технологического процесса.

Полунатурное моделирование представляет собой подход к исследованию устройства, реализованного в виде системы из натуральных элементов, сопрягаемых с остальной частью системы, реализованной в виде модели. Создание аппаратных блоков, максимально повторяющих элементы готового изделия и управляемых моделью с компьютера, позволяет исследовать и оценить воздействие факторов, моделировать которые невозможно или нецелесообразно. Программная модель при этом дает возможность исследовать множество различных алгоритмов работы и обработки информации. Часто различные алгоритмы обработки информации можно исследовать параллельно, что также сильно повышает эффективность работ [3, 4].

Преимущественно проектирование и разработка сложных систем управления осуществляется на основе двух принципов. При первом работоспособность системы исследуют и настраивают с помощью инструментов моделирования. Программное обеспечение для моделирования обеспечивает гибкость проверки системы при отработке различных сценариев. Второй принцип заключается в разработке проекта на конкретной платформе и оценке работоспособности оборудования системы в реальных условиях. При исследовании реализованных проектов нужно запускать как модель, так и само устройство, получить данные эксперимента и сравнить полученные результаты.

Преимущества этих подходов объединены в методе аппаратно-программного моделирования Hardware in the Loop (HIL). Методология HIL [2] обеспечивает промежуточный уровень контроля разрабатываемых систем, а именно между программным обеспечением для моделирования и тестированием оборудования проектируемой системы.

Для реализации полунатурного моделирования необходимо организовать обмен информацией между численной моделью, реализуемой на компьютере, и реальным объектом, работающим в реальном времени. Обмен информацией физически реализуется с помощью интерфейса и адаптера, а алгоритмически – с помощью программных средств.

Если для рассмотрения взять *двухуровневую систему*, то можно выделить ряд задач, которые нужно решить на этапе имитационного моделирования:

- программное или аппаратное моделирование объекта управления;
- моделирование управляющей логики (ПЛК);
- централизованное управления и визуализация (SCADA);
- реализация обмена данными (интерфейс, протокол, шлюз, etc.).

Производители тестовых программно-аппаратных комплексов решают технические задачи сопряжения модельного объекта (эмулируемого на рабочей станции) с натурной системой управления через средства ввода-вывода и синхронизации.

Сокращение издержек на внедрение новых систем промышленной автоматизации и повышение качества автоматического управления кроется в совершенствовании средств отладки управляющих программ для промышленных программируемых контроллеров. Оно может заключаться в автоматизированном построении программной модели технологического объекта, реализующей его динамические свойства и эмулирующей осведомительные сигналы с как можно более полным учетом их фактических характеристик.

*Целью работы* является повышение эффективности тестирования управляющих алгоритмов систем промышленной автоматизации путем использования метода автоматизированного построения модели объекта управления на основе обработки временных рядов технологических сигналов. Эта цель обуславливает следующие *задачи исследования*:

- анализ и упорядоченное хранение характерных образов входных и выходных сигналов в виде временных рядов;
- разработка метода быстрого поиска наиболее подходящих фрагментов временных рядов и синтеза реакции технологического объекта управления;
- разработка элементов программного обеспечения для обработки временных рядов технологических сигналов для тестирования управляющих алгоритмов систем промышленной автоматизации;
- обобщение предложенного подхода поддержки пусконаладочных работ и тестирования систем автоматического управления сложными технологическими процессами в виде схемы информационной технологии.

### **3. Материал и результаты исследований**

Производители промышленных программируемых логических контроллеров и средств разработки управляющих программ стремятся усовершенствовать программные средства эмуляции и отладки, однако для реализации моделей технологического оборудования необходимо непосредственное участие разработчиков конкретной АСУТП. Это требует временных и денежных затрат, сравнимых с затратами на разработку управляющих программ [1].

Процесс тестирования, отладки и испытаний систем управления и программного обеспечения непосредственно на промышленном объекте приводит к неконтролируемому росту финансовых издержек и временных затрат предприятий-разработчиков. В итоге процесс пуско-наладки может затягиваться на несколько рабочих недель по сравнению с утвержденным планом работ. Имеющиеся программные средства отладки не обеспечивают автоматизированной идентификации объекта управления и автоматизированного проведения тестов с фиксацией логических ошибок.

При наличии полигонного ПЛК со всеми интерфейсными модулями отладка по принципу Hardware-in-the-loop будет заключаться в подключении входов и выходов через дополнительные модули ввода-вывода к рабочей станции, на которой выполняются задачи (рис. 1):

- формирование тестовых сценариев;
- вывод к исследуемой системе задающих сигналов и эмулированных сигналов обратной связи (осведомительных);
- считывание управляющих сигналов, формируемых ПЛК в соответствии со своей программой;
- моделирование объекта управления и расчет его мгновенных значений выходных сигналов;
- контроль корректности работы управляющих программ ПЛК и формирование сообщений оператору-тестировщику.

Стоит отметить, что при описанном подходе модельное время должно как можно точнее совпадать с реальным, иначе точность формирования осведомительных сигналов существенно падает, что может сказаться на качестве тестирования.

Подобные комплексы позволяют значительно снизить издержки по отладке систем управления, однако такая концепция бесполезна при отсутствии действенных средств автоматизации построения модели технологического объекта, максимально приближенной

по характеру реакции к реальному технологическому объекту. Крайне желательно, чтобы метрологические характеристики тестовых сигналов были близки к реальным.

Решить указанную проблему можно путем разработки метода формирования ситуационных динамических моделей технологических объектов и анализа ситуационного отклика объекта. Такой метод будет включать этапы классификации архивной информации, содержащей историю изменения всех сигналов технологического объекта, быстрого поиска подобных ситуаций по образам сигналов и расчета на их основе прогнозного значения выходного сигнала объекта. В итоге схема отладки и тестирования управляющих устройств и алгоритмов, изображенная на рис. 1, становится действенным и эффективным средством автоматизация тестирования, увеличения безопасности испытаний систем управления.

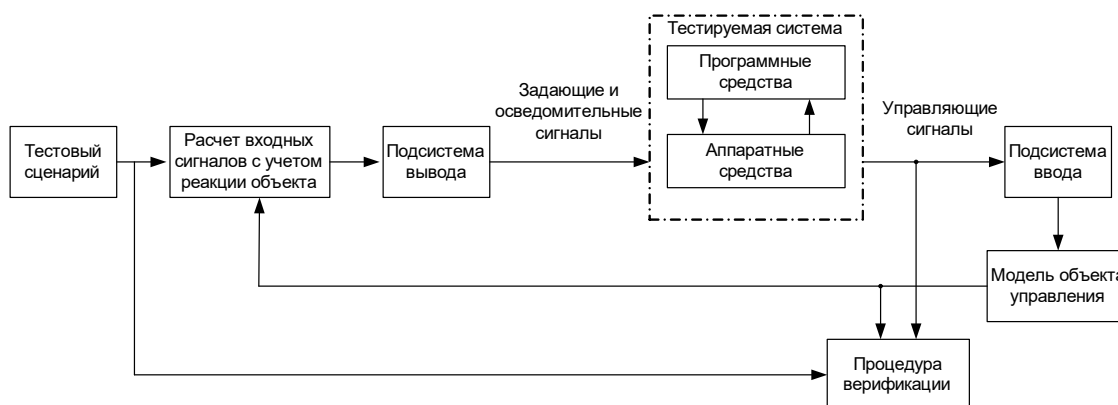


Рис. 1. Принцип Hardware-in-the-loop для отладки управляющих систем

Для сохранения форм и характеристик реальных сигналов задержка расчета прогнозного значения выходного сигнала моделью объекта управления не должна превышать интервал дискретизации тестируемой системы управления. Чаще всего для систем управления технологическими процессами горно-обогатительного производства такие интервалы лежат в пределах от 0,1 до 5 секунд.

Рис. 2 демонстрирует предложенный подход к разбиению временных отчетов технологических сигналов на характерные фрагменты (в рассмотренном примере имеется два канала входных воздействий и один канал обратной связи, по которому можно судить о реакции объекта). На основе фрагментов можно уверенно спрогнозировать будущую реакцию технологического объекта в тестовых целях, даже если точно такой же ситуации в архиве не содержится.

Детальнее процесс интерполяционных расчетов выходной реакции описан в [2]. Стоит отметить, что динамические свойства технологического оборудования вынуждают учитывать более протяженную ретроспективу для выходных сигналов.

Разбиение на фрагменты, классификацию и упорядоченное хранение исходных архивов дата-лоджинга целесообразно организовать следующим образом.

Последовательно из архива в массив оперативной памяти извлекаются значения временных отчетов. Если выбранный интервал дискретизации больше, чем в исходном архиве, итоговое значение можно получать как результат операции медианного сглаживания. В итоге количество точек отсчета каждого сигнала должно быть не менее десяти.

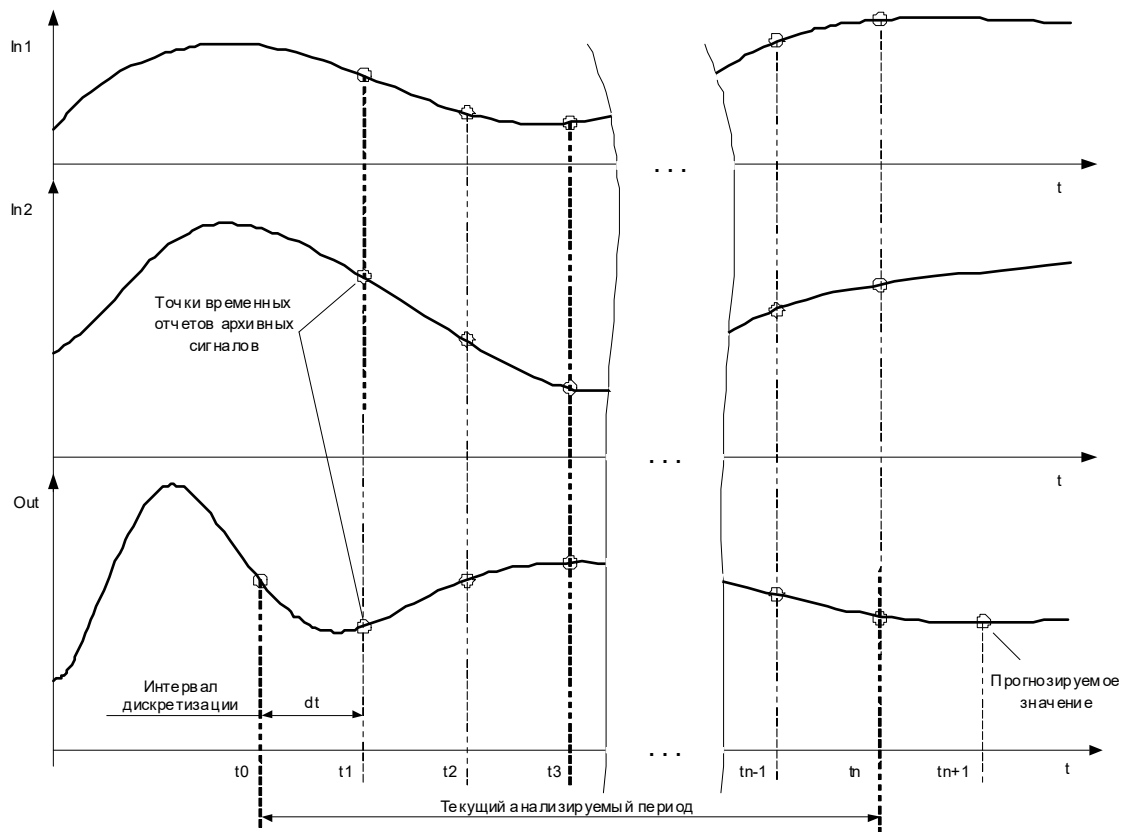


Рис. 2. Схема получения временных рядов технологических сигналов (In1, In2 – сигналы входных воздействий на объект; Out – сигнал реакции объекта)

Каждый фрагмент временных рядов сигналов хранится в виде структуры, подобной той, что приведена на рис. 3.

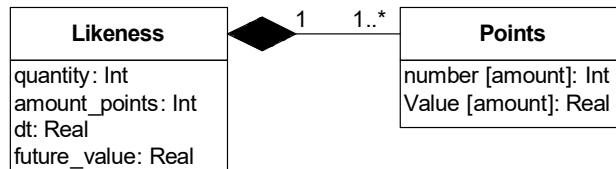


Рис. 3. Диаграмма структуры хранения временных рядов

Структура *Likeness* содержит информацию о количестве рядов, количестве точек в хранимом фрагменте, величине интервала дискретизации и прогнозом значения выходного сигнала. С этой структурой отношением композитной ассоциации связаны структуры *Points*, содержащие массивы номеров точек и абсолютных значений сигнала. Такого рода программные структуры при условии упорядоченного хранения являются основой для поведенческой эмуляции технологического объекта.

Для работы метода эмуляции следует рассчитать классификационные признаки для каждого сигнала в виде вещественных чисел. Такими признаками могут быть: среднее значение каждого сигнала на анализируемом периоде, производные сигнала в начале и конце периода, среднее значение производной, конечное значение сигнала.

Среднее значение:

$$y_{av} = \frac{\sum_{i=0..n} y_i}{n},$$

где  $y_{av}$  – среднее значение сигнала на периоде;  $y_i$  – текущее значение сигнала.

Производные вычисляются в конечных разностях:

$$dy_{av} = \frac{\sum_{i=0..n-1} \frac{y_{i+1} - y_i}{dt}}{n}, \quad dy_0 = \frac{y_{i+1} - y_i}{dt}, \quad dy_n = \frac{y_n - y_{n-1}}{dt},$$

где  $dy_{av}$  – среднее значение производной на периоде;  $dy_0$  – значение производной на начале периода;  $dy_n$  – значение производной в конце периода.

Переход от классификационных признаков к адресам хранения структур данных выполняется посредством многомерного массива указателей, в котором каждый элемент содержит один указатель или цепочку указателей на структуры, близкие по квалификационным признакам. Мерность массива определена количеством классификационных признаков и количеством сигналов. Преобразование вещественного значения каждого признака в целочисленный индекс выполняется по формуле:

$$\text{index} = \text{round}\left(\frac{P_k - P_{\min}}{dP}\right), \quad (1)$$

где  $P_k$  – значение классификационного признака;  $P_{\min}$  – минимально возможное значение классификационного признака;  $dP$  – цена дискреты классификационного признака.

Например, если реакция объекта управления – обжиговой печи – определяется температурой материала в диапазоне 650 – 1100 градусов Цельсия и количество дискретных значений выберем 20, то для среднего значения ряда 830°C по формуле (1) значение индекса будет равно 8.

В процессе отладки по принципу Hardware-in-the-loop временные ряды формируются на основе тестового сценария, который регламентирует задающие сигналы системы управления, прошлых и текущих значений сигналов управления, формируемых тестируемым ПЛК, прошлых и текущих значений осведомительных сигналов, формируемыми моделью объекта управления. Так как для модельных расчетов важен быстрый поиск фрагментов, наиболее близких к текущей ситуации, для анализируемого периода следует рассчитать признаки, от них перейти к индексам массива и извлечь указатели на структуры хранения архивных данных.

После вычисления указателя на структуры, хранящие временные ряды технологических сигналов, производится поиск наиболее подходящих путем простого перебора и расчета расстояния между рядами сигналов для каждой структуры:

$$S = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \frac{\sum_{i=0}^n |y_i^* - y_i|}{y_{av}^*}, \quad (2)$$

где  $k$  – количество рядов (сигналов) в структуре;  $y_i^*$  – мгновенные значения одного сигнала текущего сценария;  $y_i$  – мгновенные значения проверяемого фрагмента;  $y_{av}^*$  – среднее значение сигнала на текущем периоде.

Если для текущей ситуации и определенных классификационных признаков не найдены близкие фрагменты, процедура верификации формирует сообщение пользователю. Для обеспечения непрерывности процесса тестирования и синтеза выходного сигнала объекта могут использоваться фрагменты из соседних ячеек массива.

На основе найденных фрагментов производится расчет выходных сигналов технологического объекта управления с помощью нечеткой интерполяции [5].

Функциональная модель проведения процессов тестирования систем управления сложными технологическими процессами описывается UML-диаграммой на рис. 4.

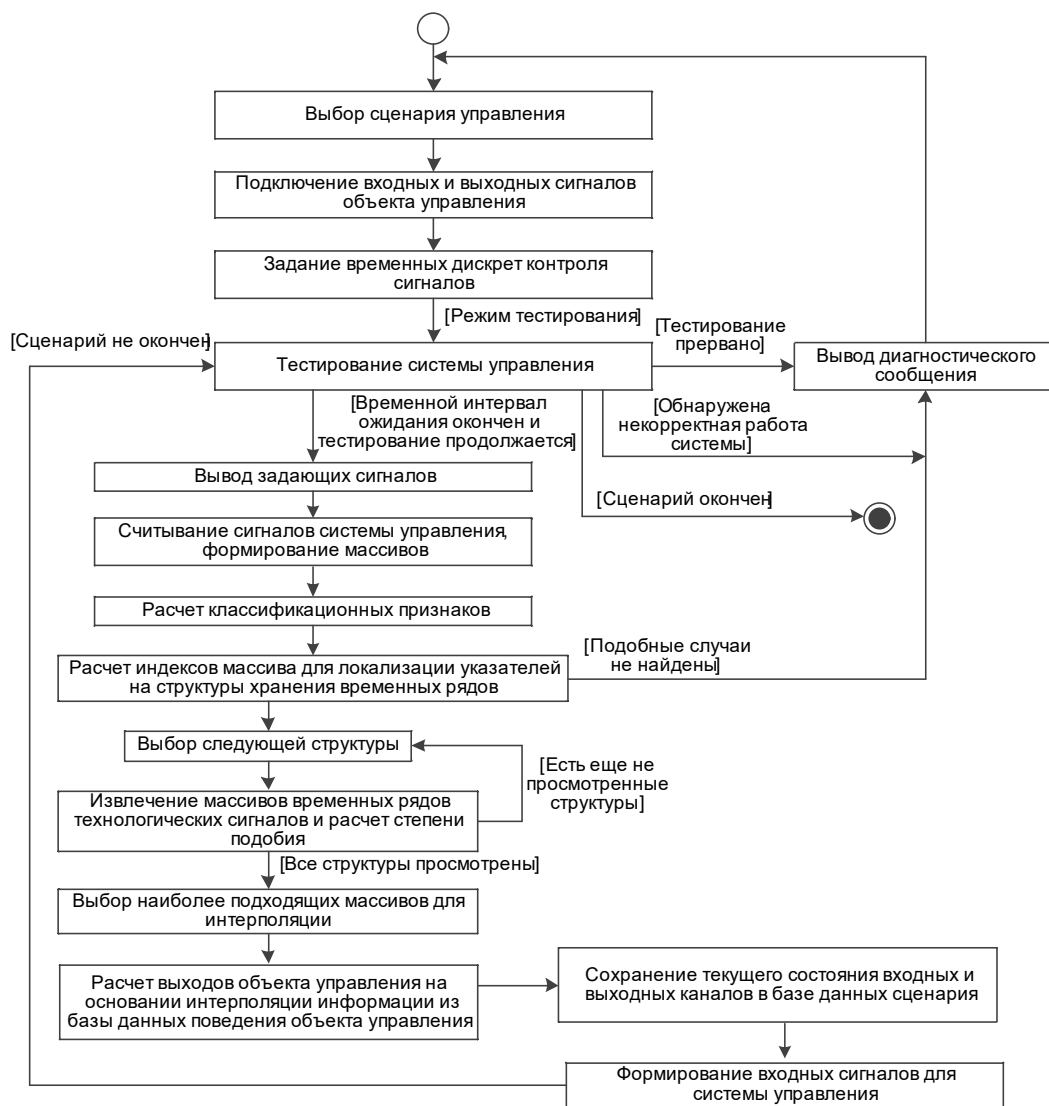


Рис. 4. UML-диаграмма состояний программного обеспечения автоматизированного тестирования систем управления

Сценарий тестирования содержит информацию об изменении во времени задающих сигналов, начальном состоянии технологического объекта и ожидаемых реакциях объекта с указанием соответствующего времени. Это позволяет запустить процесс автоматического управления модельным объектом и по ключевым моментам судить о корректности функционирования системы управления. Так как выходные сигналы моделируемого объекта формируются на основе сохраненных реальных технологических сигналов, то становится возможным обеспечить такие же метрологические характеристики и повысить достоверность тестирования [4]. Каждое последующее значение выходных сигналов рассчитывается на основе нескольких прогнозируемых значений, которые являются результатом циклической работы процедуры поиска наиболее соответствующих данной ситуации фрагментов.

Перейдем к описанию информационной технологии поддержки пусконаладочных работ и тестовых процедур систем автоматического управления сложными технологическими процессами.

Согласно [6], при разработке информационной технологии необходимо определить её статическую часть – структуру данных (DS) и комплекс математических методов и моделей (СММ), а также описать динамическую составляющую информационной техноло-

гии – информационные процессы (IP) и их взаимодействие между собой (IPI). Исходя из этого информационная технология должна представляться набором [6]:

$$IT = \langle DS, CMM, IP, IPI \rangle. \quad (3)$$

Каждый информационный процесс в свою очередь представляется блоком, имеющим информационные входы, управляющие входы, выходы и регламент выполнения, который определяется методами и моделями, привлекаемыми по мере необходимости для реализации процесса (рис. 5).

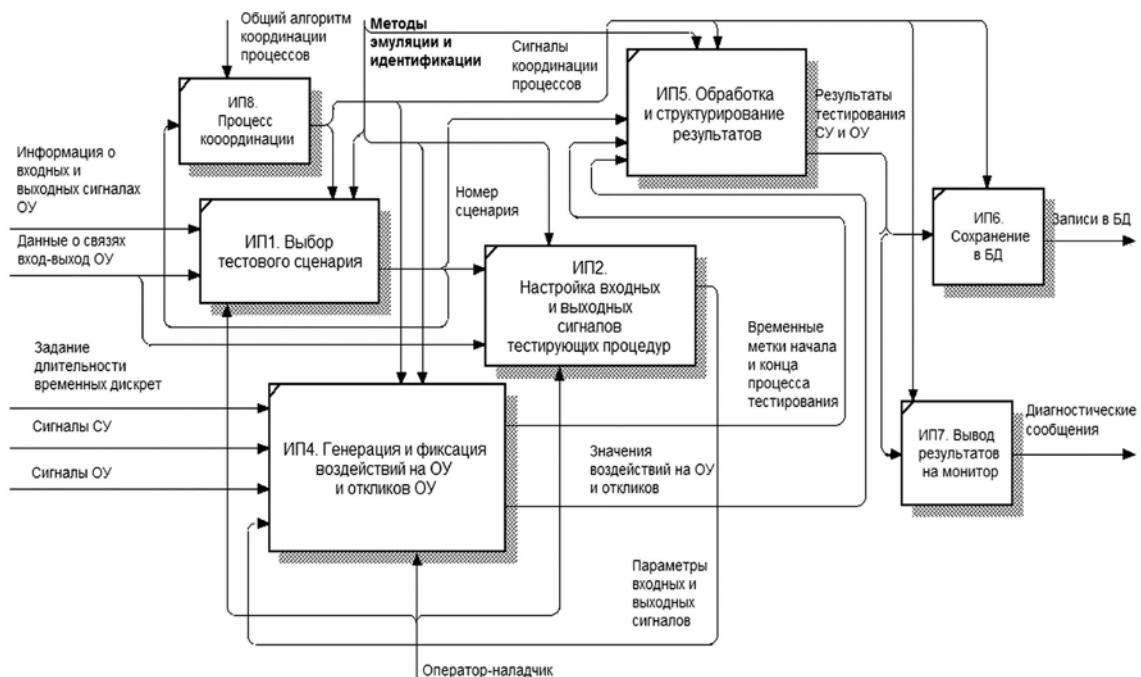


Рис. 5. Информационная технология поддержки пусконаладочных работ и тестовых процедур систем автоматического управления сложными технологическими процессами

Сущность показанных на схеме информационных процессов достаточно подробно описана выше. Процесс координации (ИП8) реализуется главным программным модулем, осуществляющим диспетчерские функции при отработке заданного тестового сценария.

#### 4. Выводы

Развитие технологий тестирования управляющего программного обеспечения АСУТП и испытаний промышленных систем управления на базе ПЛК по-прежнему остается актуальной задачей. Современные средства отладки требуют большого объема труда квалифицированных инженеров для разработки моделей объектов управления и проведения тестов. Затраты на создание тестовых моделей «с нуля» имеют сравнимый объем с затратами на разработку управляющих программ – порядка 15–25 %. Автоматизация тестирования, увеличение эффективности и безопасности испытаний систем управления может быть достигнуто за счет внедрения сценариев управления моделью объекта с сохранением форм и характеристик реальных сигналов и автоматическим контролем корректности работы управляющих алгоритмов.

Получила дальнейшее развитие функциональная модель процесса проведения пусконаладочных работ и формирования процессов тестирования систем управления сложными технологическими процессами, отличающаяся тем, что включает формирование ситуационных динамических моделей технологических объектов, анализ ситуационного отклика объекта и позволяет снизить время и затраты на наладку систем управления, а также повысить безопасность процесса наладки сложных объектов.



Разработана информационная технология поддержки пусконаладочных работ и тестовых процедур систем автоматического управления сложными технологическими процессами в горно-обогатительном производстве.

Построение моделей поведения многоканального объекта управления на основе интерполяции временных отчетов выходных сигналов и идентификации ситуаций по массиву входных и выходных предыдущих сигналов позволяет уменьшить объем исследовательских работ и внедрить модель объекта в программные пакеты тестирования управляющих программ.

**Список литературы:** 1. Конох И. С. Использование информационных технологий для повышения эффективности пусконаладочных работ и испытаний систем автоматического управления / Найда В.В., Сухомлин Л.В. / Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського. Кременчук: КрНУ, 2015. Вип. 3/2015 (92), част. 1. С. 40–47. 2. Вычужанин В. Методика аппаратно-программного моделирования и тестирования проектируемых систем // Современная электроника. 2015. №2. С. 62–67. 3. William F. Waite, Stephen J. Swenson, Alexander C. Jolly, Seth Shepherd, Robert M. Gravitz. Validation of Hardware-In-The-Loop (HWIL) And Distributed Simulation Systems. Foundations For V&V In The 21st Century Workshop (Foundations '02), Kossiakoff Conference And Education Center, Johns Hopkins University /Advanced Physics Laboratory, Laurel, Maryland, USA, 2002. 4. Gomez M. Hardware-in-the-Loop Simulation /M. Gomez// Embedded. 2001. Режим доступа: <http://www.embedded.com/design/prototyping-and-development/4024865/Hardware-in-the-Loop-Simulation>. 5. Конох И. С. Эмуляция сигналов объектов управления в электромеханических системах с использованием нечетких логических контроллеров /И.С. Конох, В.В. Найда // Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал. Кременчук: КрНУ, 2013. Вип. 4/2013 (24). С. 70–83. 6. Левыкин В. М. Метод построения информационной технологии диагностики состояния сложного технологического процесса / В. М. Левыкин, И. В. Шевченко // Управляющие системы и машины. 2014. №3. С. 33–38.

*Поступила в редколлегию 11.01.2016*

**Найда Виталий Владимирович**, аспирант кафедры информационно-управляющих систем Кременчугского национального университета им. М. Остроградского. Научные интересы: интеллектуальные информационные технологии процессов тестирования и наладки сложных систем управления. Адрес: Украина, 39600, Кременчуг, ул. Первомайская, 20, E-mail: [vitalik.najda@yandex.ru](mailto:vitalik.najda@yandex.ru).

**Шевченко Игорь Васильевич**, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры информационно-управляющих систем Кременчугского национального университета им. М. Остроградского. Научные интересы: интеллектуальные информационные технологии контроля и управления в сложных технологических процессах. Адрес: Украина, 39600, Кременчуг, ул. Первомайская, 20, E-mail: [ius.shevchenko@gmail.com](mailto:ius.shevchenko@gmail.com).

**Конох Игорь Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информационно-управляющих систем Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского. Научные интересы: промышленная автоматизация, интеллектуальные системы управления технологическими процессами. Адрес: Украина, 39600, Кременчуг, ул. Первомайская, 20, E-mail: [kis\\_saue@mail.ru](mailto:kis_saue@mail.ru).