

Научная статья

УДК 004.05+519.718.2

DOI 10.25205/1818-7900-2022-20-3-14-28

Отладочный комплекс с имитацией кондуктивных помех для тестирования контроллеров АСУ ТП

**Владимир Владимирович Гаркуша¹, Сергей Сергеевич Журавлев²,
Станислав Рудольфович Шакиров³, Владимир Владимирович Яковлев⁴**

^{1,2,4}Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий
Новосибирск, Россия

³Конструкторско-технологический институт научного приборостроения
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

¹vgar49@mail.ru

²s-zhur@yandex.ru

³shakirov@tdisie.nsc.ru

⁴vy82@mail.ru

Аннотация

В работе представлен полнофункциональный имитационный отладочный комплекс, предназначенный для тестирования программируемых контроллеров АСУ ТП в лабораторных условиях, но максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации на объекте, с учетом большой зашумленности входных сигналов, воздействия на них сетевой и импульсных помех большой интенсивности, а также с учетом вариации параметров линии связи. Для имитации наиболее характерных помех разработана структура формирователя кондуктивных помех и параметров линии связи с описанием всех его элементов.

Ключевые слова

имитационный отладочный комплекс, электромагнитная помеха, формирователь кондуктивных помех, имитатор параметров линии связи, адаптер-формирователь помехи

Для цитирования

Гаркуша В. В., Журавлев С. С., Шакиров С. Р., Яковлев В. В. Отладочный комплекс с имитацией кондуктивных помех для тестирования контроллеров АСУ ТП // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. Т. 20, № 3. С. 14–28. DOI 10.25205/1818-7900-2022-20-3-14-28

© Гаркуша В. В., Журавлев С. С., Шакиров С. Р., Яковлев В. В., 2022

ISSN 1818-7900 (Print). ISSN 2410-0420 (Online)

Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2022. Том 20, № 3

Vestnik NSU. Series: Information Technologies, 2022, vol. 20, no. 3

Debugging Complex with Simulation of Conductive Interference for Testing Automated Control System Controllers

Vladimir V. Garkusha¹, Sergey S. Zhuravlev², Stanislav R. Shakirov³,
Vladimir V. Yakovlev⁴

^{1,2,4}Federal Research Center for Information and Computational Technologies
Novosibirsk, Russian Federation

³Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering of Siberian Branch of RAS
Novosibirsk, Russian Federation

¹vgar49@mail.ru

²s-zhur@yandex.ru

³shakirov@tdisie.nsc.ru

⁴vy82@mail.ru

Abstract

The paper presents a full-featured simulation debugging system designed to test programmable controllers for automated process control systems in the laboratory. This system imitates the operating conditions of the automated process control system, as close as possible to the real operating conditions at the automation object. The presented system can form various levels of interference of input signals, influencing the automatic process control system with high-intensity network and impulse noise. The system also allows one to vary the parameters of the communication line. The structure of the conducted interference generator and the variator of the communication line parameters have been developed. A description of all elements necessary for modeling the main types of interference is given. In this work, an analysis of the existing electromagnetic interference in the signal circuits of process control systems was carried out, and the most typical interference was identified. A block diagram of a conducted interference generator and a variator of communication line parameters has been developed. Both functional blocks are part of the modeling and debugging complex. They allow one to simulate the interference environment for the controller under test by introducing the generated interference into the signal communication lines in a conductive way. The structure of the adapter-former of interference for analog signals is worked out in detail with a description of its main components. Recommendations for choosing the element base are given. The practical significance of the performed work lies in the fact that it may improve the efficiency of the complex of control and laboratory tests of the systems being created. This allows one to achieve a reduction in complexity and in setup time during implementation at the automation facility.

Keywords

simulation and debugging complex, electromagnetic interference, conducted interference shaper, communication line parameters simulator, interference shaper adapter

For citation

Garkusha V. V., Zhuravlev S. S., Shakirov S. R., Yakovlev V. V. Debugging Complex with Simulation of Conductive Interference for Testing Automated Control System Controllers. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2022, vol. 20, no. 3, pp. 14–28. DOI 10.25205/1818-7900-2022-20-3-14-28

Введение

В ФИЦ ИВТ (ранее КТИ ВТ СО РАН и ИВТ СО РАН) много лет проводятся работы по созданию промышленных программируемых контроллеров и АСУ ТП различного назначения на их основе. Разработаны и введены в промышленную эксплуатацию несколько автоматизированных систем, в том числе: АСУ ТП турбокомпрессорной станции и АСУ ТП тепловой станции № 1 СО РАН [1; 2], несколько АСУ ТП для угольных шахт Кузбасса (контроля и управления ленточными конвейерами; наблюдения, оповещения и поиска персонала при авариях; водоотлива; вентиляции и др.) [3; 4]. Работы по внедрению АСУ ТП всегда были сопряжены с большим объемом отладочных работ как при производстве контроллеров и систем, так и с еще большим объемом и трудоемкостью при выполнении пуско-наладочных работ на объектах автоматизации, поэтому в ФИЦ ИВТ всегда большое внимание уделялось средствам отладки систем при их изготовлении, т. е. созданию специализированных отладочных стендов [5].

Как показал опыт внедрения АСУ ТП шахтного и рудничного исполнения, пуско-наладочные работы на месте их монтажа и будущей эксплуатации существенно затруднены как спо-

собами и местами размещения оборудования и кабельных трасс, так и рабочими условиями эксплуатации. При этом, даже когда каждое устройство или рабочая программа системы в отдельности прошли все стадии технического контроля и корректно выполняли свои функции на стадии наладки при производстве, то собранная из них система на месте эксплуатации может иметь в себе новые уязвимости. Поэтому так важно осуществлять многофакторную верификацию и отладку программно-аппаратных средств АСУ ТП на этапе ее производства или модернизации.

Для реализации этих целей в ФИЦ ИВТ ведутся работы по созданию имитационного отладочного комплекса с функцией автоматической верификации алгоритмов управления АСУ ТП специального назначения, а также ее компонент, с использованием моделей технологических процессов угольной шахты.

Существующий в настоящее время отладочный комплекс позволяет проводить тестовые испытания контроллеров АСУ ТП с имитационными сигналами и реальными сигналами без помех, при которых выявляется большинство программных ошибок [6]. Для этих контроллеров, в качестве имитаторов входных реальных сигналов и исполнительных устройств для выходных управляющих сигналов, в отладочном комплексе используются промышленные модули серийного производства и устройства собственной разработки.

Очевидно, что предварительные испытания АСУ ТП, проводимые в лабораторных условиях, и ее эксплуатация в реальных условиях отличаются по степени воздействия внешних факторов. О двух из них и пойдет речь в данной работе:

- во-первых, это электромагнитная обстановка, влияющая на виды и уровни помех, индуцируемых в сигнальных цепях сбора данных и управления;
- во-вторых, это характеристики кабельных линий связи, которые в лабораторных условиях практически идеальны, хотя в реальных условиях эксплуатации такие линии могут достигать длины от сотен метров до нескольких километров, при этом параметры линий могут варьироваться в зависимости от качества используемой кабельной продукции и способа прокладки сигнальных линий.

Чтобы учесть эти факторы при проведении предварительных и тестовых испытаний системы необходимо в существующий имитационный отладочный комплекс добавить дополнительный блок – блок формирования помех и параметров линий связи, управляемый от АРМ тестировщика, что даст возможность тестирования системы на отладочном комплексе, как с целью проверки ее работоспособности с идеальными первичными имитационными сигналами, так и с целью исследования надежности функционирования ее оборудования и алгоритмов, при воздействии вышеуказанных факторов, в условиях разной помеховой обстановки.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка структурной схемы полнофункционального имитационного отладочного комплекса. Данный комплекс предназначен для тестирования автоматизированных систем и промышленных программируемых контроллеров в лабораторных условиях, но максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации их на объекте. К таким условиям относятся – большая зашумленность сигналов от датчиков, воздействиями сетевой помехи (50 Гц) и импульсных помех большой интенсивности, а также с вариациями параметров линии связи.

Практически все производители оборудования для облегчения процесса его наладки и тестирования, так или иначе всегда сталкиваются с проблемой создания отладочных комплексов разной степени сложности, функциональности и назначения в зависимости от глубины и объема проводимых тестовых испытаний. Речь не идет о специализированных стендах, предназначенных для проведения в обязательном порядке приемо-сдаточных испытаний выпускаемого оборудования в соответствии с его техническими условиями, в которых приводится и схема стенда, и используемые в нем, поверенные измерительные приборы и дополнительно привлеченное оборудование. Это отдельная задача и решается она индивидуально для каждого конкретного изделия в зависимости от его назначения, при этом могут проводиться испытания

на электробезопасность, на соответствие заявленным параметрам, могут быть затронуты вопросы метрологии измерительных каналов и т. д.

Тема создания отладочных стендов не нова, существует достаточно много публикаций по данному вопросу, в которых приводятся описания различных стендов, в том числе виртуальных, испытательного и измерительного оборудования, средств генерации электромагнитных помех (ЭМП) и их измерений, тестового программного обеспечения, и все это разрабатывалось и создавалось как для частного применения [7–10], так и для создания инструментальных средств разработки комплексов (Стенды NI, комплексы на базе xPC Target MathWorks и другие).

В данной работе рассматривается более широкая задача – создание имитационного отладочного комплекса, на котором необходимо выявлять с помощью разноплановых тестов большинство аппаратных, алгоритмических и программных ошибок, допущенных при проектировании и изготовлении программируемых контроллеров и АСУ ТП, перед внедрением их на объекте автоматизации.

Классификация помех

Любой функциональный узел АСУ ТП, будь то управляющий программируемый контроллер с блоками сбора данных и управления, датчики и исполнительные механизмы, линии передачи сигналов и электропитания или программное обеспечение, невозможно полностью оградить от воздействия внешних факторов, каким-либо образом влияющих на качество их функционирования. Поэтому одной из важнейших задач при проектировании систем автоматизации является обеспечение их работоспособности с учетом всех факторов внешнего воздействия, характерных для места размещения и эксплуатации технических средств. Кроме учета таких факторов как: влияние окружающей среды (температура, влажность, давление, осадки, агрессивные среды); механические удары и вибрации; воздействие человека – особое внимание необходимо уделять ЭМП. Влиянию этих помех более всего подвержены электронные блоки устройств АСУ ТП и линии связи, а также алгоритмы замкнутого контура управления.

Вопросам возникновения ЭМП на объектах автоматизации, воздействия их на оборудование, как и способ защиты последнего от воздействия помех, обеспечения помехоустойчивости управляющих систем и электромагнитной совместимости используемой техники, в литературе уделено много внимания [11–13].

В общем случае, ЭМП считается любое электромагнитное явление, которое сможет ухудшить качество функционирования технического средства.

Определение электромагнитной обстановки, то есть выделение ограниченного набора видов ЭМП и их характеристик, наиболее значимо влияющих на устройство в условиях его эксплуатации – является задачей экспертной, а значит субъективной. В национальном стандарте ГОСТ Р 51317.2.5-2000 представлена достаточно подробная классификация электромагнитных явлений и процессов и связанных с ними ЭМП, при этом, предложено для конкретного технического средства и конкретной электромагнитной обстановки, а также места эксплуатации выбрать свой ограниченный перечень ЭМП, достаточно полно (по мнению эксперта) описывающий условия эксплуатации этого технического средства.

Согласно указанного ГОСТ ЭМП подразделяются на излучаемые и кондуктивные. Излучаемые ЭМП возникают и распространяются в непроводящей среде, в то время как кондуктивные возникают и передаются в токопроводящих средах. Эти помехи тесно связаны между собой и на протяжении всего пути распространения могут переходить от одного вида к другому, пока не достигнут своего реципиента. ЭМП может проникать в техническое средство через разные порты [12]: корпус; линии питания (переменного или постоянного тока); линии ввода-вывода; заземление.

Для иллюстрации шумов, приходящих на вход АСУ ТП, на рис. 1 приведен реальный исходный сигнал от термометра сопротивления ТСМ50 (температура стали статора мощного

двигателя), снятый авторами при помощи осциллографа, из которого видно, что на основную наводку от промышленной сети 50 Гц дополнительно накладывается еще широкополосный шум до 10 МГц (похожий на «белый шум») и хаотические импульсные помехи большой амплитудой.

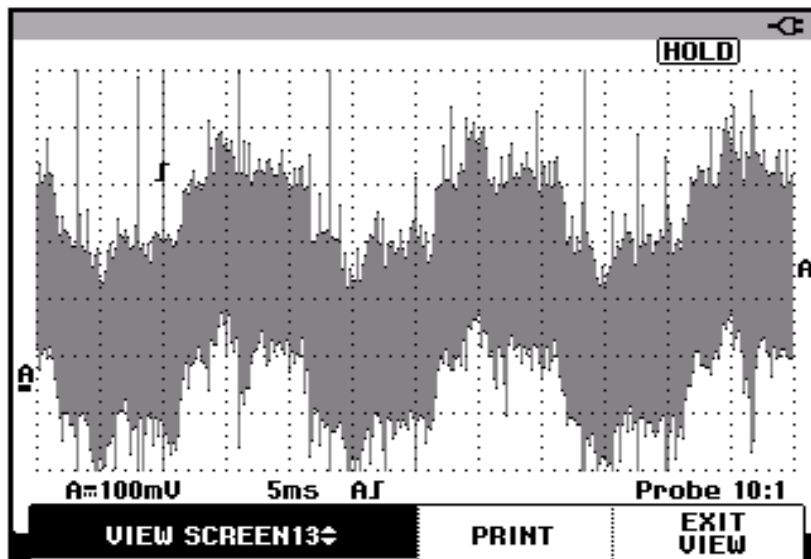


Рис. 1. Исходный сигнал температуры стали статора двигателя

Fig. 1. The initial temperature signal of the engine stator steel

Отношение сигнал/шум ($U_c/U_{ш}$) в этом сигнале составляет величину порядка 1, что наложало достаточно серьезные требования к входным портам контроллера АСУ ТП, принимающим такие зашумленные сигналы. Для достижения заданной абсолютной погрешности измерения температур статора во всем диапазоне, для обработки таких сигналов в программируемом контроллере авторами была применена как аппаратная, так и программная фильтрация. Кроме аппаратных RC фильтров на входах модулей был введен программный параметрический алгоритм реализации фильтра нижних частот с регулируемой частотой среза в диапазоне от 0,1 до 10 Гц.

В любой системе автоматизации используется большое количество различных электро-механических контактов, главным недостатком которых является произвольные повторные коммутации после срабатывания контактной пары. Это явление и стали называть – дребезгом контактов и борются с ним с самого начала, как только появились элементы автоматизированных систем. В зависимости от размеров, массы, материала и конструкции контактной системы время дребезга (время от первого соприкосновения контактов до затухания механических колебаний и установления стабильного контактирования) составляет величину от 0,5 до 2 мс у миниатюрных герконов и до сотен мс у мощных контакторов.

Практически вся цифровая электроника воспринимает дребезг как целую череду сигналов. Эти ложные коды вполне могут привести к неправильной работе и даже выходу из строя чувствительной электроники. Опять же исходя из собственной практики, измеренные значения времени дребезга контактов конечных выключателей электрифицированных задвижек в реальной системе составили величину не более 10 мс.

Еще одна существенная наводка присутствует практически во всех сигналах АСУ ТП – сетевая помеха 50 Гц: синфазная, достигающая величины десятков и даже сотен вольт на длин-

ных линиях связи и противофазная – небольшой амплитуды, возникающая от несимметричности линии связи. Эта помеха оказывает влияние в основном только на аналоговые сигналы.

Параметры линии связи (сопротивление, индуктивность и емкость – RLC) не являются случайными, как в случае с ЭМП, и определяются при проектировании системы в соответствии с установленными техническими условиями применения аппаратных средств, используемых при построении АСУ ТП. Однако при тиражировании таких систем, использовании кабельной продукции различной номенклатуры, способов прокладки кабелей, выполнении электрических соединений разными способами и с разным качеством на практике приводит к девиации параметров линий связи.

Виды имитируемых воздействий

Types of Simulated Impacts

	Типы портов	2-х проводные			3-х– 4-х	4-х– 6-и	Цепи питания		Порты цифровой связи (RS-485)	Порты заземления
		Дискретный (12В/сух. конт)	Сигнальный (напряжение, ток, сопротивления, термодвойной)	Частотный (12В, 0-60 Гц, 0-200Гц):	Сигнальный (Термометр-сопротивления)	Сигнальный (тензопреобразователь)	1-фазные 230В 50Гц	Постоянного тока 12В/24В		
Виды имитируемых воздействий:										
Провалы, кратковременные прерывания сигнала		+					+	+		
Дребезг контакта		+		+						
Импульсные помехи и «розовый шум»		+	+	+	+	+	+	+	+	
Гармонические помехи 50 Гц синфазные			+		+	+			+	+
Гармонические помехи 50 Гц дифференциальные			+		+	+				
Отклонение напряжения питания							+	+		
Положительные выбросы напряжения питания							+	+		
Изменение частоты питающего напряжения							+			
Провалы напряжения сигнала в пределах допуска									+	
Логически искажения целостности пакета данных									+	
Электростатические разряды										+
Параметры линии связи (RLC)		+	+	+	+	+	+	+	+	

Обобщая все приведенное выше и исходя из опыта работы по созданию АСУ ТП, а также с учетом экспертных оценок, из ГОСТ Р 51317.2.5-2000 авторами были выбраны наиболее характерные для различных портов технических средств АСУ ТП виды ЭМП и дополнены

другими видами искажений сигналов, необходимых для исследования работоспособности аппаратной и программной частей АСУ ТП (см. табл.).

Эти ЭМП и было решено реализовать в проектируемом имитационном отладочном комплексе путем их генерации и возможностью введения в порты ввода-вывода тестируемых технических средств кондуктивным способом с учетом вариации параметров линий связи (RLC).

Структурная схема имитационного отладочного комплекса

Для выполнения задачи по доработке существующего имитационного отладочного комплекса был разработан дополнительный блок, который вошел в состав отладочного комплекса и стал элементом его структуры. Блок получил название – формирователь кондуктивных помех и параметров линии связи (ФКП). Формирователь достаточно просто вписывается в структуру существующего отладочного комплекса и подключается между имитатором первичных сигналов и тестируемым контроллером АСУ ТП. На практике это может производиться, например, простой перекоммутацией сигналов на клеммных колодках отладочного комплекса.

На рис. 2 приведена усовершенствованная структурная схема имитационного отладочного комплекса с ФКП в своем составе, предназначенного для полнофункционального тестирования контроллеров АСУ ТП с возможностью моделирования и имитирования в лабораторных условиях параметров линий связи и помеховой обстановки, с максимальным приближением к тем условиям, в которых в дальнейшем на объекте будет эксплуатироваться действующий образец испытываемой системы.

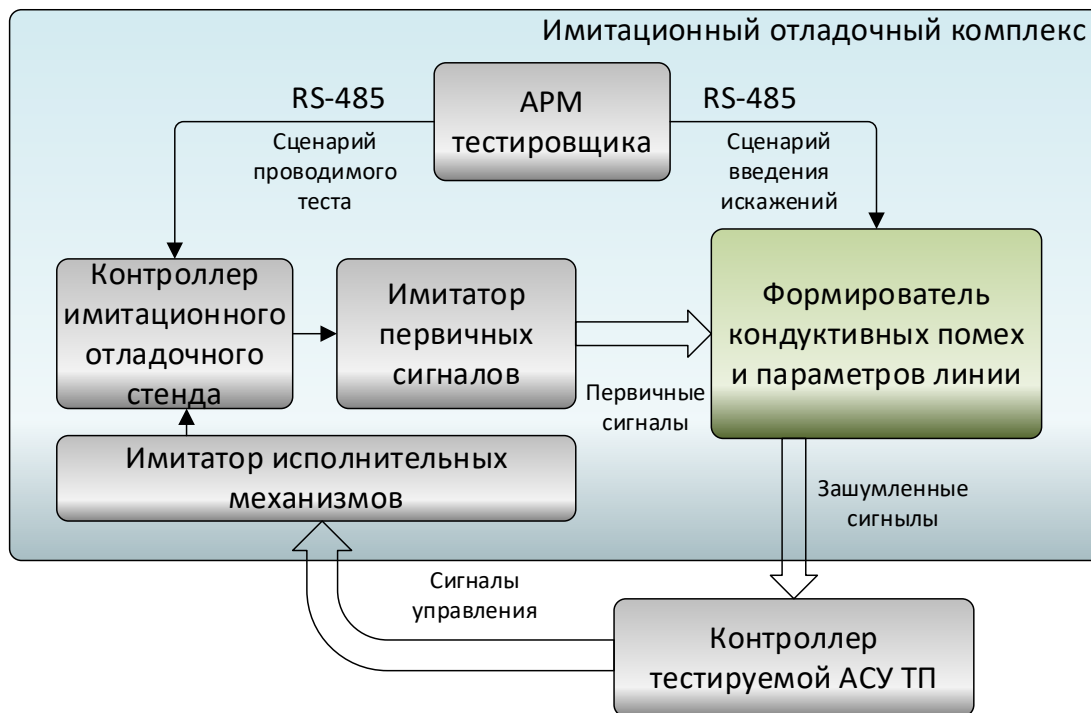


Рис. 2. Усовершенствованная структурная схема имитационного отладочного комплекса

Fig. 2. Improved block diagram of the simulation debugging complex

Формирователь кондуктивных помех и параметров линии

Формирователь кондуктивных помех и параметров линии предназначен для формирования, наиболее характерных помех, согласно приведенной выше таблице, наложения их на фор-

мируемые отладочным комплексом первичные сигналы с разными весовыми коэффициентами, задаваемыми от АРМ тестировщика, а также для имитации влияния параметров линий связи на первичные сигналы, т. е. создания на входе тестируемого контроллера АСУ ТП зашумленных сигналов. ФКП представляет собой функционально законченный блок, имеющий в своем составе набор имитаторов всех видов выбранных помех, для всех первичных сигналов, генерируемых в отладочном комплексе. ФКП подключается в разрыв цепей ввода-вывода тестируемого контроллера АСУ ТП в имитационном отладочном комплексе и управляется по линии интерфейса RS-485 от АРМ тестировщика (рис. 2; 3). ФКП имеет в своем составе полнофункциональный контроллер с индикатором и клавиатурой, в который от АРМ тестировщика загружаются заранее выбранные и установленные виды помех, а также их уровни, для каждого генерируемого комплексом сигнала и для каждого теста. Ввиду того, что параметры линий связи и виды формируемых шумов могут быть различны для каждого первичного сигнала, было принято решение для каждого типа сигнала реализовать отдельный модуль для формирования помех и имитации параметров линии - адаптер-формирователь помех (АФП). По сути дела, АФП предназначены для обеспечения аддитивного сложения формируемых в них помех с различными типами первичных сигналов: дискретных, тока, напряжения, сопротивления, термодар, сигналов тензомостовых датчиков, цифровых линий связи, питания и др. и, таким образом, на входе тестируемого контроллера получается суперпозиция чистого сигнала и всех имитируемых помех отладочного комплекса.

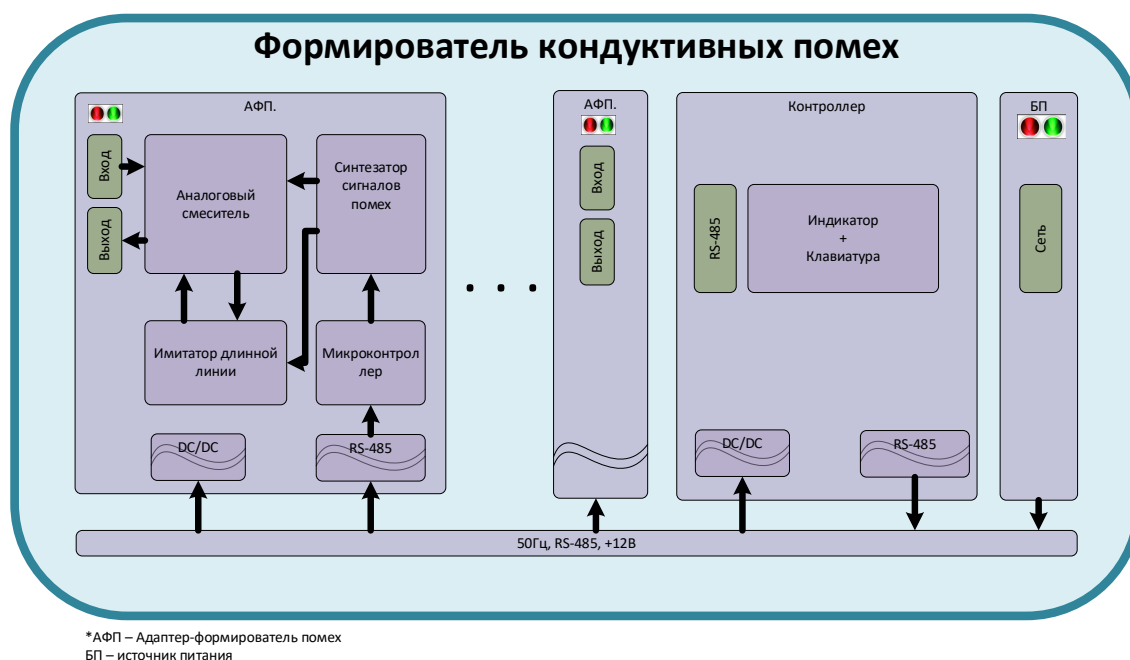


Рис. 3. Структурная схема формирователя кондуктивных помех и параметров линии

Fig. 3. Block diagram of the conductive interference shaper and line parameters

По внутренней шине ФКП RS-485 данные о параметрах формируемых помех для каждого сигнала передаются в микроконтроллеры АФП, которые устанавливают режимы работы синтезатора сигналов помех и имитатора длинной линии. Исходную сетевую помеху 50 Гц можно взять от источника питания ФКП или сгенерировать программно в его контроллере и пустить по шине. Для каждого первичного сигнала отладочного комплекса в АФП программно можно установить свой уровень каждой помехи и свои параметры линии связи.

Таким образом, конфигурация ФКП необходимым набором АФП зависит от количества и номенклатуры входов тестируемого контроллера.

Клавиатура и индикатор контроллера ФКП служат дополнительно в качестве резервной системы управления. При отключенном АРМ или его отсутствии, в ручном режиме работы комплекса, с клавиатуры контроллера ФКП в адаптерах-формирователях помех можно устанавливать и изменять необходимые уровни шумов, сетевой и импульсных помех, а также параметров линий связи для каждого канала тестируемого контроллера с визуальным их контролем на индикаторе или осциллографе.

Конструктивно ФКП может быть выполнен, как один из вариантов исполнения, в виде отдельного блока стандарта 3 U Евромеханика, с шинами питания и интерфейса RS-485, через которые осуществляется питание и управление АФП. АФП унифицированы по габаритным и установочным размерам и могут устанавливаться в качестве модулей в любую позицию блока, затем их типы и местоположение в блоке прописывается в контроллере.

АФП в своем составе имеет:

- блок входных контактов (соединитель) для подключения первичных сигналов (Вход);
- блок выходных контактов (соединитель) для подключения сформированных сигналов к тестируемому контроллеру АСУ ТП (выход);
- микроконтроллер;
- программируемый синтезатор сигналов помех, формирующий сигналы установленной интенсивности «розового шума» и случайной последовательности импульсных помех;
- имитатор длинной линии;
- аналоговый смеситель, с помощью которого сформированные помехи и параметры линии связи подключаются к линиям первичных сигналов;
- последовательный интерфейс RS-485;
- вторичный блок питания.

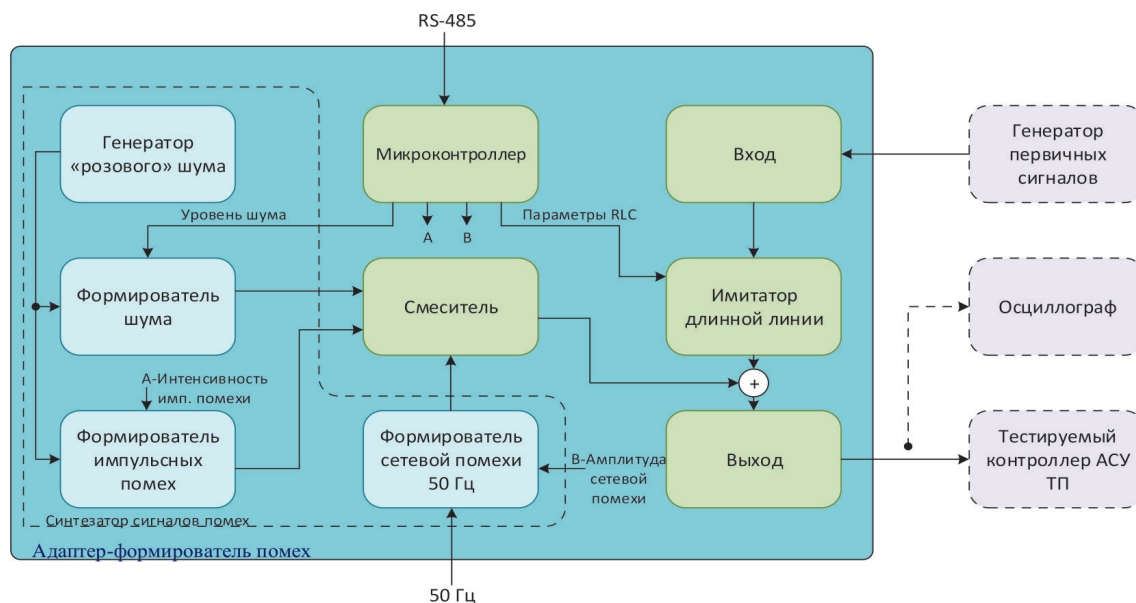


Рис. 4. Структурная схема АФП для аналогового сигнала

Fig. 4. Block diagram of an adapter interference shaper for an analog signal

Перечень необходимых для разработки АФП определялся исходя из реальных сигналов, внедренных на объектах АСУ ТП, и типов первичных сигналов, генерируемых в имитационном отладочном комплексе:

- АФП в дискретных линиях передачи сигналов, с напряжением 12 В постоянного тока;
- АФП в линиях передачи токового сигнала 4-20 мА;
- АФП в линиях передачи напряжения 0-1 В;
- АФП в линиях передачи сигналов от термометров-сопротивления;
- АФП в линиях передачи сигналов от тензопреобразователей (тензомостов);
- АФП в линиях передачи сигналов от термопар;
- АФП в линиях частотных сигналов напряжением 12В;
- АФП в линиях RS-485.

На рис. 4 приведена структурная схема АФП для аналогового сигнала с более подробным представлением синтезатора сигналов помех (ССП). Программируемый синтезатор сигналов помех предназначен для формирования широкополосного шума, сетевой наводки 50 Гц и импульсных помех случайной последовательности. Для каждого первичного сигнала отладочно-го комплекса в АФП можно программно установить и зафиксировать индивидуальный уровень помех для каждого теста.

Основой ССП является генератор «розового шума» – «белого шума» с ограниченным спектром. В природе процессов в чистом виде «белого шума» не существует, но при определенных предположениях реальные помехи можно описать моделью «белого шума». Ввиду того, что автокорреляционная функция «белого шума» представляет собой дельта – функцию, «белый шум» часто называют дельта-коррелированным случайным процессом. Отсутствие корреляции между любыми, сколь угодно близкими значениями «белого шума» означает бесконечно большую скорость изменения процесса, т. е. энергетический спектр «белого шума» является равномерным в диапазоне частот от 0 до ∞ , таким образом и средняя мощность «белого шума» также не ограничена. На практике же спектр «белого шума» на входах информационно-измерительных систем, при проведении их тестирования, можно смело ограничить верхней частотой в единицы МГц, т. к. входные каналы систем имеют ограниченную полосу пропускания, как за счет применяемой элементной базы, так и за счет схемотехнических решений.

В качестве источника «белого шума» в полосе частот от 20 Гц до 1 МГц, (генератора «розового шума») целесообразно использовать специализированный стабилитрон – кремниевый генератор шума КГ401В, имеющий спектральную плотность напряжения шума, при постоянном рабочем токе 50 мкА, не менее $30 \text{ мкВ}/\sqrt{\text{Гц}}$, т. е. в указанной полосе частот напряжение шума на выходе генератора будет порядка 30 мВ. Для генерации шумов в более широкой полосе спектра – от 20 Гц до 2,5 МГц, применяют КГ401А, правда при этом напряжение шума на выходе будет ниже – около 10 мВ. Кроме этого специализированного прибора в литературе есть рекомендации к применению и некоторых обычных стабилитронов: КС168; Д814В; 1N759, которые апробированы в реальных схемах и показали неплохие результаты в качестве генераторов шума при работе с микротоками.

Формирователь шума – это широкополосный и быстродействующий усилитель с высоким входным сопротивлением (не менее 10 МОм), чтобы не шунтировать генератор «розового шума», и регулируемым коэффициентом усиления, управляемым от микроконтроллера, для установки необходимого для данного теста уровня шума. Важными требованиями к усилителю, необходимыми для передачи дельта- функций шума, являются: входное сопротивление – не менее 10 МОм; полоса единичного усиления – не менее 15 МГц; скорость нарастания выходного напряжения, определяемая из выражения $V = 6,28 * U_{\text{вых.пик}} * F_{\text{макс.}}$ – не менее 15,7 В/мкс ($U_{\text{вых.пик}} = 1 \text{ В}$, $F_{\text{макс.}} = 2,5 \text{ МГц}$); время установления выходного напряжения – не более 400 нс. Среди операционных усилителей, широко представленных сегодня на рынке, для этих целей наибольшего внимания заслуживает операционный усилитель КР544УД2АТ (НПО «Восток»), с характеристиками, полностью удовлетворяющими нашим требованиям. Регулируемый коэффициент передачи формирователя реализуется использованием в обратной связи цифрового потенциометра с I2C интерфейсом, например, 256-позиционного AD5245 от Analog Devices (цифрового переменного резистора MCP41XXX с интерфейсом SPI компа-

нии Microschip или AD511X, DS18XX, MAX54XX). Этот прибор выполняет те же функции, что и механические потенциометры или переменные резисторы, но имеет более качественные параметры типа разрешающей способности, постоянство положения движка и температурного коэффициента сопротивления. Установка значения сопротивления производится микроконтроллером через I²C интерфейс, который позволяет как считывать, так и записывать данные.

Формирователь импульсной помехи – это компаратор (дифференциальный усилитель с большим коэффициентом усиления) с регулируемым от микроконтроллера порогом. На один вход поступает «розовый шум» с генератора, на второй вход – напряжение порога. В зависимости от уровня выставленного порога на выход формирователя проходят только верхняя часть «розового шума»: чем ниже порог, тем большая часть шумов проходит на выход и значит тем больше на выходе интенсивность импульсной помехи, т. е. выше хаотически повторяющаяся частота ее появления. При высоких порогах на выходе формирователя можно добиться крайне редкого появления импульсных помех. В качестве операционного усилителя опять же можно использовать КР544УД2АТ (К154УД4), регулировку порога достаточно просто осуществить при помощи цифрового потенциометра с I²C интерфейсом AD5245.

Формирователь сетевой помехи 50 Гц – усилитель с регулируемым коэффициентом усиления выполняется по аналогии со схемой формирователя шума и на тех же элементах.

На смесителе проще и целесообразнее смешивать только сетевую помеху 50 Гц и шумы с формирователя шума, при этом на выходе смесителя будет сигнал схожий с реальным сигналом (см. рис. 1). Этот сигнал *кондуктивным* способом вводится в линию с первичным аналоговым сигналом отладочного комплекса. Таким же способом в линию вводится и импульсная помеха. В результате такого преобразования на нагрузке входного порта тестируемого контроллера будет суперпозиция всех имитируемых отладочным комплексом сигналов.

Чтобы имитировать линию связи разной длины от источника сигнала до входа контроллера, необходимо задавать разные значения параметров R , L , C в зависимости от длины линии. Зависимость здесь прямая – чем более длинная линия, тем большие значения принимают ее параметры. По приведенным в литературе сведениям, погонная емкость межблочных кабелей определяется конструкцией, размерами и свойствами диэлектрика, и лежит в пределах 10...100 пФ/м, погонная индуктивность кабеля зависит от его геометрии и тоже невелика, речь идет о величинах 0,1...1 мкГн/м. Омическое сопротивление проводника определяется его сечением и материалом, из которого он изготовлен. Например, один метр медной проволоки сечением 1 мм² имеет сопротивление 0,0172 Ом.

В качестве ориентира для расчета параметров имитатора линии возьмем широко применяемый в АСУ ТП кабель ВВГнг-Ls – 0,5 мм², который и авторы использовали в реальных системах в качестве кабелей питания. Для этого кабеля в литературе приводятся измеренные и вычисленные значения погонной емкости и индуктивности, которые составляют 100 пФ/м и 0,54 мкГн/м соответственно. Сопротивление постоянному току двух жил пары – примерно 70 Ом/км. Для кабеля марки ТПП, который также часто используется в АСУ ТП в качестве сигнальных кабелей, значения погонной емкости составляют также от 50 до 60 нФ/км, т.е. величины того же порядка, что и для кабеля ВВГнг, поэтому его данные и примем для разработки имитатора длинной линии. Для упрощения задачи остановимся на четырех вариантах длины линии и ее параметрах, что для оценки ее влияния на генерируемый сигнал и на вход тестируемого контроллера будет достаточно.

Вариант 1: 0 м; $R = 0$ Ом; $L = 0$ мкГн; $C = 0$ нФ.

Вариант 2: 100 м; $R = 7,0$ Ом; $L = 54$ мкГн; $C = 1$ нФ.

Вариант 3: 500 м; $R = 35,0$ Ом; $L = 270$ мкГн; $C = 5$ нФ.

Вариант 4: 1000 м $R = 70,0$ Ом; $L = 540$ мкГн; $C = 10$ нФ.

На рис. 5 приведена эквивалентная схема имитатора длинной линии для реализации всех четырех его вариантов с разными значениями R , L , C , устанавливаемыми от микроконтроллера, который управляет реле, аналоговыми ключами или коммутаторами, подключая нужные

элементы к линии. При выборе элементов коммутации необходимо обращать внимание на их сопротивление в открытом состоянии, которое возможно придется учитывать в общем омическом сопротивлении линии. Параметры линии R , L , C выбираются из номинальных рядов соответствующих элементов, при этом нужно иметь в виду, что при применении в качестве индуктивностей дросселей типа ДМ, необходимо опять же учитывать их омическое сопротивление постоянному току, которое согласно справочным данным равно: 3,8 Ом для ДМ-0,1-56 мкГн; 5,5 Ом для ДМ-0,1-280 мкГн; 15 Ом для ДМ-0,1-500 мкГн.

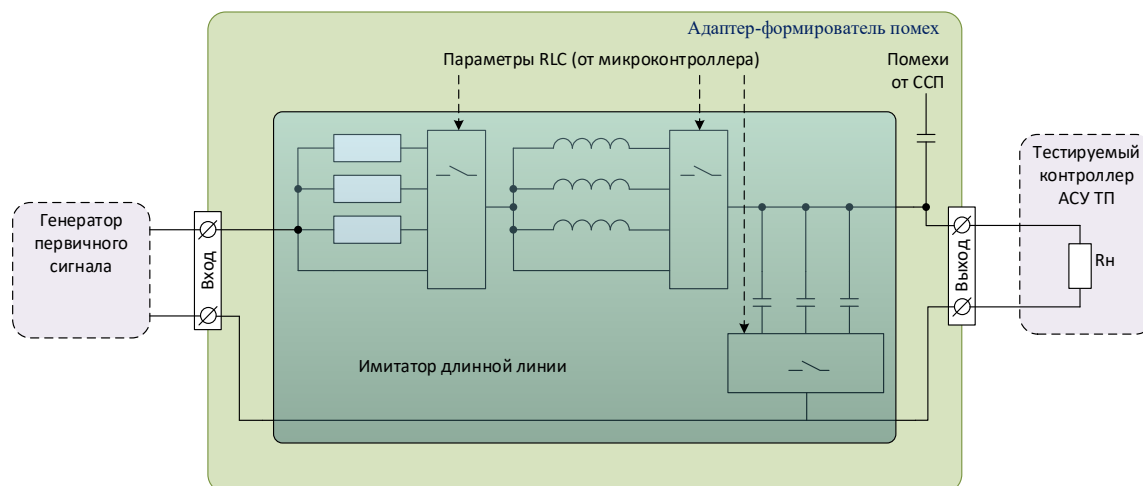


Рис. 5. Имитатор длинной линии в структуре АФП
Fig. 5. Long line simulator in the an adapter interference shaper structure

Заключение

В работе представлена структурная схема полнофункционального имитационного отладочного комплекса, предназначенного для тестирования программируемых контроллеров АСУ ТП в лабораторных условиях, но максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации на объекте, с учетом большой зашумленности сигналов от датчиков, воздействия сетевой помехи (50 Гц) и импульсных помех большой интенсивности, а также с учетом вариации параметров линии связи.

Проведен анализ существующих электромагнитных помех в сигналах АСУ ТП, выделены наиболее характерные помехи, для имитации которых разработана структурная схема ФКП, входящего в состав имитационного отладочного комплекса, и позволяющего имитировать помеховую обстановку для тестируемого контроллера путем ввода формируемых помех в сигнальные линии связи кондуктивным способом. Подробно проработана структура АФП для аналоговых сигналов с описанием основных его компонентов, выданы рекомендации по выбору элементной базы.

Практическая значимость выполненной работы заключается в том, что она позволит повысить результативность проведения комплекса тестовых лабораторных испытаний создаваемых систем, с целью уменьшения трудоемкости и сокращения сроков пуско-наладочных работ при их внедрении на объекте.

Список литературы

1. Гаркуша В. В., Собстель Г. М., Сурудин С. П., Яковлев В. В., Гилев В. М., В. И., Пищик Б. Н. Автоматизированная система управления технологическими процессами турбокомпрессорной станции. Проблемы информатики, 2009. № 3. С. 85–93.

2. **Гаркуша В. В., Пищик Б. Н., Михеев В. П., Потатуркин О. И.** Автоматизированная система управления технологическими процессами тепловой станции // *Теплофизика и аэромеханика*, 2006. № 2. С. 315–321.
3. **Благодарный А. И., Гусев О. З., Журавлев С. С., Золотухин Е. П., Каратышева Л. С., Колодей В. В., Михальцов Э. Г., Чейдо Г. П., Шакиров Р. А., Шакиров С. Р.** Автоматизированная система контроля и управления ленточными конвейерами на угольных шахтах // *Горная промышленность*. 2008. № 5 (81). С. 38–44.
4. **Благодарный А. И., Гусев О. З., Журавлев С. С., Зензин А. С., Золотухин Е. П., Каратышева Л. С. и др.** Автоматизированная система наблюдения, оповещения и поиска персонала при авариях в шахтах // *Горная промышленность*. 2009. № 1. С. 34–38.
5. **Журавлев С. С., Окольников В. В., Рудометов С. В., Шакиров С. Р.** Применение подхода «модельно-ориентированного проектирования» к созданию АСУ ТП опасных промышленных объектов // *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии*, 2018. Т. 16, № 4. С. 56–67. DOI 10.25205/1818-7900-2018-16-4-56-67
6. **Журавлев С. С.** Имитационный программно-аппаратный комплекс для тестирования АСУ ТП предприятий горнодобывающей промышленности: Дис. ... канд. техн. наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий» (ФИЦ ИВТ), Новосибирск. 2020. 16 с.
7. **Акимов А. А., Козлов М. В., Кудеяров Ю. А., Паньков А. Н., Раевский И. А., Стефанов А. Ю., Стефанов Ю. В.** Стенд для тестирования (испытаний) программного обеспечения средств измерений // *Законодательная и прикладная метрология*. 2008. № 6. С. 25–27.
8. **Попадько В. Е., Барашкин Р. Л., Антипов О. Д., Зуев С. А., Северенко В. С.** Имитационный стенд для тестирования алгоритмов управления объектов нефтегазовой отрасли // Конференция «Компьютерные измерительные технологии». М. 2015. С. 229–233.
9. **Акимов А. А., Козлов М. В., Кудеяров Ю. А., Паньков А. Н., Раевский И. А., Стефанов А. Ю., Стефанов Ю. В.** Стенд для тестирования (испытаний) программного обеспечения средств измерений // *Законодательная и прикладная метрология*. 2008. № 6. С. 25–27.
10. **Андрянов И. Н.** Индустрия 4.0 на практике: виртуальный стенд объекта автоматизации // *Промышленные контроллеры и АСУ*. 2020. № 3. С. 3–9.
11. **Гурина Л. А.** Электромагнитные помехи и методы защиты от них: Учебное пособие. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2006. – 104 с.
12. ГОСТ 30805.16.2.1-2013 Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости и методы измерений. Часть 2-1. Методы измерений параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости. Измерение кондуктивных радиопомех. Дата введения: 01.01.2014.
13. **Вербин В. С.** Разработка методологической базы для исследования и обеспечения помехоустойчивости управляющих систем и устройств на информационных объектах : диссертация ... канд. техн. наук. Москва, Московский энергетический институт, 2005. 142 с.

References

1. **Garkusha V. V., Sobstel G. M., Surodin S. P., Yakovlev V. V., Gilev V. M., Zapryagaev V. I., Pishchik B. N.** Automated control system for technological processes of a turbocompressor station. *Problems of Informatics*, 2009. No. 3. (in Russ.)
2. **Garkusha V. V., Pishchik B. N., Mikheev V. P., Potaturkin O. I.** Automated control system for technological processes of a thermal station. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2006. No. 2, pp. 315–321. (in Russ.)

3. **Zhuravlev S. S., Blagodarny A. I., Gusev O. Z., Zhuravlev S. S., Zolotukhin E. P., Karatysheva L. S., Kolodey V. V.** Automated system for control and management of belt conveyors in coal mines. *Mining*, 2008. No. 5 (81), pp. 38–44. (in Russ.)
4. **Blagodarny A. I., Gusev O. Z., Zhuravlev S. S., Zenzin A. S., Zolotukhin E. P., Karatysheva L. S.** Automated system for monitoring, notification and personnel search in case of accidents in mines. *Mining industry*, 2009. No. 1, pp. 34–38. (in Russ.)
5. **Zhuravlev S. S., Okolnishnikov V. V., Rudometov S. V., Shakirov S. R.** Application of the “Model-Based Design” approach to the creation of automated process control systems for hazardous industrial facilities. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2018. Vol. 16, no. 4, pp. 56–67. DOI 10.25205/1818-7900-2018-16-4-56-67 (in Russ.)
6. **Zhuravlev S. S.** Simulation software and hardware complex for testing automated process control systems for mining enterprises: dissertation of candidate of technical sciences, Federal State Budgetary Scientific Institution “Federal Research Center for Information and Computing Technologies” (FRC ICT), Novosibirsk, 2020. 16 p. (in Russ.)
7. **Akimov A. A., Kozlov M. V., Kudiyarov Yu. A., Pankov A. N., Raevsky I. A., Stefanov A. Yu., Stefanov Yu. V.** Stand for testing (trials) software for measuring instruments. *Legislative and applied metrology*, 2008. No. 6, pp. 25–27. (in Russ.)
8. **Popad’ko V. E., Barashkin R. L., Antipov O. D., Zuev S. A., Severenko V. S.** Simulation stand for testing control algorithms for oil and gas industry facilities. Conference “COMPUTER MEASURING TECHNOLOGIES”. M., 2015. Pp. 229–233. (in Russ.)
9. **Akimov A. A., Kozlov M. V., Kudiyarov Yu. A., Pankov A. N., Raevsky I. A., Stefanov A. Yu.** Stand for testing (trials) software for measuring instruments. *Legislative and applied metrology*, 2008. No. 6, pp. 25–27. (in Russ.)
10. **Andriyanov I. N.** Industry 4.0 in practice: a virtual stand of an automation object. *Industrial controllers and automated control systems*, 2020. No. 3, pp. 3–9. (in Russ.)
11. **Gurina L. A.** Electromagnetic interference and methods of protection against them // Study guide. Blagoveshchensk: Amur State University, 2006. 104 p.
12. GOST 30805.16.2.1-2013 Electromagnetic compatibility of technical means. Requirements for equipment for measuring the parameters of industrial radio interference and noise immunity and measurement methods. Part 2-1. Methods for measuring the parameters of industrial radio interference and noise immunity. Measurement of conducted radio interference. Date of introduction: 01.01.2014. (in Russ.)
13. **Verbin V. S.** Development of a methodological base for the study and ensuring the noise immunity of control systems and devices at information objects: dissertation of candidate of technical sciences. Moscow, Moscow Energy Institute, 2005. 142 p. (in Russ.)

Информация об авторах

Гаркуша Владимир Владимирович, заведующий сектором измерительных систем и приборостроения центра инженерно-технического обеспечения, Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Новосибирск, Россия)
РИНЦ Author ID: 557936
SCOPUS Author ID: 8253890500

Журавлев Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории автоматизированных систем, Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Новосибирск, Россия)
РИНЦ SPIN: 7484-8635
Web of Science Researcher ID: E-7348-2014
SCOPUS Author ID: 57206421044

Шакиров Станислав Рудольфович, кандидат физико-математических наук, исполняющий обязанности директора, Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук (Новосибирск, Россия)

РИНЦ SPIN: 1929-2332

Web of Science Researcher ID: U-4958-2018

SCOPUS Author ID: 57196404292

Яковлев Владимир Владимирович, младший научный сотрудник лаборатории индустриальной информатики, Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (Новосибирск, Россия)

РИНЦ SPIN: 2311-8180

Web of Science ResearcherID: C-7406-2017

SCOPUS Author ID: 57197688579

Information about the Authors

Vladimir V. Garkusha, Head of the measuring systems and instrumentation sector of the laboratory of engineering and technical support, Federal Research Center for Information and Computational (Novosibirsk, Russian Federation)

RSCI Author ID: 557936

SCOPUS Author ID: 8253890500

Sergey S. Zhuravlev, Candidate of Technical Sciences, Researcher, Laboratory of Automated Systems, Federal Research Center for Information and Computational Technologies (Novosibirsk, Russian Federation)

RSCI SPIN: 7484-8635

Web of Science Researcher ID: E-7348-2014

SCOPUS Author ID: 57206421044

Stanislav R. Shakirov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, acting director, Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering of Siberian Branch of RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

RSCI SPIN: 1929-2332

Web of Science ResearcherID: U-4958-2018

SCOPUS Author ID: 57196404292

Vladimir V. Yakovlev, Junior Researcher, Laboratory of Industrial Informatics, Federal Research Center for Information and Computational Technologies (Novosibirsk, Russian Federation)

RSCI SPIN: 2311-8180

Web of Science ResearcherID: C-7406-2017

SCOPUS Author ID: 57197688579

Статья поступила в редакцию 01.06.2022;

одобрена после рецензирования 25.09.2022; принята к публикации 25.09.2022

The article was submitted 01.06.2022;

approved after reviewing 25.09.2022; accepted for publication 25.09.2022