

# Автоматизация криогенно-гелиевой установки



Рассматривается опыт создания АСУ криогенно-гелиевой установки с использованием российского оборудования и программного обеспечения.

Компания «ИнСАТ», г. Москва

## История вопроса

Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ) на базе действующего ускорителя «Нуклотрон»<sup>1</sup> ведет сооружение нового уникального ускорительного комплекса — коллайдера NICA<sup>2</sup>. Это поистине масштабное предприятие, имеющее международное значение, потребовало глобальной модернизации всех систем. В компанию «ИнСАТ» обратились по вопросу автоматизации криогенно-гелиевой установки (КГУ) (рис. 1). На ресурсе IAEA (Международное агентство по атомной энергии) удалось найти ссылку на публикацию 1985 года «Алгоритмы автоматического управления криогенной гелиевой установкой КГУ-1600/4.5» [1]. Однако с тех пор прошло уже больше тридцати лет, появились новые задачи, новая элементная база, безнадежно устарело ПО и возникла необходимость в новом взгляде на автоматизацию.

К 2017 году от комплекса автоматизации XX века ничего не осталось, вместо него была создана только система мониторинга состояния ожижителей (уровни криогенных жидкостей, обороты турбодетандеров, температуры в блоках ожижения) на базе контроллера и модулей ввода/вывода производства Advantech и адаптированной версии программного обеспечения для построения интегриро-

ванных систем безопасности ядерно-опасных объектов.

## Что и зачем надо автоматизировать?

Криогенная система — это сложный комплекс оборудования для производства жидкого гелия, необходимого для охлаждения сверхпроводящих магнитов ускорителя, работающих при температуре 4,5 К. Не будет сверхпроводимости — не будет работать ускоритель и не состоятся эксперименты, к которым готовятся ученые с мировым именем, открытия не будут сделаны... В настоящее время гелий используется для охлаждения бустера<sup>3</sup> и «Нуклотрона», а затем планируется его применение и для самого коллайдера NICA.

Общая схема установки представлена на рис. 2. В процессах производства жидкого гелия используется множество всяческого оборудования: газгольдеры, компрессоры, ресиверы, турбодетандеры, азотные танки, сборники гелия, датчики температуры и давления, вентили и клапаны, электронагреватели.

Ситуация усугубляется тем, что режимы работы установки несколько (пусковой, рефрижераторный, ожижительный, сателлитный) и задача автоматизации становится трудно формализуемой.

На производстве трудятся высококлассные специалисты с большим опытом работы. Однако при всем восхищении их профессионализмом хотелось бы минимизировать человеческий фактор и иметь возможность автоматизированного контроля столь ответственных процессов. Нам хочет-

ся верить, что автоматизация будет способствовать и общему техническому прогрессу, освободит человечество от рутинной работы ради реализации его творческого потенциала.

## Сложности

Сама лаборатория физики высоких энергий создана в 1950-е. Первый ускоритель лаборатории — синхрофазотрон на энергию протонов 10 ГэВ — запущен в апреле 1957 года. В то время это был самый крупный ускоритель в мире. Тогда же в лаборатории начались исследования в области криогенной техники и были созданы первые ожижители. По информации [2], к концу 1957 года был запущен ожижитель водорода, а осенью 1961 года — водородно-гелиевая установка. С тех пор технологии производства «холода» все время совершенствовались. Теперь нет водорода, а мощности современных криогенных установок лаборатории позволяют обеспечить функционирование сверхпроводящего ускорителя «Нуклотрон», снабдить жидким гелием физиков для проведения экспериментов.

Особенности и сложности:

- ▶ работа при температуре среды процесса, близкой к абсолютному нулю (4,5 К);



Рис. 1. Вид системы управления установкой КГУ до автоматизации

<sup>1</sup> «Нуклотрон» — базовая установка, предназначенная для получения пучков многозарядных ионов с энергией до 6 ГэВ на нуклон, протонов, а также поляризованных дейтронов.

<sup>2</sup> NICA (Nuclotron-based Ion Collider Facility) — коллайдер протонов и тяжелых ионов, строящийся с 2013 года на базе Лаборатории физики высоких энергий (ЛФВЭ) им. В.И. Векслера и А.М. Балдина Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ), в г. Дубне Московской области. Ускорительный комплекс создается в целях исследования области физики частиц в ранее недоступной области параметров и условий эксперимента — получение интенсивных пучков тяжелых ионов и поляризованных ядер с целью поиска смешанной фазы ядерной материи и исследования поляризационных эффектов в области энергии до  $\sqrt{s_{NN}} = 11$  ГэВ/н.

<sup>3</sup> Бустер: (англ. booster) — промежуточный циклический ускоритель, служащий инжектором для большого циклического ускорителя. Применение бустера позволяет повысить начальную энергию (энергию инжекции) большого циклического ускорителя, что приводит к существенному повышению его предельной интенсивности (из-за ослабления взаимодействия частиц пучка с ростом энергии) и к снижению поперечных размеров камеры ускорителя.

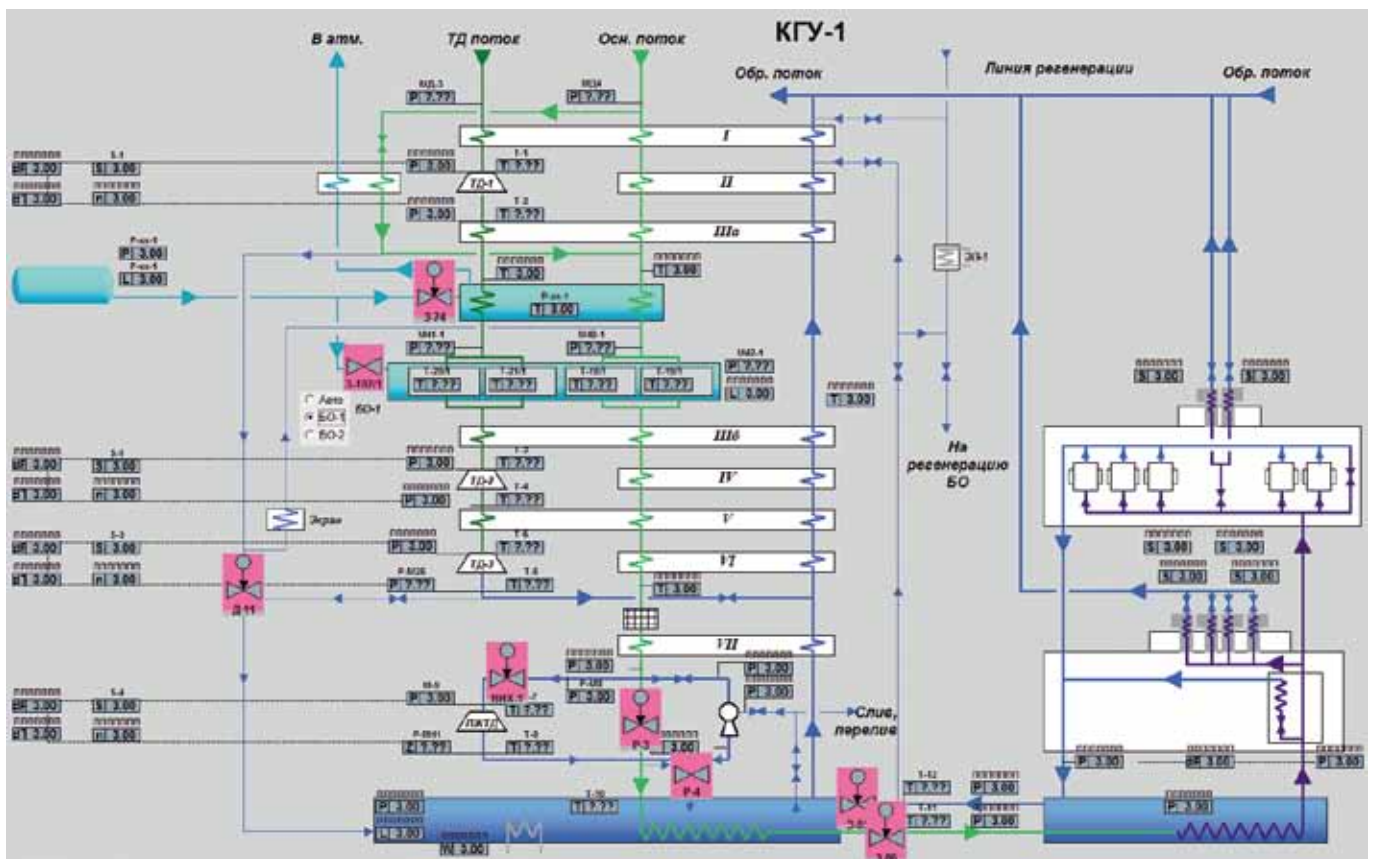


Рис. 2. Мнемосхема установки после внедрения АСУ ТП

► разнообразие основных и вспомогательных процессов (компримирование<sup>4</sup>, регенерация, ожижение, охлаждение, вакуумирование, очистка, хранение и транспортирование);

► необходимость уточнения параметров процессов «на ходу» методом интервьюирования технологов для разработки оптимальных алгоритмов;

► переходные агрегатные состояния среды процесса.

При модернизации решения измерения криогенных температур нами был заменен устаревший преобразователь температур в 4–20 мА на современный преобразователь ТСП/IP. Не потребовалось использовать дорогостоящее импортное оборудование, непосредственно в Дубне был изготовлен блок измерения криогенных температур (диапазон 4–300 К) с питанием PoE.

Проблема отсутствия описания процесса не могла решиться только путем интервьюирования технологов или операторов. Совместно с глав-

ным инженером лаборатории и начальником криогенного отдела было принято решение сначала реализовать комплексную систему диспетчеризации оборудования и получить достоверный архив измеренных параметров в разных режимах работы установки, а потом уже использовать эти результаты как исходные данные для создания АСУ ТП.

Сложные состояния процесса и возможности их поддержания нам еще предстоит изучить.

#### Построение АСУ ТП

В этой статье мы имеем возможность остановиться только на некоторых ключевых моментах нашей работы.

Система автоматизации была построена преимущественно с использованием российского оборудования. Сердце системы – резервированный контроллер TREI-5B-05 M903E (фирма «Трей», Пенза) со средой программирования и исполнительной системой MasterSCADA 4D (компания «ИнСАТ», Москва). В системе были применены: датчики TurboFlow (ГК «Турбулентность-ДОН», Краснодар), TRM202 и ПД100 (производственное

объединение ОВЕН, Москва), цифровой тахометр (НПП «Дана-терм», Московская область, пос. Менделеево) и уже упомянутый многоканальный измеритель криогенных температур ПКТ-8 (компания «Диалтек», Московская область, Дубна), термометры ТВО производства ЛФВЭ ОИЯИ. Серверы, преобразователи интерфейсов, коммутаторы и мониторы были закуплены импортные. Верхний уровень системы сделан в среде разработки MasterSCADA 3.10.

Связь с модулями TREI в контроллере реализована по протоколу



Рис. 3. Дерево системы с контроллером Trei 903

<sup>4</sup> Компримирование – повышение давления газа с помощью компрессора, используется в процессах ожижения. Сопровождается повышением температуры газа и, как правило, требует последующего охлаждения.

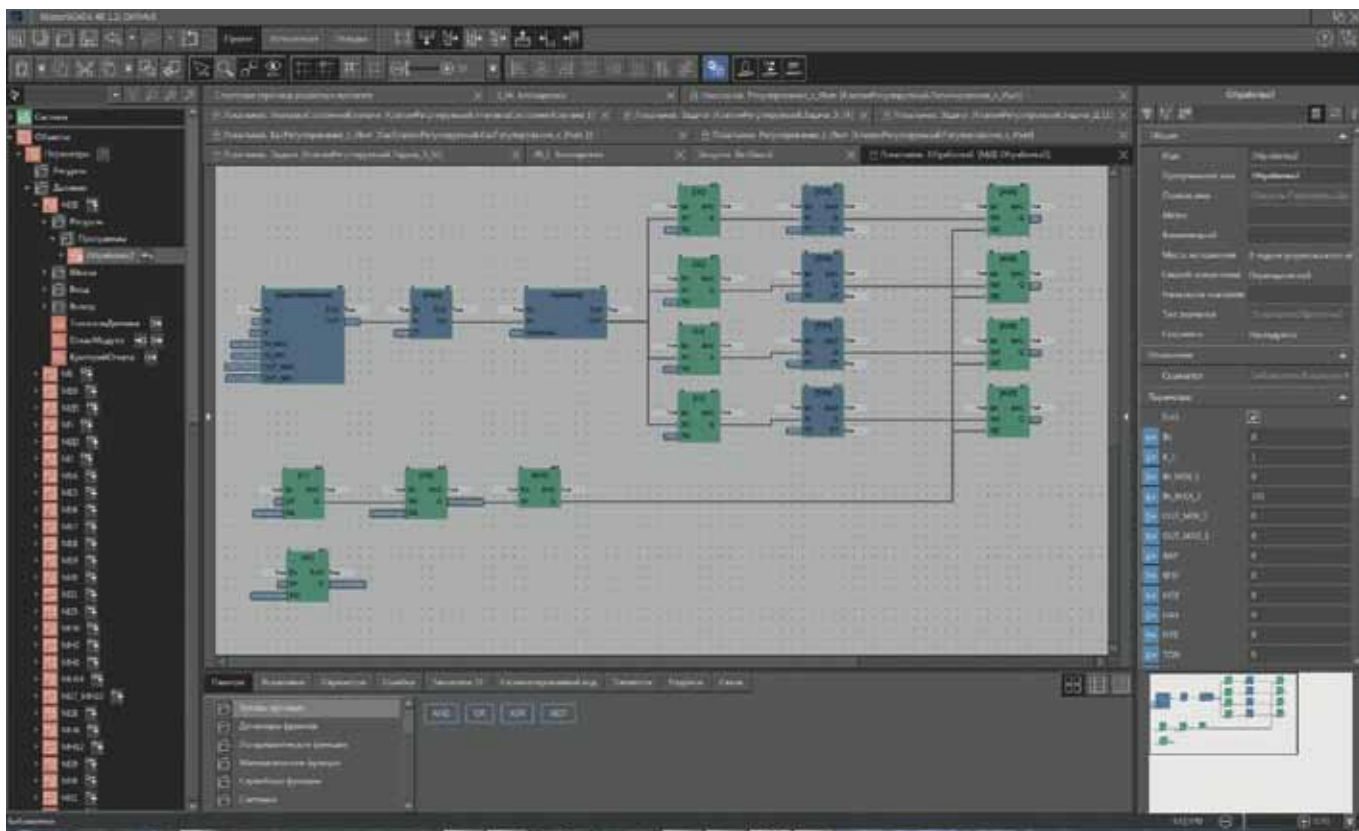


Рис. 4. Реализация обработки измеряемого параметра на языке FBD

St-bus, а с другими устройствами – по протоколу Modbus TCP (рис. 3).

Для основной задачи контроллера установлен цикл (период) 500 мс. Задача 1 выполняется с наивысшим приоритетом и циклом 50 мс. В эту задачу назначены те части алгоритма, которые требуют наибольшего быстрого действия. Цикл задачи был определен экспериментально.

Программирование в Master-SCADA может осуществляться на любом из языков МЭК-61131. Для обработки измеряемого параметра мы

написали программу на языке FBD (рис. 4).

Поступившее на вход измеренное значение масштабируется относительно входной шкалы (от входного минимального до входного максимального) и выходной шкалы (от выходного минимального до выходного максимального) и умножается на коэффициент К. Например, значение входной шкалы 0...20 мА, выходной шкалы – 0...50 Гц, а коэффициента – 10, означает, что при входной величине 10 на выходе получается 250 еди-

ниц. Затем значение фильтруется аperiodическим фильтром первого порядка: устраняются слишком резкие (относительно времени фильтрации) изменения входной величины. Блок гистерезиса необходим для исключения частых срабатываний предупредительных и аварийных уровней при нахождении величины рядом с уровнем.

После этого при помощи сравнения с уставками верхнего и нижнего предупредительного и аварийного уровней (ВАУ, ВПУ, НПУ и НАУ) и задержки включения сигнала на

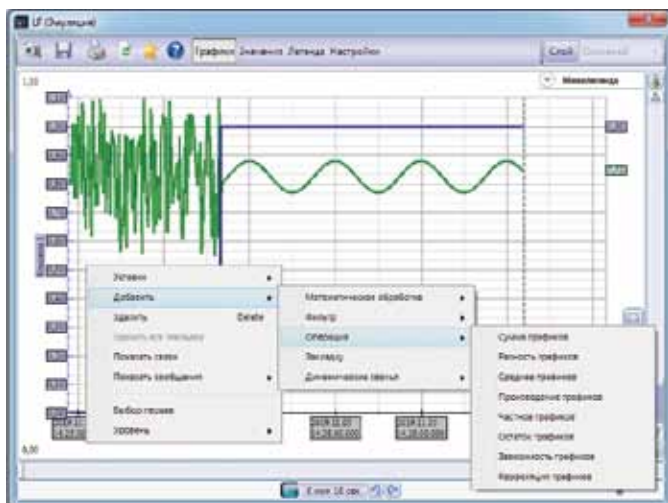


Рис. 5. Операции над графиками

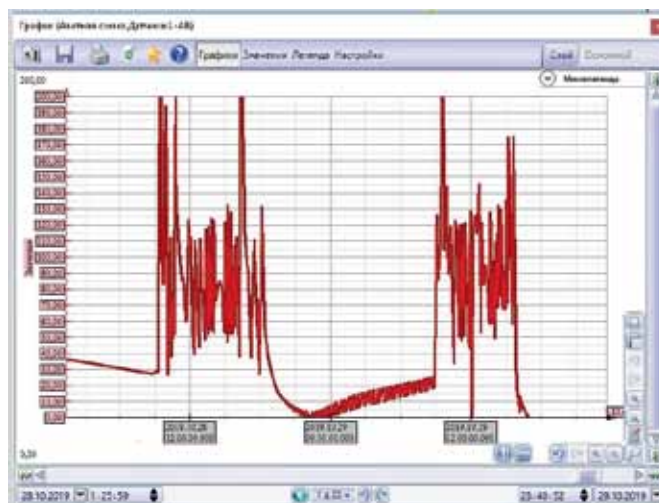


Рис. 6. График уровня в азотной ванне

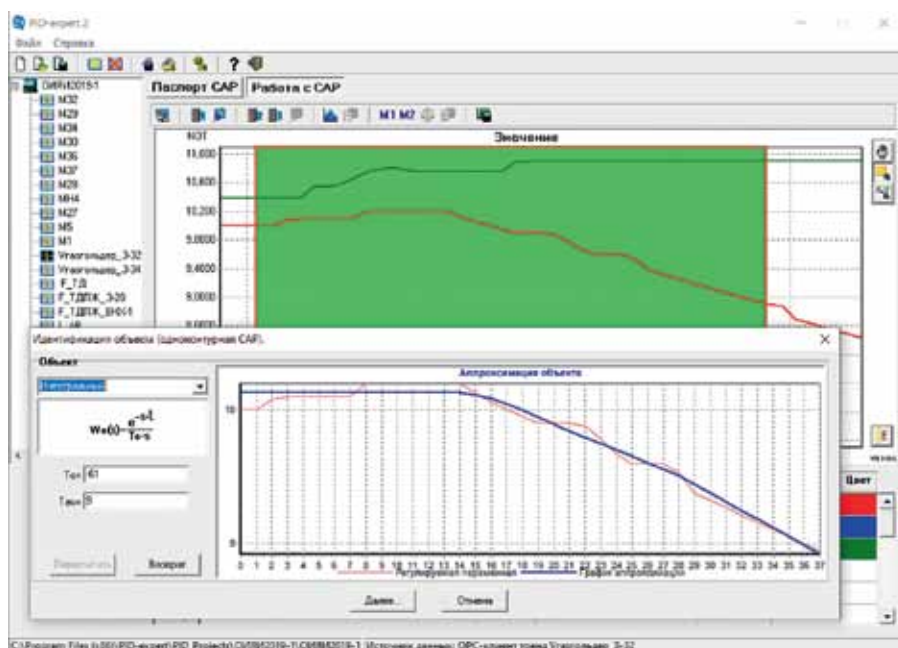


Рис. 7. Идентификация объекта регулирования (источник данных – OPC-клиент)

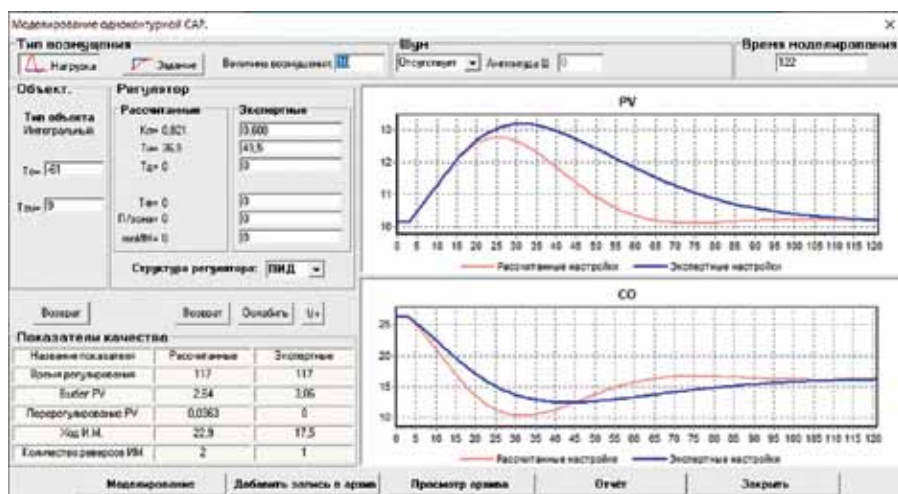


Рис. 8. Моделирование САП уровня (объема) газгольдера

время ТОН срабатывают соответствующие сигналы о нарушении уровня при условии, что на входе имеется корректное значение (проводится проверка на минимум датчика и отсутствие отказа модуля).

Обработанные значения передаются по протоколу Modbus over TCP на верхний уровень. MasterSCADA ver.3.10 получает данные через Master Universal Modbus OPC сервер для визуализации и архивирования. Контроллер использует эти значения в задачах управления.

#### Обработка результатов

Основа для принятия решений по управлению – это архивы достоверных данных. Первое, что позволила сделать внедренная система, опреде-

лить, какие исполнительные механизмы и какие действия каким именно образом влияют на параметры процесса. В частности, после получения данных сразу стало понятно, что на поддержание некоторых параметров оказывает влияние не тот клапан, который предполагался.

Возможность представлять на одном графике (тренде) аналоговые значения и события в совокупности с наличием развитого математического аппарата позволяют анализировать те или иные зависимости. На рис. 5 представлено совмещение события (синяя линия), изменение графика после воздействия (зеленая линия) и меню выбора типа операций над графиками.

На рис. 6 представлен график (тренд) уровня в азотной ванне. Ха-

рактерные всплески (больше реального объема ванны) – это скачки давления в результате кипения жидкости при подливе азота.

Наличие системы регистрации параметров (комплексной системы диспетчеризации оборудования) позволило начать исследования возможностей регулирования. Для этого целесообразно использовать программу PID-expert. Программа подключается к действующей системе управления по OPC-технологии и ведет собственный архив технологических переменных. На основании переходных процессов в контурах регулирования она определяет параметры объекта регулирования, рассчитывает настройки регулятора, а также позволяет производить имитационное моделирование переходных процессов, являющихся реакцией контура на различные возмущения, что дает возможность оценить характер поведения регулятора с рассчитанными настройками еще до того, как они будут установлены в реальную систему управления. На рис. 7 и 8 показан процесс настройки регулятора уровня в газгольдере.

На сегодняшний день системой автоматизации получено значительно больше опытных данных, чем ожидалось. До сих пор продолжается их обработка. И в этом прослеживается сходство с теми экспериментами, которые проводятся на ускорителе лаборатории: эксперимент длится 20 дней, а результаты обрабатываются несколько месяцев. Самая интересная работа еще впереди!

#### Литература

1. Агапов Н. Н., Королев В. С., Слепнев В. М., Турзо И. Алгоритмы автоматического управления криогенной гелиевой установкой КГУ-1600/4,5 / Сообщения объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1985 // Международное агентство по атомной энергии [сайт]. URL: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/16/085/16085731.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/16/085/16085731.pdf) (дата обращения: 16.12.2019).
2. Агапов Н. Н. Научная школа криогеники в лаборатории высоких энергий / Письма в ЭЧАЯ. 2004 г. Т. 1, № 6.

Г.Л. Веселуха, заместитель директора, компания «ИнСАТ», г. Москва, тел.: +7 (495) 989-2249, e-mail: info@insat.ru, сайт: www.insat.ru, www.masterscada.ru