

# СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И СБОРА ДАННЫХ НА УСТАНОВКЕ «СИНГЛЕТ»

*А. А. Адаменков, М. И. Безруков, Л. А. Вдовкин, Д. В. Соколов, М. В. Трошкин*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Разработана общая структурная схема системы управления и сбора данных (СУСД) и ее основных функциональных подсистем. Проведено исследование рынка для промышленной автоматизации, выбор элементной базы. Составлена карта межсистемных и межмодульных соединений СУСД. Разработаны схемы управления двигателем реактора, электромагнитными клапанами и нагревателями в ручном и автоматическом режимах, а также схемы самодельных устройств для регистрации экспериментальных данных. Проведено тестирование и отладка отдельных модулей и систем, компоновка единого комплекса, проверка взаимодействия и окончательная отладка. Создано программное обеспечение для тестирования взаимодействия приобретенного оборудования и его отладки. Разработана и создана общая всеохватывающая компьютерная программа для автоматизации экспериментальных работ на установке сверхзвукового химического кислород – йодного лазера «Синглет», включающая управление установкой, контроль ее параметров в ходе подготовки и проведения пусков, сбор и обработку данных.

## Введение

В 2015 году было принято решение о модернизации СУСД на установке мощного химического лазера «Синглет». Это решение было обусловлено тем, что прежняя система управления и сбора данных на установке «Синглет» была введена в эксплуатацию в далеком 1996 году и за почти два десятка лет изрядно устарела как с точки зрения аппаратной части, так и плане программного обеспечения. Также большие нарекания вызывал тот факт, что рабочее место оператора вплотную примыкало к установке, которая, как известно, представляет собой довольно сложное устройство с повышенными требованиями к технике безопасности. Наличие магистралей высокого давления, агрессивных химических веществ, мощного лазерного излучения и других факторов представляет реальную угрозу здоровью и самой жизни обслуживающего персонала и, в случае ошибочных действий, может привести к катастрофическим последствиям. Поэтому на этапе проектирования новой СУСД было решено расположить пульт управления в соседнем помещении за капитальной стеной и оставить в распоряжении оператора лишь компьютер с программными средствами управления работой установки и монитор для визуального контроля ее параметров. Аппаратную часть СУСД, как и ранее, предполагалось разместить непосредственно в габаритах установки для минимизации количества и длины соединений с целью повышения надежности работы системы и ее помехозащищенности.

## Постановка задачи

В результате анализа многолетнего опыта, накопленного в ходе эксплуатации предыдущих версий СУСД на установке «Синглет», были сформулированы основные требования к новому проекту:

- Проведение экспериментальных работ на установке, включая управление рабочим циклом, контроль параметров, сбор и обработку данных, должно быть полностью автоматизировано.
- Пульт управления (компьютеризированное место оператора) должен находиться в отдельном помещении.
- Алгоритм управления должен быть гибким и легко перенастраиваться в зависимости от конкретных условий проведения эксперимента. Новые исполнительные устройства должны легко

интегрироваться в систему управления, которая не должна зависеть в широких пределах от их количества, физических характеристик и характера взаимодействия.

- В течение всего рабочего цикла должен осуществляться контроль критических параметров; в случае выхода какого-либо параметра за установленные границы программа должна незамедлительно автоматически приступить к выполнению соответствующей аварийной циклограммы завершения работы.

- По окончании рабочего цикла программа должна автоматически обработать собранные данные и предоставить пользователю итоговую экспресс-информацию в требуемом виде (таблицы, графики, изображения, сообщения и т. д.)

- Общее количество каналов системы сбора экспериментальных данных – не менее 64; адаптация входных каскадов к датчикам различных типов.

- Общее количество каналов системы управления – не менее 32; работа системы управления, как в пультовом, так и в автоматическом режиме.

- Общее количество каналов контроля параметров установки во время проведения экспериментов – не менее 8; фиксация и обработка нештатных ситуаций.

- Частота единичного цикла сбора данных системой регистрации – не менее 20 Гц.

- Характерные времена работы установки при проведении пусков – 1...300 секунд.

## Реализация проекта

В самом начале проектирования СУСД, когда обсуждался вопрос выбора элементной базы, нами было принято решение использовать продукцию фирмы National Instruments. Основные причины в пользу принятия такого решения были следующие:

- разнообразная и постоянно обновляемая номенклатура выпускаемых фирмой изделий в области автоматизации эксперимента;

- устоявшаяся хорошая репутация фирмы и ее широкое представительство в России, свободное получение консультаций и подробной информации по интересующим вопросам;

- большое количество технической и справочной литературы по изделиям, удобный и часто обновляемый интернет-сайт фирмы, содержащий много полезной и легко доступной информации;

- поддержка со стороны среды разработки виртуальных инструментов LabVIEW, которая была выбрана базой при создании практически всего программного обеспечения для СУСД.

Поэтому оговоримся заранее, что, если не приведена конкретная ссылка на производителя, то все промышленные изделия, о которых пойдет речь далее, представляют собой продукцию фирмы National Instruments.

Принимая во внимание вышеприведенные требования, а также с учетом предшествующего опыта разработки, реализации и эксплуатации подобных систем на установке «Синглет», мы пришли к следующей структурной схеме СУСД (рис. 1).

Основными функциональными подсистемами СУСД являются:

- система регистрации;

- система управления;

- система контроля и защиты.

Основой СУСД является компьютер (далее основной компьютер) на базе промышленного корпуса IPC-510 (Advantech) с размещенными внутри многофункциональными платами NI6225 и NI4351[1].

Аналоговая часть платы NI6225 позволяет обрабатывать данные 80 аналоговых входов с помощью 16-разрядного АЦП со скоростью 250 Квыб / сек. Любой вход может быть сконфигурирован как в однополюсном, так и в дифференциальном режиме. Каждый вход может быть настроен на прием амплитуд сигналов в диапазоне от  $\pm 0,2$  до  $\pm 10$  вольт. Кроме того, плата содержит 2 аналоговых выхода 16-разрядного ЦАП со скоростью 740 Квыб / сек и диапазоном напряжений  $\pm 10$  вольт.

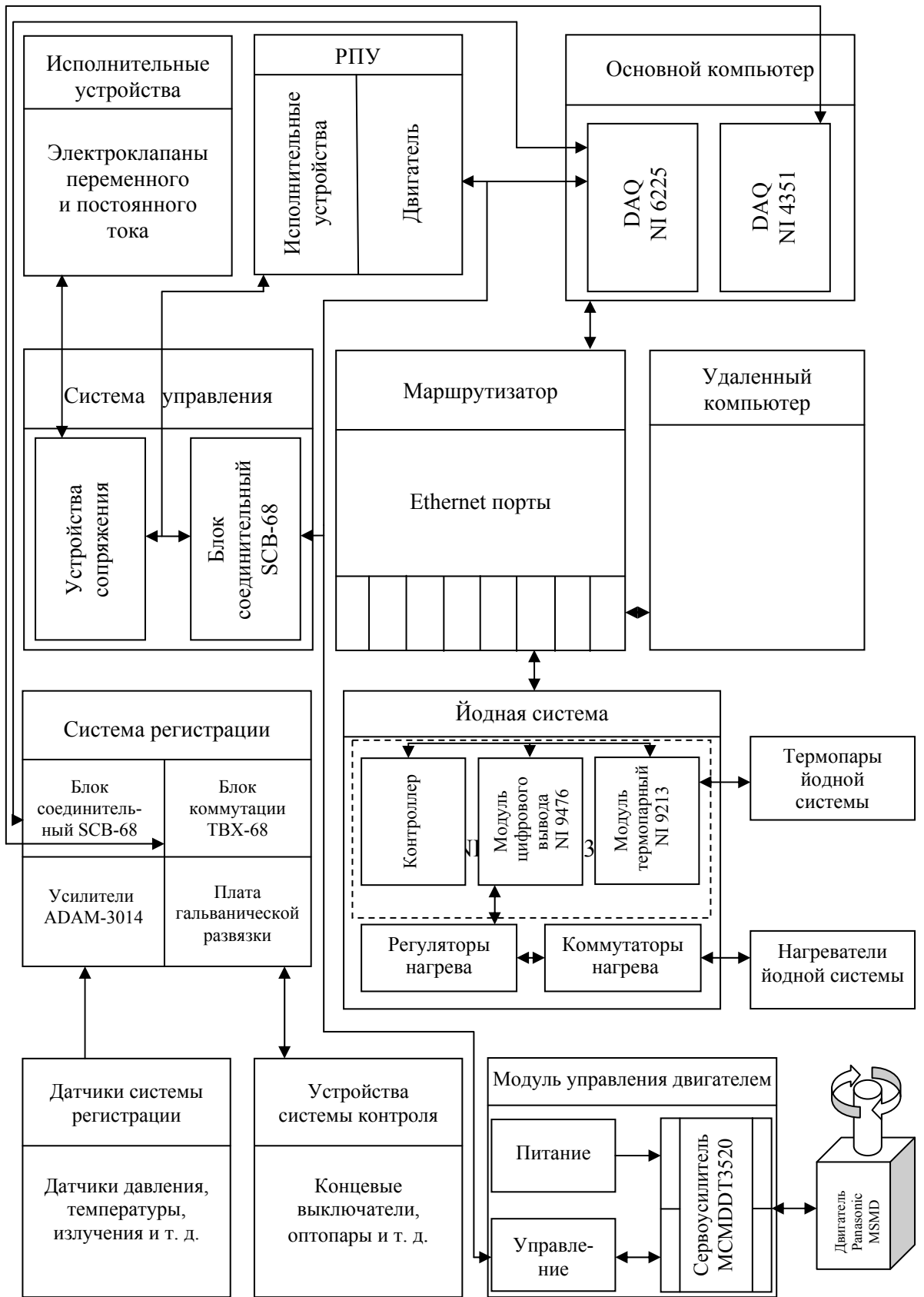


Рис. 1. Структурная схема СУСД

Цифровая часть платы NI6225 содержит 24 канала, которые могут быть сконфигурированы как на ввод, так и на вывод. Логические уровни цифровых сигналов - TTL-совместимые. Мы посчитали полезным использовать также плату NI4351, имея в виду ее способность измерять с высокой точностью малые амплитуды входных сигналов (например, термопар) без привлечения дополнительных устройств типа специализированных усилителей и фильтров. Основные параметры аналоговой части платы NI4351 следующие:

- количество входных каналов – 16 дифференциальных;
- амплитуда входных сигналов – устанавливается пользователем для каждого канала в одном из 6 диапазонов; минимальный диапазон  $\pm 0,625$  вольт, максимальный  $\pm 15$  вольт;
- разрядность АЦП – 24;
- функция определения обрыва термопары;
- функция автоматического определения нулевого уровня сигнала.

Кроме того, плата NI4351 содержит 8 цифровых TTL-совместимых каналов, которые также могут быть сконфигурированы как на ввод, так и на вывод. Эти каналы мы решили задействовать в системе защиты и контроля.

Мы сочли разумным территориальное разделение СУСД на отдельные модули с точки зрения, как общей функциональности, так и обеспечения максимальной помехозащиты слаботочных сигнальных линий от импульсных помех, возникающих в силовых цепях при коммутации мощных нагрузок. Таких модулей получилось пять:

- ящик системы регистрации;
- ящик системы управления;
- пульт ручного управления;
- модуль двигателя реактора;
- ящик йодной системы.

**В ящике системы регистрации** скомпонованы элементы, позволяющие осуществлять ввод и первичную обработку сигналов датчиков, используемых на установке «Синглет». Этапами первичной обработки могут являться усиление, фильтрация и преобразование (например, «ток-напряжение»). В настоящее время источниками сигналов являются:

- промышленные термопары К-типа (хромель–алюмель) и J-типа (железо–константан);
- промышленные датчики давления типов ИКД 27, МИДА-ДА и МЕТРАН-1420;
- калориметрические измерители энергии лазерного излучения ТПИ2-5, ТПИ2-А и Ophir L1500W-LP;
- самодельные детекторы мощности лазерного излучения на базе фотодиодов G8370 фирмы Hamamatsu.

Соединение выходов датчиков с входными устройствами системы регистрации выполнено витыми экранированными парами типа STP-2 и STP-4. В тех случаях, когда это необходимо, усиление и преобразование сигналов датчиков производится с помощью промышленных модулей ADAM 3014 фирмы Advantech. Эти чрезвычайно удобные устройства с полной гальванической развязкой (входа, выхода и питания) и малым температурным дрейфом работают в широком диапазоне входных униполярных и биполярных сигналов, как напряжения, так и тока.

Далее одна группа сигналов (термопары либо калориметры) поступает в блок коммутации ТВХ-68, другая (датчики давления, фотодиоды и все остальные) – в блок коммутации SCB-68. И тот и другой блоки содержат входные клеммы для механического подключения проводников, несущих исходные сигналы, и выходной разъем для подключения кабеля SHC68-68-EPM, передающего данные в основной компьютер. Один кабель соединяет блок коммутации ТВХ-68 и плату NI4351, другой – блок коммутации SCB-68 и разъем № 1 платы NI6225.

Помимо перечисленного, в ящике системы регистрации находится самодельная плата, осуществляющая передачу и гальваническую развязку сигналов, относящихся к системе защиты и контроля. Эти сигналы формируются внешними устройствами, либо оператором в случае нештатного поведения установки в ходе работы (снижение оборотов двигателя реактора ниже допустимого значения, несрабатывание какого-либо исполнительного устройства и т. д.). С помощью нашей платы

сигналы передаются через блок коммутации ТВХ-68 на линии DIO 0 – DIO 7 цифрового порта платы NI4351 и далее в основной компьютер для формирования соответствующей реакции.

Основное предназначение оборудования, расположенного в **ящике системы управления**, состоит в физической реализации работы исполнительных устройств (рис. 2).

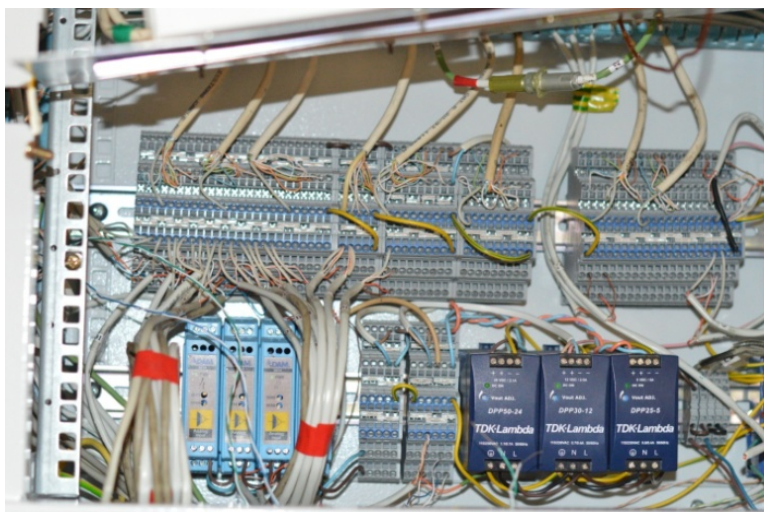


Рис. 2. Ящик системы управления

В настоящее время на установке «Синглет» применяются электромеханические клапаны BURKERT 6013A и ASCO в силовых цепях 220 V переменного тока и клапаны ПЭК-ДД и ТЭК32-1 – в цепях 24 V постоянного тока. В качестве устройств сопряжения используются твердотельные реле фирмы CROUZET типа GMS-ODC (5 – 48 VDC, 3 AMP) и GMS-OAC (12 – 280 VAC, 5 AMP). Общее количество каналов управления – 20, из которых 14 отведено под клапаны переменного тока, а 6 – под клапаны постоянного тока. Управляющие сигналы для работы реле формируются цифровыми портами P0 (линии P0.0 – P0.7), P1 (P1.0 – P1.7) и P2 (P2.0 – P2.3) платы NI6225 и передаются по кабелю SHC68-68-EPM, соединяющему разъем №0 платы и блок коммутации SCB-68, который также находится в ящике системы управления.

Иногда бывает необходимо управлять работой какого-либо клапана (или группы клапанов) вручную, без привлечения программных средств. Как правило, такая потребность возникает при подготовке установки к пуску или во время проведения наладочных или регламентных работ. С этой целью был изготовлен и интегрирован в состав СУСД **пульт ручного управления** (рис. 3), представляющий собой панель с закрепленными на ней механическими переключателями (тумблерами).



Рис. 3. Ящик РПУ

Каждый из 20 тумблеров ассоциирован с выбранным устройством управления (клапаном). Также на панели пульта ручного управления расположен выключатель «БЛОКИРОВКА», активация которого разрывает управляющие цепи всех устройств сопряжения и вызывает принудительное отключение всех устройств управления, в каком бы состоянии они при этом не находились. Кроме того, предусмотрены механические переключатели (тумблер «ГОТОВ» и кнопка «ПУСК»), позволяющие запускать и останавливать в ручном режиме двигатель реактора установки «Синглет», что тоже бывает необходимо в отдельных случаях.

**Модуль двигателя реактора**, как явствует из его названия, предназначен для управления работой двигателя, который приводит во вращение шнек реактора синглетного кислорода – важнейшего агрегата установки «Синглет». Нами используется двигатель MSMD фирмы Panasonic, укомплектованный драйвером MCDD, с которым он соединяется силовой шиной и шиной управления. Двигатель развивает номинальную мощность 750 Вт в диапазоне скоростей вращения вала от 0 до 4500 об/мин. Исходное напряжение питания подается на драйвер от однофазной сети переменного тока 220 В и далее, в преобразованном виде, на двигатель. Ящик модуля двигателя изображен на рис. 4.

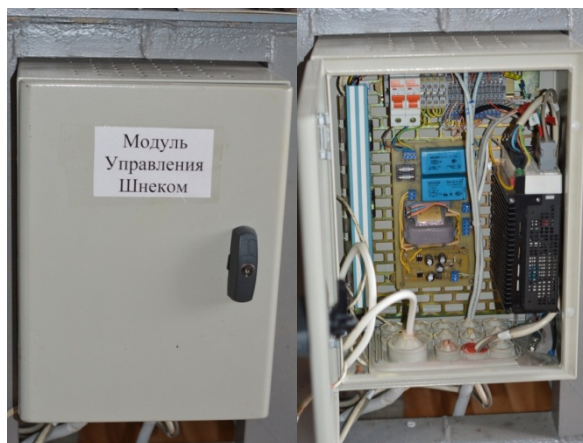


Рис. 4. Ящик модуля двигателя

Теперь о **йодной системе**. Как известно, цикл работ на установке «Синглет» включает в себя два основных режима: подготовка и пуск. В режиме подготовки все действия проводятся оператором вручную: он снимает и оценивает показания датчиков, манипулирует исполнительными устройствами и т.д. Напротив, пуск установки проводится исключительно в автоматическом режиме под управлением основного компьютера. То есть, все функциональные узлы установки «Синглет» во время проведения пуска работают в автоматическом режиме, а между пусками – в ручном. Все, кроме йодной системы, которая работает в автоматическом режиме непрерывно в течение всего цикла работ на установке, обеспечивая процесс приготовления газообразного йода. Более того, часто возникает потребность в автономной работе йодной системы, когда основной компьютер отключен, а остальные системы СУСД обесточены. Поскольку очевидно неразумно полностью загружать основной компьютер работой одной системы, было решено спроектировать и изготовить автономный комплекс управления йодной системой на базе специализированного контроллера.

Была выбрана система распределенного сбора данных и управления NIcRIO9073. Она состоит из двух компонентов: базового блока и модулей ввода-вывода. Базовый блок системы содержит микропроцессор, встроенную операционную систему, преобразователь постоянного напряжения, 8-позиционную объединительную плату для установки модулей ввода-вывода, а также порт обмена данными по сети Ethernet. Основными функциями базового блока являются следующие:

- прием и дешифрация команд от основного компьютера по локальной сети;
- управление модулями ввода-вывода;



- ввод, предварительная обработка и преобразование аналоговых и дискретных данных, а также их вывод;
- сравнение величин аналоговых данных с предварительно заданными значениями;
- формирование и передача данных;
- автоматическая проверка работоспособности.

В качестве модулей ввода-вывода используем: NI9213 – 16-канальный модуль ввода сигналов терморпар и NI9476 – 32-канальный модуль дискретного вывода с гальванической изоляцией, который может использоваться для управления нагревателями. Таким образом, оснащая базовый блок модулями NI9213 и NI9476, получаем автономный комплекс управления йодной системой. Исходные значения температур отдельных функциональных узлов йодной системы передаются оператором с помощью основного компьютера в базовый блок автономного комплекса, где записываются и хранятся во внутренней памяти. Далее управление передается процессору базового блока. Он периодически опрашивает каналы терморпарного модуля, вычисляет значения температур, сравнивает их с опорными значениями и на основании анализа управляет соответствующими каналами модуля дискретного вывода, включая либо выключая нужные нагреватели. Управление нагревом отдельного функционального узла йодной системы заключается в периодическом включении и выключении соответствующего нагревателя в зависимости от текущей температуры. В качестве коммутирующего элемента, как и в системе управления, было выбрано твердотельное реле типа GMS-OAC, управляющий вход которого подключается к выбранному выходу модуля NI9476. Поскольку допустимый диапазон напряжений на управляющем входе реле достаточно широк (4...32 В), а модуль NI9476 питается от источника 24 В, не требуется никаких дополнительных согласований уровней сигналов. Внешний вид ящика йодной системы приведен на рис. 5.



Рис. 5. Ящик йодной системы

**Системы управления и регистрации.** В качестве основного средства разработки программного обеспечения СУСД была выбрана среда разработки National Instruments LabVIEW. Программа способна работать практически с любым существующим оборудованием ввода-вывода с крайне незначительными изменениями. Изменения могут касаться только части программы отвечающей за операции низкоуровневого обмена данных с этим оборудованием.

В стартовом окне оператор с помощью мыши нажимает кнопку с названием необходимой системы, при этом открывается окно программы, схематично изображающее выбранную систему с датчиками, исполнительными устройствами и устройствами контроля.

**Работа в пультовом режиме.** Для управления исполнительными устройствами СУСД в пультовом режиме применяется РПУ. На лицевой панели РПУ расположены переключатели, с помощью которых можно включить или выключить выбранное исполнительное устройство. Измерение показаний датчиков установки «Синглет» в пультовом режиме производится с помощью компьютера. По аналогии с исполнительными устройствами, датчики разбиты на группы в соответ-

ствии с функциональным делением установки. Далее оператор должен включить необходимые исполнительные устройства и наблюдать на экране монитора показания выбранных датчиков. Для примера на рисунке 6 показано окно программы с изображением йодной системы.

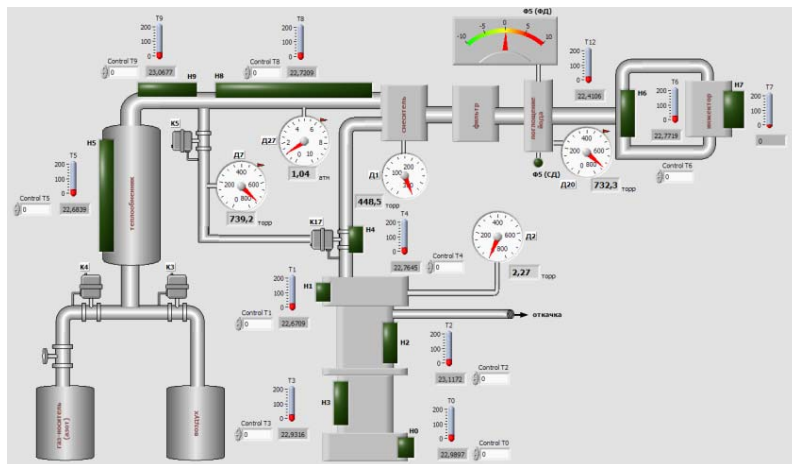


Рис. 6. Окно с йодной системой

**Работа в автоматическом режиме.** Готовясь к проведению пуска, оператор выводит на монитор окна с изображениями желаемых систем установки. Список исполнительных устройств и их времена включения и выключения (циклограмма) должен быть предварительно сформирован оператором, для этого в программе предусмотрена специальная процедура. После завершения подготовительных операций дается команда на проведение пуска. Пуск осуществляется щелчком мыши по кнопке «Старт» в основном окне программы «Система управления и регистрации» (рис. 7).

По ходу выполнения эксперимента обрабатывается циклограмма, проводится сбор данных и контроль критических параметров. В случае возникновения аварийной ситуации, включается программа аварийного завершения, отключаются определенные заранее исполнительные устройства, сбор данных не прерывается. Для экстренного отключения всех устройств системы управления предусмотрена специальная кнопка на панели РПУ.

По окончании работы циклограммы эксперимента происходит автоматическая обработка данных, запись результатов в специальный файл и формирование отчетов в формате Microsoft Excel. Данные с различных систем установки разнесены для удобства анализа работы стенда на различные вкладки и выведены в виде графиков. На рис. 8 приведено изображение файла отчета с активной вкладкой «Двигатель». На ней записывается скорость вращения вала двигателя со шнеком с размерностью обороты в минуту. В данном случае в рабочем режиме использовалось значение 3600 об/мин. Включение по циклограмме происходило на первой секунде, а выключение на четырнадцатой.

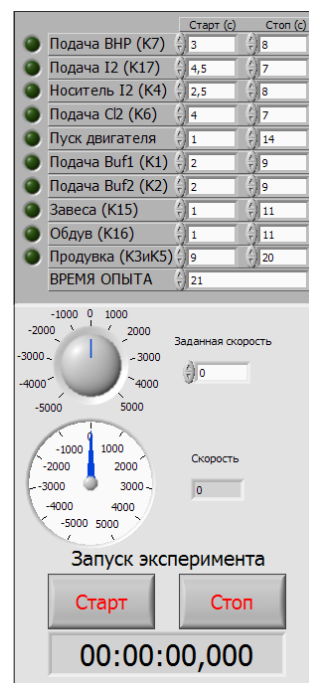


Рис. 7. Окно программы «Система управления и регистрации»



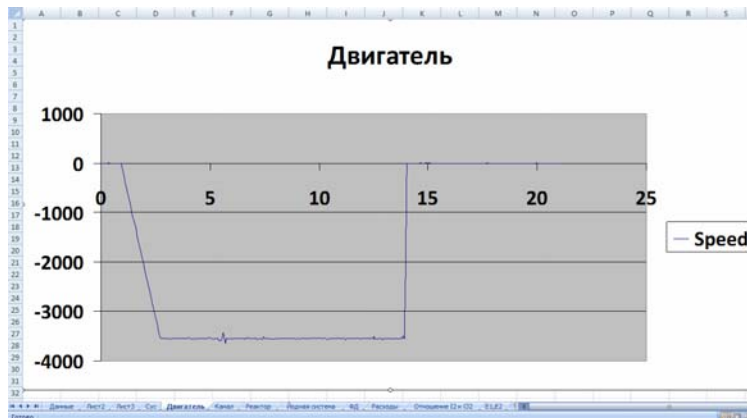


Рис. 8. Пример файла отчета одного из рабочих пусков с активной вкладкой «Двигатель»

### Заключение

Итогом данной работы явилось практическое создание компьютеризированного комплекса, который уже более полугода работает в составе установки мощного химического лазера «Синглет» и обеспечивает полную автоматизацию всего цикла экспериментальных исследований. При создании комплекса учитывалось, что «Синглет» является динамично развивающейся установкой, требующей на начальном этапе довольно частого изменения применяемых методик и измерительной аппаратуры. С этой целью был создан определенный аппаратный резерв, и теперь добавление новых устройств сводится лишь к их подключению к свободным каналам систем регистрации, управления и контроля. Что касается программной части, то здесь эта проблема решается еще проще, а именно, заполнением соответствующих полей в окнах, содержащих технические характеристики применяемого оборудования, или написанием небольших программных фрагментов, отвечающих за операции низкоуровневого обмена данных с этим оборудованием.

Таким образом, разработанная и созданная нами автоматизированная система управления, сбора и обработки данных на установке «Синглет» стала неотъемлемой частью установки, демонстрируя в проводимых опытах широкую функциональность, надежность, легкость и удобство в эксплуатации.

### Список литературы

1. NI 435x User Manual, Austin, Texas 78759-3504 USA, 2005.
2. OPERATING INSTRUCTIONS AND SPECIFICATIONS NI 9213, Austin, Texas 78759-3504 USA, 2009.