## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ

УДК 681.322.0

**В. В. Васильев**, д-р техн. наук, проф.
**О. С. Воронова**, канд. техн. наук,
**А. Ф. Зыков**, канд. техн. наук,
**А. И. Левина**, канд. техн. наук,
**А. И. Баранов**, инж.

# ИНТЕГРИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС МОНИТОРИНГА И ТРЕНАЖА ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Отделение гибридных моделирующих и управляющих систем в энергетике Института проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова НАН Украины,
e-mail: vsvv06@gmail.com

*Рассмотрены вопросы построения комплекса мониторинга ручной дуговой сварки плавящимся электродом, сочетающего в себе функции обучения приемам и профессиональным навыкам электросварщика. Дано описание структурной схемы и основных особенностей функционирования программного обеспечения.*

**Введение.** Разработка математических моделей и структурных схем мониторинга процессов ручной дуговой сварки (ручной дуговой сварки штучным плавящимся электродом и полуавтоматической сварки электродной проволокой в среде защитных газов), описанных в работах [1 – 3] стала основой для создания комплексов, которые успешно могут сочетать в себе функции мониторинга процесса сварки и тренажерных систем.

Мониторинг процесса дуговой сварки предусматривает непрерывное оценивание текущего состояния основных параметров процесса, сравнение их с ограничениями, определяющими условия получения качественного сварного соединения, и формирования сигналов о времени и месте нарушений нормативных параметров.

Для организации мониторинга элементы сварочного оборудования оснащаются датчиками, которые позволяют получить информацию о напряжении дуги, токе дуги, углах наклона электрода к поверхности свариваемого изделия. Значения данных параметров используются для оценки скрытых параметров процесса, определяемых на основе математических моделей: теплосодержания сварочной ванны, скорости сварки, пространственного положения сварочной дуги, отклонений параметров режима от рекомендованных технологических значений.

Комплекс мониторинга сварочного процесса может быть применим и при обучении ведению сварки на реальном процессе ручной дуговой сварки. Для преобразования комплекса мониторинга в тренажер сварщика достаточно заменить реальное сварочное соединение имитатором и дополнить программное обеспечение комплекса базой данных, содержащей персональные данные студентов, типовых учебных заданий, учебных сеансов сварки. Таким образом, можно говорить об интегрированном комплексе мониторинга и тренажа сварщиков.

Отделением гибридных моделирующих и управляющих систем в энергетике ИПМЭ НАН Украины на основе исследований в области мониторинга процессов электросварки проведены разработки интегрированных комплексов мониторинга и тренажа для ручной дуговой сварки [3]. Рассмотрим вопросы построения и функционирования интегрированного аппаратно-программного комплекса (АПК) «ARCUS-1T», который позволяет проводить обучение, тестирование и тренировку сварщиков. Основной его особенностью является взаимодействие обучаемого с реальной сварочной обстановкой и оценка этого взаимодействия.

Интегрированный комплекс «ARCUS-1T» обеспечивает:

– формирование учебных заданий разной степени сложности;

– контроль и регистрацию выполнения заданий;

– формирование сигналов обратной связи при нарушении условий задания;

– анализ ошибочных действий с прогнозированием их влияния на качество сварного шва;

– формирование комплексных отчетов как по отдельному тренировочному сеансу, так и по всему учебному циклу.

Конечным результатом тренировочного сеанса сварки является оценка качества выполняемого процесса, которое может контролироваться по таким параметрам:

– отдельным: длине дугового промежутка, пространственному положению электрода, скорости сварки и т. д.;

– совокупности параметров;

– интегральной оценке величины удельного тепловложения.

Контроль качества по отдельным параметрам сварки осуществляется путем измерения их текущих величин, после чего для каждого учитываемого параметра определяется, находится ли его текущее значение в допустимых пределах. Допустимые пределы параметров сварки задаются в соответствии с технологическими требованиями.

В процессе обучения фиксируется количество допущенных ошибок, причем регистрируется как время совершения ошибки, так и ее положение на сварочном шве.

Имеется возможность усложнения учебного задания, что позволяет вести обучение «от простого к сложному». Так, например, можно сужать коридор допустимых значений параметров сварки, обучая ученика максимально точно выдерживать технологические требования.

Каждое неправильное действие имеет свой «весовой коэффициент» и может оказывать различное влияние на качество сварочного процесса. Поэтому в тренажерном комплексе «ARCUS-1T» введена система анализа каждой совершаемой ошибки и интегральной оценки их совокупности. Степень влияния каждой из ошибок устанавливается технологическими условиями.

**Структура аппаратной части комплекса.** Компоненты и структура аппаратной части АПК «ARCUS-1T» схематически изображены на рис. 1.

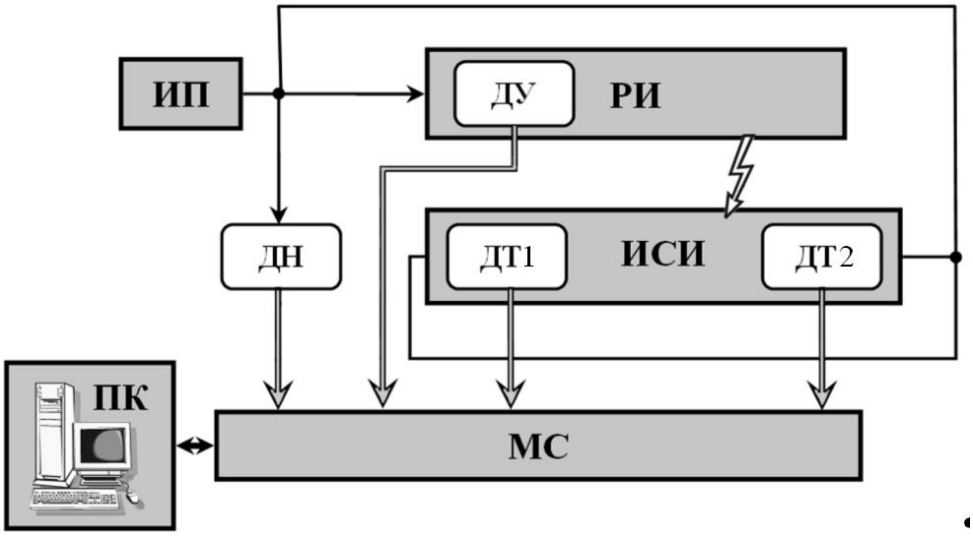



Рис. 1. Структура аппаратной части АПК:
ИП – источник питания; РИ – ручной инструмент; ИСИ – имитатор свариваемого изделия;
ДН – датчик напряжения дуги; ДТ1 и ДТ2 – датчики тока; ДУ – датчик продольного и поперечного углов наклона электрода; МС – модуль сопряжения с персональным компьютером (ПК)

В качестве источника питания может использоваться один из известных типов промышленного сварочного источника тока для ручной дуговой сварки, например, ТДЭ-101 У2.

Ручной инструмент представляет собой стандартный ручной инструмент сварщика с электродом для выполнения ручной дуговой сварки штучным электродом, оснащенный датчиком углов.

Имитатор свариваемого изделия представляет собой металлическую пластину произвольного размера и постоянного продольного сечения, которая может принимать различные геометрические формы, например: плоского, уголкового, трубного с разрезом снизу. Имитатор может быть установлен в любое пространственное положение. При замене одного типа имитатора свариваемого изделия на другой не требуется переналадка комплекса мониторинга.

Датчик напряжения дуги предназначен для измерения напряжения на выходе источника питания. В качестве ДН может быть использован преобразователь напряжения, LV 25-P (LEM Components).

Датчики тока ДТ1 и ДТ2 предназначены для измерения токов, протекающих через участки свариваемого изделия. В качестве ДТ1 и ДТ2 могут быть использованы датчики тока типа ДСТ-50 … ДСТ-250.

Датчики тока и напряжения размещены на силовой шине вторичной цепи источника питания и являются бесконтактными преобразователями, выполненными на основе датчиков Холла. Эти датчики так же используются для гальванической развязки между измеряемыми и измерительными цепями.

Датчик углов предназначен для измерения углов наклона электрода в продольной и поперечной плоскостях. Определение значений углов основано на измерении емкостей, величины которых преобразуются в выходные сигналы постоянного напряжения. В качестве датчика углов используется инклинометр типа ДК1.

Модуль сопряжения предназначен для преобразования текущих аналоговых сигналов с датчиков (напряжения, тока и углов) в цифровую форму для последующего ввода в ПК. В качестве модуля сопряжения может быть использован модуль SDI-ADC16-32H (Saturn Data International).

Персональный компьютер обеспечивает выполнение программной части интегрированного комплекса. Настоящая версия программной части АПК «ARCUS 1T» ориентирована на платформу x86 и операционную систему Windows. Следует отметить, что требования к ПК и системному программному обеспечению в основном определяются типом модуля сопряжения, а также требованиями, предъявляемыми внешними модулями программного комплекса.

Сеанс сварки начинается с возбуждения дуги в произвольном месте на плоскости имитатора свариваемого изделия. Студент может вести сварку в продольном направлении от места возбуждения дуги к одному из его концов.

Текущая информация с датчиков (напряжения, тока и углов) через модуль сопряжения поступает в ПК для обработки программными модулями.

**Описание программной части комплекса.** Структура программной части схематически изображена на рис. 2, на котором стрелками условно обозначены направления потоков обмена данными.

Основным компонентом программной части комплекса является система управления базой данных (СУБД) «ARCUS-1T», которая выполняет функции:

– управления потоками данных и запуска внешних модулей программного комплекса;

– ведения и учета карточек: персональных данных студентов, типовых учебных заданий, учебных сеансов сварки, проведенных каждым из студентов;

– выдачи учебного задания на конкретный сеанс (время сеанса сварки и граничные допустимые значения контролируемых параметров);

– формирования и печати статистических данных как по отдельному учебному сеансу сварки, так и по всему курсу обучения студента.

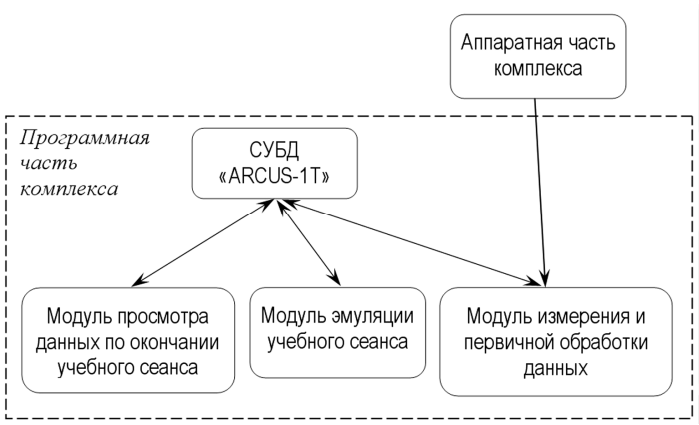



Рис. 2. Структура программной части АПК

Прочие модули интегрированного комплекса «ARCUS-1T» называются внешними, поскольку являются полностью независимыми и могут быть запущены как самостоятельно, так и под управлением СУБД. Они обеспечивают:

– регистрацию данных по контролируемым параметрам сварочного процесса;

– первичный, одновременно с процессом, контроль параметров сварки;

– ретроспективный анализ сварочного процесса с возможностью его эмуляции программными средствами.

Описанная выше архитектура программной части интегрированного комплекса «ARCUS-1T» обеспечивает ей уникальную гибкость в плане дальнейшего развития. В частности, при обеспечении единого протокола обмена данными отдельные модули могут легко изменяться и заменяться, что существенно снижает стоимость и трудозатраты по модернизации комплекса в целом.

В настоящей версии АПК хранение данных лишь частично обеспечивается средствами СУБД. Данные о сварочном процесса для каждого учебного сеанса сварки хранятся в виде отдельных файлов, а в базе данных прописываются лишь параметры файла данных (полное имя, дата изменения, размер), позволяющие проконтролировать целостность данных. Остальные данные (персональные данные обучаемого, статистическая информация об учебных сеанса сварки, данные о типовых учебных заданиях и т. д.) хранятся и обслуживаются средствами СУБД. Выбор такого способа хранения данных обуславливается следующими причинами. Во-первых, тем, что регистрация параметров сварочного процесса в объеме, позволяющем в дальнейшем выполнить полную компьютерную эмуляцию процесса, порождает массивы данных большого размера, и на момент выхода данной версии тренажера хранение таких объемов информации в базе данных не есть целесообразным. Во-вторых, для написания внешних модулей регистрации и анализа сварочного процесса могут быть использованы различные среды программирования, имеющие свои особенности работы с данными. Поэтому текущий способ хранения данных о сварочном процессе наиболее простой способ обеспечить единый стандарт обмена данными. Однако использование для хранения информации только средств файловой системы затрудняет обеспечение целостности данных и повышает риск искажения данных вследствие их утери, умышленного или непредумышленного изменения. Поэтому в дальнейшем, для повышения безопасности хранения данных можно создать дублирующую базу данных о сварочном процессе, что при необходимости будет реализовано в следующих версиях тренажера.

Рассмотрим более детально основные элементы интерфейса СУБД «*ARCUS-1T*». Регистрация персональных данных обучаемого осуществляется с помощью экранной формы «Учетная карточка студента», в которой указывается информация о проведенных учебных сеансах сварки (рис. 3). Записи о проведенных данным студентом сеансах сварки автоматически сортируются по дате проведения сеанса.

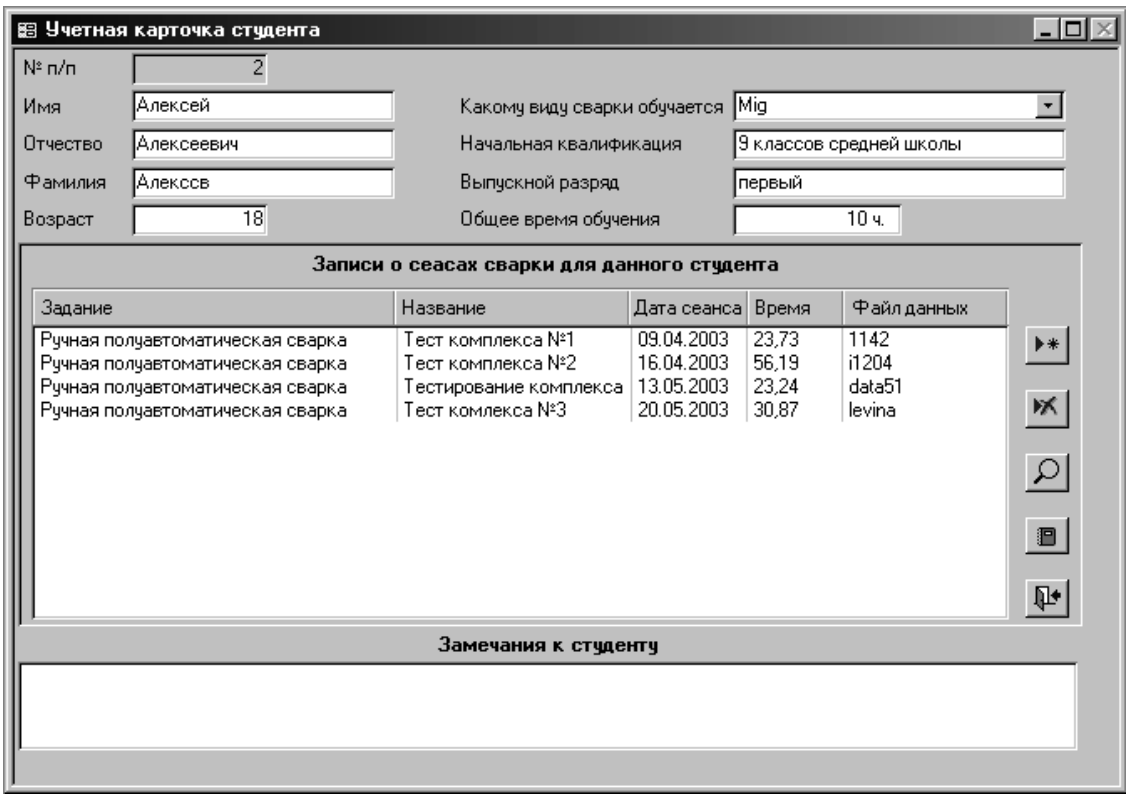



Рис. 3. Форма «Учетная карточка студента»

Окно формы содержит органы управления, которые позволяют добавить, удалить и выбрать для просмотра запись об учебном сеансе сварки, а также сформировать и напечатать справку о результатах по всему курсу обучения студента.

При добавлении новой записи об учебном сеансе сварки автоматически активизируется окно экранной формы «Учетная карточка сеанса», которое позволяет задать время тренировочного сеанса, указать вид учебного задания, в случае необходимости, откорректировать минимальные и максимальные допустимые значения контролируемых параметров и дать старт учебному сеансу, запустив модуль измерения и первичной обработки данных. При этом ученик должен начать сеанс сварки.

После окончания учебного сеанса сварки активизируется окно расширенной формы «Учетная карточка сеанса», которое дополнительно содержит информацию о допущенных во время сеанса сварки ошибках, реальном времени сеанса, времени горения дуги, ориентировочную оценку сеанса и поле для замечаний и рекомендаций мастера (рис. 4).

Окно формы «Учетная карточка сеанса» также содержит органы управления, позволяющие просмотреть и напечатать отчеты о данном учебном сеансе сварки, а также повторить сеанс в режиме компьютерной эмуляции.

Экранная форма «Учетная карточка типового учебного задания» позволяет мастеру-инструктору ввести информацию о типе используемого сварочного процесса, типе материала и виде сварного соединения, а также типовые для данного процесса минимальные, максимальные и оптимальные значения контролируемых параметров и коэффициенты в уравнении для расчета тепловложения. Параметры типового учебного задания затем используются при формировании заданий на каждый конкретный учебный сеанс сварки.

Таким образом, предоставляя пользователю удобный, дружественный интерфейс и объединяя отдельные программные модули в единый комплекс, СУБД «ARCUS-1T» выступает в роли автоматизированного рабочего места мастера-инструктора.

К внешним модулям программной части комплекса относятся:

- модуль измерения и первичной обработки данных;
- модуль эмуляции учебного сеанса;
- модуль просмотра данных.

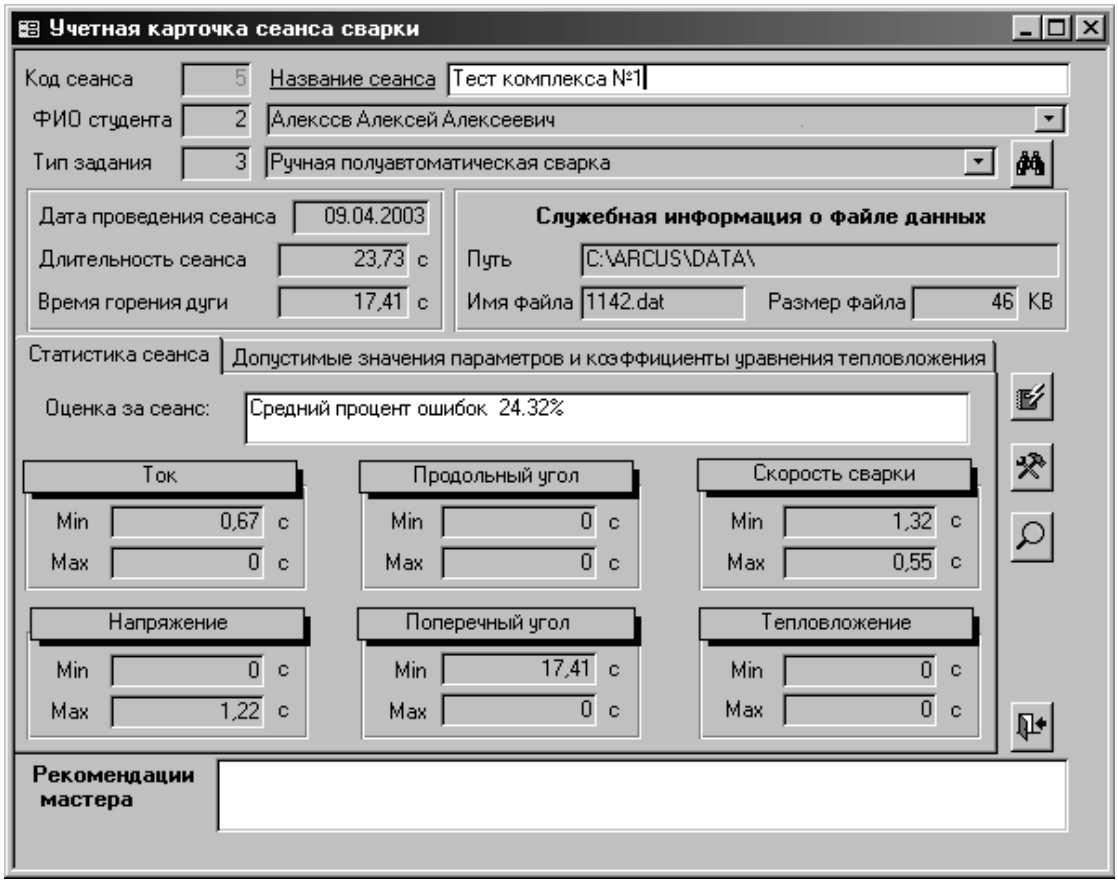



Рис. 4. Окно расширенной формы «Учетная карточка сеанса»

Рассмотрим функции каждого из этих модулей.

*Модуль измерения и первичной обработки данных* предназначен для контроля и регистрации сварочного процесса в течении учебного сеанса сварки. Его функции:

– измерение и регистрация первичных величин;
– вычисление и регистрация вторичных параметров;
– визуализация контролируемых параметров;
– формирование сигналов об ошибке в случае выхода контролируемых параметров за установленные границы;
– подсчет количества ошибок по каждому параметру и их анализ;
– визуализация мест горения и обрывов дуги.

Первичными измеряемыми величинами являются: продольный $\alpha$ и поперечный $\beta$ углы наклона ручного инструмента, токи $I_1$ и $I_2$ (рис. 5), напряжение на дуге $U_д$. Вторичными вычисляемыми величинами являются: скорость сварки, интегральная величина удельного тепловложения.

Параметры процесса сварки по первичным величинам определяются следующим образом.

Текущая величина длины дуги $L_д(t)$ определяется по величине напряжения на выходе источника питания, которое с выхода датчика напряжения дуги через модуль сопряжения поступает в ПК. Основанием для этого служит линейная зависимость напряжения на дуге $U_д$ от ее длины, которая определяется уравнением Айртона:

$$U_д = a + bL_д,$$

где $a = U_k + U_a$, $U_k$, $U_a$ – падения напряжения в приэлектродных областях столба дуги, которые являются пренебрежимо малыми величинами.

Текущая величина скорости сварки $v_{св}(t)$ вычисляется в результате деления величины продольного перемещения сварочной дуги на время, за которое произошло это перемещение. Продольное перемещение сварочной дуги определяется на основе найденных координат дуги в начале и в конце заданного промежутка времени. По этим координатам также определяется длина сварочного шва. При возбуждении дуги ток источника тока $I_{св}$ распределяется по поверхности имитатора изделия на токи $I_1$ и $I_2$, которые от точки горения дуги замыкаются на источник тока через участки $L_1$ и $L_2$ поверхности имитатора изделия и соответствующие датчики тока (рис. 5).

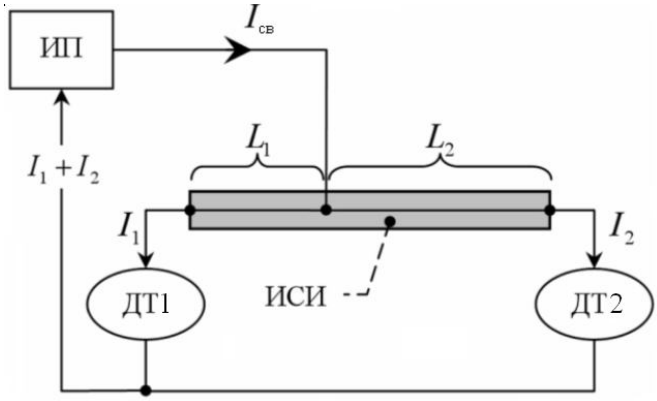



Рис.5. Схематическое изображение распределения токов

В процессе сварки при движении сварочной дуги будет осуществляться перераспределение токов $I_1$ и $I_2$ обратно пропорционально сопротивлениям участков $L_1$ и $L_2$. Сопротивления участков пропорциональны их длинам $L_1$ и $L_2$. Таким образом, отношение токов будет обратно пропорционально отношению длин этих участков: $I_1/I_2 = L_2/L_1$. По величине длины поверхности имитатора изделия и величинам токов $I_1$ и $I_2$ определяются значения длины участков $L_1$ и $L_2$ как

$$L_1 = L_{из}\frac{I_1}{I_1 + I_2}; \quad L_2 = L_{из}\frac{I_2}{I_1 + I_2}, \tag{1}$$

где $L_{из}$ – длина поверхности имитатора изделия.

Определение координат горения дуги и вычисление скорости сварки осуществляются на основе величин напряжения $U_1$ и $U_2$ на выходах датчиков тока, которые поступают через модуль сопряжения в ПК. Величины напряжений $U_1$ и $U_2$ пропорциональны токам $I_1$ и $I_2$ и обратно пропорциональны длинам участков $L_1$ и $L_2$. В соответствии с уравнением (1) определяются длины участков $L_1$ и $L_2$ и фиксируется продольная текущая координата $x(t)$. Через время $\Delta t$ вновь определяется координата $x(t + \Delta t)$ и вычисляются: продольное перемещение сварочной дуги $S_д(t) = x(t + \Delta t) - x(t)$ и скорость ведения сварки

$$v_{св}(t) = \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t}.$$

Текущая величина погонной энергии $Q(t)$ может быть вычислена следующим образом,

$$Q(t) = \frac{I_{св}(t)U_{св}(t)}{v_{св}(t)},$$

где $I_{св}(t)$, $U_{св}(t)$ и $v_{св}(t)$ – соответственно текущие значения тока сварки, напряжения дуги и скорости сварки.

Интегральная величина удельного тепловложения $H(t)$ вычисляется как решение дифференциального уравнения

$$\frac{dH}{dt} + aH(t) + bH(t)v_{св}(t) = cI_{св}(t)U_{св}(t), \qquad (2)$$

где начальные условия и коэффициенты $a$, $b$ и $c$ определяются видом сварочного процесса.

В основном окне модуля измерения и первичной обработки данных отображаются три графика, индикаторы и дополнительные числовые поля для отображения текущих значений контролируемых параметров в процессе тренировочного сеанса сварки (рис. 6)

Графики предназначены для отображения во время тренировочного сеанса сварки значений основных контролируемых параметров (сварочного тока, напряжения на дуге, скорости сварки). Дополнительные поля предназначены для отображения текущих значений контролируемых параметров и ошибок по ним, а также для отображения заданного времени сеанса сварки, текущего времени и времени горения дуги. Во время тренировочного сеанса сварки при выходе контролируемых параметров за граничные значения рядом с соответствующим дополнительным полем зажигается индикатор ошибки.

По окончании тренировочного сеанса сварки формируется сводная таблица ошибок, которая для наглядности отображается в виде гистограммы, а затем сохраняется в файле статистики. Вычисляется и отображается на дополнительном графике интегральная величина удельного тепловложения (2). В нижней части окна на схематическом изображении образца отображаются места горения и обрывов дуги.

*Модуль эмуляции учебного сеанса* предназначен для повторного (или многоразового) просмотра на экране монитора ПК проведенного сеанса сварки, а также для восстановления данных статистики в случае их утери. Его интерфейс полностью повторяет интерфейс модуля измерений и первичной обработки (рис. 6).

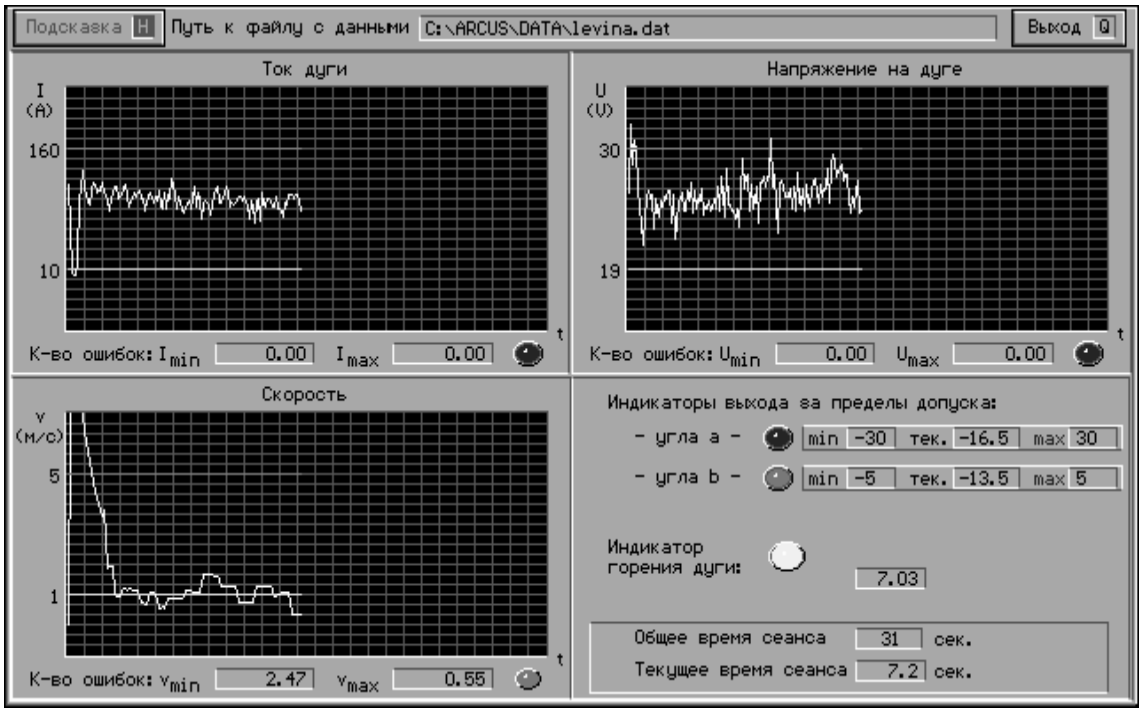



Рис. 6. Интерфейс модуля измерения и первичной обработки данных

В функции *модуля просмотра данных* входит построение сводных графиков изменения основных параметров, характеризующих сварочный процесс, как во времени, так и относительно пространственной координаты.

**Заключение.** Таким образом, заменяемые внешние модули программной части тренажерного комплекса обеспечивают все функции, связанные с регистрацией и последующей обработкой информации о сварочном процессе, поступающей через модуль сопряжения из аппаратной части комплекса. Следует отметить, что благодаря модульной архитектуре программного обеспечения АПК для каждого типового сварочного процесса может быть подключен свой модуль измерения и первичной обработки данных. Таким образом, принимая во внимания особенности каждого типового сварочного процесса, алгоритмы первичной обработки данных могут быть существенно упрощены.

Возможность оценки техники ведения ручной дуговой сварки в пространстве координат реальной сварочной дуги относительно сварочного шва с указанием его дефектов во времени и месте их свершения позволяет осуществлять процесс обучения сварщиков на качественно новом уровне. Следует также отметить, что интегрированный комплекс мониторинга и тренажа «ARCUS-1T» фактически реализует концепцию автоматизированного рабочего места, чем значительно улучшает условия работы мастера-инструктора.

**Список литературы**

1. *Васильев В. В., Симак Л. А.* Математическая модель электросварки для мониторинга и тренажа // Математические модели процессов электросварки и их применение к проблемам мониторинга (Препринт / НАН Украины. Отделение гибридных моделирующих и управляющих систем в энергетике ИПМЭ, № 06/98). – С. 5 – 22.
2. *Моделирование* динамических систем: Аспекты мониторинга и обработки сигналов // НАН Украины. Отделение гибридных моделирующих и управляющих систем в энергетике ИПМЭ / под ред. В. В. Васильева. – К.: – 2002. – 342 с.
3. *Имитационное* моделирование и тренажерно-обучающие системы в электросварки / НАН Украины. Отделение гибридных моделирующих и управляющих систем в энергетике ИПМ / под ред. В. В. Васильева. – К., 2003. – 118 с.

В. В. Васильєв, О. С. Воронова, А. Ф. Зиков, Г. І. Левіна, О. І. Баранов

**Інтегрований комплекс моніторингу та тренажу для дугового зварювання**

Розглянуто питання побудови комлексу моніторингу ручної дугової зварки плавким електродом, що поєднує в собі функції моніторингу та навчання прийомів і професійних навичок електрозварника. Подано опис структурної схеми та основних особливостей програмного забезпечення.

V. V. Vasylyev, O. S. Voronova, A. F. Zykov, G. I. Levina, O. I. Baranov

**Integrated complex of monitoring and training for arc welding**

Items concerning the construction of the monitoring complex for the manual arc welding by a consumable electrode has been examined. Given complex combines monitoring functions with ones of teaching of welding methods and skills. Basic structure and main features of software was described.