

УДК 004.415.26:629.783

И.Б. ТУРКИН¹, Ю.А. ШЕПЕТОВ¹, П.А. ЛУЧШЕВ¹, Д.Г. БЕЛОВ²

¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

² *Государственное конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля, Украина*

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ БОРТОВЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Предложен язык описания технологических процессов испытаний сложных технических систем, преимущественно относящихся к космической технике. Приведены основные результаты внедрения разработанных моделей, алгоритмов и программных средств при испытаниях системы электроснабжения космического аппарата типа «Микроспутник».

язык описания сценариев проведения испытаний, языки ПЛК, функциональный блок, стандарт ИЕС 1131-3

Введение

Испытания сложных технических систем сопровождает все этапы их жизненного цикла: от ранних стадий разработки до серийного производства и эксплуатации. Проблемная область испытаний систем достаточно обширна, так как тщательным проверкам подлежат не только конструкции систем, но и логика их работы, комплексы, образующиеся при взаимодействии исследуемой системы с внешней средой и смежными системами. В процессе испытаний анализируются вещественно-энергетические и информационные потоки, реализуемые в рамках данных взаимодействий. При этом объектом изучения и проверок является не только испытываемая система, но и контрольно-проверочная аппаратура, технологические процессы испытаний и проверок, эксплуатационная документация. В то же время коэффициент полезного действия испытаний достаточно низок: основная часть затрат времени и средств приходится на подготовку испытаний, восстановление объекта испытаний после отказов и отклонений параметров, изготовление деталей и узлов с новыми техническими решениями и т.д.

Все вышесказанное в полной мере относится и к системам электроснабжения (СЭС) космических ап-

паратом (КА), при этом следует учесть, что доля исследовательских и экспериментально-отработочных испытаний в жизненном цикле систем КА заметно выше из-за уникальности самого объекта испытаний, сложности имитации факторов космического пространства в наземных условиях и т.д. [1, 2].

Постановка задачи. Стандарт ИЕС 61131-3 определяет языки для программируемых контроллеров таким образом, что части прикладной программы могут быть запрограммированы на любом языке и скомпонованы в единую исполняемую программу. Стандарт включает структурное программирование, абстрактные типы данных, выделение данных и процедур в блок (инкапсуляцию) в сочетании с сохранением тесной связи с классическими языками для программируемых контроллеров.

Стандарт ИЕС 61131-3 описывает два графических языка: "Диаграмма цепей" (LD) и "Диаграмма функциональных блоков" (FBD). В этих языках графические символы обеспечивают прямое соответствие между графическим представлением решения задачи и программой, решающей эту задачу.

¹ Отечественные разработчики программных средств промышленной автоматизации используют термин «Язык релейно-контактных схем»

LD использует стандартизированный набор символов и представляют собой диаграммы-схемы на основе релейной логики.

FBD – это графический язык, который повсеместно используется в Европе. Элементы этого языка выглядят как блоки, соединенные проводами в электрическую цепь, делая язык удобным для множества прикладных программ, содержащих передачу информации или данных между различными компонентами. Функциональные блоки – это программные объекты, которые представляют специализированные функции управления, используемые в управляющих системах.

В дополнение к графическим языкам LD и FBD стандарт IEC 61131-3 определяет элементы языка "Схема последовательных функций" (SFC) – "шаги", "переходы" и "блоки операций", которые могут быть использованы для организации "операций", написанных на любом языке, для получения алгоритмов последовательного управления.

В IEC 61131-3 определяется также два стандартных текстовых языка: "Список команд" (IL) и "Структурированный текст" (ST). IL – язык низкого уровня, аналогичный германскому стандарту "Anwelsungsliste", в то время как ST – язык высокого уровня, разработанный для структурного программирования. Язык ST предоставляет булевы и арифметические операторы, а также конструкции структурного программирования, такие, как IF... THEN ELSE, CASE, WHILE DO, REPEAT...UNTIL.

В стандарте IEC 61131-3 не определяется максимальный или минимальный набор возможностей; единственное, для чего он предназначен, это создание базы для конкуренции производителей в целях достижения максимального удобства для пользователей [5]. Для эффективной разработки ПО испытаний систем требуется дополнительно адаптировать универсальную семантику языков стандарта IEC 61131-3 к задачам более узкого класса.

Когда заходит речь о разработке ПО для автома-

тизации испытаний, к общим требованиям, например, надежности, оптимальности кода по быстродействию и ресурсам добавляются жесткие ограничения на время разработки программного продукта, возможность оперативного переконфигурирования технологических режимов проведения испытаний в целом, и алгоритмов диагностических проверок, в частности [7].

В качестве количественных показателей, характеризующих сложность задачи автоматизации испытаний систем КА, отметим, что:

- объем информации, поступающей от внешних устройств, составляет несколько кб/с
- количество сигналов и команд управления – $10^2 \div 10^3$.
- на мнемосхеме одновременно должно быть визуализировано текущее состояние $30 \div 80$ сигналов, для которых дополнительно требуются графические средства для анализа их предыстории
- сообщения о событиях и тревогах, которые должны быть зарегистрированы для последующего анализа, формируются с частотой – $10^{-2} \div 10^2$ 1/с;
- требуемая периодичность циклического выполнения алгоритмов диагностирования – 0,1 с;
- количество алгоритмов диагностирования – десятки;
- количество технологических процессов и форм протоколов испытаний – десятки.

Отладку и тестирование технологических режимов испытаний, алгоритмов программного обеспечения трудоемко и экономически неэффективно проводить только в стендовых условиях на поздних этапах разработки. Поэтому технология разработки специального программного обеспечения натурных испытаний СЭС должна базироваться на имитационной математической модели (ИММ) инфраструктуры стенда и объекта испытаний: СЭС и ее контрольно-измерительной и контрольно-проверочной аппаратуры (КИА и КПА). Такая модель необходима не только для тестирования системы, но и для

уточнения и развития требований, изучения свойств системы, понимания логики взаимодействия с внешней средой и т.д. При этом высокая стоимость испытаний с реальными объектами оправдывает значительные затраты на такие системы, тем более, если предстоят испытания систем электроснабжения с множеством развивающихся версий. Основные требования к модели сводятся к следующим положениям [6]:

- все данные от ИММ должны поступать на испытываемое ПО в соответствии с естественным ходом процессов в имитируемых объектах реального времени;

- диапазоны изменения исходных данных в программных имитаторах должны обеспечивать перекрытие всех характеристик реальных объектов;

- генерируемые тестовые и эталонные данные, все виды искажений и аномалий, поступающих на испытываемое ПО, должны регистрироваться, контролироваться и обобщаться в любой момент времени и на любом шаге обработки информации;

- модель должно настраиваться на структуру аппаратных средств и параметры внешнего окружения, которые при разработке системы обычно точно не определены. Настройка обычно выполняется статически до запуска системы;

- должна быть обеспечена возможность измерения и обобщения показателей качества и безопасности ПО.

Таким образом, целью работы является разработка и реализация программных средств для автоматизации технологических процессов испытаний сложных технических систем на основе специализированного языка, к которым предъявляются следующие требования:

- поддержка сложной событийно-ориентированной логики;

- удобство и лаконичность, выразительная сила;

- сквозной характер – отсутствие семантических разрывов на этапах разработки технологического

процесса, его верификации и практического применения.

Функции и структура комплекса программного обеспечения

Перечисленные требования определяют необходимость разработки программного комплекса, функциональное назначение которого состоит в следующем:

- подготовка испытаний СЭС, включая редактирование технологических процессов испытаний специалистом-технологом без участия программиста и повторной компиляции программного комплекса, а также автономное тестирование ПО и верификация технологических процессов испытаний;

- осуществление проверок СЭС на стенде автономных испытаний и в составе КА, в т.ч. управление имитаторами, контрольно-измерительной и контрольно-проверочной аппаратурой, эмуляция смежных систем КА, визуализация и протоколирование телеметрической информации, контроль взаимного функционирования составных частей и СЭС в целом, логики работы в различных условиях и режимах эксплуатации, близких к реальным, проверка работоспособности СЭС при имитации возможных нештатных ситуаций и т.д.

- анализ интегральных электроэнергетических характеристик СЭС по результатам испытаний.

- Объект испытаний – СЭС КА типа “Микроспутник”, состоит из фотоэлектрической батареи (БФ); химической батареи (БХ); прибора автоматического регулирования и контроля (ПАРК), который обеспечивает функциональное сопряжение компонентов СЭС; и преобразователя-стабилизатора сетки номиналов напряжений (ПССН) вторичного питания [8].

Для испытаний СЭС используется электрический эквивалент – имитатор БФ (ИБФ), КПА ПАРК и КИА ПССН, которые образуют КИА СЭС. В качестве основной ПЭВМ, на которой устанавливается

ПО испытаний СЭС, задействуется одна из двух ПЭВМ КПА ПАРК.

На этапе подготовки испытаний формируется описание технологического процесса испытаний, представленное в формате базы данных. Редактор сценариев проведения испытаний СЭС в диалоговом режиме с использованием удобного графического и интуитивно-понятного интерфейса пользователя обеспечивает возможности создания и редактирования описание режимов испытаний, которое впоследствии может быть сохранено на диске и документировано на твердом носителе.

Подсистема реального времени (рис. 1) включает в себя следующие программные единицы:

- монитор состояния СЭС, который, исходя из описания стратегии испытаний, хранящейся в базе данных, осуществляет запросы информации от внешних устройств, ее прием и преобразование, выдачу управляющих воздействий;
- программа-имитатор БЦВК, применяемая только при автономных испытаниях СЭС;
- программа регистрации, обработки и просмотра сообщений о событиях, происходящих при испытаниях;
- коммуникационная программа для взаимодействия с внешними устройствами через последовательный интерфейс и по локальной сети Ethernet в реальном времени и с ИММ во время автономной отладки технологии проведения испытаний и тестирования программного продукта.

Язык описания технологических процессов испытаний сложных технических систем

В основу описания технологического процесса испытаний положены ключевые понятия (рис. 2):

1. «Режим» – некоторое устойчивое состояние системы, ограниченное во времени благодаря наличию событий, вследствие которых система переходит в новый режим. Описание события представляет собой перечень необходимых условий, при истин-

ности которых событие считается состоявшимся (рис. 3).

2. «Проверка» – алгоритм диагностирования. На графической мнемосхеме во время редактирования ТП «проверка» представлена графом, вершины которого (функциональные блоки) представляют элементарные действия по вводу и обработке текущей информации, формированию и выдаче управляющих воздействий и сообщений оператору, а направление передачи информации задается ребрами графа [4]. К основным типам ФБ относятся:

- блоки-источники, которые представляет собой ссылку на данные, формируемые путем программного опроса внешних каналов, ввода текущего времени или выполнения внешней подсистемы;
- блоки анализа и обработки данных, регламентирующие основные способы преобразования информации;
- блоки управления сценарием, позволяющие организовать иерархическую схему описания процесса испытаний;
- блоки, реализующие выдачу команд управления на внешние устройства, данных из вызываемых подсистем, сообщений оператору.

3. «Последовательность элементарных действий» (команд управления внешними устройствами, модификации управляющих переменных, сообщений оператору, временных пауз) позволяет «разгрузить» графическое описание проверок за счет вынесения последовательности действий в линейный список.

В качестве примера использования данного подхода для испытаний СЭС КА «Микроспутник», рассмотрим один из разработанных алгоритмов, а именно алгоритм проверки исправности датчика среднего напряжения (ДСН).

Срабатывание датчика среднего напряжения должно происходить при устойчивом (в течение 3...5 с) снижении напряжения на выходе СЭС до величины $29,5 \pm 0,15$ В.

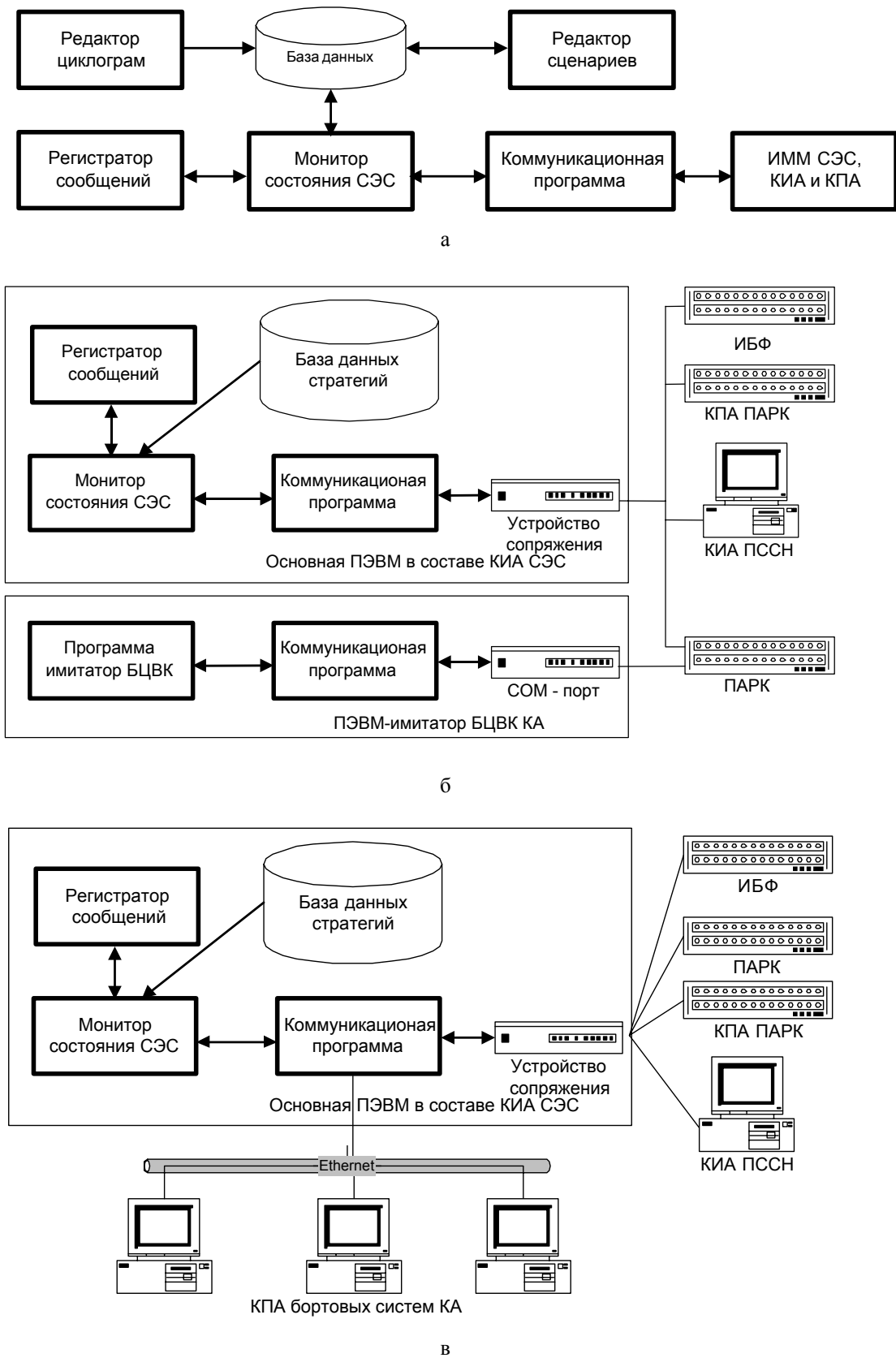


Рис. 1. Схема информационного взаимодействия программ подсистемы реального времени:
 а – схема применения математической модели СЭС для тестирования программного обеспечения
 и верификации технологических процессов; б – автономные испытания СЭС;
 в – испытания в составе КА

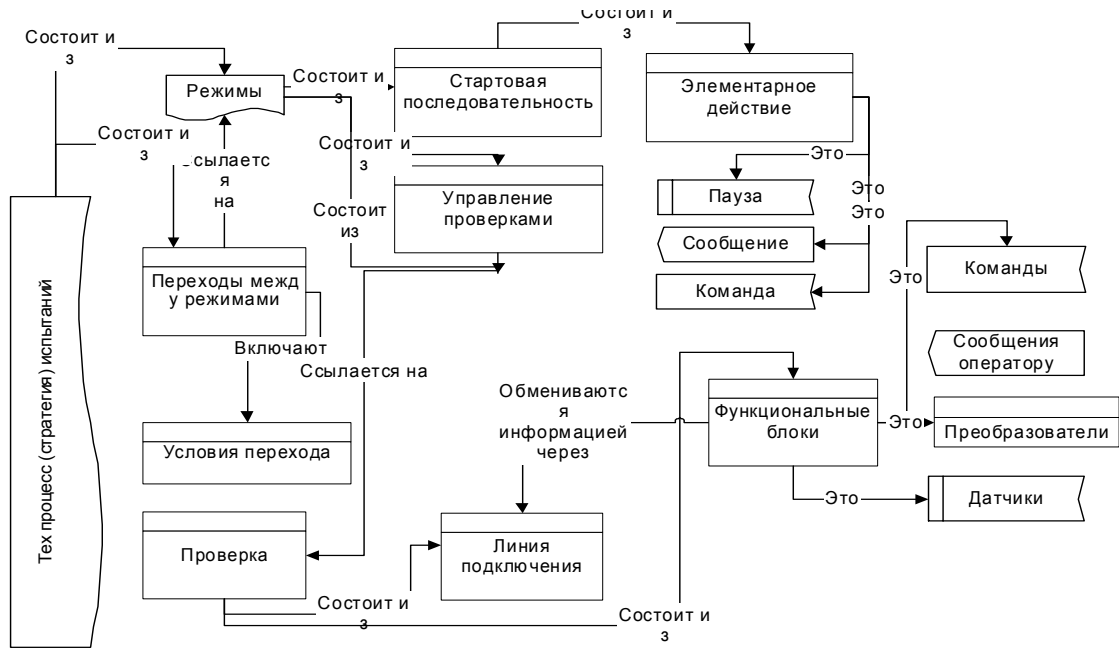


Рис. 2. Семантическая сеть, характеризующая взаимосвязь понятий предлагаемой модели

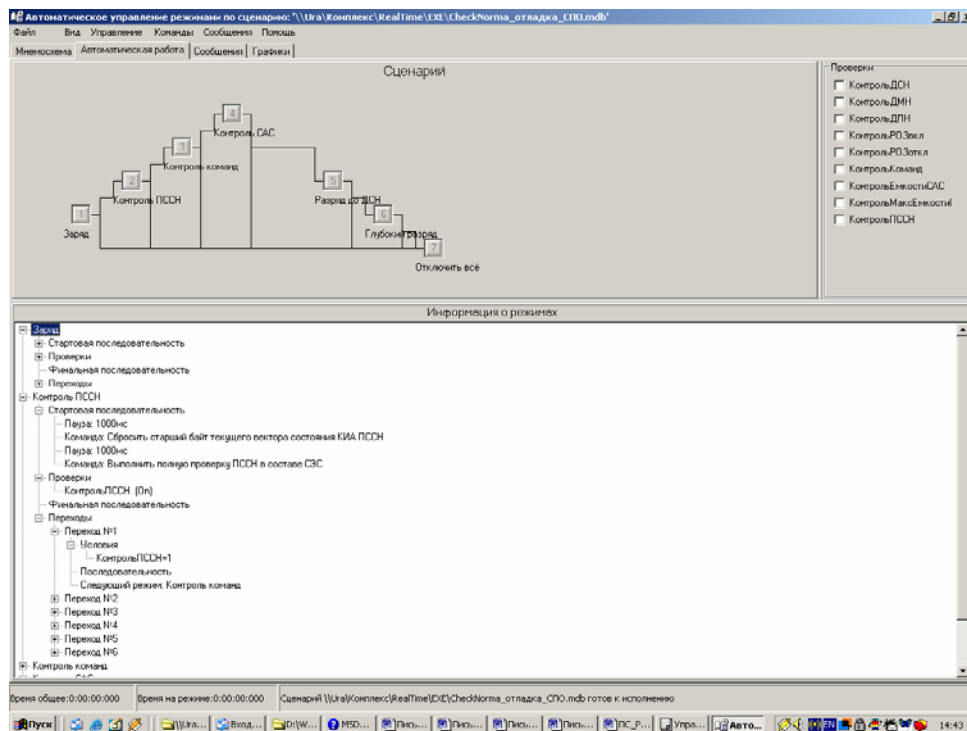


Рис. 3. Сценарий автономных испытаний СЭС КА «Микроспутник»

Указание двух допустимых диапазонов времени и напряжения срабатывания приводит к тому, что результаты проверки могут иметь 4 возможных исхода, среди которых только один соответствует исправному состоянию датчика. Тогда алгоритм проверки ДСН выглядит так, как показано на рис. 4.

1. Если датчик сработал при $U > U_{ДСН} + \Delta U$ (где $U_{ДСН} = 29,5 \text{ В}$, $\Delta U = 0,15 \text{ В}$), то сигнализировать о ложном срабатывании датчика.

2. При падении напряжения на выходе СЭС до $U \leq U_{ДСН} + \Delta U$ (где $U_{ДСН} = 29,5 \text{ В}$, $\Delta U = 0,15 \text{ В}$) начать отсчет возможного времени $t_{возм}$.

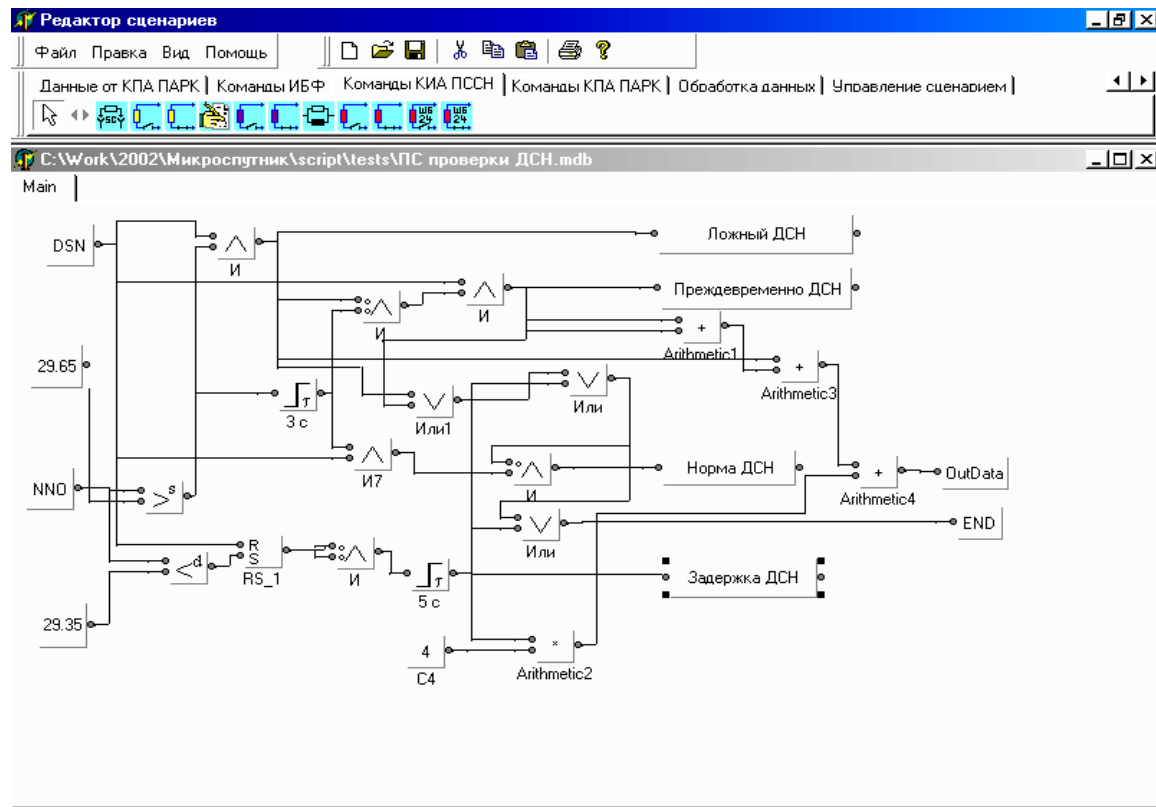


Рис. 4. Алгоритм диагностирования ДСН, представленный на языке функциональных блоков, в графическом редакторе

3. При срабатывании ДСН фиксировать $t_{возм}$. Если $t_{возм} < 3$ с, сигнализировать о преждевременном срабатывании датчика, в противном случае об его исправности.

4. При отсутствии срабатывания ДСН и $U \leq U_{ДСН} - \Delta U$ начать отсчет необходимого времени срабатывания $t_{необх}$.

5. При отсутствии срабатывания и выполнении условия $t_{необх} > t_{max}$ (где $t_{max} = 5$ с), сигнализировать о задержке срабатывания датчика.

6. Если при отсчете $t_{возм}$ или $t_{необх}$ зафиксирована ситуация $U > U_{min}(U_{max})$, соответствующий таймер остановить.

Управление процессом интерактивного создания и редактирования технологических режимов испытаний осуществляется редактором сценариев испытаний, в результате чего происходит создание и модификация реляционной базы данных. В процессе редактирования данных редактор осуществляет исчерпывающий контроль корректности и непрото-

речивости данных, допуская построение базы данных (описания технологического процесса) лишь в точном соответствии с алгоритмами проверок. Вся информация, содержащаяся в отредактированном сценарии испытаний, автоматически сохраняется в базе данных, а затем на этапе проведения испытаний считывается из нее, т.е. отсутствует ручная трансляция представлений технолога в текст программной реализации, при которой обычно допускается много ошибок.

Заключение

В статье предложен подход к разработке программного обеспечения для ИУС испытаний сложных технических систем. Особенности данного подхода являются:

- включение в состав ПО имитационной модели объекта испытаний и инфраструктуры испытательного стенда;
- распределение функций программного ком-

плекса по соответствующим его подсистемам – подготовки испытаний, реального времени, анализа и обработки результатов;

- представление технологического процесса проведения испытаний в виде, который позволяет специалисту-технологу испытаний либо разработчику системы самостоятельно создать, отредактировать, проверить корректность проверок, не требуя при этом ни непосредственного участия программиста и повторной компиляции программного продукта, ни собственно наличия стенда и объекта испытаний.

Разработанные программные средства для испытаний сложных технических систем ориентированы на комплексное использование визуальных и текстовых средств проектирования и спецификации технологических режимов испытаний, которые в совокупности обеспечивают гибкость, лаконичность, выразительную мощь представления ТП испытаний по сравнению с альтернативными средствами.

На основе предложенных подходов и методических разработок может быть обеспечено дальнейшее развитие и наращивание программного продукта в следующих направлениях:

- разработка баз данных типовых сценариев проведения проверок и диагностирования элементов СЭС КА в процессе наземных испытаний системы;

- создание программных средств для сопровождения СЭС КА в период летной эксплуатации;

- расширение состава поддерживаемых платформ в направлении переносных устройств, а именно мобильных телефонов (WAP-телефония) и карманных компьютеров, что предоставляет качественно новые возможности контроля и управления технологическими процессами испытаний;

- поддержка в составе проверок нечетко сформулированных алгоритмов диагностирования (Fuzzy Logic), что позволяет за счет использования технологии искусственного интеллекта описать технологические процессы испытаний системы на языке ее конструктора-разработчика.

Литература

1. Безручко К.В., Туркин И.Б. Концепция планирования испытаний систем электроснабжения космических аппаратов // Вісті академії інженерних наук України. – 2001. – № 1, 20. – С. 143-162.

2. Безручко К.В., Туркин И.Б. Автоматизированная система испытаний энергоустановок космических аппаратов // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т». – 2001. – Вип. 26. – С. 199-204.

3. Парфенов В.В., Терехов А.Н. RTST – технология программирования встроенных систем реального времени // Системная информатика. – Вып. 5: Архитектурные, формальные и программные модели. Новосибирск. – 1997. – С. 228-256.

4. ITU Recommendation Z.100: Specification and Description Language (SDL). – 1993. – 204 p.

5. IEC 61131-3. Overview, 1997. – [Электр. ресурс]. – Режим доступа: <ftp://ftp.cle.ab.com/stds/iec/sc65bwg7tf3/html/s1-4.htm> (13.01.06).

6. Динамическое моделирование и испытания технических систем / И.Д. Кочубиевский, В.А. Стражмейстер, Л.В. Калиновская, П.А. Матвеев: Под ред. И.Д. Кочубиевского. – М.: Энергия, 1978. – 303 с.

7. Кривцов В.С., Безручко К.В., Белов Д.Г., Туркин И.Б. Моделирование при разработке, испытаниях и эксплуатации систем электроснабжения перспективных космических аппаратов // Космическая техника. Ракетное вооружение. Научно-техн. сборник. – Днепропетровск: ГКБ «Южное». – 2004. – Вып. 1. – С. 254-263.

8. Belov D.G., Gladilin V.S., Dranovsky V.J., Perepovsky I.T. The Electric Power System for Small Satellite // Proc. of International Conference of Small Satellites: – Missions & Technology. 9-13 Sept. 1996. – Madrid, Spain. – P. 640-641.

Поступила в редакцию 16.01.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Кривцова, Академия гражданской защиты Украины, Харьков.