

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)

Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Системы автоматического управления»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент н.о. КИПиА ООО «УрИЦ»

_____ / Досин А.А.

« ____ » _____ 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____ / В.И. Ширяев

« ____ » _____ 2017 г.

Программное обеспечение автоматизированного комплекса для ресурсных и
повторно-статических испытаний стоек шасси самолета

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ – 09.04.01.2017.016.00 ПЗ ВКР

Руководитель работы

н.п. АСУ ТП ООО «УрИЦ»

_____ / Батурин А.А.

« ____ » _____ 2017 г.

Автор работы

студент группы **КЭ-270**

_____ / Андреева А.А.

« ____ » _____ 2017 г.

Нормоконтролер

доцент каф. САУ ЮУрГУ, к.т.н.

_____ / Павловская О.О.

« ____ » _____ 2017 г.

АННОТАЦИЯ

Андреева А.А. Программное обеспечение автоматизированного комплекса для ресурсных и повторно-статических испытаний стоек шасси самолета: ЮУрГУ(НИУ), ВШ ЭКН; 2017 г. 94 с., 56 ил., библиогр. список – 49 наим., 12 листов слайдов презентации ф. А4.

В работе разработан и реализован в среде графического программирования LabVIEW алгоритм управления с рабочей станции процессом повторно-статических и ресурсных испытаний опоры шасси легкого военно-транспортного самолета (ЛВТС) Ил-112В. Данный алгоритм позволяет оценить фактическую прочность опоры и узлов ее крепления путем нагружения конструкции до разрушения, определения усталостной долговечности силовых элементов конструкции опоры, поэтапного подтверждения ресурса.

Для выбора типа и параметров адаптивного регулятора системы нагружения получена математическая модель системы нагружения испытательного комплекса. По результатам имитационного моделирования системы нагружения рекомендован нечеткий ПИД-регулятор.

Отладка ПО с использованием OPC Server Recorder позволила устранить 2 собственные ошибки программного обеспечения (ПО). Анализ надежности с использованием экспоненциальной модели надежности, и графа состояний показал, что коэффициент готовности ПО комплекса для ресурсных и повторно-статических испытаний, частью которого является разработанное ПО, составляет 0,999.

Работа выполнена с использованием следующего программного обеспечения: NI LabVIEW, СУБД MySQL, ПО Recorder от Mera, MATLAB, Simulink.

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	Программное обеспечение автоматизированного комплекса для ресурсных и повторно-статических испытаний стоек шасси самолета		
Разраб.	Андреева А.А.						
Провер.	Батурин А.А.						
Реценз.	Досин А.А.						
Н. Контр.	Павловская О.О.						
Утверд.	Ширяев В.И.						
					<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
					Д	4	94
					ЮУрГУ Кафедра САУ		

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	7
1 Принцип работы испытательного комплекса опор шасси самолета Ил-112В.....	13
1.1 Режим повторно-статических испытаний опоры.....	14
1.2 Режим ресурсных испытаний опоры шасси.....	16
1.2.1 Ресурсные испытания системы уборки/ выпуска опоры.....	17
1.2.2 Ресурсные испытания системы разворота стойки.....	18
1.3 Автоматизация ресурсных и повторно-статических испытаний стоек передней опоры шасси.....	21
Выводы по главе 1.....	23
2 Техническое задание на разработку программного обеспечения.....	24
3 Разработка алгоритмов управления стендовыми испытаниями.....	26
3.1 Алгоритм работы подпрограммы запуска.....	27
3.2 Алгоритм работы подпрограммы сбора данных систем измерения.....	29
3.3 Алгоритм работы подпрограммы управления режимами испытаний..	30
3.4 Настройка параметров системы нагружения при повторно-статических испытаниях.....	31
3.4.1 Математическая модель системы нагружения.....	32
3.4.2 Методы интеллектуального регулирования параметров системы нагружения.....	38
3.4.2.1 Метод нечеткой логики.....	38
3.4.2.2 Метод нейросетевого управления.....	46
Выводы по главе 3.....	50
4 Реализация алгоритма управления стендом.....	53
4.1 Подпрограммы запуска.....	53
4.1.1 Запуск программы.....	53
4.1.2 Обработка сообщений.....	57
4.2 Подпрограммы сбора данных с системы измерения.....	58
4.2.1 Обработчик ошибок.....	58
4.2.2 Система измерений.....	58
4.3 Подпрограммы режимов испытаний.....	62

4.3.1	Выбора режима испытаний.....	62
4.3.2	Реализация режима «повторно-статические испытания».....	64
4.3.3	Реализация режима «ресурсные испытания».....	67
	Вывод по главе 4.....	68
5	Оценка надежности ПО испытательного комплекса.....	69
5.1	Отладка ПО с использованием модели надежности Миллса.....	71
5.2	Оценка надежности разработанного ПО по экспоненциальной модели...	74
5.3.	Анализ надежности ПО комплекса.....	76
	Выводы по главе 5.....	79
	Заключение.....	81
	Библиографический список.....	84
	Приложение А – Подпрограмма запуска...	89
	Приложение Б – Подпрограмма обработчика ошибок.....	91
	Приложение В – Подпрограмма считывания данных с тензостанции через ПО Recorder.....	92
	Приложение Г – Подпрограмма выбора режима испытаний.....	93

ВВЕДЕНИЕ

Шасси самолёта – один из основных элементов конструкции данного типа летательного аппарата (ЛА). Оно предназначено для поглощения и рассеивания энергии ЛА в момент его приземления, обеспечения его разбега при взлете и пробега при посадке, передвижения по грунту [18]. Помимо этого, шасси отвечает за устойчивость, которая обеспечивается за счет оптимальной компоновки опор относительно центра тяжести ЛА [17]. Однако, у разных моделей самолетов согласно их целевому назначению различны конструктивные схемы шасси.

В настоящий момент предприятие ООО «Уральский инжиниринговый центр» («УриЦ») занимается разработкой и изготовлением комплекса для повторно-статических и ресурсных испытаний опор шасси, гидроцилиндров и систем уборки-выпуска основной и передней опор шасси легкого военнотранспортного самолета (ЛВТС) Ил-112В для АО «Авиаагрегат», г. Самара. Проектированием шасси для этой модели самолета занимался холдинг «Технодинамика».

Комплекс предназначен для испытаний трехопорного шасси, обеспечивающего возможность эксплуатации самолета на грунтовых аэродромах. По бортам фюзеляжа самолета расположены обтекатели, в которые убираются основные опоры шасси. Колеса основных опор (размер 880x315 мм) оборудованы тормозами большой энергоемкости и расположены по одному на оси каждой стойки [45]. На самолете установлено четыре основные стойки. Минимально возможные размеры обтекателей шасси, их расположение исключают влияние вредной интерференции воздушного потока от обтекателей. Уборка основных опор выполняется перемещением стоек по вертикали вверх.

На передней опоре расположены колеса меньшего размера, 668x200 мм. Колеса передней опоры поворачиваются на угол до 50° для обеспечения разворота самолета на посадочной полосе шириной от 16м. При этом передняя опора расположена впереди центра тяжести и практически исключает возможность опрокидывания на нос, что позволяет применять резкое торможение колес, то есть сокращать посадочную дистанцию.

С целью обеспечения высокого качества выпускаемой продукции, соответственно, выполнения каждым из агрегатов самолета своей задачи, в

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

данном случае ЛВТС, на завершающей стадии производства предусмотрены статические, повторно-статические и ресурсные испытания агрегатов. Так, повторно-статические испытания проводятся для определения усталостной долговечности силовых элементов конструкции опоры, поэтапного подтверждения ресурса последних по результатам испытаний. Статические испытания проводятся с целью оценки фактической прочности опоры и узлов ее крепления путем нагружения конструкции до разрушения. При ресурсных испытаниях гидроцилиндры, система уборки-выпуска, разворота опоры нагружаются в нескольких точках силами, изменяющимися по определенной программе с целью получения реакции конструкции и определения наработки до достижения ее критического состояния, т.е. для выявления фактической долговечности силовых элементов и системы уборки-выпуска, разворота опоры.

Вопросам проектирования стендов испытаний стоек шасси различных самолетов посвящены следующие работы [14, 15, 24, 34–36]. Авторами предложены изобретения, направленные на снижение энергетических затрат при испытаниях за счет уменьшения количества силовых элементов: гидроцилиндров с помощью распространения созданных ими усилий, через рычажно-тяговую систему на необходимые точки нагружения. Также предложены системы нагружения стендов с механизмом вынужденных колебаний. Вопросам проектирования программных компонентов, посвящены работы Корченгина В.И., Бандорина Д.А., Корнеева В.М, Егорова А.А. [1, 19, 39]. Однако, в данных работах производится описание стендов повторно-статических и ресурсных испытаний, не учитывающих особенности конструкции шасси, обеспечивающего эксплуатацию с увеличенными нагрузками: во время полетов обусловленными более высокими скоростями, при посадке – наличием оборудованности аэродромов; и программное обеспечение, ограниченное в выполняемых задачах относительно обработки и методов регистрации данных измерений, необходимых для испытаний стоек текущего проекта.

На настоящий момент завершены работы по проектированию, созданию и сборке самого стенда: силовой рамы, гидравлической системы, определен состав системы измерения, однако для полноценной работы стенда во время его эксплуатации необходима программная часть системы управления

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
						8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

элементами испытательного комплекса.

Поэтому **целью выпускной квалификационной работы** является разработка программного обеспечения системы управления комплекса для ресурсных и повторно-статических испытаний стоек трехопорного шасси легкого военно-транспортного самолета Ил-112В, обеспечивающее в автоматическом режиме управление процессом испытаний, измерение параметров испытаний, протоколирование процесса испытания и обработку полученных данных.

Для достижения цели необходимо решить **следующие задачи**:

1. Изучить принцип работы испытательного комплекса опор шасси ЛВТС Ил-112В в разных режимах испытаний.

2. Ознакомиться с техническим заданием на проектирование системы управления испытательного комплекса. Сформулировать ТЗ на разработку программного обеспечения для системы управления.

3. Разработать алгоритмы управления каждым из типов испытаний стоек шасси.

4. Реализовать алгоритм управления стендом.

5. Произвести тестирование разработанного программного обеспечения.

6. Провести анализ надежности программного обеспечения автоматизированной системы управления комплексом для ресурсных и повторно-статических испытаний стоек шасси комплекса с учетом надежности разработанной программы управления комплексом.

Объект исследований. Комплекс для повторно-статических и ресурсных испытаний стоек шасси, гидроцилиндров и систем уборки-выпуска основной и передней опор шасси легкого военно-транспортного самолета (ЛВТС) Ил-112В для АО «Авиаагрегат», г. Самара.

Предмет исследований. Программное обеспечение для автоматизированной системы управления стенда ресурсных и повторно-статических испытаний стоек шасси, обеспечивающее в автоматическом режиме управление процессом испытаний, измерение параметров испытаний, протоколирование процесса испытания, обработку полученных данных.

Методы исследований. Исследования, проводимые в работе, основаны на комплексном использовании системного программного обеспечения;

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

основ автоматизированного проектирования; современных средств проектирования систем управления, теории автоматического управления; надежности, эргономики и качества автоматизированных систем обработки информации и управления.

При тестировании программного обеспечения системы управления стенда ресурсных и повторно-статических испытаний стоек шасси использовался OPC Server ПО Recorder, получающий сигналы с тензостанции.

Оценка надежности автоматизированной системы управления стенда ресурсных и повторно-статических испытаний стоек шасси по критерию «коэффициент готовности» произведена по результатам тестирования и с использованием модели надежности Миллса, экспоненциальной модели надежности и графа состояний программного обеспечения системы управления испытательным стендом.

Новизна результатов работы состоит в следующем:

1. Получена математическая модель системы нагружения испытательного комплекса, базирующаяся на работах Белоусова А.И., Расторгуева Г.И., Федоровой О.Р., Кочергина В.И., Куликова Е.Н., Лапердина И.А. и доработанная с учетом упрощающих допущений применительно к учету податливости объекта испытаний, соответственно о регистрируемом датчиком усилия, уравнению движения золотника гидрораспределителя при сохранении адекватности модели.

2. Имитационное моделирование системы нагружения испытательного комплекса (режим повторно-статических испытаний) позволило автоматизировать процедуру выбора типа и параметров ПИД-регулятора из условия обеспечения требуемой точности воспроизведения нагрузок на агрегаты ЛА.

3. Разработан алгоритм управления с рабочей станции процессом повторно-статических и ресурсных испытаний стоек шасси легкого военно-транспортного самолета (ЛВТС) Ил-112В, позволяющий по результатам измерения параметров испытаний (с протоколированием) и обработки полученных в ходе испытаний данных выявить оценить фактическую прочность опоры и узлов ее крепления путем нагружения конструкции до разрушения, определения усталостной долговечности силовых элементов конструкции опоры, поэтапного подтверждения ресурса по результатам испытаний.

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

Практическая ценность результатов работы.

1. Для обеспечения соответствия программного нагружения реальным нагрузкам на агрегаты ЛА, а также для сокращения времени настройки системы во время натурного эксперимента достаточно провести настройку системы по результатам математического моделирования процесса нагружения.

2. Разработанный и реализованный в среде LabVIEW алгоритм работы системы управления стенда для повторно-статических и ресурсных испытаний стоек шасси ЛВТС Ил-112В обеспечивает:

- измерение и отображение в реальном времени показаний с датчиков перемещений, усилий, температур, напряжений, давления, сигналов на выходе пропорциональных распределителей; формирование выборки в числовой форме и в виде графика;

- синхронную запись выбранных параметров через заданный интервал времени в диапазоне от 0,01 до 120 с;

- хранение данных измерений с тензостанции интерфейсов и аналоговых датчиков в формате, совместимом с базами данных MySQL;

- накопление результатов на протяжении всего периода испытаний в базе данных MySQL;

- возможность увеличения количества каналов измерений согласно количеству имеющихся резервных, путем подключения к ним измерительных устройств, редактирования информации о предельных значениях снимаемых показаний с аналоговых датчиков и параметров системы измерений относительно выделения принадлежности измерительного канала по типам испытаний;

- контроль внесения тарифовочных коэффициентов для датчиков перемещения и положения оси колеса;

- реализация схемы нагружения при повторно-статических испытаниях с точностью 5% по каналу нагружения P_y ;

- время нарастания/спада каждого канала нагружения до 90% от величины изменения нагрузки – не менее 0,3 с;

- время выдержки в 3% коридоре каналов нагружения не менее 0,5 с;

- суммарное время выхода на точку нагружения согласно схеме нагружения – не более 1,5 с.

										Лист
										11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

09.04.01.2017.016.00 ПЗ

3. Надежность разработанного программного обеспечения оценивается коэффициентом готовности (комплексным показателем надежности) на уровне 0,999.

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

1 ПРИНЦИП РАБОТЫ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНД ОПОР ШАССИ САМОЛЕТА ИЛ-112В

Данный стенд предназначен для проведения испытаний самой передней опоры, гидроцилиндров и систем уборки/выпуска и разворота передней опоры шасси.

Стенд состоит из следующих основных элементов (рис. 1.1):

- 1) силовая рама стенда с базовыми поверхностями для крепления изделий, нагружающих устройств и измерительной системы;
- 2) комплект нагружающих устройств – гидроцилиндров, передаточных звеньев, механизмов имитации массовой и аэродинамической нагрузки, сопротивления при развороте;
- 3) измерительная система для определения испытательных усилий и деформаций изделия;
- 4) насосная станция, блок управляющей гидроаппаратуры нагружающих устройств;
- 5) шкаф управления насосной станцией (электросиловой);
- 6) пульт управления насосной станцией;
- 7) пульт управления стендом;
- 8) компьютер с программным обеспечением;
- 9) соединительные электрокабели, гидравлические рукава.



Рисунок 1.1 – Структурная схема испытательного стенда

Стенд работает в трех режимах испытаний:

- 1) повторно-статические испытания;
- 2) ресурсные испытания – поворот опоры шасси;
- 3) ресурсные испытания – уборка – выпуск шасси.

Рассмотрим каждый из видов испытаний стенда более подробно, основное внимание уделяя реализации системы нагружения элементов опоры.

1.1 Режим повторно-статических испытаний опоры

Цель испытания:

- определение усталостной долговечности силовых элементов конструкции опоры;
- определение напряженного состояния в элементах конструкции опоры;
- подтверждение ресурса, назначенного в ТЗ на разработку передних опор шасси для легкого военно-транспортного самолета.

Стенд обеспечивает испытания опоры на повторно-статические нагружения, имитирующие нагрузки, эквивалентные типовому полету. При этом стенд обеспечивает реализацию графика нагружения с точностью 5%.

При повторно-статических испытаниях (рис. 1.2) нагрузки P_y и P_z прикладываются к осям колёс через фальшступицы (ложные колёса) (поз. 2), установленные на осях колёс испытуемого изделия с помощью втулок (поз. 15). Силы P_x прикладываются непосредственно к втулкам (поз. 15).

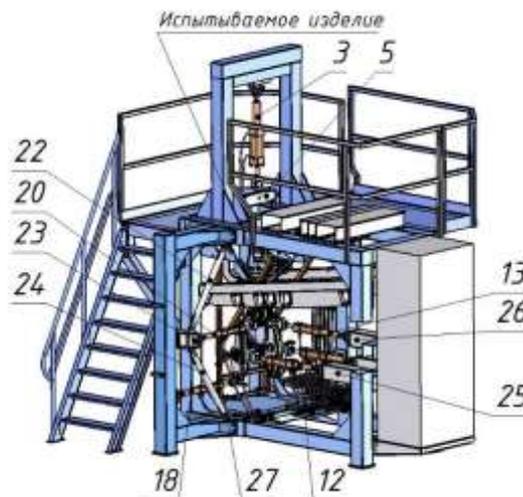


Рисунок 1.2 – Стенд передней опоры с настройкой на повторно-статические испытания

Ни рис. 1.2 введены следующие обозначения: 3 – ГЦ на оси Y, 5 – коромысло, 12 – ГЦ на ось X, 13 – ГЦ на ось $X_{\text{букс}}$, 18 – ГЦ на ось Z, 22, 24-26 – раскосы, 27 – измерительная система.

Нагрузка P_y создаётся гидроцилиндром (поз. 3) и передаётся на фальшступицы через датчик силы «Тензо-М» (поз. 4) (датчиками этого типа снабжены все гидроцилиндры), коромысло (поз. 5) с соотношением плеч 1:1, короткие тяги (поз. 6), кривые тяги (поз. 7), длинные тяги (поз. 8), имеющие возможность регулировки длины путём вращения винта тяги, имеющего концы с правой и левой резьбой. Необходимость применения кривых тяг вызвана тем, что линии действия сил P_y пересекают испытуемое изделие.

Силы P_x создаются цилиндрами (поз. 9) и передаются через проушины (поз. 14), снабжённые ШС большого диаметра (рис. 1.3). Силы P_z передаются на фальшступицы от гидроцилиндров (поз. 10). В соответствии с ТЗ линия действия силы P_z смещена относительно оси колеса в вертикальном и горизонтальном направлении. Для повышения устойчивости положения фальшступицы на оси колеса при воздействии сил P_y и P_z проушина фальшступицы, предназначенная для присоединения тяги, передающей на неё силу P_y , выполнена значительной длины.

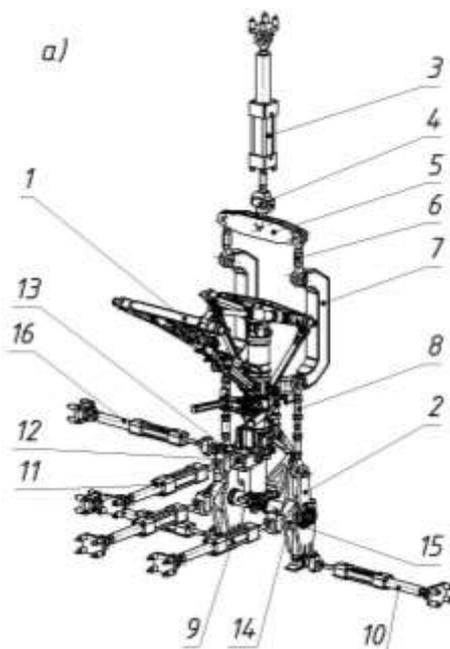


Рисунок 1.3 – Нагружающие элементы стенда передней опоры при повторно-статических испытаниях

На рис. 1.3 введены следующие обозначения: 2 – ложные колеса, 4 – датчик силы, 5 – коромысло, 6 – короткие тяги, 7 – кривые тяги, 8 – длин-

ные тяги, 3,9, 11, 16 – гидроцилиндры, 10 – фальшступица ГЦ 12,13 – проушины, 15 – втулка, 17 – болт-вилка.

В каналах нагружения P_x и P_z в каждом из каналов применены по два гидроцилиндра, поскольку указанные силы принимают в процессе испытаний знакопеременные значения, вследствие чего выполнить деление сил на 2 между фальшступицами с помощью коромысла и тяг не представляется возможным (при воздействии толкающего усилия система потеряет устойчивость). Деление силы на 2 гидроцилиндра в каждом канале осуществляется параллельным включением гидроцилиндров в гидросистему стенда.

Сила P_{x6} передаётся буксировочному кронштейну испытуемого изделия от гидроцилиндра поз. 11 через датчик силы (поз. 4), проушину поз. 12, охватывающую проушину (поз. 13). Охватывающая проушина (поз. 13) имеет радиальный разъем, обеспечивающий возможность её монтажа на внешней поверхности буксировочного кронштейна (диаметром 38,1 мм) по посадке с гарантированным зазором.

Сила P_{z6} прилагается к болту-вилке (поз. 17), вставленному в отверстие буксировочного кронштейна, от гидроцилиндра (поз. 16) через датчик силы.

Все шарнирные соединения частей системы нагружения, кроме проушины (поз. 12) и охватывающей проушины (поз. 13) имеют сферические подшипники скольжения.

1.2 Режим ресурсных испытаний опоры шасси самолета

Испытания передней опоры шасси (ПОШ) изделия Ил-112В проводятся на нагрузки, имитирующие действие аэродинамических сил и перегрузки на опору шасси и передние малые створки.

Цель испытания:

- оценка сохранения заданной функциональной способности опоры, систем уборки-выпуска и разворота передней опоры в пределах установленного на изделие ресурса и срока службы;
- получение экспериментальных материалов, подтверждающих устанавливаемый ресурс;
- выявление физической долговечности силовых элементов;
- проверка эффективности конструктивных и технологических мероприятий по повышению надежности и ресурса объекта испытаний.

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

1.2.1 Ресурсные испытания системы уборки/ выпуска опоры

Испытания опоры, гидроагрегатов и механизмов систем уборки-выпуска и разворота колес передней опоры от давления, подаваемого в рулежные гидроцилиндры изделия, на нагрузки, имитирующие основные режимы работы агрегатов в эксплуатации; функциональные испытания опоры, гидроагрегатов, систем уборки-выпуска с подачей давления в гидроцилиндр «уборки-выпуска» и разворота передней опоры обеспечивает сборка стенда, указанная на рис. 1.4.

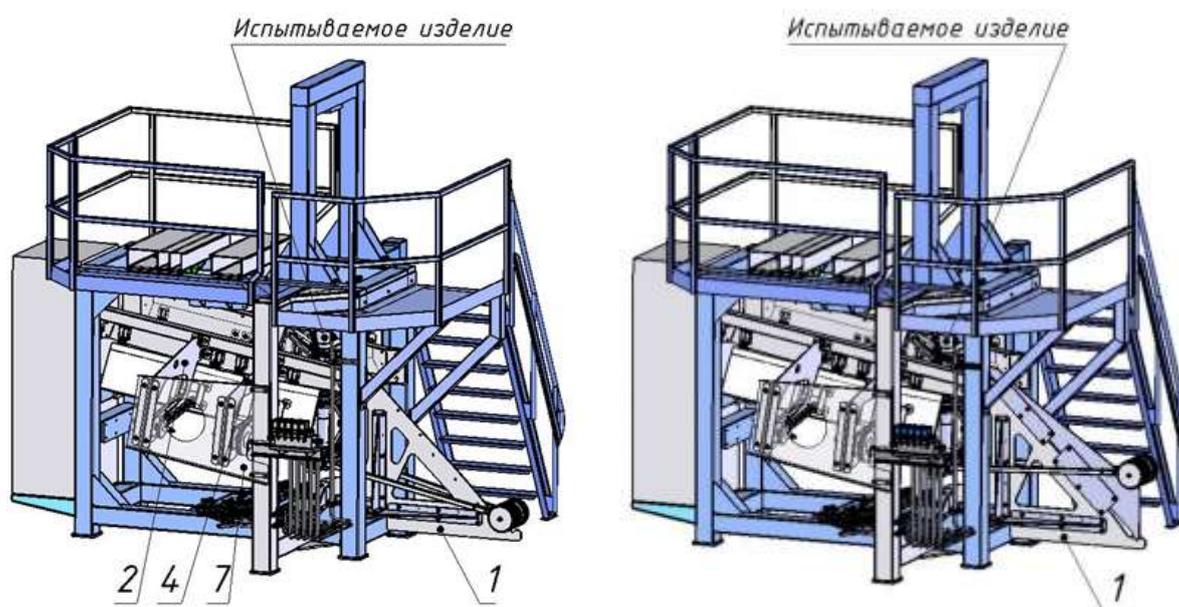


Рисунок 1.4 – Стенд передней опоры: а) настройка на ресурсные испытания уборка-выпуск с имитацией аэродинамических нагрузок и перегрузки
б) настройка на ресурсные испытания уборка-выпуск с имитацией аэродинамических нагрузок

На рис. 1.4 обозначены: 1 – система имитации нагрузки на стойку, 2,4 – система имитации нагрузки на створки.

Для оценки фактической загруженности силовых элементов опоры, схожимости результатов расчетов с экспериментами, получения прямых эквивалентов на опору и цилиндр уборки-выпуска установлены тензорезисторы. Измерения с помощью тензорезисторов производятся в единицах относительной деформации. Для контроля температуры на опору установлены датчики.

Испытания проводятся этапами. Общая наработка по всем режимам составляет 120 000 циклов, т.е. по 60 000 циклов на случай «уборка-выпуск» и

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

на разворот колес.

Функциональные испытания опоры на стенде (см. рис. 1.4) на случай «уборка-выпуск» производятся по расчетным случаям:

1) с имитацией аэродинамического момента, действующего при уборке-выпуске опоры. Моменты, действуют по оси передних малых створок и возникают под действием аэродинамических сил на передних малых створках. Аэродинамические силы, действующие на передние малые створки, влияют на опору, создавая свой момент относительно оси уборки-выпуска;

2) с имитацией аэродинамического момента и перегрузки.

1.2.2 Ресурсные испытания системы разворота стойки

Испытания передней опоры совместно с механической частью системы разворота колёс проводятся для случая, имитирующего разворот изделия на ВПП (имитация случая управлением изделия при рулении).

При ресурсных испытаниях на поворот стойки на стенде (рис. 1.5) устанавливается механизм нагружения (поз. 2 на рис. 1.6), преобразующий вращательное движение стойки в поступательное движение штока гидроцилиндра, управление которым обеспечивает заданный момент сопротивления повороту стойки.

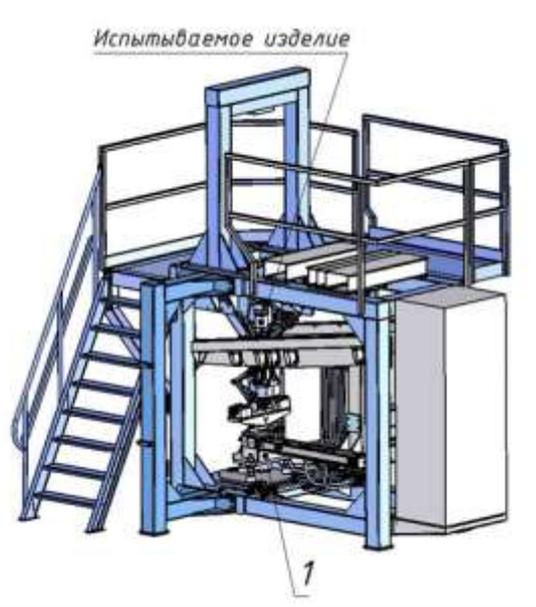


Рисунок 1.5 – Стенд передней опоры, настроенный на ресурсные испытания системы разворота стойки

Механизм нагружения при повороте стойки (рис. 1.6) содержит вертикальный вал (поз. 3), установленный на опорных подшипниках в корпусе ме-

ханизма (поз. 4). К валу шарнирно прикреплен поводок (поз. 5) с двумя призмами для передачи на него вращающего момента от поворота стойки. На валу установлен зубчатый сектор (поз. 6), имеющий возможность вращаться на нём (на двух подшипниках). Вращение от вала к зубчатому сектору передаётся через датчик силы «Тензо-М» (поз. 7), который используется для измерения вращающего момента от стойки (для присоединения датчика и вал, и сектор имеют выступы-рычаги). Зубчатый сектор входит в зацепление с зубчатой рейкой (поз. 8), к которой прикреплен профильный рельс HIWIN, линейно перемещающийся в двух каретках (линейных шарикоподшипниках), прикрепленных к корпусу механизма (с возможностью регулировки радиального зазора в зацеплении сектор-рейка). Зубчатая рейка передаёт поступательное движение штоку гидроцилиндра (поз. 9). В шарнирных соединениях штока и корпуса гидроцилиндра установлены сферические подшипники скольжения (ШС). Описанная выше схема установки датчика силы (момента) позволяет исключить из его показаний трение в паре сектор-рейка и линейных направляющих рейки.

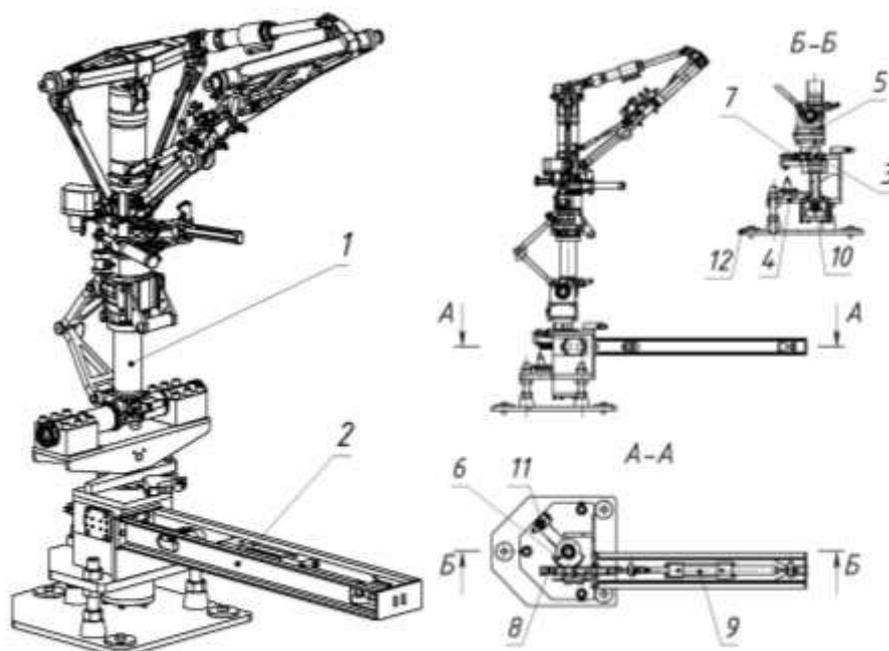


Рисунок 1.6 – Механизм нагружения при развороте

На рис. 1.6 введены обозначения: 2 – механизм нагружения, 3 – вал, 4 – опорные подшипники, 5 – поводок, 6 – зубчатый сектор, 7 – датчик силы, 8 – зубчатая рейка, 9 – шток ГЦ, 10 – тензодатчик, 11 – датчик угла поворота, 12 – основание.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

09.04.01.2017.016.00 ПЗ

Лист

19

Осевая сила от зарядки газом амортизатора стойки передаётся от поводка (поз. 5) через вал (поз. 3) и упорный подшипник к тензодатчику (поз. 10), предназначенному для её измерения.

Измерение угла поворота стойки осуществляется датчиком (поз. 11), соединённым с валом (поз. 3) зубчато-ремённой передачей.

Механизм нагружения при повороте стойки содержит также регулируемые упоры, ограничивающие поворот стойки на заданный угол. Для регулировки вертикального положения корпуса механизма с целью установки заданного значения хода амортизатора стойки он установлен на основании (поз. 12) с тремя резьбовыми шпильками (домкратный узел), способными воспринять вращающий момент стойки. Соосность вертикального вала механизма нагружения со штоком испытываемой стойки выставляется при снятом поводке (с призмами) с помощью индикатора, прикреплённого к штоку стойки, для этого вертикальный вал имеет на верхнем конце соосную реперную поверхность.

Выделим основные параметры режимов испытаний стенда (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Параметры режимов испытаний стенда

	Повторно-статические	Ресурсные «Уборка-Выпуск»	Ресурсные «Разворот»
Объект испытаний	Силовые элементы передней опоры	Передняя опора, малые, большие створки	Система разворота передней опоры
Реализуемые нагрузки	$P_x, P_y, P_z, P_{xб}, P_{zб}$	$M_{пер}, M_{аэр}$	M_y, P_y, P_0
Система нагружения	Гидроцилиндры	Кулачковый имитатор момента аэродинамической силы и перегрузки на ось уборки/выпуска	Механизм нагружения при развороте
Отслеживаемые параметры	Напряжения в конструкции опоры, перемещение центра колеса	Угол уборки, температура в узлах установки опоры и цилиндрах уборки-выпуска	Угловое положение системы нагружения, напряжения и усилия в элементах опоры, системе разворота и гидроцилиндрах опоры

1.3 Автоматизация ресурсных и повторно-статических испытаний стоек основной опоры шасси

Согласно составу разработанного предприятием стенда (см. гл. 1 ранее) и общим принципам построения АСУ, можно изложить следующую структуру СУ стендом испытаний передней опоры, гидроцилиндров и систем уборки-выпуска передней опоры (рис. 1.7).

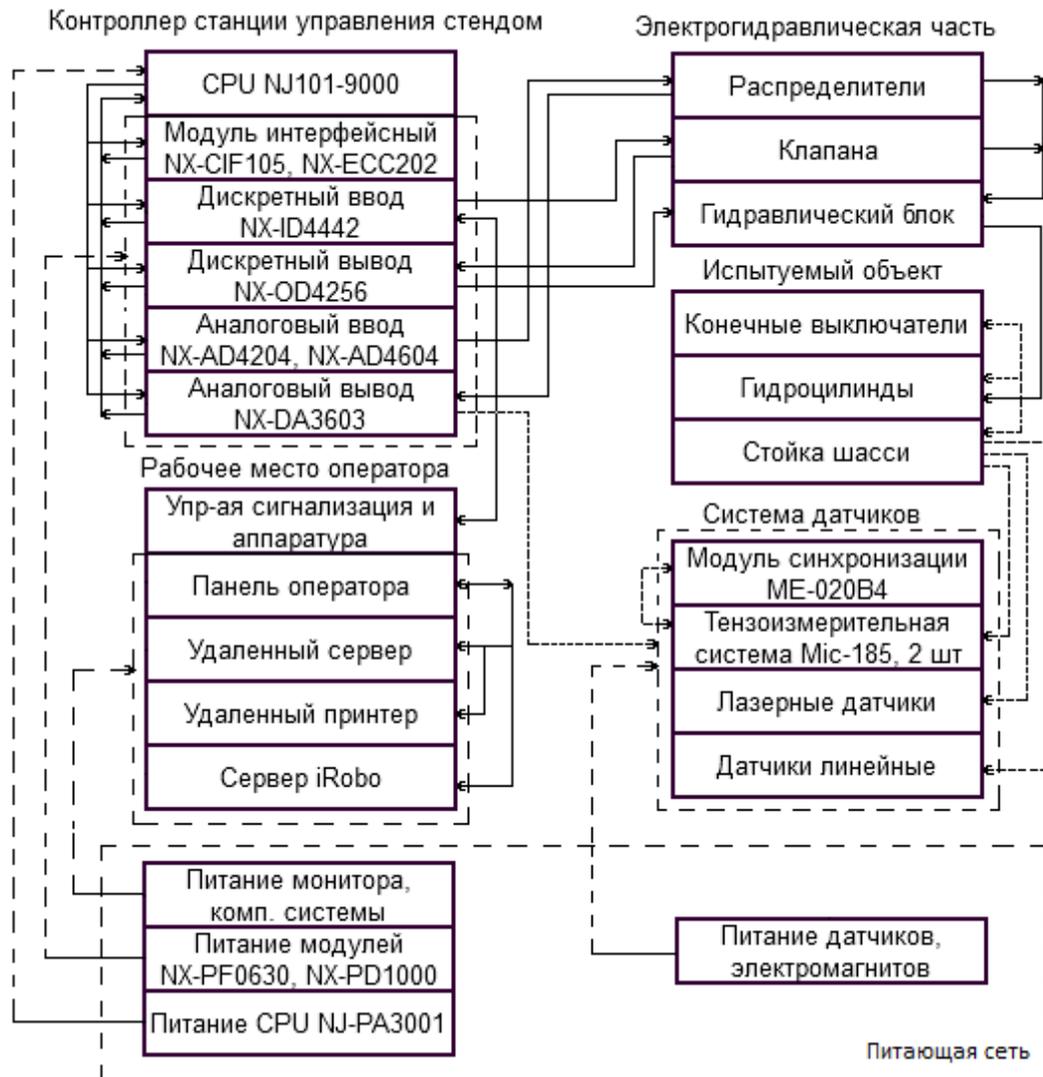


Рисунок 1.7 – Расширенная схема СУ стенда

Оборудование стенда состоит из нескольких основных частей:

- механической части – это непосредственно испытуемый образец с размещенными на нем датчиками и подсоединенными к месту крепления колеса штоками с гидроцилиндрами;
- гидравлической части, которая обеспечивает приложение нагрузки, эквивалентной аэродинамическим нагрузкам, согласно программе-методике;
- электрической – обеспечивает функционирование технической части,

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

09.04.01.2017.016.00 ПЗ

Лист

21

приводов уборки-выпуска, системы разворота шасси;

– контрольно-регистрирующей аппаратуры, обеспечивающей визуализацию и хранение показаний датчиков, системы тензометрии и термопар.

В качестве полевого устройства управления используется программируемый логический контроллер фирмы Omron серии NJ с подключенными к нему аналоговыми и дискретными модулями ввода/вывода. Он работает под управлением операционной системы с возможностью запуска управляющей программы в режиме реального времени, что гарантирует отсутствие прерываний во время выполнения программы.

Для более полного понимания процессов потока информации обратимся к рис. 1.8.

Система измерений стенда состоит из:

- подсистемы измерения напряжений и деформаций;
- подсистемы измерения усилий, прикладываемых к объекту испытаний.



Рисунок 1.8 – Информационный контур СУ стенда

Сигналы задания на оси нагружения формируются в контроллере, посредством корректирования и задания значений, типов нагружений на верхнем уровне автоматизированной системы управления стендом испытаний. Для обеспечения выполнения точных заданий усилий на объект испытаний применяются гидравлические силовозбудители. Напряжения тензодатчиков по групповым кабелям поступают на входы измерительных модулей многоканального тензокомплекса МІС-185. Данные комплексы установлены в приборных стойках, там же размещены модули синхронизации ME-020B4, обес-

печивающие синхронную работу измерительных модулей и комплексов. Данные с измерительного комплекса посредством их передачи по OPC Server поступают в программу верхнего уровня управления работой стенда. Данная программа позволяет визуализировать данные, осуществлять контроль процесса записи измерений и настроек в базу данных (логирование).

Выводы по главе 1

1. В ходе ознакомления с принципами работы стенда при испытаниях стоек основной опоры шасси ЛВТС Ил-112В определены:

а. управляющие сигналы системы нагружения для каждого режима испытаний, а именно для ресурсных испытаний – это давление в полостях нагружающих гидроцилиндров, для повторно-статических испытаний управляющий сигнал формируется посредством задания пропорциональными гидрораспределителями давления в полостях нагружающих гидроцилиндров.

б. основными параметрами, определяемыми в ходе испытаний компонентов передней стойки являются: углы уборки-выпуска, давления в полостях нагружающих гидроцилиндров, напряжения конструкций опоры, температура в узлах установки датчиков контроля температуры, величины воспроизводимых системой нагружений.

2. Структура информационного контура СУ стенда определила структуру программного комплекса СУ стендом, что позволит далее сформулировать техническое задание на разработку и реализацию алгоритма автоматизированного управления процессом испытаний стоек шасси легкого военно-транспортного самолета (ЛВТС) Ил-112В на выносливость изолированной передней опоры, ресурсных испытаний опор, гидроцилиндров и системы уборки-выпуска.

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
						23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2 ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ НА РАЗРАБОТКУ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Требования, предъявляемые к системе управления испытательного стенда согласно техническому заданию на разработку конструкторской документации, изготовление, пуско-наладку, аттестацию стенда для повторно-статических и ресурсных испытаний передней опоры, гидроцилиндров и систем уборки-выпуска передней опоры шасси Ил-112В:

- измерение и отображение в реальном времени значений с датчиков перемещений, усилий, температур, напряжений, давления, сигналов на выходе пропорциональных распределителей; выборка в числовой форме и в виде графика;

- синхронную запись выбранных параметров через заданный интервал времени в диапазоне от 0,01 до 120 с;

- хранение данных измерений с тензостанции интерфейсов и аналоговых датчиков в формате, совместимом с базами данных MySQL;

- накопление результатов на протяжении всего периода испытаний в базе данных MySQL;

- возможность увеличения количества каналов измерений согласно количеству имеющихся резервных, путем подключения к ним измерительных устройств, редактирования информации о предельных значениях снимаемых показаний с аналоговых датчиков и параметров системы измерений относительно выделения принадлежности измерительного канала по типам испытаний;

- контроль внесения тарифовочных коэффициентов для датчиков перемещения, положения оси колеса.

Требования к реализации алгоритма системы нагружения:

- реализация схемы нагружения при повторно-статических испытаниях с точностью 5% по каналу нагружения P_y ;

- время нарастания/спада каждого канала нагружения до 90% от величины изменения нагрузки – не менее 0,3 с;

- время выдержки в 3% коридоре каналов нагружения не менее 0,5 с.

- суммарное время выхода на точку нагружения согласно схеме нагружения не более 1,5 с.

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

Требование к надежности ПО испытательного комплекса:
K_г – не менее 0,99.

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

3 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ СТЕНДОВЫМИ ИСПЫТАНИЯМИ

Основными задачами системы управления стендовыми испытаниями верхнего уровня согласно ТЗ являются:

- визуализация хода испытаний в цифровом и графическом виде;
- корректировка задающего сигнала с целью более точной отработки программы нагружения испытания;
- останов работы стенда при невозможности выйти на режим испытаний;
- остановка работы стенда при возникновении аварийных ситуаций;
- тарировка, калибровка и поверка каналов измерений;
- логирование испытаний в формате базы данных MySQL.

С целью более удобной реализации выше указанных задач в программе имеет смысл обращение к многоуровневой структуре построения приложения (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Архитектуры программы

Ядро программы отвечает за распределение потоков информации во время работы стенда: потоки сообщений, формирования и объединения сообщений во время работы программы, взаимодействия программных модулей между собой.

1-й уровень отвечает за подключение к базе данных MySQL, посредством OPC Server взаимодействие с контроллером, ПО Recorder, которое регистрирует и обрабатывает данные с тензоизмерительной системы МІС-185. Так же данный уровень включает в себя обработчик ошибок, собирающий ошибки всех асинхронно запущенных модулей. Должна быть предусмотрена возможность устранения ошибок в автоматическом режиме.

2-й уровень является модулем управления испытанием. Обеспечивает обратную связь через программу среднего уровня с измерительной системой, системой нагружения. Осуществляет сборку и обработку данных измерений. На экраны в графическом и цифровом виде выводит показания датчиков.

3-й уровень отвечает за формирование и отображение отчетов по запросу пользователя.

Возможны следующие виды межмодульных взаимодействий программы:

– централизованный: сигналы идут через ядро. Реализация осуществляется формированием событий (Event);

– передача данных: сигналы идут от источника получения данных до модуля управления сигналом и генератора отчетов. Реализация осуществляется через уведомления (Notifiers);

– инициализация и ссылки: индикаторы и контролы, необходимые в разных модулях, представлены через ссылки, косвенную адресацию. Для получения набора ссылок при запуске модуль получает соответствующее уведомление, содержащее массив ссылок, необходимых для взаимодействия с другими модулями. При изменении значения по ссылке, изменяется значение переменной в модуле, которому она принадлежит.

При завершении работы стенда, обеспечивается остановка работы всех модулей программы по единому событию.

Далее следует составить и описать алгоритмы работы каждого из модулей-уровней программы подробно с целью их последующей реализации.

3.1 Алгоритм работы подпрограммы запуска

Уровень отвечает за асинхронный запуск подпрограмм отдельных модулей (рис. 3.2). Инициализацию обработчика ошибок и сообщений, завершение работы приложения.

Перед запуском подпрограмм разных уровней необходимо создать и запустить диспетчер сообщений и обработчик ошибок. Данные с обработчиков переводим в режим динамический формат для передачи данных между подпрограммами приложения. После запуска обработчика ошибки имеет место определение порядка и списка подпрограмм, которые необходимо запустить в асинхронном режиме с целью постоянного обмена данными между ними, генерации и обработки воспроизводимых событий. Затем проводится накопление ошибок, при их наличии, сбор ссылок на запущенные подпрограммы.

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

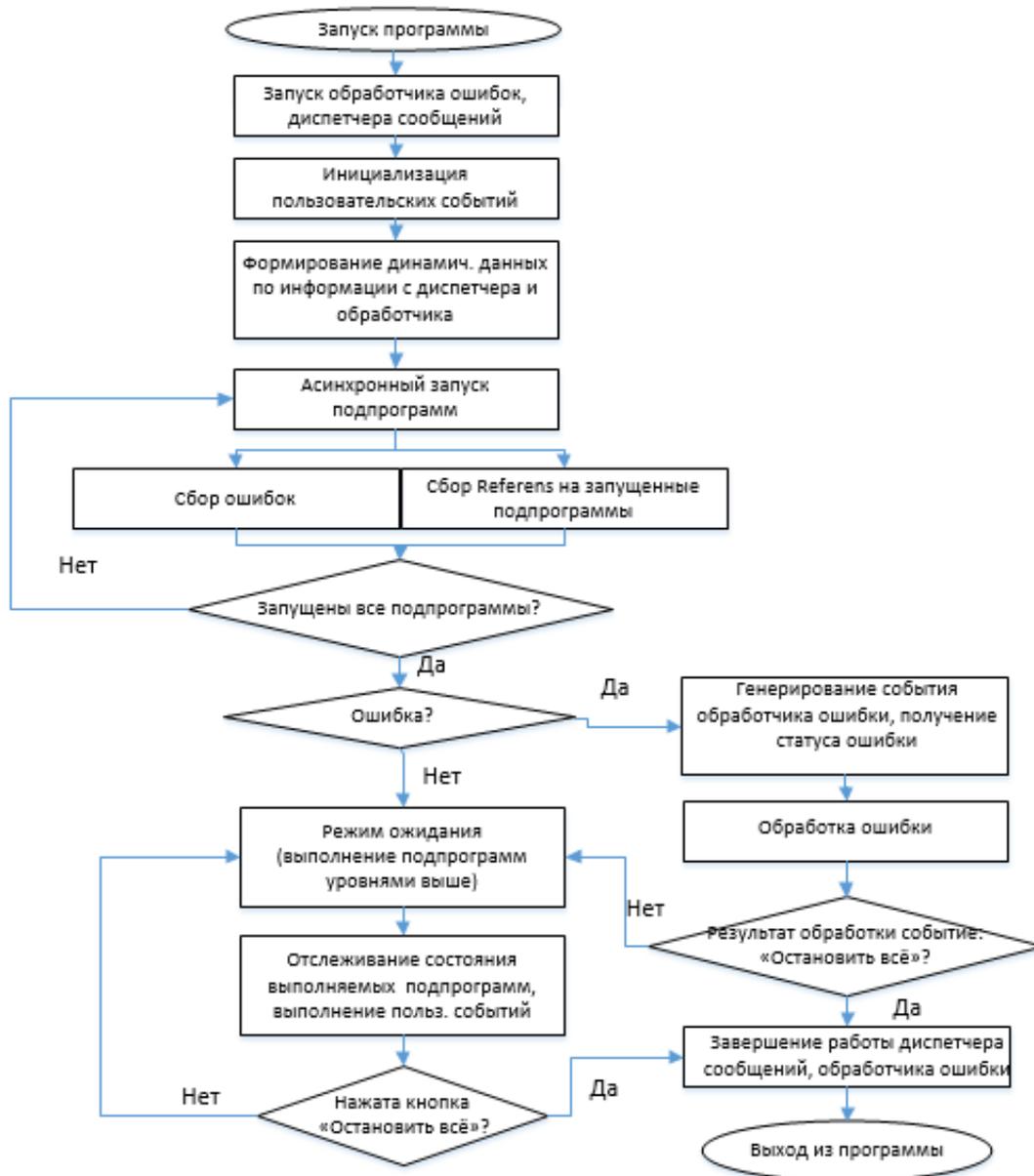


Рисунок 3.2 – Блок-схема подпрограммы 0-го уровня

Если запущены все желаемые компоненты, предназначенные для постоянного выполнения при работе стенда, программа переходит в режим ожидания событий. В данном режиме проводится обработка входящих событий с диспетчера сообщений.

В случае наличия сообщений о ошибках запускается обработчик ошибок, если результатом обработки является необходимость в останове программы, выполняется регистрация события «Остановить всё», последовательное завершение пользовательских событий, останов диспетчера сообщений, обнуление референсов запущенных подпрограмм, посредством закрытия последних, с последующим выходом из программы. Также в рамках программы предусмотрен выход из нее по нажатию кнопки «Выход».

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

3.2 Алгоритм работы подпрограммы обработки данных системы измерения

Данный логический уровень отвечает за запуск сторонних приложений, обеспечивающих обработку и передачу данных сигнала одновременно с LabVIEW, за передачу информации с системы измерения. Блок-схема алгоритма работы логического уровня вынесена на рис.3.3.

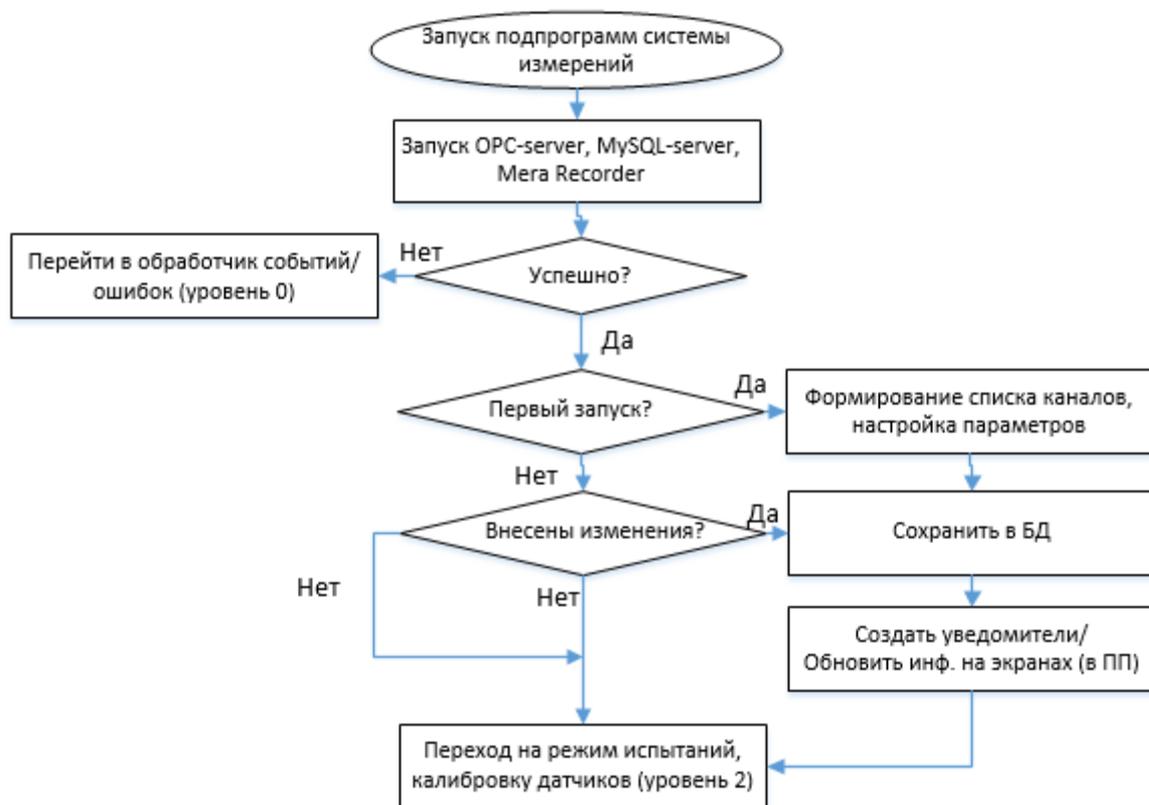


Рисунок 3.3 – Блок-схема подпрограммы 1-го уровня

В рамках данного уровня предусмотрен вынос информации о состоянии измерительных каналов системы управления стендом, насосной станции системы нагружения. При первом запуске программы необходимо внести информацию о каналах измерительной системы, записать в базу данных для считывания при последующих запусках и правки.

Каждой группе датчиков предусмотрена отдельная подпрограмма обработки или диагностики данных измерений: подпрограммы диагностики каналов тензо-термостанции, дискретных каналов, динамометров, лазерных датчиков Serial-интерфейса, аналоговых датчиков.

С началом запуска насосной станции предусмотрено начало записи данных системы измерений.

Перед запуском каждого из режима испытаний предусмотрена возможность калибровки лазерных датчиков положения, с сохранением внесенных параметров на протяжении серии испытаний.

3.3 Алгоритм работы подпрограммы управления испытаниями

Данный уровень программы отвечает за настройку и контроль параметров испытаний с последующей их регистрацией с базу данных. Блок-схема отражена на рис.3.4.

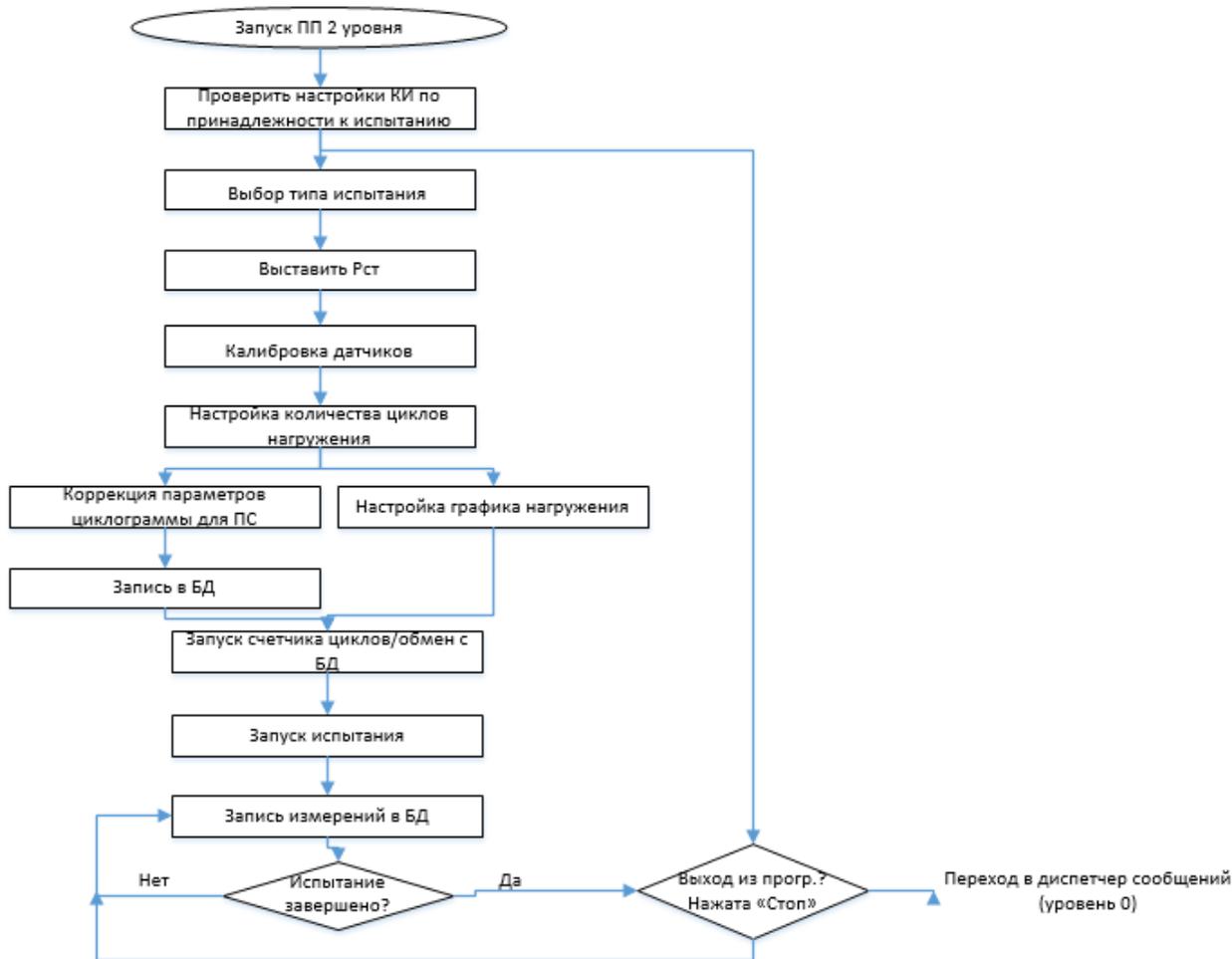


Рисунок 3.4 – Блок-схема подпрограммы 2-го уровня

При переходе программы на данный уровень перед выбором типа испытаний необходимо проверить настройки принадлежности каналов измерений к каждому типу испытаний, что выполняется на логическом уровне обработки данных системы измерения, затем выполняется калибровка.

Перед началом испытаний также необходимо настроить количество требуемых циклов нагружения, при необходимости отредактировать параметры нагружения. Для режима повторно-статических испытаний предусмотрена отдельная подпрограмма настройки циклограммы.

В режиме «Повторно-статических испытаний» реализация типового нагружения обеспечивается с точностью $\pm 5\%$ посредством подстройки параметров ПИД-регулятором. Обеспечивается регистрация следующих данных: нагрузки $P_y, P_{x0}, P_z, P_{x6}, P_{z6}$, перемещение центра колеса, измерения тензосистемы.

В режиме ресурсных испытаний на случаи «Разворот на взлетно-посадочной полосе (ВПП)» и «Уборка-выпуск» регистрируются: температура рабочей жидкости (в баке и на входе в полости уборки и выпуска, полости рулежных цилиндров испытуемого агрегата); давление в линии нагнетания; давление в линии слива; напряжения в конструкции опоры; усилия, возникающие в цилиндре уборки-выпуска опоры и цилиндрах больших створок; давление на входе в полости рулежных гидроцилиндров, цилиндра уборки-выпуска опоры и цилиндров больших створок; углы перемещения опоры при уборке-выпуске; углы разворота опоры на режиме «Разворот»; величины момента сопротивления на силовую плиту M_y ; время уборки, выпуска, разворота; температура в узлах установки опоры и цилиндров уборки-выпуска.

На протяжении всех испытаний ведется подсчет и запись удачно завершенных циклов нагружений разных типов.

По окончании испытаний осуществляется выход из программы с сохранением всех параметров в базу данных MySQL.

3.4 Настройка параметров системы нагружения повторно-статических испытаний

Перед стендовыми испытаниями ставятся задачи получения качественной картины происходящих в испытываемой системе процессов, протекающих в агрегатах изделия при нагружении, максимально схожем с типовым полетом ЛА, установления количественных зависимостей между основными параметрами указанных процессов, проверки работоспособности элементов системы.

Решение данного типа задач усложняется тем, что исследуемые процессы характеризуются большим числом параметров со сложными функциональными зависимостями и широким диапазоном изменения параметров. Поэтому каждое стендовое испытание должно наиболее полно решать задачи, поставленные в программе испытания.

Поскольку статические испытания проводятся с целью оценки фактической прочности опоры и узлов ее крепления путем нагружения конструкции

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

до разрушения, определения усталостной долговечности силовых элементов конструкции опоры, поэтапного подтверждения ресурса по результатам испытаний [47], то одной из важных задач при проектировании испытательных стендов на статические нагрузки является задача обеспечения наибольшей схожести программного нагружения типовому полету ЛА, агрегаты которого подвергаются испытаниям [24, 31].

Осуществление данного требования при проектировании стенда в настоящий момент осуществляется перед запуском испытаний на каждый модуль циклограммы нагружения с калибровочной донастройкой параметров ПИД-регулятора перед запуском повторно-статических испытаний, однако данное требование может быть удовлетворено посредством настройки системы нагружения согласно результатам математического моделирования процесса нагружения, поскольку такой метод позволит сократить время настройки системы стенда во время натурного эксперимента [26, 29, 48].

3.4.1 Математическая модель системы нагружения

В состав оборудования стенда входят гидравлическая система нагружения (ГСН), объект испытания и устройство управления (рис. 3.5).

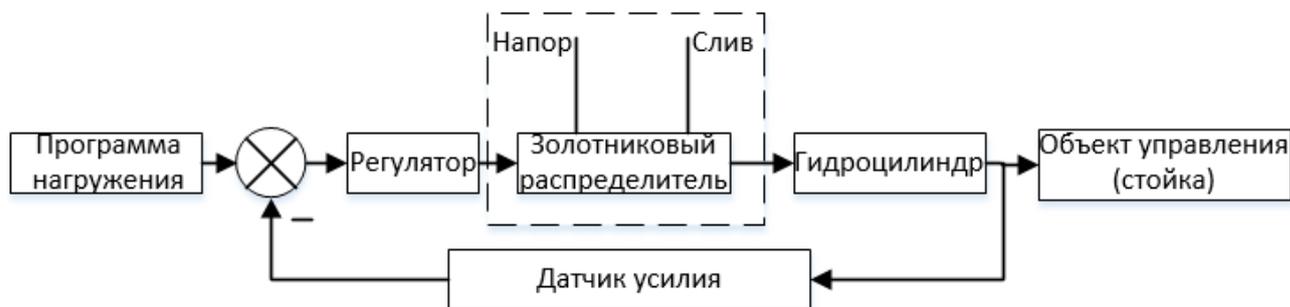


Рисунок 3.5 – Функциональная схема системы нагружения

Рассмотрим принцип нагружения на ось Y стойки шасси. При повторно-статических испытаниях нагрузки прикладываются к осям колес. В начальный момент времени на управляющее устройство, в данном случае регулятор, поступает программная нагрузка P_y , где происходит сравнение программных и фактических значений сил с выдачей управляющего сигнала u . Управляющий сигнал поступает на гидрораспределитель, с которого посредством управления сервоклапаном гидравлический цилиндр поступает расход жидкости, на выходе имеем перемещение штока гидроцилиндра. Перемещение штока гидроцилиндра вызывает усилие, действующее на объект

нагружения (стойку). Датчик силы измеряет фактическое значение реализованного усилия, которое подается на управляющее устройство [].

Используя метод моделирования процессов системы, обратимся к расчетным схемам механизмов и их математическому описанию. При составлении расчетной схемы исполнительного органа, в данном случае, гидроцилиндра (рис. 3.6), укажем действующие нагрузки, введем обозначения давления в полостях, расходы линий напора и слива [2, 10].

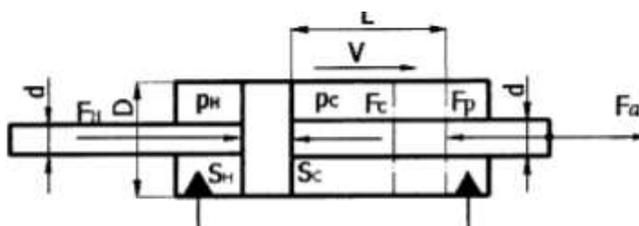


Рисунок 3.6 – Расчетная схема параметров гидроцилиндра с двухсторонним штоком

Расчетная нагрузка, действующая на гидроцилиндр, определяется как приведенная сила F_p к штоку гидроцилиндра. Требуемое тяговое усилие, рассчитывается как тяговая сила на штоке гидроцилиндра F_a , равна сумме приведенных нагрузок, действующих на шток, в данном случае: этими нагрузками являются силы давления и противодействия в напорной и сливной полостях, силы трения в ГЦ, инерционные нагрузки движущихся масс элементов и рабочей жидкости.

На поршень и шток гидроцилиндра действуют силы давления F_n и противодействия F_c в полостях напора и слива, расчетная нагрузка на штоке F_p , сила вязкого трения рабочей жидкости F_{mp} .

Основной формулой для расчета параметров гидроцилиндра является формула (3.1), описывающая силу давления рабочей жидкости (РЖ) на поршень в полости цилиндра:

$$P = p \cdot S + F_{mp}, \quad (3.1)$$

где P – сила давления РЖ, [Н];

p – давление, [МПа];

S – рабочая площадь поршня, [мм²].

Максимально возможная нагрузка на штоке гидроцилиндра с учетом противодействия и механических потерь (3.2):

$$F_p = (p_a S_a - p_b S_b) \cdot \eta_M, \quad (3.2)$$

где F_p – расчетная нагрузка на штоке цилиндра, [Н];

p_a, p_b – давление рабочей жидкости в напорной и сливной полостях, [МПа];

S_a, S_b – рабочая площади поршня в рабочей и сливной полостях, [мм²].

η_M – механический КПД гидроцилиндра.

Примем рабочие площади полостей напора и слива равными, т.е. $S_a = S_b = S$, тогда (3.2) примет вид (3.3):

$$F_p = (p_a - p_b)S \cdot \eta_M = \Delta p \cdot \eta_M \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}, \quad (3.3)$$

где Δp – полезный перепад давления в гидроцилиндре, [МПа];

D – диаметр поршня ГЦ, [мм];

d – диаметр штока ГЦ, [мм];

S – рабочая площадь, [мм²].

Определим давление в каждой из полостей гидроцилиндра (3.4):

$$\dot{p}_a = \frac{E}{V_a}(Q_a - A_a \dot{x}); \quad \dot{p}_b = \frac{E}{V_b}(Q_b - A_b \dot{x}), \quad (3.4)$$

где \dot{p}_a, \dot{p}_b – скорость изменения давления в полостях ГЦ;

E – приведенный объёмный модуль упругости рабочей жидкости;

Q_a, Q_b – расход, поступающий в рабочую камеру;

A_a, A_b – площадь поршня в полостях ГЦ.

Следует учитывать, что положительная скорость перемещения поршня вызывает увеличение давления жидкости в полости В, уменьшение давления в полости А.

Показания системы регистрирования величины усилия через перемещение штока гидроцилиндра определяются согласно (3.5) [3, 4]. Поскольку объект испытаний представляет собой упругую конструкцию, то в математической модели ее свойства можно отразить матрицей податливости, вычисленной для текущей схемы приложения сил.

$$P = C_{din}(x - y), \quad (3.5)$$

где C_{din} – жесткость динамометра;

x – перемещение штока гидроцилиндра, мм;

y – податливость объекта испытаний, опоры шасси.

Однако в виду сложности вычисления коэффициента податливости испытуемого объекта, стойки шасси и отсутствия информации о параметрах датчика имеет место представление формулы (3.5) в виде, где C – коэффициент восприятия датчиком принимаемого усилия с учетом сопротивления объекта нагружения (3.6):

$$P = (p_a - p_b)S \cdot C. \quad (3.6)$$

Представим расчетную схему гидрораспределителя (рис. 3.7) [9, 33, 42].

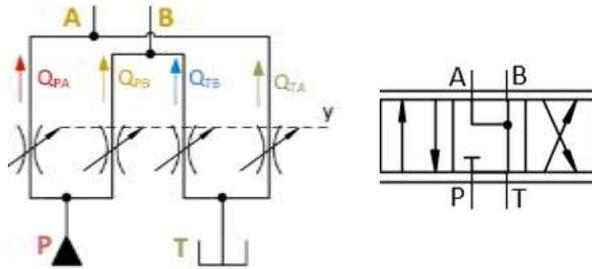


Рисунок 3.7 – Расчетная схема параметров гидрораспределителя 3/4

Согласно рис. 3.8 дросселирующая щель представлена в виде дросселя с изменяемой площадью проходного сечения. Знак расхода определяется согласно знаку перепада давления.

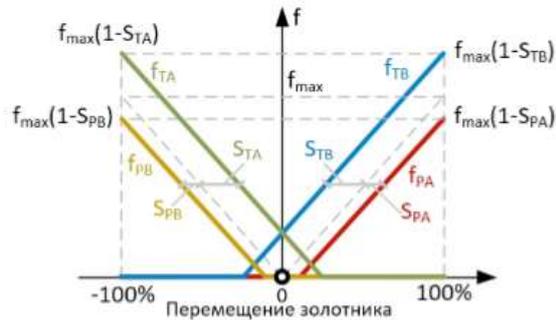


Рисунок 3.8 – Расчетная схема параметров гидрораспределителя 3/4

Таким образом расход через дросселирующие щели описывается следующими уравнениями с учетом перемещений золотника гидрораспределителя в функции соответствующих функциях его описания: $f_{PA}(y)$, $f_{PB}(y)$, $f_{TB}(y)$, $f_{TA}(y)$:

$$Q_{PA} = \mu_S f_{PA}(y) \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_n - p_A| \cdot \text{sign}(p_n - p_A)};$$

$$Q_{PB} = \mu_S f_{PB}(y) \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_n - p_B| \cdot \text{sign}(p_n - p_B)};$$

$$Q_{TA} = \mu_S f_{TA}(y) \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_T - p_A| \cdot \text{sign}(p_T - p_A)};$$

$$Q_{TB} = \mu_S f_{TB}(y) \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_T - p_B|} \cdot \text{sign}(p_T - p_B).$$

Т.е. для нахождения расхода через соответствующие полости принимаем:

$$Q_A = Q_{PA} + Q_{TA}; \quad Q_T = Q_{TA} + Q_{TB}; \quad Q_B = Q_{PB} + Q_{TB}; \quad Q_P = Q_{PA} + Q_{PB}.$$

Таким образом в качестве модели агрегата управления гидравлического распределителя (ГР) можем принимать выше указанную нелинейную форму записи. Белоусовым [3, 16] предложена формула (3.7) определения смещения золотника ГР, связывающая объем нагнетания и слива масла из гидроцилиндра при подаче управляющего сигнала на электромеханический преобразователь

$$T\dot{s} + s = fU, \quad (3.7)$$

где T – время запаздывания золотника;

f – коэффициент чувствительности золотника ГР к управляющему сигналу;

\dot{s}, s – скорость смещения, смещение золотника гидрораспределителя.

Таким образом, согласно представленным выше описаниям процессов системы с некоторыми допущениями получаем следующую математическую модель системы нагружения (3.8):

$$\begin{cases} P = (p_a - p_b)SC = C_{din}(x - y); \\ \dot{p}_a = \frac{E}{V_a}(Q_a - A_a \dot{x}); \\ \dot{p}_b = \frac{E}{V_b}(Q_b - A_b \dot{x}); \\ Q_{PA} = \mu_S f_{PA}(y) \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_n - p_A|} \cdot \text{sign}(p_n - p_A); \\ Q_{TB} = \mu_S f_{TB}(y) \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_T - p_B|} \cdot \text{sign}(p_n - p_B); \\ Q_{PB} = \mu_S f_{BA}(y) \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_n - p_B|} \cdot \text{sign}(p_n - p_B); \\ Q_{TA} = \mu_S f_{TA}(y) \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_T - p_A|} \cdot \text{sign}(p_T - p_A); \\ T\dot{s} + s = fU. \end{cases} \quad (3.8)$$

Рассмотрим основные требования к воспроизведению нагрузок системы, согласно техническому заданию (рис. 3.9):

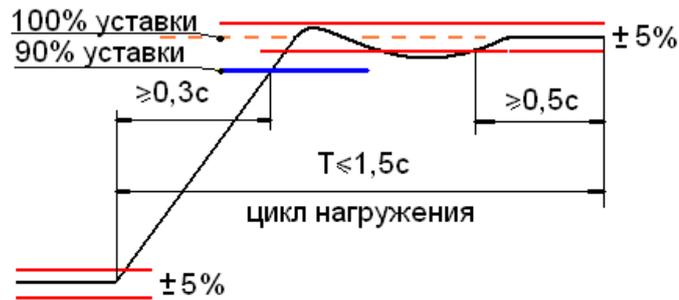


Рисунок 3.9 – Требования к быстродействию и точности воспроизведения нагрузок

Согласно рис. 3.9 время нарастания, спада каждого канала нагружения до 90% от величины изменения нагрузки не менее 0,3 с; время выдержки в 5% коридоре одновременно всех каналов нагружения не менее 0,5с; суммарное время выхода на точку нагружения должно быть не более 1,5с. За один цикл нагружения принимается процесс перехода от начала одной контрольной точки до начала следующей контрольной точки (рис. 3.10).



Рисунок 3.10 – Циклограмма нагружения на ось Y

Разработанная модель системы нагружения имеет вид, отраженный на рис. 3.11:

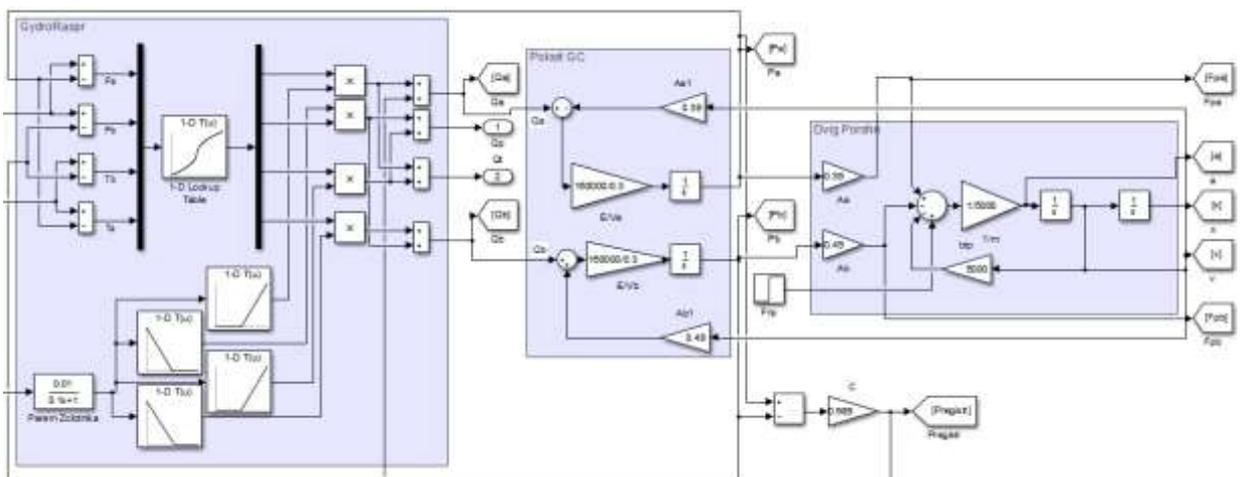


Рисунок 3.11 – Имитационная модель системы нагружения

Результаты моделирования с использованием модели приведены на рис. 3.12.

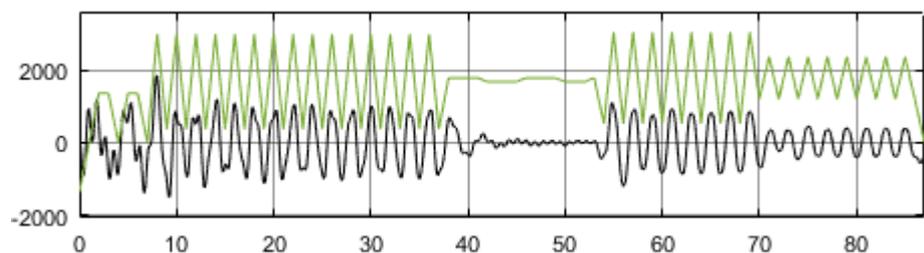


Рисунок 3.12 – Результат моделирования воспроизводимого нагружения на ось Y

Согласно результатам моделирования, представленным на рис. 3.12, данная математическая модель, в виду сочетания неточности своего описания относительно физического процесса посредством введения в уравнения допущений и фактических неточностей в описании реальной системы при воспроизведении нагрузок, не обеспечивает требуемые качества реализации программного сигнала, что видно из расхождения графиков \square 1500 кгс, однако полученный в результате сигнал практически полностью повторяет характер реализуемого воздействия. В виду недостаточной точности реализации программной нагрузки с целью устранения данного недостатка необходимо применение регулятора в прямой цепи системы (рис. 3.1).

3.4.2 Методы интеллектуального регулирования параметров системы нагружения

3.4.2.1 Метод нечеткой логики

Согласно работам Кудинова, Буракова, Бошлякова [5-8, 20-22] для систем с неполнотой данных об объекте, множеством нелинейных и нестационарных характеристик при описании процессов в оборудовании испытательного стенда и испытуемой опоры шасси, не поддающихся детальному и точному описанию имеет место реализация процесса моделирования и принятия решения

согласно полученным результатам с использованием метода нечеткой логики. Данный метод также позволяет производить расчет параметров регуляторов системы, что рассмотрим далее.

Перед тем как перейти к построению регулятора системы программного управления, рассмотрим основные принципы построения адаптивного управления, базирующейся на нечетких множествах.

Логико-нечеткие регуляторы содержат нечеткие множества, логические операции объединения, пересечения, композиции с лингвистическими значениями переменных, нечеткое отношение, образованное одной или несколь-

кими логическими операциями, правила выводы нечеткого выхода при известном входе.

В [13] выделены основные задачи, которые позволяет решить адаптивные системы:

- 1) осуществить оптимизацию работы объекта;
- 2) обеспечить работоспособность системы с необходимыми показателями качества в условиях, когда свойства объекта изменяются;
- 3) повысить надежность сложных систем, унифицировать алгоритмы управления для классов объектов;
- 4) уменьшить требования к процессу проектирования систем за счет следующего пополнения информации в процессе функционирования.

Для решения задачи адаптации системы используют два подхода: изменения структуры регулятора и изменения параметров регулятора.

Для наиболее оптимального результата работы регулятора с точки зрения точности и быстродействия необходимо предусмотреть работу системы автоподбора параметров следующим образом [11]:

- 1) анализ погрешность управления (её значение, скорость изменения, сумму);
- 2) на основе информации о погрешности в блоке адаптации рассчитывают параметры регулятора;
- 3) сформировать сигнал управления на основе ПИД-закона.

Вернемся к свойствам систем нечеткого вывода. Характерная особенность таких систем – преобразование значений входных переменных в выходные переменные в пять этапов:

- 1) формирование базы правил;
- 2) фаззификация входных переменных;
- 3) агрегирование подусловий в нечетких правилах продукций;
- 4) активизация (композиция) подзаключений в нечетких правилах продукций;
- 5) аккумуляция заключений нечетких правил продукций.

Первый этап заключается в формировании базы правил, в которых условия и заключения сформулированы в терминах нечетких лингвистических высказываний.

Суть этапа фаззификации входных (выходных) переменных: введение нечеткого вывода на основании установления соответствия между конкретным значением отдельной входной переменной и значением функции принадлежности соответствующего ей термина входной лингвистической переменной. К основным формам задания лингвистических переменных относятся:

1. Кусочно-линейные функции (треугольные, трапециевидные, П-образные), описывающие нечеткие множества типа «среднее значение», «приблизительно в пределах от и до», «примерно равно», «около», «расположен в интервале», «подобен объекту».

2. S-образные, описывающие нечеткие термины нечеткие множества вида «большое количество», «большое значение», «значительная величина», «высокий уровень».

3. Z-образные, которые характеризуют неопределенности типа «малое количество», «небольшое значение», «незначительная величина».

На начальном этапе решения задачи функции принадлежности, описывающие термины лингвистических переменных, задаются в виде кусочно-линейных функций.

Следующий этап – агрегирование – представляет собой процедуру определения степени истинности условий по каждому из правил системы нечеткого вывода. Формально значения истинности всех подусловий системы считаются известными до начала этапа, затем рассматривается каждое из условий правил системы нечеткого вывода [12, 17].

Этап активации – процесс нахождения степени истинности каждого из подзаключений правил нечетких продукций. Функции принадлежности каждого из подзаключений для выходных лингвистических переменных можно определить следующими методами нечеткой композиции:

- min-активация, здесь $\mu'(y) = \min\{c_j, \mu(y)\}$;
- prod-активация, здесь $\mu'(y) = c_j \cdot \mu(y)$;
- average-активация, здесь $\mu'(y) = 0,5(c_j + \mu(y))$,

где $\mu'(y)$ – функция принадлежности каждого из элементарных подзаключений следствий всех продукционных правил;

$\mu(y)$ – функция принадлежности термина, который является значением некоторой выходной переменной, заданной на универсуме u ;

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40

c_j – элемент множества значений степени истинности подзаключения.

Этап аккумуляции – процесс объединения всех степеней истинности подзаключений для получения функции принадлежности каждой из выходных переменных.

Для получения на выходе системы нечеткой логики конкретного (числового) значения переменной, после реализации перечисленных выше пяти этапов необходимо выполнить операцию дефаззификации, которая сведет нечеткую логическую переменную к четкости.

Основными методами дефаззификации являются [27]:

– *метод центра тяжести* (3.9) – вычисления центра тяжести площади нечеткого множества, согласно которому

$$y = \frac{\int_{\min}^{\max} x \cdot \mu(x) dx}{\int_{\min}^{\max} \mu(x) dx} \quad (3.9)$$

где y – результат дефаззификации;

x – переменная, соответствующая выходной лингвистической переменной;

$\mu(x)$ – функция принадлежности нечеткого множества, соответствующего выходной переменной после этапа аккумуляции;

\min – левая точка интервала носителя нечеткого множества рассматриваемой выходной переменной;

\max – правая точка интервала носителя нечеткого множества рассматриваемой выходной переменной.

– *метод центра тяжести для одноточечных множеств* (3.10):

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \mu(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(x_i)} \quad (3.10)$$

где n – число одноточечных нечетких множеств, каждое из которых характеризует единственное значение рассматриваемой выходной лингвистической переменной.

– *метод центра площади* (3.11):

$$\int_{\min}^y \mu(x) dx = \int_y^{\max} \mu(x) dx \quad (3.11)$$

– *метод левого модального значения* (3.12):

$$y = \min\{x_m\} \quad (3.12)$$

где x_m – модальное значение нечеткого множества, соответствующего выходной переменной после аккумуляции.

– метод правого модального значения (3.13):

$$y = \max\{x_m\} \quad (3.13)$$

В настоящее время наиболее часто при решении задач нечеткой логики используются два метода: метод Сугено и метод Мамдани. Основное отличие этих методов – в характере зависимости выходной и входной переменных. Так, метод Сугено применяется, если параметры выходных переменных имеют линейную зависимость от входных и определяются согласно весовым коэффициентам, значение выходной переменной в каждом из заключений определяется как некоторое действительное число. Метод Мамдани используется в случае неопределенности вида взаимосвязи входных и выходных переменных [30, 43]. При этом аккумуляция данного метода основана на объединении нечетких множеств, соответствующих термам подзаключений, согласно формуле (3.14)

$$\mu(x) = \max\{\mu_\alpha(x), \mu_\beta(x)\} \quad (3.14)$$

где $\mu(x)$ – результат объединения;

$\mu_\alpha(x), \mu_\beta(x)$ – нечеткие множества, соответствующие термам подзаключений, относящихся к одним и тем же выходным лингвистическим переменным.

В виду неизвестности характера зависимости ошибки и скорости ее нарастания в дальнейшем имеет место обращение к методу Мамдани.

В нашем случае нечеткий адаптивный ПИД-регулятор состоит из линейного ПИД-регулятора, описываемого соотношением (3.15):

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) + K_d \dot{e}(t), \quad (3.15)$$

где K_p – коэффициент усиления пропорциональной составляющая регулятора;

K_i – коэффициент усиления интегральной составляющая регулятора;

K_d – коэффициент усиления дифференциальной составляющая регулятора;

$\dot{e}(t)$ – скорость нарастания ошибки при отработке типового воздействия.

Таким образом общая структура системы нечеткого адаптивного ПИД-управления в нашем случае принимает вид, показанный на рис. 3.14.

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

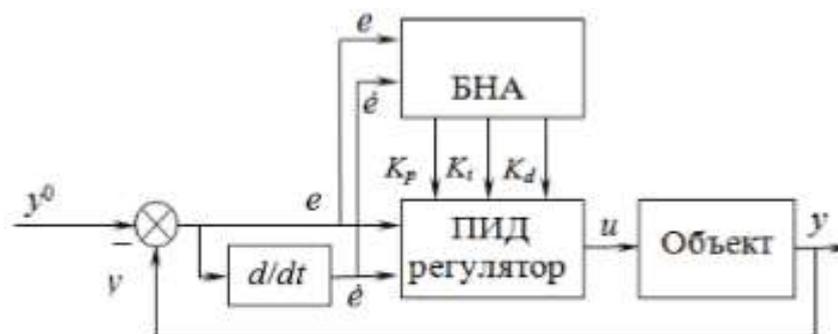


Рисунок 3.14 – Система управления с нечетким регулятором. Общая структура

Изложим основные принципы построения групп нечетких правил, связывающих ошибку и её производную с коэффициентами усиления составляющих ПИД-регулятора [17, 43]:

- 1) если e относительно велико, то для снижения e следует увеличить K_p и уменьшить K_d , а также исключить интегральное воздействие;
- 2) если e и $\dot{e}(t)$ допустимы, то следует уменьшить K_p до некоторой требуемой величины для снижения перерегулирования и влияния на систему;
- 3) если e очень мало, надо увеличить K_p и K_i , чтобы системы обладала устойчивостью. Требуется так изменить K_d , чтобы избежать колебания в системе. Если e мало, то увеличиваем K_d , если $\dot{e}(t)$ велико, уменьшаем K_d .

Таким образом экспертная база правил назначения коэффициентов ПИД-регулятора примет вид, показанный в табл. 3.1–3.3.

Таблица 3.1 – База правил для K_d

	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	Z	Z
NM	NB	NB	NM	NS	NS	Z	Z
NS	NB	NM	NS	NS	Z	PS	PS
Z	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM
PS	NM	NS	Z	PS	PS	PM	PB
PM	Z	Z	PS	PS	PM	PB	PB
PB	Z	Z	PS	PM	PM	PB	PB

Таблица 3.2 – База правил для K_i

	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	Z

Продолжение таблицы 3.2 – База правил для K_i

NS	Z	NS	NM	NM	NS	NS	Z
Z	Z	NS	NS	NS	NS	NS	Z
PS	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PS	PS	PS	PB

Таблица 3.3 – База правил для K_p

	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PM	Z
NM	PB	PD	PM	PS	PS	Z	NS
NS	PM	PM	PM	PS	Z	NS	NS
Z	PM	PM	PS	Z	NS	NM	NM
PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
PB	Z	Z	NM	NM	NM	NB	NB

В таблицах 3.1-3.3 приняты следующие обозначения: Z – ноль, P – положительный, N – отрицательный, B – большой, S – малый, M – среднее.

Приведем результаты формирования функций принадлежности каждой из переменных системы нечеткого вывода (рис. 3.15-3.18).

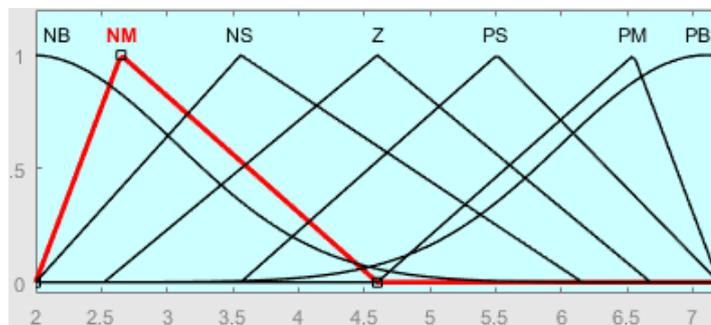


Рисунок 3.15 – Функции принадлежности для K_i

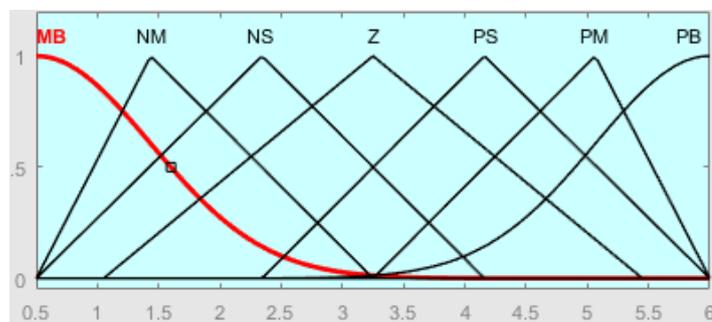


Рисунок 3.16 – Функции принадлежности для K_d

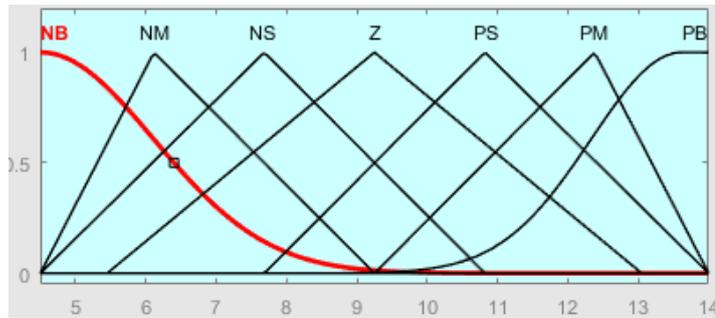


Рисунок 3.17 – Функции принадлежности для K_p

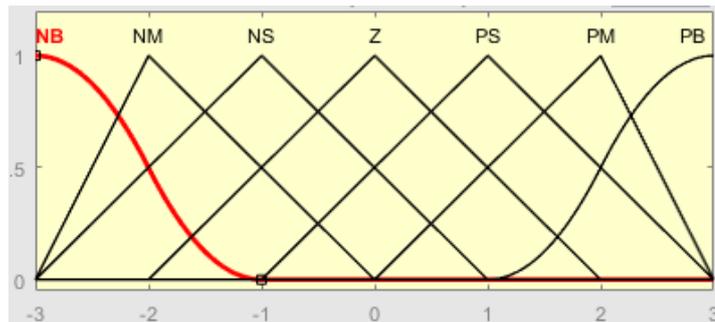


Рисунок 3.18 – Функции принадлежности для e и $\dot{e}(t)$

Диапазоны принадлежности для каждой из переменных назначены согласно заранее определенным значениям коэффициентов ПИД-регулятора по минимальной ошибке воспроизведения входного воздействия для каждого из блоков нагружения типового полета, отраженных выше.

Произведем моделирование системы в Simulink согласно модели, представленной на рис. 3.19.

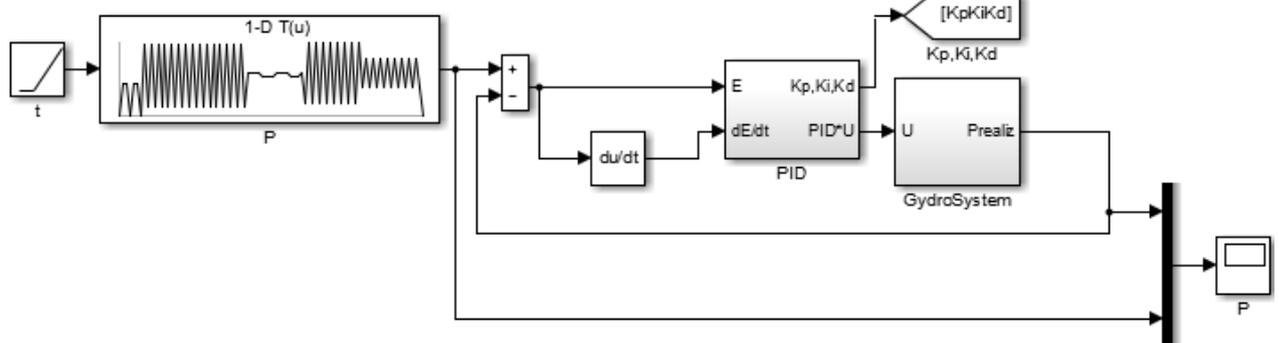


Рисунок 3.19 – Модель с нечетким регулятором

При этом модель ПИД-регулятора будет иметь вид, представленный на рис. 3.20.

Согласно результатам моделирования системы (рис. 3.21, 3.22), использованием адаптивного нечеткого регулятора ПИД-типа удалось добиться отработки сигнала с ошибкой значительно меньшей ранее полученной без использования данного типа корректирующего блока: величина перерегу-

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

лирования при моделировании без использования регулятора – 50%, с использованием адаптивного регулятора – 0,03%.

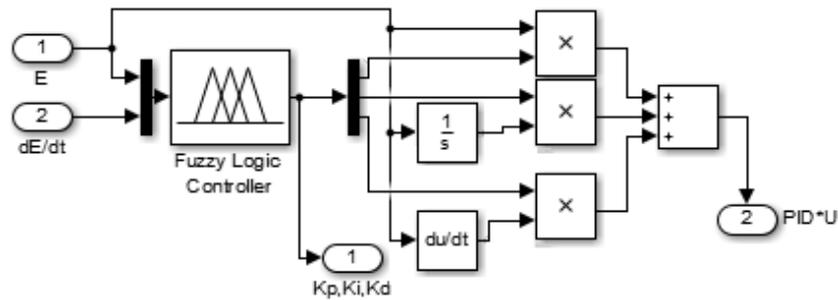


Рисунок 3.20 – Общий вид ПИД-регулятора

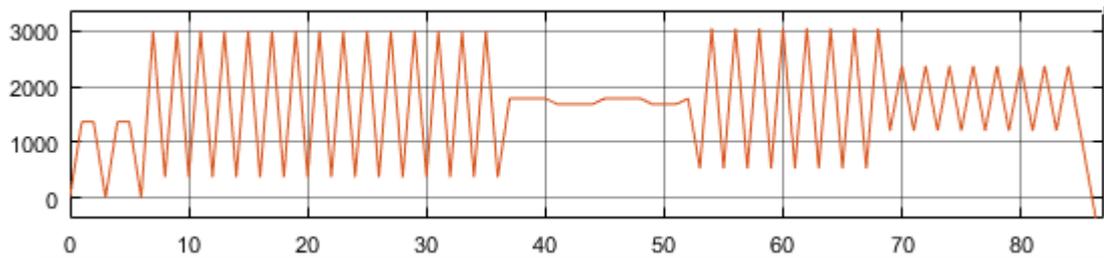


Рисунок 3.21 – Результат моделирования воспроизводимого нагружения на ось Y

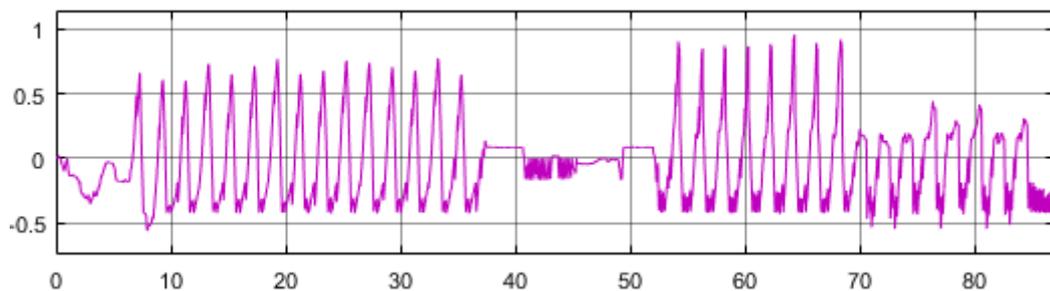


Рисунок 3.22 – Ошибка обработки нагружения системой с нечетким ПИД-регулятором

Согласно полученным результатам в ходе моделирования делаем вывод, что система удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к реализации нагрузок.

3.4.2.2 Метод нейросетевого управления

Согласно работам Кузнецова, Буракова, Подпорина [7, 23, 41] применение нейросетевой технологии управления в значительной мере упрощает задачу аналитического синтеза параметров структуры регуляторов проектируемых систем управления. Это обусловлено тем, что достигаемые свойства и качества

процессов управления в нейросетевых системах в большей степени зависят от фундаментальных свойств многослойных нелинейных нейросетей, а не от

аналитически рассчитанных оптимальных законов, расчет которых производится посредством компьютерных программ.

Большие исследования, посвященные вопросам управления нелинейными динамическими объектами проводились при помощи искусственных нейронных сетей Руденко О.Г, Бородянским Е.В. [44]. Особое внимание исследователи уделяют совершенствованию методов обучения нейронных сетей, идентификации нелинейных нестационарных объектов с помощью нейронных сетей, синтезу нейросетевых систем управления нелинейными объектами.

Определим этапы проектирования нейронных сетей для решения задач управления:

- этап идентификации управляемого процесса;
- этап синтеза закона управления.

На этапе идентификации разрабатывается модель управляемого процесса в виде нейронной сети, позволяющая получить корректную модель любого сложного нелинейного объекта с помощью многослойной искусственной нейронной сети. Полученную в результате процедуры идентификации модель можно в дальнейшем использовать для синтеза управляющего регулятора и для систем адаптивного управления с эталонной моделью.

Наиболее часто используются следующие модели нейросетевого управления:

- управление с предсказанием. В данной модели алгоритм оптимизации применяется для расчета такого управления, которое минимизирует разность между желаемыми и действительными изменениями выхода модели;
- управление на основе модели авторегрессии со скользящим средним;
- управление на основе эталонной модели. Здесь в качестве регулятора используется нейронная сеть, отслеживающая поведение эталонного процесса.

Обратимся к архитектуре регулятора NARMA-L2 (Nonlinear Autoregressive-Moving Average), реализованной в MATLAB. Регулятор в качестве модели управляемого процесса использует модель нелинейной авторегрессии со скользящим средним.

При моделировании и синтезе нейронного регулятора используются будем обращаться к модели, представленной на рис. 3.23.

Модель авторегрессии со скользящим средним в общем виде описывается следующим образом (3.16):

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		47

$$y(k + d) = N[y(k), y(k - 1), \dots, y(k - n + 1), u(k), u(k - 1), \dots, u(k - n + 1)], \quad (3.16)$$

где $y(k)$ – выход модели, представляющий величину нагружения по оси Y;

d – число тактов предсказания;

$u(k)$ – вход модели, управляющий сигнал системы нагружения.

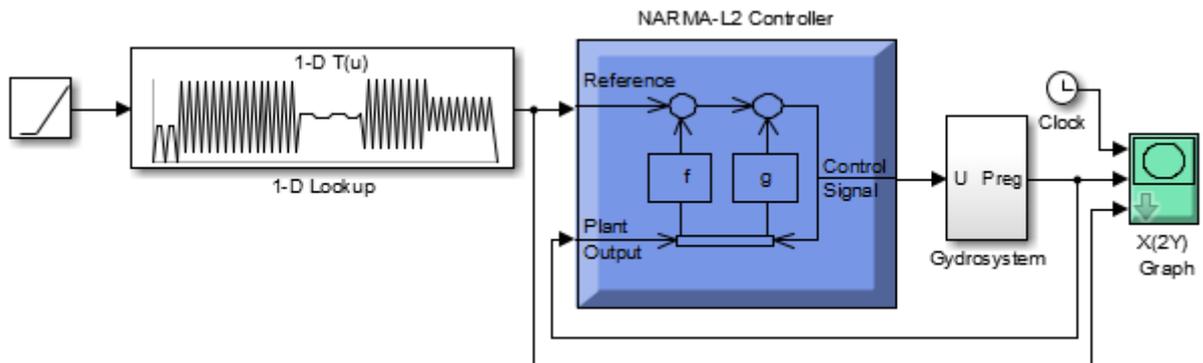


Рисунок 3.23 – Модель системы нагружения стенда с NARMA-регулятором

Таким образом с учетом (3.16) нейронный регулятор должен обеспечивать сигнал управления (3.17):

$$u(k) = G[y(k), y(k - 1), \dots, y(k - n + 1), y_r(k + d), u(k - 1), \dots, u(k - m + 1)], \quad (3.17)$$

где $y_r(k + d)$ – заданное усилие.

Данный регулятор имеет место для практического применения, однако в виду большого количества вычислений для минимизации средней квадратической ошибки выполняемой динамическим вариантом методом обратного распространения ошибки. Поэтому для практической реализации задачи управления с нейронными регуляторами Нарендрой и Макхопадхаи предложена приближенная NARMA-модель с выделенной составляющей управления (3.18):

$$y(k + d) = f[y(k), y(k - 1), \dots, y(k - n + 1), u(k - 1), \dots, u(k - m + 1)] + g[y(k), y(k - 1), \dots, y(k - n + 1), u(k - 1), \dots, u(k - m + 1)]u(k). \quad (3.18)$$

Согласно формуле (3.18), сигнал управления можно вычислить при известной траектории $y_r(k + d)$ и предыстории управления

$$\{u(k - 1), \dots, u(k - m + 1)\},$$

предшествующих и текущих значениях на выходе системы

$$\{y(k - 1), \dots, y(k - n + 1)\},$$

$$u(k) = \frac{y_r(k + d) - f[y(k), y(k - 1), \dots, y(k - n + 1), u(k - 1), \dots, u(k - m + 1)]}{g[y(k), y(k - 1), \dots, y(k - n + 1), u(k - 1), \dots, u(k - m + 1)]u(k)} \quad (3.17)$$

Моделирование нейронной системы управления с NARMA-L2 регулятором, включающее процедуры идентификации эталонной модели и обучения

						09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
							48
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			

регулятора выполнены в MATLAB с использованием Simulink и Neural Network Toolbox.

В качестве параметров нейронной сети выбраны: многослойный перцептрон с одним скрытым слоем размерностью 19 нейронов; количество задержанных выходов – 2, входов – 3; такт квантования 0,001 с, размерность обучающей выборки составляет 9000 комбинаций «вход-выход».

Качество идентификации оценивалось показателем качества, соответствующим значению среднеквадратической ошибки распространения сигнала в исходной модели и ее нейронной аппроксимации. Для рассматриваемой модели значение данного показателя составило величину $1,45 \cdot 10^{-7}$.

Для проверки работоспособности полученной NARMA-модели системы нагружения испытательного стенда в режиме повторно-статических испытаний производилось моделирование процессов гидросистемы (модель рассматривалась в начале разд. 3.4) с учетом заданной циклограммы, соответствующей нагружению типового полета, заданного в табличном виде. На рис. 3.24 приведен график отработки заданных усилий относительно фактической циклограммы.

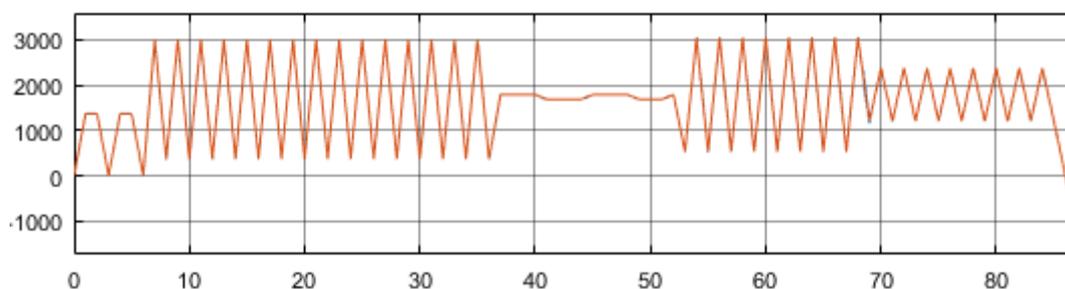


Рисунок 3.24 – Результат моделирования воспроизводимого нагружения на ось Y

Согласно полученным результатам моделирования системы (рис. 3.24), приходим к выводу, что использованная схема управления на базе модели нелинейной авторегрессии пригодна для решения задачи контроля уровня реализуемого усилия. Определим величину ошибки воспроизведения заданной циклограммы (рис. 3.25).

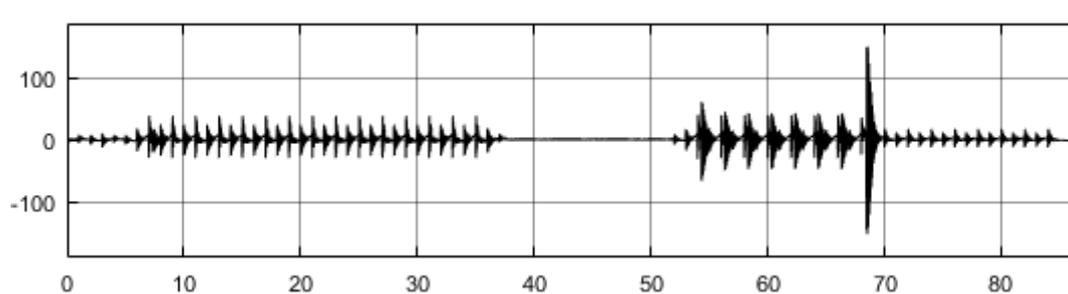


Рисунок 3.25 – Ошибка отработки нагружения системой

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

По рис. 3.25 видно, что ошибка при обработке программного сигнала является максимальной в конце блока нагрузок «Выруливание», данная особенность обусловлена накоплением ошибки в процессе обработки заданных сигналов и последующим переходом на блок нагружения «Разбег». Величина перерегулирования составляет 3,89%, что также удовлетворяет требованиям ТЗ.

Таким образом можно выделить несколько особенностей нейронного управления на базе нелинейной авторегрессии:

1) обработка заданных сигналов осуществляется с достаточной точностью;

2) перед переходом на каждый новый блок нагружения и в его начале имеют место отклонения в обработке заданных сигналов до 4%: величина ошибок обработки в данных случаях зависит от скорости уровня перепада величин нагружения;

3) на качество управления сложным нелинейным объектом влияет степень предварительной обученности нейронной сети: в случае некорректного или недостаточного по количеству примеров обучения, нейронная сеть регулятора будет выдавать непрогнозируемый искаженный управляющий сигнал.

Выводы по главе 3

1. Алгоритм управления с рабочей станции процессом повторно-статических и ресурсных испытаний стоек шасси легкого военно-транспортного самолета (ЛВТС) Ил-112В имеет 3-х уровневую архитектуру: 0-й уровень – запуск программы – отвечает за запуск программы и ее подпрограмм в асинхронном режиме, формирует логику обработки данных, и частичную обработку пользовательских сообщений; 1-й уровень – обработка данных измерений – реализован как информационно управляющий параметрами системы измерений и отвечает в том числе за своевременную запись регистрируемых данных в БД MySQL; 2-й уровень – управление режимом испытаний – отвечает за управление параметрами режимов испытаний, формирование сигнала задания системы нагружения стенда.

2. Разработанный алгоритм обработки данных измерений обеспечивает:

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		50

- измерение и отображение в реальном времени показаний с датчиков перемещений, усилий, температур, напряжений, давления, сигналов на выходе пропорциональных распределителей; формирование выборки в числовой форме и в виде графика;
- синхронную запись выбранных параметров через заданный интервал времени в диапазоне от 0,01 до 120 с;
- хранение данных измерений с тензостанции интерфейсов и аналоговых датчиков в формате, совместимом с базами данных MySQL;
- накопление результатов на протяжении всего периода испытаний в базе данных MySQL;
- возможность увеличения количества каналов измерений согласно количеству имеющихся резервных, путем подключения к ним измерительных устройств, редактирования информации о предельных значениях снимаемых показаний с аналоговых датчиков и параметров системы измерений относительно выделения принадлежности измерительного канала по типам испытаний;
- контроль внесения тарифовочных коэффициентов для датчиков перемещения и положения оси колеса.

3. Получена математическая модель системы нагружения испытательного комплекса, базирующаяся на работах Белоусова А.И., Расторгуева Г.И., Федоровой О.Р., Кочергина В.И., Куликова Е.Н., Лапердина И.А. и доработанная с учетом упрощающих допущений применительно к учету податливости объекта испытаний, соответственно о регистрируемом датчиком усилия, уравнению движения золотника гидрораспределителя при сохранении адекватности модели.

4. По результатам имитационного моделирования системы нагружения испытательного комплекса рекомендованы две модели адаптивных регуляторов:

- нечеткий ПИД-регулятор, реализующий нагружение с перерегулированием до 0,03%, что удовлетворяем требованиям ТЗ;
- нейронный регулятор основе модели авторегрессии со скользящим средним, реализующий усилия с перерегулированием до 3,89%, что также удовлетворяет условиям ТЗ.

5. Разработанный *алгоритм реализации повторно-статических*

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		51

испытаний обеспечивает:

- реализацию схемы нагружения с точностью 5% по каналу нагружения P_y ;
- время нарастания/спада каждого канала нагружения до 90% от величины изменения нагрузки – не менее 0,3 с;
- время выдержки в 3% коридоре каналов нагружения не менее 0,5 с;
- суммарное время выхода на точку нагружения согласно схеме нагружения – не более 1,5 с.

6. Разработанный алгоритм управления с рабочей станции процессом повторно-статических и ресурсных испытаний стоек шасси легкого военно-транспортного самолета (ЛВТС) Ил-112В, позволяет по результатам измерения параметров испытаний (с протоколированием) и обработки полученных в ходе испытаний данных выявить оценить фактическую прочность опоры и узлов ее крепления путем нагружения конструкции до разрушения, определения усталостной долговечности силовых элементов конструкции опоры, поэтапного подтверждения ресурса по результатам испытаний.

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
						52
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

4 РЕАЛИЗАЦИЯ ПО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ СТЕНДОМ

Разработку программы управления стендом испытаний будем производить в LabVIEW. LabVIEW – разработки на графическом языке программирования. Используется в системах сбора и обработки данных, для управления техническими объектами и технологическими процессами.

4.1 Подпрограммы запуска

4.1.1 Запуск программы

Рассмотрим подпрограмму, формирующую логику обработки сообщений (рис. 4.1, табл. 4.1).

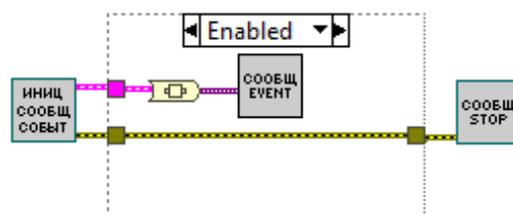


Рисунок 4.1 – Программа запуска приложения, логики обработки сообщений

При запуске стенда, после запуска программы и проведенной инициализации основных пользовательских событий переводим эти данные в динамический тип, для последующей отправки в подпрограмму, формирующую архитектуру и логику работы программы – *Queued_messag_handl*, кластер ошибок выполнения инициализации отправляем в подпрограмму останова формирования пользовательских сообщений – *Messag_stop*.

Таблица 4.1 – Параметры подпрограммы архитектуры приложения

Название	Start.vi
Назначение	Запуск ядра программы
Точка запуска, тип запуска	ОС, синхронный
Примечание	Точка входа в программу. Запускает ядро.

Подпрограмма, формирующая архитектуру и логику работы программы в целом представлены на рисунках 4.2-4.9, приложении А.

Во фрагменте программы, представленном в приложении А входным параметром являются данные, переданные с диспетчера сообщений с подпрограммы инициализации, которые формируют кластер сообщений. Выделяем данные диспетчера сообщений и останова программы, регистрируем *User Event*, каждое пользовательское событие обрабатываем в отдельных циклах программы.

Обработка события вызванного диспетчера сообщений осуществляется согласно схеме, представленной на рис. 4.2, 4.3. В случае статуса сообщения «Обработка ошибки» данные преобразуются к стандартному виду кластера ошибки Error, посредством *Schift Registr* происходит накопление ошибок при выполнении подпрограммы.

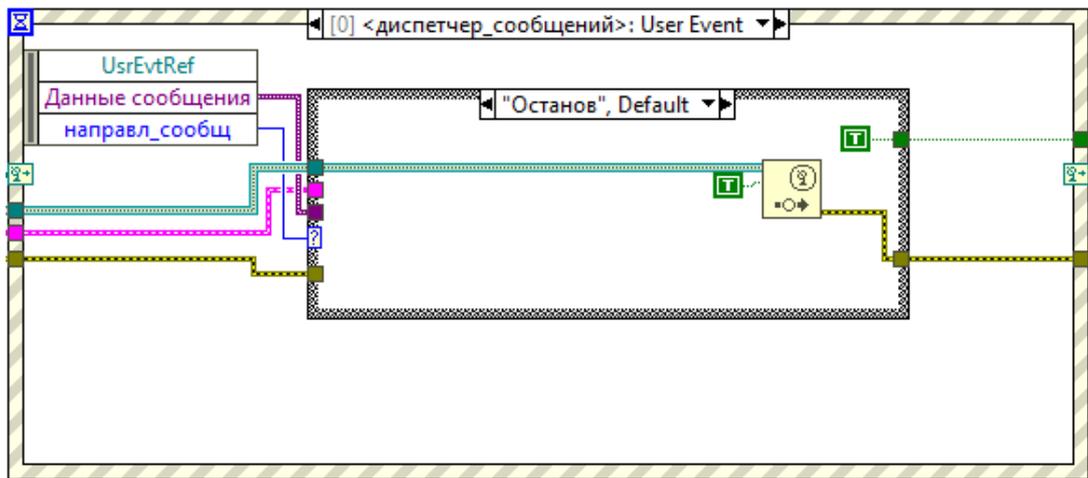


Рисунок 4.2 – Фрагмент ядра программы: подпрограммы обработки событий.

Обработка пользовательского события «диспетчер сообщений», останов

В случае статуса сообщения «Останов» (рис. 4.2) данные регистрируются событием «Остановить все», осуществляется остановка исполняемого цикла программы.

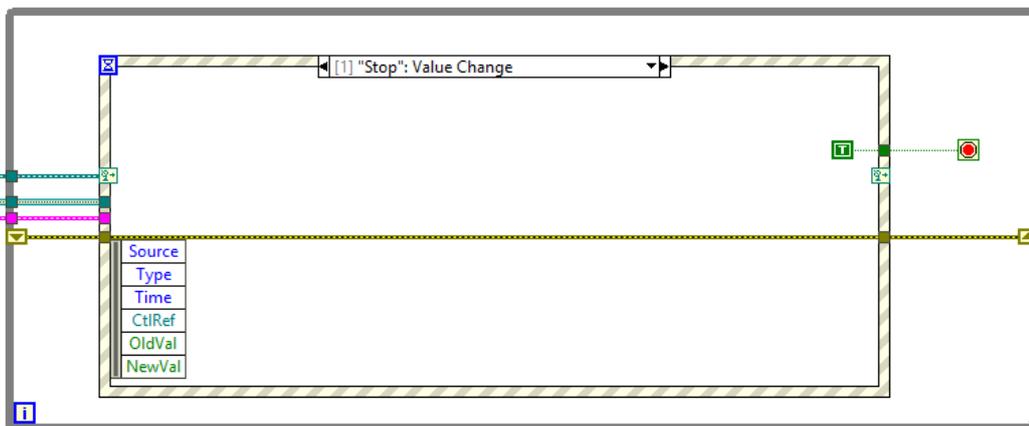


Рисунок 4.3 – Фрагмент ядра программы: подпрограммы обработки событий.

Обработка пользовательского события «Stop»

Также остановку исполняемой программы можно выполнить посредством нажатия кнопки стоп верхнего уровня (рис. 4.3).

Рассмотрим цикл обработки событий программы от момента запуска до ее завершения. При запуске программы (Приложение А) *Enum* с режиме *Schift Registr* согласно событиям в цикле вызывает этапы обработки: старт,

ожидание, стоп. В режиме «*Старт*» данные с диспетчера сообщений преобразуем в тип variant, подаем в подпрограммы асинхронного запуска vi, позволяющую независимо друг от друга работать нескольким подпрограммам. Также происходит накопление ссылок запущенных подпрограмм в массив с целью последующей более удобной работы с ними. После запуска всех желаемых экранов в асинхронном режиме программа переходит в режим «*Ожидание*» (рис. 4.4).

В режиме «*Ожидание*» отслеживается статус события «*Остановить все*» или же любых других действий пользователя.

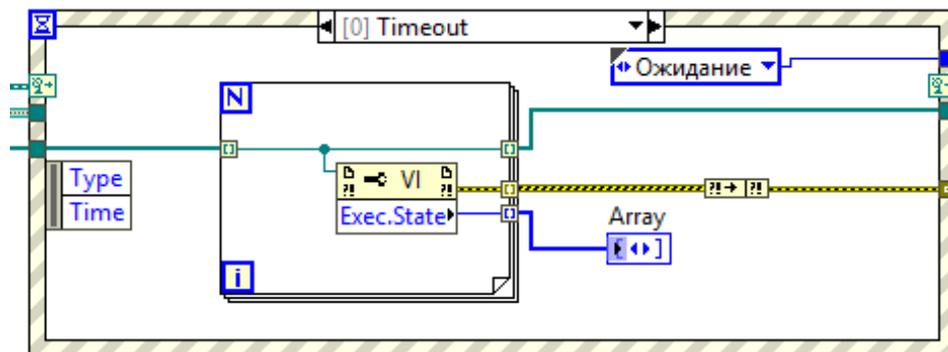


Рисунок 4.4 – Фрагмент ядра программы: подпрограммы обработки этапов работы приложения (этап ожидания приложения)

В случае улавливания события «*Остановить все*» программа переходит в режим «*Стоп*» (рис. 4.5).

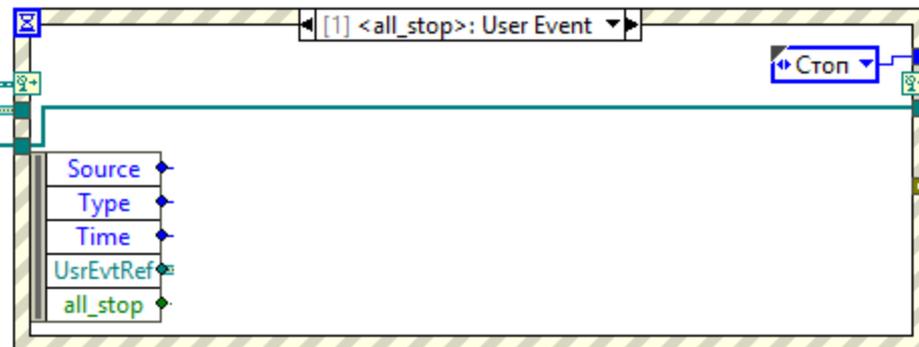


Рисунок 4.5 – Фрагмент ядра программы: подпрограммы обработки этапов работы приложения

В случае нажатия кнопки верхнего уровня «*Остановить программу*» (рис. 4.6) регистрируется сообщение о введении данных в событие «*Остановить все*», система возвращается в режим ожидания событий.

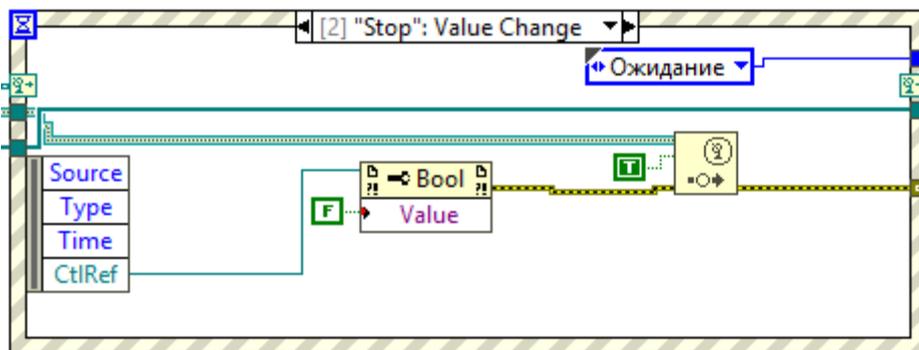


Рисунок 4.6 – Событие нажатие кнопки «Остановить все»

В режиме «*Stop*» система сохраняет параметры программы перед выходом, передает данные в обработчик ошибок, осуществляет выход из цикла обработки.

Выделим основные параметры подпрограммы логики обработки событий (табл. 4.2):

Таблица 4.2 – Параметры подпрограммы логики

Название	MsgDispatcher.vi
Назначение	Запуск модулей и обработчик служебных сообщений модуля.
Точка запуска, тип запуска	Start.vi, синхронный
Входные параметры	Кластер «Все_события», тип - <i>variant</i>
Выходные параметры	Кластер ошибок
Примечание	Последовательно запускает все модули программы и следит за их состоянием.

На рис. 4.7 представлена *SubVi* асинхронного запуска подпрограммы. Входными параметрами являются: флаг запуска *vi*-подпрограммы, *referens*-ссылка на подпрограмму, ошибки, сформированные ранее, данные типа *variant*, определяющие структуру сходных данных запускаемой *vi*.

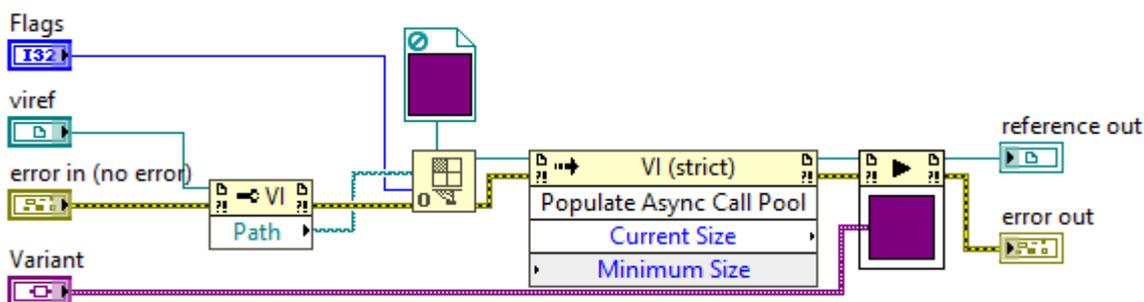


Рисунок 4.7 – Подпрограмма асинхронного запуска экрана

Согласно ссылке на подпрограмму формируется путь к ней, настройкой параметров, *Invoke Node VI*, выставлением *PopulateAsyncCallPool* выполняет-

ся асинхронный запуск с последующей передачей ссылки на запускаемую подпрограмму *ReferensOut*.

Выделим основные параметры подпрограммы асинхронного запуска (табл. 4.3):

Таблица 4.3 – Параметры SubVI асинхронного запуска

Название	Asynch.vi
Назначение	Запуск в асинхронном режиме любой подпрограммы
Точка запуска, тип запуска	Любая vi, синхронный
Входные параметры	Кластер ошибок, референс на запускаемую подпрограмму, флаг параметра запуска vi, данные типа <i>variant</i>
Выходные параметры	Референс подпрограммы, ошибка запуска (при наличии)

4.1.2 Обработка сообщений

Рассмотрим подпрограмму инициализации сообщений (рис. 4.8, табл. 4.3).

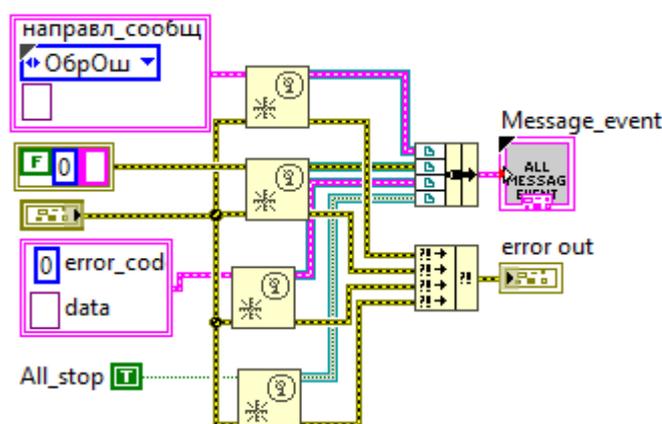


Рисунок 4.8 – Подпрограмма инициализации сообщений

Данная подпрограмма формирует 4 основных типа пользовательских сообщений согласно типу событий: «Диспетчер сообщений», «Остановить все», «Обработка ошибок», «Обратная связь с обработки ошибок».

Диспетчер сообщений регистрирует данные:

1. этап обработки сообщения: обработка ошибки, останов, стоп
2. данные сообщения типа *variant*.

Таблица 4.3 – Параметры подпрограммы инициализации сообщений

Название	Msgevent_init.vi
Назначение	Создание системных событий
Точка запуска, тип запуска	Start.vi, синхронный
Выходные параметры	Кластер «Все_события»; Кластер ошибок

При останове программы вызывается *Msgevent_halt.vi* (рис. 4.9, табл. 4.4), отвечающая за завершение формирования сообщений и последовательное завершение регистрации данных по каждому из типов сообщений о пользовательских событиях: «Обратная связь с обработки ошибок», «Остановить все», «Обработка ошибок», «Диспетчер сообщений».

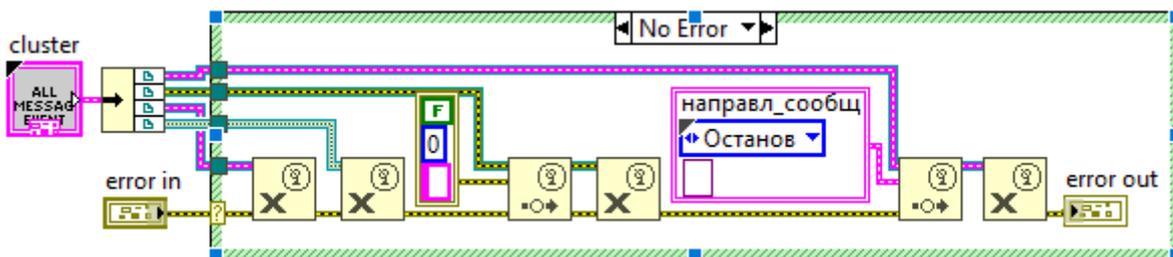


Рисунок 4.9 – Подпрограмма «разрушения» сообщений

Таблица 4.4 – Параметры SubVI асинхронного запуска

Название	Msgevent_halt.vi
Назначение	Уничтожение системных событий
Точка запуска, тип запуска	Start.vi, синхронный
Входные параметры	Кластер «Все_события», кластер ошибок

4.2 Подпрограммы сбора данных с системы измерения

4.2.1 Обработчик ошибок

Подпрограмма обработчика ошибок представлена в приложении Б, основные параметры вынесены в табл. 4.5. Подпрограммой осуществляется регистрация пользовательских событий, в рамках обратной связи с обработчиком ошибки при ее наличии данные о ней обнуляются.

Таблица 4.5 – Параметры обработчика ошибок

Название	Error_sender.vi
Назначение	Проверка ошибки и отправка на обработку, если имеется
Точка запуска, тип запуска	Все vi с 1-го уровня, кроме обработчика ошибок, синхронный
Входные параметры	Событие «Диспетчер сообщений»; Кластер ошибок
Выходные параметры	Кластер ошибок (обнуленный)
Примечание	Вставляется в конец цикла

4.2.2 Система измерений

Рассмотрим подпрограммы регистрации и начальной обработки данных системы измерений. Они позволяют вывести данные показаний системы

измерения на экраны настройки и диагностики каналов измерений, записи показаний в базу данных:

- 1 Полный список каналов измерения;
- 2 Аналоговые датчики;
- 3 Дискретные сигналы;
- 4 Динамометры;
- 5 Лазерные датчики;
- 6 Диагностика каналов тензостанции.

Экран «Каналы измерения»

При первом запуске основного экрана группы «Каналы измерений» (рис. 4.10), пользователем вводится базовая информации о каналах. По окончании заполнения данных о типах и виде единиц измерения, наименования и типа канала, необходимо произвести их запись в БД посредством нажатия кнопки «Записать». При регистрации данного пользовательского события произойдет вызов подпрограммы «Обновление записи», данные в базе данных обновятся или дополнятся (рис. 4.11).

№ канала	Наименование канала измерения	№ кд. инт.	Тип измеренного канала	Ед. изм.	Тип единицы измерения
1	Датчик силы - ось X0_1	0	Аналоговый интерфейс (ДС)	кгс	Сила
2	Датчик силы - ось X0_2	0	Аналоговый интерфейс (ДС)	кгс	Сила
3	Датчик силы - ось Y0	0	Аналоговый интерфейс (ДС)	кгс	Сила
4	Датчик силы - ось Z	0	Аналоговый интерфейс (ДС)	кгс	Сила
5	Датчик силы - ось Z_1	0	Аналоговый интерфейс (ДС)	кгс	Сила
6	Датчик силы - ось Z_2	0	Аналоговый интерфейс (ДС)	кгс	Сила
7	Датчик силы - ось Z0	0	Аналоговый интерфейс (ДС)	кгс	Сила
8	Датчик температуры - ось X_1	0	Сетевой интерфейс (Температура)	°С	Температура
9	Датчик температуры - ось X_2	0	Сетевой интерфейс (Температура)	°С	Температура
10	Датчик температуры - ось Y_1	0	Сетевой интерфейс (Температура)	°С	Температура
11	Датчик температуры - ось Y_2	0	Сетевой интерфейс (Температура)	°С	Температура
12	Датчик температуры - ось Z_1	0	Сетевой интерфейс (Температура)	°С	Температура
13	Датчик температуры - ось Z_2	0	Сетевой интерфейс (Температура)	°С	Температура
14	Датчик температуры - ось Z_3	0	Сетевой интерфейс (Температура)	°С	Температура
15	ИМС. Контроль включенной арматуры (Q1 H1)	0	Дискретный сигнал	б/у	Бинарный
16	ИМС. Контроль включенной арматуры (Q1 AT1)	0	Дискретный сигнал	б/у	Бинарный

Рисунок 4.10 – Фрагмент экрана «Каналы измерения»

Экран «Дискретные каналы»

На основании общей информации о каждой группе каналов, хранящейся в базе данных, при вызове экранов аналоговых датчиков, дискретных сигналов согласно фрагменту подпрограммы, отраженному на рис. 4.11 производится считывание информации о канале измерения из базы данных MySQL. Информация в базе данных содержится в виде, указанном на рис. 4.11. Для корректного получения информации о необходимом типе каналов измерений в подпрограмму соответственно вносится информация «тип канала измере-

ния», наименование таблицы данных в БД. Это позволяет осуществить выборку данных в запросовой форме к MySQL Server. По мере поступления данных в 2-мерный массив происходит конвертирование *Variant*-типа в *String*, что позволяет распределять данные по массивам в необходимом количестве на экран *Vox*-панели списка сигналов экрана.

N...	Name_instr_channel	Type_instr_channel
1	Датчик силы - ось X0_1	0 Modbus интерфейс (ДС)
2	Датчик силы - ось X0_2	0 Modbus интерфейс (ДС)
3	Датчик силы - ось Xb	0 Modbus интерфейс (ДС)
4	Датчик силы - ось Y	0 Modbus интерфейс (ДС)
5	Датчик силы - ось Z_1	0 Modbus интерфейс (ДС)
6	Датчик силы - ось Z_2	0 Modbus интерфейс (ДС)
7	Датчик силы - ось Zb	0 Modbus интерфейс (ДС)
8	Датчик положения - ось X_1	0 Serial интерфейс (Лазерные датчики)
9	Датчик положения - ось X_2	0 Serial интерфейс (Лазерные датчики)
10	Датчик положения - ось Y_1	0 Serial интерфейс (Лазерные датчики)
11	Датчик положения - ось Y_2	0 Serial интерфейс (Лазерные датчики)
12	Датчик положения - ось Z_1	0 Serial интерфейс (Лазерные датчики)
13	Датчик положения - ось Z_2	0 Serial интерфейс (Лазерные датчики)
14	НАС. Контроль включения автомата QF1.H1	0 Дискретный модуль
15	НАС. Контроль включения автомата QF2.AT1	0 Дискретный модуль
16	НАС. Контроль включения пускателя KM1.H1	0 Дискретный модуль
17	НАС. Контроль включения пускателя KM2.AT1	0 Дискретный модуль
18	НГЖ. Контроль включения автомата QF1.1.H	0 Дискретный модуль
19	НГЖ. Контроль включения автомата QF2.1.AT	0 Дискретный модуль

Рисунок 4.11 – Запись данных о каналах измерения в БД

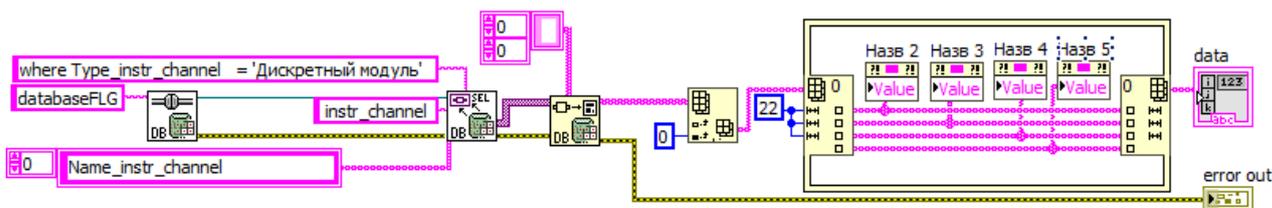


Рисунок 4.12 – Считывание данных о каналах системы измерений из БД

Показания системы измерения об уровне сигнала при запуске испытательного стенда считываются с контроллера по OPS Server.

Адрес	Инд.	Название I
		Реле (модуль I0-D4442)
		Реле (модуль I0-D4442)
		НАС. Включение контактора насоса Н1
		НАС. Включение контактора агрегата АТ1
		НАС. Включение электродвигателя ТА1 (линия загрузки RT1)
		НГЖ. Включение электродвигателя ТА2 распределителя Р3
		НГЖ. Включение электродвигателя ТА3 распределителя Р6
		Рублен. Включение электродвигателя ТА7.1 распределителя Р7
		Рублен. Включение электродвигателя ТА7.2 распределителя Р7
		Реле (Модуль I0-00438)
		НАС. Лента Пуск насоса Н1
		НАС. Лента Пуск агрегата АТ1
		НАС. Лента насос Н1 Загружен
		УПС. Лента Низкий уровень масла в баке
		УПС. Лента Высокая температура масла
		УПС. Лента Вентилятор #1 (главный) загружен
		НАС. Лента Вентилятор #2 (главный) загружен
		Реле (Модуль I0-00438)

Рисунок 4.13 – Фрагмент экрана «Дискретные каналы»

Экран «Данные тензостанции»

Подпрограмма считывания и регистрации данных с тензостанции через ПО Recorder отражена в Приложении В.

Для запуска подпрограммы данного экрана вносится имя и адрес запускаемого модуля считывания данных. На основании введенной информации производится подключение к ПО Recorder для считывания данных.

Для формирования группы транслируемых сигналов указываем их тип, в данном случае «Оценки. МО», посредством чего из полного списка характеристик сигналов выбирается именно данная оценка. Для случая активизации процедуры считывания данных с экрана новая группа считываемых сигналов с последующим созданием тегов каждому из них и регистрацией пользовательского события о чтении данных с тензостанции.

При активном подключении в процессе считывания данных происходит автообновление уровня сигналов, на экран выводятся: имя регистрируемого канала, время регистрации и уровень снимаемого сигнала. В процессе переполнения буфера данных об измерениях в LabVIEW, подпрограммой отсылается запрос на запись массива измерений в БД.

При завершении работы подпрограммы последовательно производится удаление пользовательского события, группы тегов, группы сигналов, происходит разрыв соединения с ПО Recorder, завершает работу программный модуль LabVIEW.

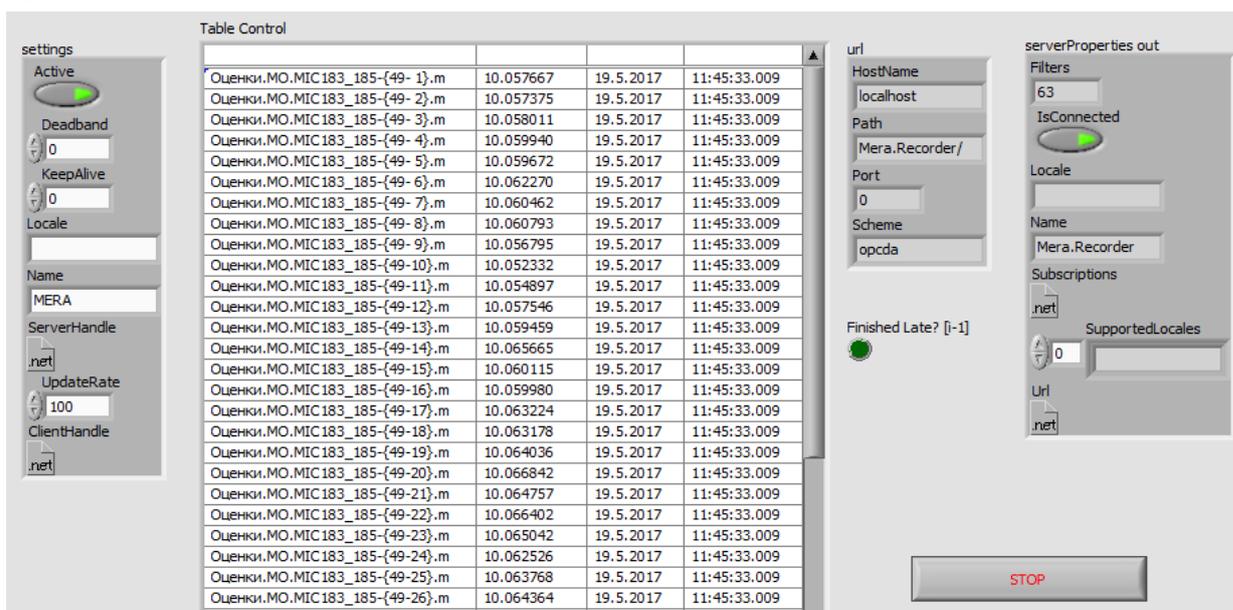


Рисунок 4.14 – Фрагмент экрана «Диагностика каналов тензостанции»

4.3 Подпрограммы режимов испытаний

Подпрограммы 2 уровня обеспечивают работу следующих экранов:

- 1 – экран выбора режима испытаний;
- 2 – экран режима «повторно-статических» испытаний;
- 3 – экран режима «ресурсных испытаний системы уборки-выпуска»;
- 4 – экран режима «ресурсных испытаний разворота опоры»;
- 5 – экран «графики».

Рассмотрим описание экранов каждого из режимов более подробно.

4.3.1 Выбора режима испытаний



Рисунок 4.15 – Панель выбора типа испытания

Данный экран (приложение Г, табл. 4.6) позволяет выбрать режим работы для повторно-статических, ресурсных системы уборки-выпуска и разворота испытаний, также позволяет завершить работу программы управления стендом. Экран отображается после начала обмена данными с контроллером по *OPC Server*, установлением соединения с тензостанцией посредством программного обеспечения *Mera Recorder*, установления связи с базой данных *MySQL*. В случае ошибки запуска одного из компонентов обмена данными предусмотрена возможность вызова с экрана посредством нажатия контролов. Запуск данного экрана может занять некоторое время после запуска самого приложения. После нажатия кнопки «Выход» требуется время на прекращение обмена сообщениями.

В приложении Г приведены параметры создания и начальной настройки исходных данных для испытаний разных типов:

- 1 – уведомления
 - о начале измерений;
 - настройке параметров;
 - настройке блока управления.

2 – формирование типа данных о событиях:

- о величине нагружения;
- № цикла испытания;
- кластера режима испытания;
- кластера параметров испытания;
- массива данных о смещении датчика от 0.

Также в приложении Г показан вызов режима повторно-статических испытаний с учетом пересылки формирования данных в вызываемую подпрограмму. Происходит вызов *Front Panel* и активизация *Event* «Повторная статика». Аналогично осуществляется вызов других типов испытаний.

Предусмотрены пользовательские события типов: завершить работу программы по нажатию кнопки «Выход». В таком случае на уведомитель режима работы испытательного комплекса подается сигнал, передающий информацию о переходе программы в состояние «Останов». Диспетчер сообщений перехватывает данное сообщение, программа переходит в состояние завершения работы запущенных модулей, уведомители обнуляются, сообщения сбрасываются.

Подпрограмма запуска сторонних приложений является общей для разных приложений. Единственное различие в указанном пути к файлу приложения. В случае, если нажата кнопка запуска программы, в данном случае «Recorder.Mera», происходит ее вызов (рис. 4.16).

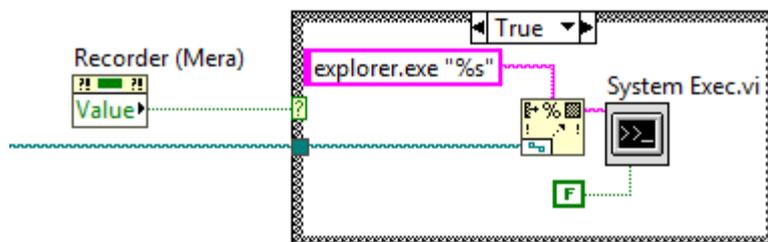


Рисунок 4.16 – Фрагмент подпрограммы выбора режима испытаний.
Вызов стороннего приложения с экрана

Таблица 4.7 – Параметры подпрограммы выбора испытания

Название	Test_start.vi
Назначение	Точка старта для различных режимов управления в LabView. Связь с другими модулями на этапе инициализации.
Точка запуска, тип запуска	MsgDispatcher.vi; асинхронный
Входные параметры	Событие: «Диспетчер сообщений»

4.3.2 Реализация режима повторно-статических испытаний

Экран (рис. 4.17, табл. 4.8) является основным при проведении повторно-статических испытаний. Для начала работы выбирается желаемая программа нагружения, задается количество обрабатываемых циклов, после отработки которых испытание будет автоматически завершено. Для запуска необходимо нажать кнопку «Старт», штатной остановки испытания – «Стоп». В последнем случае испытанию будет присвоен статус «Аварийного завершения», последний цикл не будет засчитан в количество отработанных. Для выхода из экрана нажмите кнопку «Выход».

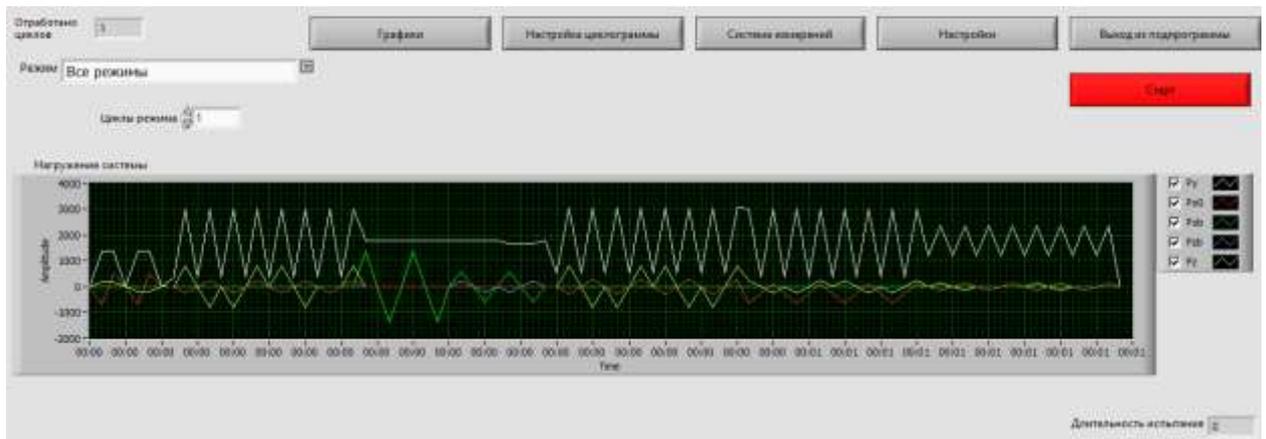


Рисунок 4.17 – Экран повторно-статических испытаний

В поле отображения графиков выводятся данные с датчиков ненормированные к направлению осей, заданных в методике испытания.

Таблица 4.8 – Параметры подпрограммы «Повторно-статические испытания»

Название	Static.vi
Назначение	Модуль управления испытанием «Повторная статика»
Точка запуска, тип запуска	Test_Start.vi; синхронный
Входные параметры	Кластер «Данные для повторной статике» <i>variant</i>

Для настройки параметров циклограммы предусмотрен экран ее настройки (рис. 4.18, табл. 4.9). Осуществляется выбор блока нагружения и настройка величины усилия на оси по каждой контрольной точке.

Таблица 4.9 – Параметры подпрограммы циклограммы

Название	Cycle_Static.vi
Назначение	Управление настройками режима
Точка запуска, тип запуска	Static.vi; синхронный
Входные параметры	Кластер «Данные для повторной статике»

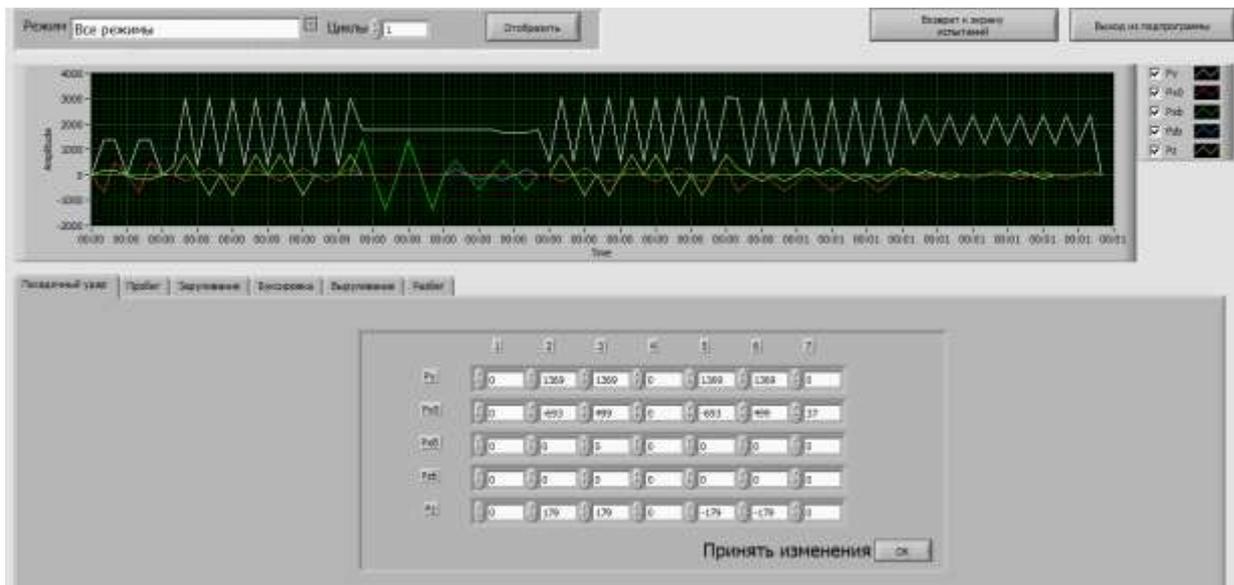


Рисунок 4.18 – Экран настройки циклограммы повторно-статических испытаний

На рис. 4.19 показана подпрограмма записи данных циклограммы нагружения

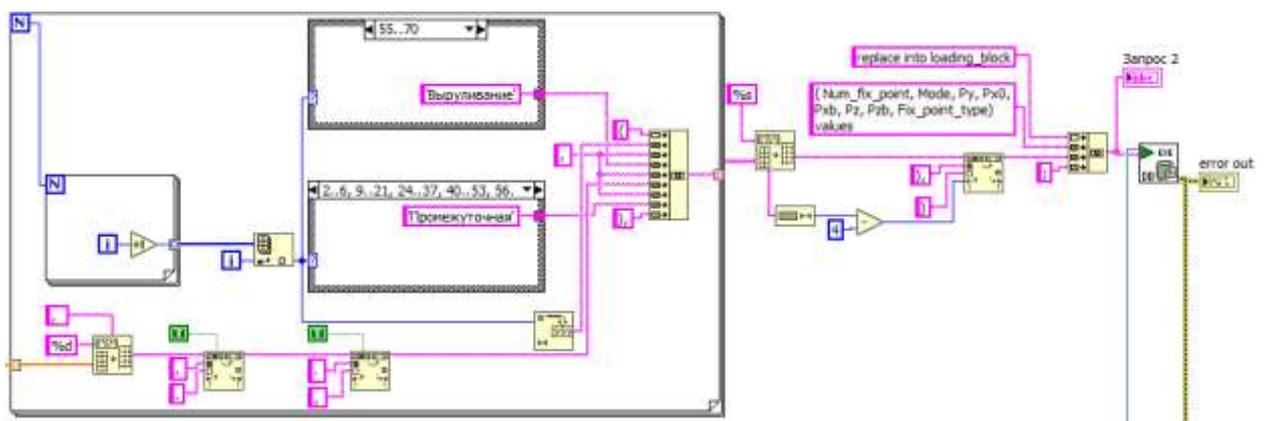


Рисунок 4.19 – Подпрограмма записи параметров циклограммы в базу данных с последующей передачей массивов по осям в контроллер

Num_fix_point	Mode	Px0	Pxb	Py	Pz	Pzb	Fix_point_type
1	Последний удар	0	0	0	0	0	Начало блока
2	Последний удар	-693	0	1369	0	179	Промежуточная
3	Последний удар	499	0	1369	0	179	Промежуточная
4	Последний удар	0	0	0	0	0	Промежуточная
5	Последний удар	-693	0	1369	0	-179	Промежуточная
6	Последний удар	499	0	1369	0	-179	Промежуточная
7	Последний удар	37	0	0	0	0	Конец блока
8	Пробег	0	0	371	0	0	Начало блока
9	Пробег	-263	0	3001	0	798	Промежуточная
10	Пробег	0	0	371	0	0	Промежуточная
11	Пробег	263	0	3001	0	-798	Промежуточная
12	Пробег	0	0	371	0	0	Промежуточная
13	Пробег	-263	0	3001	0	-798	Промежуточная
14	Пробег	0	0	371	0	0	Промежуточная
15	Пробег	263	0	3001	0	798	Промежуточная
16	Пробег	0	0	371	0	0	Промежуточная
17	Пробег	-263	0	3001	0	798	Промежуточная
18	Пробег	0	0	371	0	0	Промежуточная
19	Пробег	263	0	3001	0	-798	Промежуточная
20	Пробег	0	0	371	0	0	Промежуточная
21	Пробег	-263	0	3001	0	0	Промежуточная
22	Пробег	0	0	371	0	0	Конец блока
23	Заруливание	263	0	3001	0	798	Начало блока
24	Заруливание	0	1369	179	0	0	Промежуточная

Рисунок 4.20 – Результат записи параметров циклограммы в БД

Экран настройки ПИД-регулятора (рис 4.21)

Регулятор по усилию обеспечивает достижение заданного усилия, путём подачи суммы от форсированного значения заданного давления в полостях ГЦ, на контур регулирования по давлению, и сигнала с ПИД-регулятора.

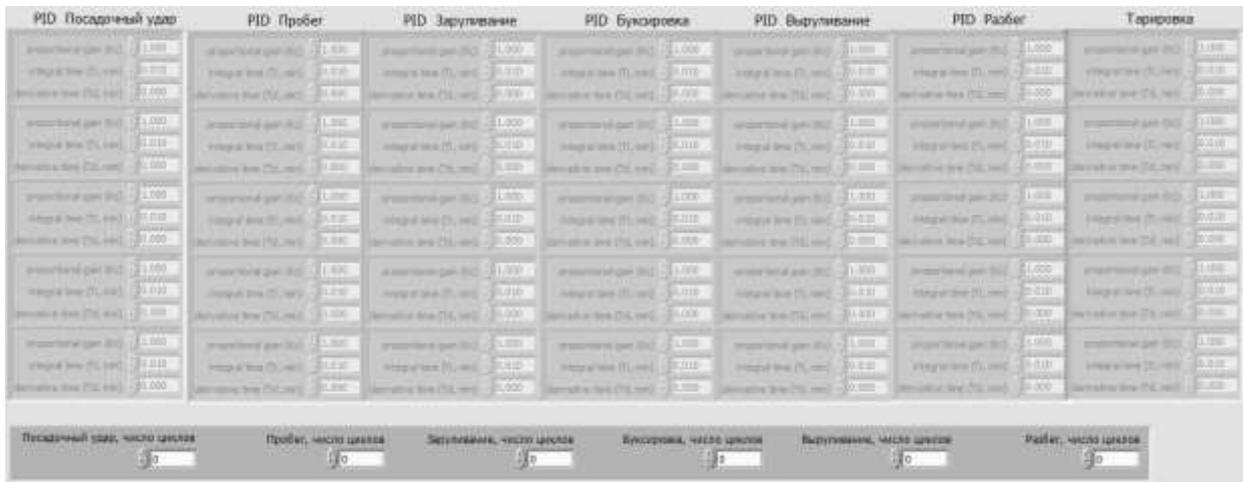


Рисунок 4.21 – Экран настройки ПИД-регулятора

ПИД-регулятор компенсирует ошибку в набранном усилии и тем самым обеспечивает точность и быстродействие системы. Т.к. ошибка по усилию зависит от множества нелинейных и нестационарных процессов в оборудовании стенда испытательного и опоры шасси, то требуется регулярная настройка параметров регулятора для обеспечения наилучших точности и быстродействия системы управления стендом.

Коэффициенты ПИД-регулятора для каждого режима по каждой оси, можно настраивать любым из способов, описанных в соответствующей литературе для данного типа регуляторов. Следует иметь в виду что П-часть регулятора обеспечивает быстродействие, но уменьшает запас устойчивости. И-часть регулятора позволяет устранять статическую ошибку, но может привести к перерегулированию.

Предельные значения с ПИД-регулятора по усилию могут влиять на достижение заданного усилия. Влияние этого фактора характеризуется не достижением заданного усилия, при одновременном задании значения с регулятора равным ограничению.

В случае изменения характеристик гидроцилиндров или замены датчиков усилия настройка регуляторов осуществляется опытным путём.

4.3.3 Реализация режима ресурсных испытаний

Данные экраны (рис. 4.22-4.23) позволяют управлять проведением ресурсных испытаний. Необходимо задать желаемое количество циклов, нажать кнопку «Старт». Также отображаются показания датчиков, секундомер уборки/выпуска и состояния конечных выключателей. При превышении температуры и давления выше 10% от номинальных происходит автоматический останов, при этом загорается индикатор «Отключено по превышению допустимых значений». Если показания соответствующих датчиков вернулись в допустимый диапазон, то можно повторно запустить испытания. Перед началом работы необходимо, откалибровать датчик положения в убранном положении, перейдя на экран соответствующих настроек.

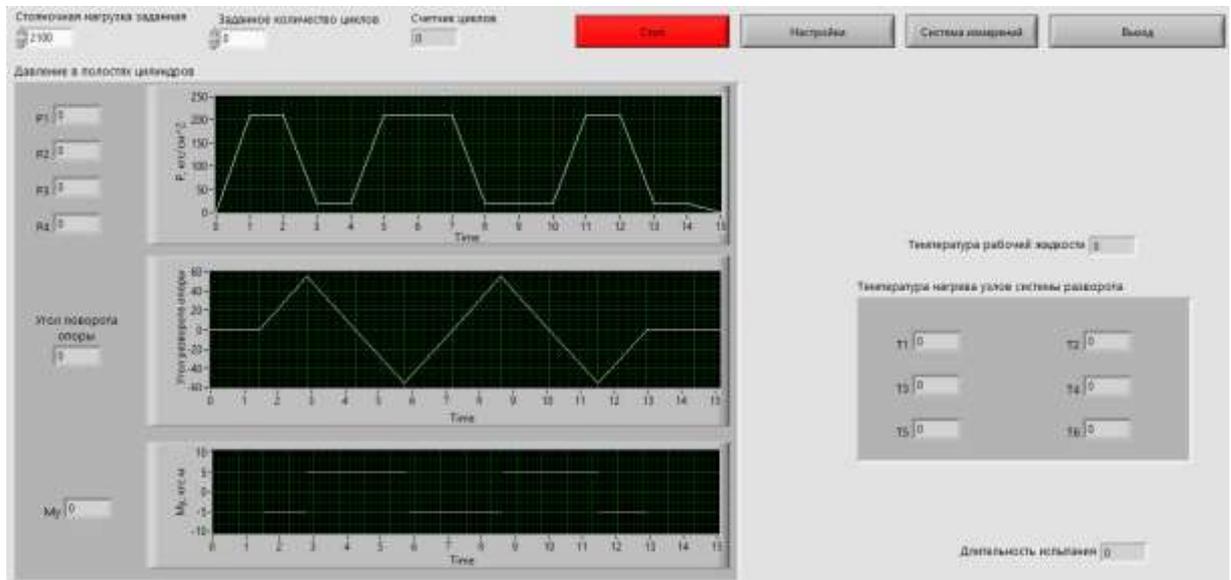


Рисунок 4.22 – Экран ресурсных испытаний на разворот



Рисунок 4.23 – Экран ресурсных испытаний уборка-выпуск опоры шасси

Вывод по главе 4

Разработанный и реализованный в среде LabVIEW алгоритм работы системы управления стенда для повторно-статических и ресурсных испытаний стоек шасси ЛВТС Ил-112В обеспечивает:

- измерение и отображение в реальном времени показаний с датчиков перемещений, усилий, температур, напряжений, давления, сигналов на выходе пропорциональных распределителей; формирование выборки в числовой форме и в виде графика;
- синхронную запись выбранных параметров через заданный интервал времени в диапазоне от 0,01 до 120 с;
- хранение данных измерений с тензостанции интерфейсов и аналоговых датчиков в формате, совместимом с базами данных MySQL;
- накопление результатов на протяжении всего периода испытаний в базе данных MySQL;
- возможность увеличения количества каналов измерений согласно количеству имеющихся резервных, путем подключения к ним измерительных устройств, редактирования информации о предельных значениях снимаемых показаний с аналоговых датчиков и параметров системы измерений относительно выделения принадлежности измерительного канала по типам испытаний;
- контроль внесения тарифовочных коэффициентов для датчиков перемещения и положения оси колеса;
- реализацию схемы нагружения при повторно-статических испытаниях с точностью 5% по каналу нагружения P_y ;
- время нарастания/спада каждого канала нагружения до 90% от величины изменения нагрузки – не менее 0,3 с;
- время выдержки в 3% коридоре каналов нагружения не менее 0,5 с;
- суммарное время выхода на точку нагружения согласно схеме нагружения – не более 1,5 с.

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
						68
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

5 ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ПО СТЕНДА

Одним из слабых мест программно-управляемых систем при высоком уровне надежности аппаратной составляющей является программное обеспечение (ПО). Так, в настоящее время около 90% отказов программно-управляемых систем обусловлено ошибками ПО. Но даже абсолютно надежное ПО не гарантирует абсолютной надежности всей системы.

Поэтому оценка надежности программно-управляемых систем включает:

1. Анализ надёжности ПО.
2. Анализ программной надежности системы.

Надёжность ПО – свойство ПО выполнять предписанные ему требования (характеризует качественное состояние программы).

Программную надёжность объекта – надежность совместной работы аппаратуры и программы (характеризует способность изделия выполнять заданные функции при условии, что программа будет находиться в том или другом состоянии).

Потребителя интересует программная надежность, но для её обеспечения необходима надежность ПО. Таким образом, надежность ПО – необходимое условие программной надежности.

Особенность надежности ПО состоит в ее увеличении с течением времени при наличии возможности исправления ошибок. Определим факторы, влияющих на надежность ПО [28, 40]:

1. Внутренние (скрытые).
2. Внешние.

К *внутренним ошибкам* относят ошибки проектирования при постановке задач и ошибки алгоритмизации, такие как:

– ошибки вычислений (связаны с некорректной записью или программированием математических выражений, а также неверным преобразование типов переменных);

– логические ошибки типа неверной передачи управления, неверного задания диапазона изменения параметра цикла, неверного условия и пр. являются причиной искажения алгоритма решения задачи;

– ошибки ввода-вывода (связаны с неправильными: управлением ввода-вывода, формированием выходных записей, определением размера записей и пр.);

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		69

- ошибки манипулирования данными (неверное определение числа элементов данных; неверные начальные значения, присвоенные данным; неверное указание длины операнда или имени переменной и др.);
- ошибки совместимости (связаны с несовместимостью разрабатываемого или применяемого ПО с операционной системой или другими прикладными программами);
- ошибки сопряжений (связаны с неверным взаимодействием ПО с другими программами или подпрограммами, с системными программами, устройствами ЭВМ).

Также к внутренним ошибкам относят ошибки на этапе программирования, недостаточное качество защиты.

К *внешним ошибкам* относят ошибки персонала при эксплуатации программы, сбои при работе модулей ЭВМ, сбои связи модулей аппаратуры.

Одним из методов анализа надежности ПО является использование математических моделей надежности. Последние делят на априорные и эмпирические модели надежности.

По *априорным ММ* оценивают показатели надежности ПО до начала его испытаний (тестирования), исходя из таких характеристик ПО, как его объем, сложность, а также характеристик процесса создания ПО (системы проектирования, условий и средств программирования).

Эмпирические ММ используют информацию, получаемую в процессе функционирования ПО (отладки, доработки, опытной и штатной эксплуатации), например, число и время отказов.

Далее будем использовать только эмпирические модели надежности. Если эти модели имеют в качестве одного из аргументов время, то они являются *непрерывными*; если время отсутствует, а как аргумент используется порядковый номер испытаний ПО, то такие эмпирические ММ являются *дискретными*.

Ознакомившись с рядом ММ надежности (непрерывные модели: экспоненциальная, модель Джелински-Моранды, модель Муссы, модель Шумана; дискретные модели: модель Миллса, модель Липова, модель Нильсона) оставим в поле зрения по одному представителю каждой группы (модель Миллса и экспоненциальную модель), поскольку именно они находят наибольшее применение в практике оценки надежности ПО, причем эти

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
						70
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

модели дают информацию о надежности ПО, и эти модели не повторяют, а дополняют друг друга.

5.1 Отладка ПО с использованием модели надежности Миллса

В виду того, что при отказе запуска или аварийного выключения отдельных модулей, предусмотрено своевременное завершение работы программы, наиболее вероятные ошибки, которые могут отслеживаться при тестировании имеют следующий характер:

- ошибки архитектуры и логики обработки входящих событий;
- некорректная обработка информации программой;
- некорректные действия пользователя.

Согласно модели Миллса перед началом тестирования программы необходимо внести некоторое количество известных ошибок. Модель исходит из допущения о равных вероятностях выявления искусственных и естественных ошибок при тестировании. Соответственно во время тестирования программы происходит сбор статистики об ошибках [37, 46].

Модель надежности Миллса имеет две формы:

1. Оценивает количество ошибок в ПО.
2. Определяет уровень доверия к модели надежности.

Первая часть модели Миллса, по которой оценивается первоначальное количество ошибок в ПО, определяется следующим выражением (5.1):

$$N = \frac{S \cdot n}{V}, \quad (5.1)$$

где N – первоначальное количество ошибок в программе;

S – количество искусственно внесенных ошибок в программу;

V – количество найденных к моменту оценки надежности ошибок, искусственно внесенных в программу;

n – количество найденных к моменту оценки надежности собственных ошибок, допущенных разработчиком.

Если обнаружены все искусственно внесенные в программу ошибки, можно воспользоваться второй частью модели Миллса, которая позволяет определить уровень значимости C (меру доверия к модели, доверительный уровень прогноза) по формуле (5.2)

$$C = \frac{S}{S + N + 1}. \quad (5.2)$$

Чтобы C можно было оценить на любом этапе тестирования (даже когда еще не обнаружены все внесенные ошибки (а этого часто имеет место при заранее определенном времени тестирования)), т.е. после того, как найдено j из S внесенных ошибок используют формулу (5.3)

$$C = \left(\frac{S}{j-1} \right) / \left(\frac{S+N+1}{N+j} \right), \quad (5.3)$$

где и числитель, и знаменатель (5.3) являются биномиальными коэффициентами вида (5.4)

$$\frac{a}{b} = \frac{a!}{b!(a-b)!}. \quad (5.4)$$

Поскольку использование модели Миллса требует «засорение» ПО искусственными ошибками, то следует рассмотреть искусственные наиболее простые в своей реализации ошибки. К ним отнесем некорректный ввод данных пользователем в систему по каналам измерения в формате, несовместимом для записи в БД, то есть содержащем символы формирования запросов на чтение/запись, которые уже учтены при составлении блоков подпрограммы формирования запросов.

При формировании структуры запроса на запись данных учитывается синтаксис MySQL посредством:

- ограничения каждого отдельного элемента одинарными апострофами, кавычками;
- преобразования двумерных массивов данных в таблицу данных типа *String*;
- ограничения начала / окончания строк данных скобками согласно синтаксису MySQL;
- при сформированном тексте запроса выставляется условный знак завершения запроса «;».

Подпрограмма записи введенной с экрана информации представлена на рисунке 5.1. Подпрограмма спроектирована с учетом возможности отслеживания ошибок при выполнении запроса в MySQL (блок «*ErrorOut*»).

Произведем тестирование программы на поиск ошибок с учетом специально вносимых 15-ти пользовательских ошибок.

Из рис. 5.2 видно, что в ходе тестирования программы обнаружены две собственные ошибки:

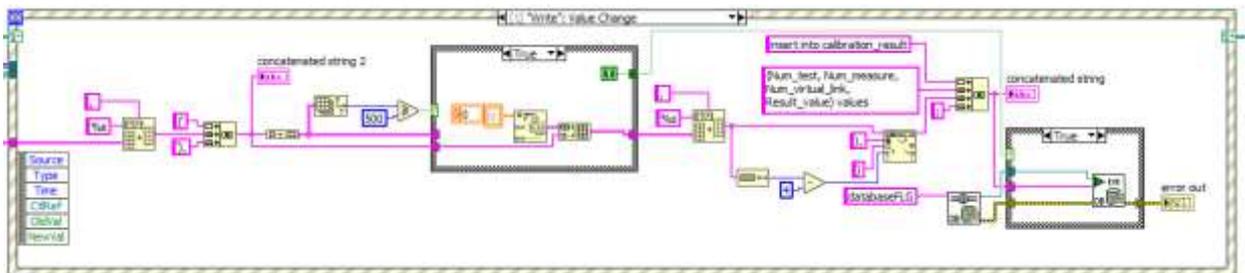


Рисунок 5.1 – Запись в БД введенной пользователем информации с экрана

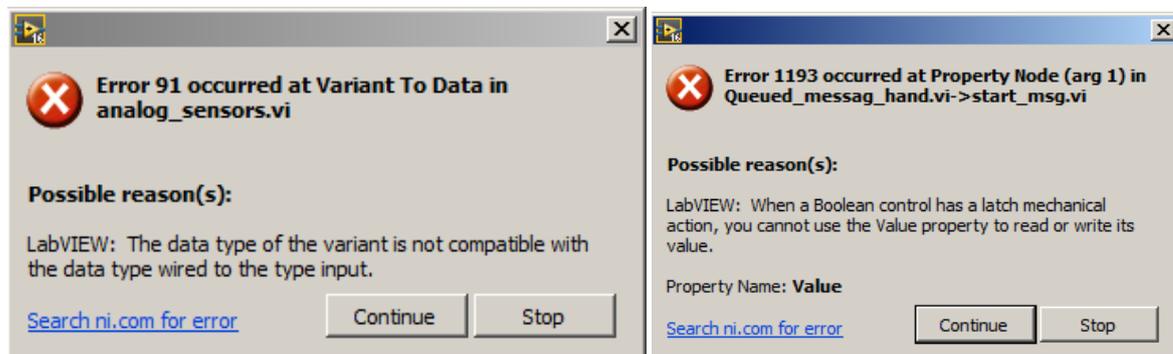


Рисунок 5.2 – Естественные ошибки программы:

- а) нарушена логика передачи динамических данных между экранами,
- б) ошибочное задание свойств Boolean-переменной

1) ошибка логики передачи данных между подпрограммами: в подпрограмме отражения и регистрации показаний аналоговых датчиков компонент системы сообщений – динамические сообщения не видит источник формирования сообщений программы;

2) ошибка настройки свойств кнопки выхода из приложения: в подпрограмме присутствует попытка присвоения кнопке значения сигнала ненадлежащего типа при вызове корректного назначения в другом месте.

Из искусственно введенных 15-ти ошибок некорректного ввода данных, возникающих при последующем формировании запроса MySQL, но не приводящих к отказу работы программы, программой обнаружено 14 ошибок.

Таким образом, согласно (5.1)

$$N = \frac{15 \cdot 2}{14} = 2,$$

т.е. разработанное ПО содержало 2 ошибки.

В свою очередь доверительный уровень прогноза согласно (5.3) и (5.4) составит

$$C = \left(\frac{15}{14-1} \right) / \left(\frac{15+2+1}{14+2} \right) = \frac{15! \cdot 2! \cdot 16!}{13! \cdot 2! \cdot 18!} = 0,686.$$

Таким образом, с помощью модели Миллса мы получили критерий окончания тестирования: тестирование ПО следует продолжать до тех пор, пока не обнаружим 2 ошибки. Все обнаруживаемые ошибки подлежат устранению, но это не значит, что по окончании этой работы мы обеспечим максимальную вероятность безотказной работы (ВБР) разработанного ПО ($P_{\text{по}}=1$).

Дело в том, что $P_{\text{по}} < 1$, так как $C < 1$. А как именно выглядит функция ВБР разработанного ПО позволяет определить экспоненциальная модель надежности. Тем более, что разработанное ПО – лишь часть программного комплекса для ресурсных и повторно-статических испытаний стоек шасси самолета. Надежность всего программного комплекса стенда можно оценить с использованием теории графов (аппарата анализа надежности восстанавливаемых систем). Но для этого нужна информация об интенсивности отказов ПО, величина которой также определяется экспоненциальной моделью надежности ПО.

Примечание к модели Миллса. Величина $C=0,686 \ll 0,98$. При необходимости можно увеличить меру доверия к модели, например, до 0,98. Тогда необходимо согласно (5.2) увеличить до 147-ти число вносимых в ПО перед тестированием искусственных ошибок. Далее следует повторное тестирование с оценкой по (5.1) величины N и продолжение тестирования до обнаружения и устранения всех N ошибок.

5.2 Оценка надежности разработанного ПО по экспоненциальной модели

Основным допущением данной модели надежности является предположение об экспоненциальном характере изменения числа ошибок в программе во времени. То есть число ошибок в ПО в каждый момент времени имеет пуассоновское распределение, временной интервал между нахождением двух последовательно обнаруженных ошибок распределен по экспоненциальному закону [25]. Интенсивность отказов пропорциональна числу еще не обнаруженных ошибок. Таким образом, с учетом указанных предположений число оставшихся ошибок определяется выражением (5.5) [38]

$$m_0(\tau) = M - m(\tau), \quad (5.5)$$

где M – число ошибок перед началом проведения тестирования;

$m_0(\tau)$ – число исправленных ошибок в ходе тестирования;

$m(\tau)$ – число оставшихся ошибок.

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		74

Интенсивность ошибок описывается следующим образом (5.6):

$$\lambda(\tau) = C m_0(\tau), \quad (5.6)$$

где C – коэффициент пропорциональности;

τ – длительность тестирования.

Средняя наработка на отказ определяется выражением (5.7)

$$T = \frac{1}{C \left(\frac{M}{I} - \varepsilon_u(\tau) \right)}, \quad (5.7)$$

где I – количество команд программы;

ε_u – количество исправленных ошибок в ходе тестирования программы.

Вероятность безотказной работы системы оценивается по формуле

$$P(t, \tau) = \exp \{ -C(M/I - \varepsilon_u(\tau))t \}. \quad (5.8)$$

Примем количество команд в программе согласно анализатору используемых блоков VI Metrics 4448. Тестирование проводилось в течение 524 часов: за первые 320 часов обнаружены 3 ошибки, за последующие 204 часа – 2 ошибки.

Рассчитаем по (5.6) интенсивность отказов ПО

$$\lambda(\tau_1) = \frac{\varepsilon_{u1}}{\tau_1} = \frac{3}{320} = 9,375 \cdot 10^{-3}; \quad \lambda(\tau_2) = \frac{\varepsilon_{u2}}{\tau_2} = \frac{2}{204} = 9,804 \cdot 10^{-3}.$$

Экспериментальное количество ошибок

$$M = I \left(\frac{\lambda(\tau_1)}{\lambda(\tau_2)} \cdot \varepsilon_{u1}(\tau_1) - \varepsilon_{u2}(\tau_2) \right) / \left(\frac{\lambda(\tau_1)}{\lambda(\tau_2)} - 1 \right) = 4448 \cdot 10^{-4} \left(\frac{9,375}{9,804} \cdot 6,745 - 4,496 \right) / \left(\frac{9,375}{9,804} - 1 \right) = 24.$$

Оценим коэффициент пропорциональности выполнения команд ЭВМ

$$C = \frac{\lambda(\tau_1)}{\frac{M}{I} - \varepsilon_{u1}(\tau_1)} = \frac{9,375 \cdot 10^{-3}}{\frac{24}{4448} - 6,745 \cdot 10^{-4}} = 1,908.$$

Таким образом, согласно (5.8) вероятность безотказной работы разработанного ПО принимает вид

$$P(t) = \exp \{ -1,908(5,396 \cdot 10^{-3} - 6,745 \cdot 10^{-4})t \} = e^{-9,37510^{-3}t}.$$

Величина интенсивности отказов ПО $\lambda = 9,375 \cdot 10^{-3}$ (ч⁻¹) далее будет использована при оценке надежности программного обеспечения автоматизированного комплекса для ресурсных и повторно-статических испытаний стоек шасси самолета с использованием аппарата теории графов.

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		75

5.3 Анализ надежности ПО комплекса

ПО комплекса включает в себя четыре составляющие:

- 1) ПО Recorder от Mera – регистратор и обработчик данных с тензостанции;
- 2) программа контроллера;
- 3) программа визуализации и управления потоками данных с контроллера, тензостанции и базы данных, написанная на LabVIEW;
- 4) ПО СУБД MySQL, позволяющее регистрировать данные о испытаниях и их параметрах испытательного стенда.

При анализе надежности комплекса программ имеет место допущение об экспоненциальном распределении наработки между отказами и времени восстановления, поскольку отказы всех составляющих данного комплекса ПО носят внезапный характер (в отличие от аппаратной части системы, где кроме внезапных отказов могут иметь место постепенные отказы, связанные со старением и износом элементов). Экспоненциальное распределение наработки позволяет описать процесс без предыстории и описать функционирование системы на участке нормальной эксплуатации. В виду применения экспоненциального распределения при описании процесса восстановления при одинарных независимых отказах модулей исследуемой системы можно представить процессы системы марковскими.

Таким образом, при расчете надежности имеет место обращение к графам состояний и соответствующей графу системе дифференциальных уравнений для вероятностей состояний (уравнениям Колмогорова-Чепмена).

Представим модель комплекса ПО в виде множества состояний системы S_1, S_2, \dots, S_n , в которых система может находиться при отказе и восстановлении отдельных модулей. При составлении модели процессов примем следующие допущения:

- время начала восстановления отказавших элементов совпадает с моментом их отказа;
- отсутствуют ограничения на число восстановлений элементов.

Для составления графа состояний комплекса ПО введем следующие обозначения: S_i – состояние системы; μ_i – интенсивности восстановления элементов комплекса ПО, λ_i – интенсивности отказов элементов комплекса ПО.

Опишем возможные состояния программного комплекса стенда:

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		76

0 – работоспособны все компоненты;

1 – комплекс ПО работает при отказе ПО Recorder с частичным функционалом;

2 – при отказе ПО контроллера система не работоспособна;

3 – при отказе ПО визуализации система не работоспособна;

4 – комплекс ПО работает при отказе СУБД MySQL с частичным функционалом;

12 – при отказе ПО Recorder и программы контроллера система не работоспособна;

13 – при отказе ПО Recorder и программы визуализации система не работоспособна;

14, 41 – при отказе ПО Recorder и СУБД MySQL система не работоспособна в виду значительной ограниченности в функционале;

42 – при отказе СУБД MySQL и программы контроллера система не работоспособна;

43 – при отказе СУБД MySQL и программы визуализации система не работоспособна.

Все элементы данной системы являются восстанавливаемыми, однако в случае отказа СУБД и ПО Recorder для тензостанции приоритетнее восстановление именно Recorder ввиду возможности регистрации показаний датчиков тензостанции логированием, что позволит производить регистрацию и запись минимума необходимых параметров испытаний пусть и в различных форматах.

Математическая модель системы в виде графа состояний представлена на рисунке 5.2.

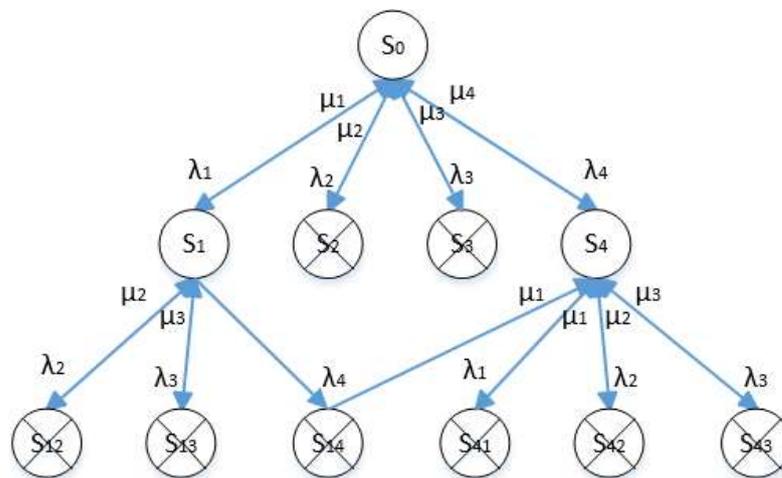


Рисунок 5.2 – Граф состояний комплекса ПО

Запишем по графу состояний комплекса ПО (см. рис. 5.1) уравнения Колмогорова-Чепмена

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_0}{dt} = \mu_1 P_1 + \mu_2 P_2 + \mu_3 P_3 + \mu_4 P_4 - P_0(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4); \\ \frac{dP_1}{dt} = -\mu_1 P_0 + \mu_2 P_{12} + \mu_3 P_{13} + P_0 \lambda_1 - P_{12} \lambda_2 - P_{13} \lambda_3 - P_{14} \lambda_4; \\ \frac{dP_2}{dt} = -\mu_2 P_2 + P_0 \lambda_1; \\ \frac{dP_3}{dt} = -\mu_3 P_3 + P_0 \lambda_3; \\ \frac{dP_4}{dt} = -\mu_4 P_0 + \mu_2 P_{42} + \mu_3 P_{43} + \mu_1 (P_{14} + P_{41}) + P_0 \lambda_4 - P_{41} \lambda_1 - P_{42} \lambda_2 - P_{43} \lambda_3; \\ \frac{dP_{12}}{dt} = -\mu_2 P_{12} + P_1 \lambda_2; \\ \frac{dP_{13}}{dt} = -\mu_3 P_{13} + P_1 \lambda_3; \\ \frac{dP_{14}}{dt} = P_1 \lambda_4 - \mu_1 P_{14}; \\ \frac{dP_{41}}{dt} = -\mu_1 P_{41} + P_4 \lambda_1; \\ \frac{dP_{42}}{dt} = -\mu_2 P_{42} + P_4 \lambda_2; \\ \frac{dP_{43}}{dt} = -\mu_3 P_{43} + P_4 \lambda_3. \end{array} \right. \quad (5.9)$$

Уравнения Колмогорова-Чепмена (5.9) будем решать алгебраическим методом. Поскольку не все уравнения (5.9) независимы, то 5-е уравнение (5.9) заменим на уравнение (5.10), соответствующее полной группе событий, образуемой состояниями S_i :

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_{12} + P_{13} + P_{14} + P_{41} + P_{42} + P_{43} = 1. \quad (5.10)$$

Для расчета вероятности безотказной работы программного комплекса в целом необходимо знать интенсивности отказов λ_i и интенсивности восстановления μ_i отдельных элементов комплекса ПО. Определим эти величины, отталкиваясь от известных из опыта эксплуатации значений T_0 и T_B (табл. 5.1) и формул расчета интенсивности отказов и интенсивности восстановления элементов

$$\lambda_i = \frac{1}{T_0}, \quad \mu_i = \frac{1}{T_B},$$

где T_B – среднее время восстановления работоспособности программы (в данном случае рассматривается перезагрузка соответствующего компонента или его запуск из программы);

T_0 – среднее время безотказной работы программы.

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		78

Таблица 5.1 – Показатели надежности компонентов комплекса ПО

Показатель надежности	ПО контроллера	Визуализация	СУБД	ПО Recorder
Среднее время восстановления $T_{в}$, ч	2	16	0,12	0,083
Среднее время безотказной работы T_0 , ч	35000	20000	5000	7000
Интенсивность отказов, $ч^{-1}$	$2,857 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$20 \cdot 10^{-5}$	$14,2 \cdot 10^{-5}$
Интенсивность восстановления, $ч^{-1}$	0,5	0,0625	8,33	12,04

С учетом данных табл. 5.1 уравнения (5.9) принимают вид

$$\begin{cases} P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_{12} + P_{13} + P_{14} + P_{41} + P_{42} + P_{43} = 1; \\ 0 = -12,04P_0 + 0,5P_{12} + 0,625P_{13} + 10^{-5}(14,2P_0 - 2,86P_{12} - 5P_{13} - 20P_{14}); \\ 0 = -0,5P_2 + 14,2 \cdot 10^{-5}P; \\ 0 = -0,625P_3 + 5P_0 \cdot 10^{-5}; \\ 0 = -8,33P_0 + 0,5P_{42} + 0,625P_{43} + 12,04(P_{14} + P_{41}) + 10^{-5}(20P_0 - 14,2P_{41} - 2,86P_{42} - 5P_{43}); \\ 0 = -0,5P_{12} + 2,86 \cdot 10^{-5}P_1; \\ 0 = -0,625P_{13} + 5P_1 \cdot 10^{-5}; \\ 0 = 20 \cdot 10^{-5}P_1 - 12,04P_{14}; \\ 0 = -12,04P_{41} + 14,2 \cdot 10^{-5}P; \\ 0 = -0,5P_{42} + 2,86 \cdot 10^{-5}P_4; \\ 0 = -0,625P_{43} + 5P_4 \cdot 10^{-5}. \end{cases}$$

а решение этой системы

$$P_0 = 2,64 \cdot 10^{-5}, P_1 = 0,73, P_2 = 7,0 \cdot 10^{-9}, P_3 = 1,97 \cdot 10^{-8}, P_4 = 0,26,$$

$$P_{12} = 4,18 \cdot 10^{-5}, P_{13} = 5,85 \cdot 10^{-4}, P_{14} = 6,28 \cdot 10^{-5},$$

$$P_{41} = 1,63 \cdot 10^{-5}, P_{42} = 1,53 \cdot 10^{-5}, P_{43} = 2,14 \cdot 10^{-4}.$$

Рассчитаем коэффициент готовности ПО автоматизированного комплекса для ресурсных и повторно-статических испытаний стоек шасси самолета

$$K_r = P_1 + P_2 + P_0 = 2,64 \cdot 10^{-5} + 0,73 + 0,26 = 0,999.$$

Данное значение коэффициента соответствует ТЗ.

Выводы по главе 5

1. Оценка надежности разработанного ПО с использованием модели Миллса при искусственно внесенных 15-ти ошибках, из которых 14 были обнаружены при тестировании, подтвердила наличие в разработанном ПО

2-х ошибок с доверительным уровнем прогноза $C=0,686$, что дало основание для продолжения тестирования до обнаружения 2-х ошибок и их устранения. При необходимости увеличения меры доверия к модели, например, до 0,98 требуется увеличить число внесенных в ПО ошибок до 147-ти, что недопустимо увеличит время тестирования.

2. При тестировании разработанного программного обеспечения системы управления комплексом ресурсных и повторно-статических испытаний стоек шасси использовался OPC Server ПО Recorder, получающий сигналы с тензостанции. Использование экспоненциальной модели надежности применительно к данным тестирования (время тестирования – 524 ч; за первые 320 ч обнаружены 3 ошибки, за последующие 204 ч – 2 ошибки). позволило оценить интенсивность отказов разработанного ПО: $\lambda = 9,375 \cdot 10^{-3} \text{ (ч}^{-1}\text{)}$.

3. Коэффициент готовности ПО автоматизированного комплекса для ресурсных и повторно-статических испытаний, частью которого является разработанное ПО, составляет 0,999, что соответствует требованиям технического задания.

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
						80
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По результатам ознакомления с принципами работы комплекса для испытаний стоек передней опоры шасси легкого военно-транспортного самолета (ЛВТС) Ил-112В определены:

а. управляющие сигналы системы нагружения: для ресурсных испытаний – давление в полостях нагружающих гидроцилиндров, для повторно-статических испытаний управляющий сигнал формируется посредством задания пропорциональными гидрораспределителями давления в полостях нагружающих гидроцилиндров.

б. контролируемые параметры: углы уборки-выпуска, давления в полостях нагружающих гидроцилиндров, напряжения конструкций опоры, температура в узлах установки датчиков контроля температуры, величины воспроизводимых системой нагружений.

2. Алгоритм управления с рабочей станции процессом повторно-статических и ресурсных испытаний стоек шасси ЛВТС имеет 3-х уровневую архитектуру: 0-й уровень отвечает за запуск программы и ее подпрограмм в асинхронном режиме, формирует логику обработки данных, и частичную обработку пользовательских сообщений; 1-й уровень реализован как информационно управляющий параметрами системы измерений и отвечает в том числе за своевременную запись регистрируемых данных в БД MySQL; 2-й уровень отвечает за управление параметрами режимов испытаний, формирование сигнала задания системы нагружения стенда.

3. Разработанный *алгоритм обработки данных измерений* обеспечивает:

– отображение в реальном времени показаний с датчиков перемещений, усилий, температур, напряжений, давления, выходных сигналов пропорциональных распределителей;

– формирование выборки в числовой форме и в виде графика;

– синхронную запись выбранных параметров через заданный интервал времени в диапазоне от 0,01 до 120 с;

– хранение данных измерений с тензостанции интерфейсов и аналоговых датчиков и накопление результатов на протяжении всего периода испытаний в базе данных MySQL;

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		81

– возможность увеличения количества каналов измерений согласно количеству имеющихся резервных, путем подключения к ним измерительных устройств, редактирования информации о предельных значениях снимаемых показаний с аналоговых датчиков и параметров системы измерений относительно выделения принадлежности измерительного канала по типам испытаний;

– контроль внесения тарифовочных коэффициентов для датчиков перемещения и положения оси колеса.

4. Получена математическая модель системы нагружения испытательного комплекса, базирующаяся на работах Белоусова А.И., Расторгуева Г.И., Федоровой О.Р., Кочергина В.И., Куликова Е.Н., Лапердина И.А. и доработанная с учетом упрощающих допущений применительно к учету податливости объекта испытаний, соответственно о регистрируемом датчиком усилия, уравнению движения золотника пропорционального гидрораспределителя при сохранении адекватности модели.

5. По результатам имитационного моделирования системы нагружения испытательного комплекса рекомендованы две модели адаптивных регуляторов: нечеткий ПИД-регулятор, реализующий нагружение с точностью до 0,03%, и нейронный регулятор, реализующий усилия с точностью до 3,89%, что удовлетворяет условиям ТЗ.

6. Разработанный алгоритм реализации повторно-статических испытаний обеспечивает:

- реализацию схемы нагружения с точностью 5% по каналу нагружения P_y ;
- время нарастания/спада каждого канала нагружения до 90% от величины изменения нагрузки – не менее 0,3 с;
- время выдержки в 3% коридоре каналов нагружения не менее 0,5 с;
- суммарное время выхода на точку нагружения согласно схеме нагружения – не более 1,5 с.

7. Реализованный в среде графического программирования LabVIEW алгоритм управления с рабочей станции процессом повторно-статических и ресурсных испытаний стоек шасси легкого военно-транспортного самолета (ЛВТС) Ил-112В, позволяет по результатам измерения параметров испытаний (с протоколированием) и обработки полученных в ходе испытаний данных выявить оценить фактическую прочность опоры и узлов

						09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			82

ее крепления путем нагружения конструкции до разрушения, определения усталостной долговечности силовых элементов конструкции опоры, поэтапного подтверждения ресурса по результатам испытаний.

8. Модель Миллса при внесении в ПО 15-ти искусственных ошибок, из которых 14 были обнаружены при тестировании ПО с использованием OPC Server ПО Recorder (получает сигналы с тензостанции посредством ПО Mera) подтвердила наличие в разработанном ПО 2-х собственных ошибок с доверительным уровнем прогноза $C=0,686$, что позволило при продолжении тестирования обнаружить ошибки и устранить. При необходимости увеличения меры доверия к модели, например, до 0,98 потребует увеличения числа внесенных в ПО ошибок до 147-ти, что недопустимо увеличит время тестирования.

9. Использование экспоненциальной модели надежности применительно к данным тестирования (время тестирования – 524 ч; за первые 320 ч обнаружены 3 ошибки, за последующие 204 ч – 2 ошибки) и решение системы уравнений Колмогорова-Чепмена показало, что коэффициент готовности ПО автоматизированного комплекса для ресурсных и повторно-статических испытаний, частью которого является разработанное ПО, составляет 0,999, что соответствует требованиям технического задания.

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		83

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бандорин Д.А., Бадугин Д.А., Бычков Е.В., Мельников В.Л., Соколов В.В., Титов В.Г. Автоматизация испытаний гидроцилиндров, как средство повышения эффективности технологического процесса. // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – №3 (100). – С. 200-206.
2. Башта Т.М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика. – М.: Машиностроение. – 1972. – 320 с.
3. Белоусов А.И. Влияние упругости конструкции летательного аппарата на воспроизведение переменных нагрузок при прочностных испытаниях: автореферат дис. ... канд. техн. наук / А.И. Белоусов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 20 с.
4. Белоусов А.И., Расторгуев Г.И., Федотова О.Р. Определение оптимальных параметров системы управления нагружением при ресурсных испытаниях летательных аппаратов с использованием математической модели // Вестник СибГАУ. – 2008. – №2. – С. 112-115.
5. Бошляков А.А., Рубцов В.И. Проектирование нечеткого регулятора следящей системы. // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 8. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/robot/936.html>
6. Бураков М.В. Нечеткие регуляторы: учеб. Пособие / М.В. Бураков – СПб.: ГУАП. – 2010. – 237 с.
7. Бураков М.Н., Коновалов А.С., Яковец О.Б. Эволюционный синтез нечетких регуляторов // Информационно-управляющие системы. – 2015. – № 79. – С. 28-33.
8. Бураков М.В., Шишлаков В.Ф. Модифицированный предиктор Смита для объекта с переменной задержкой // Труды СПИИРАН. – 2017. - № 2(51). – С. 60-77.
9. Гиматдиев А.Г., Быстров Н.Д. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. / А.Г. Гиматдиев, Н.Д. Быстров, 2010 – 178 с.
10. Глубокий В.И. Расчет гидравлических приводов станочного оборудования: Учебно-метод. пособие по курсовому проектированию по дисц. «Гидропривод и гидропневмоавтоматика» / В.И. Глубокий. – Мн.: БНТУ, 2005. – 80 с.

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		84

11. Гостев В.И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 416с.

12. Еременко Ю.И., Полещенко Д.А., Глущенко А.И., Ярмуратий Д.Ю. Об интеллектуальной адаптации параметров ПИД-регулятора для снижения энергопотребления управляемого процесса. / Научные ведомости Белгородского государственного университета // Экономика. Информатика. – № 22 (165). – 2013. – С.

13. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – С. 165.

14. Заявка 1931510 Российская федерация, МПК G01M 17/04. Гидросистема для нагружения авиационных конструкций при прочностных испытаниях / Бураков М.Л., Колобанов В.Ю., Милов А.Б - № 1931510/40-23; заявл. 15.06.73; опубл. 28.01.76.

15. Заявка 1931510 Российская федерация, МПК G01M 17/04. Стенд для испытания на выносливость системы выпуска-уборки шасси летательного аппарата / Бураков М.Л., Колобанов В.Ю., Милов А.Б – № 1931510/40-23; заявл. 15.06.73; опубл. 28.01.76.

16. Исследование влияния динамических свойств летательного аппарата на устойчивость канала нагружения / О.Р. Федорова, Г.И. Расторгуев, В.Л. Присекин, А.И. Белоусов // журнал «Вестник МАИ», – Том 16, №3. – 2009. – с. 147-149.

17. Конструкция и прочность самолетов и вертолетов. Под ред. К.Д. Миртов, Ж.С. Черненко. Изд-во «Транспорт», 1972 г., 440 с.

18. Корнеев В.М., Конструкции и основы эксплуатации летательных аппаратов: конспект лекций / В.М. Корнеев. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2009. – 130 с.

19. Кочергин В.И. Средства автоматизированного проектирования процессов управления ресурсными испытаниями механических приводов летательных аппаратов // Авторефер. Ульяновский государственный технический университет, 2008 г.

20. Кудинов Ю.И., Келина А.Ю. Упрощенный метод определения параметров нечетких ПИД регуляторов // Ю.И. Кудинов, А.Ю. Келина / Мехатроника, автоматизация, управление. – №1. – 2013. – С. 12-22.

21. Кудинов Ю.И., Келина А.Ю., Дургарян И.С., Пащенко А.Ф.,

						09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			85

Белова О.Н. Определение оптимальных параметров и структуры нечеткого ПД-регулятора / Информатика и системы управления / Интеллектуальный системы. - № 14 (39). – 2014. – С. 88-98.

22. Кудинов Ю.И., Колесников В.А., Дургарян И.С., Пащенко А.Ф., Белова О.Н. Построение и настройка нечеткого адаптивного ПИД-регулятора // Информатика и системы управления. – 2016. - № 3 (49). – С. 86-96.

23. Кузнецов Б. И. Синтез нейросетевого регулятора NARMA-L2 controller для системы наведения и стабилизации / Б. И. Кузнецов, Т. Е. Василец, А. А. Варфоломеев // Электротехника и Электромеханика = Electrical engineering & Electromechanics. – 2011. – № 4. – С. 41-46

24. Куликов Е.Н. Совершенствование методов и средств натуральных ресурсных испытаний конструкций пассажирских самолетов: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2014. – 191 с.

25. Коваленко В.Н. Надежность устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: метод. указания / В.Н. Коваленко. – Екатеринбург :УрГУПС, 2015. – 94 с.

26. Лапердин И.А., Юркевич В.Д. Экспериментальное исследование динамических свойств канала нагружения стенда для прочностных испытаний авиационных конструкций. // – Научный вестник НГТУ том 62 (Авиационная и ракетно-космическая техника), №1, 2016, с. 168-180.

27. Леоленков, А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоленков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.

28. Липаев В.В. Функциональная безопасность программных средств. – М.: СИНЕГ, 2004. – 340.

29. Моделирование процесса нагружения упругой инерционной конструкции с использованием приложения Simulink конструкции летательного аппарата / А.И. Белоусов, Г.И. Расторгуев, С.Д. Комарова // Научный вестник НГТУ. – Новосибирск, 2011. – С. 59-68.

30. Нечеткие регуляторы и системы управления. Ю. И. Кудинов, И. Н. Дорохов, Ф. Ф. Пащенко. – Проблемы управления, 2004, № 3, 2–14.

31. Опыт применения автоматизированной системы нагружения при статических и ресурсных испытаниях конструкций ракетной и космической техники / Е.В. Васюков, А.И. Гайворонский, Д.А. Данилова, К.В. Жигачов,

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		86

А.В. Стародумова, А.С. Тимошин // Космонавтика и ракетостроение. – 2014. – № 3 (76). – С. 29-32.

32. Организация контроля и испытаний продукции: уч. пособие / Петухова Л.В, Горюнова С.М; Мин-во образ. и науки России, – Казань: изд-во КНИТУ, 2013. – 112 с.

33. Панов В.М., Степанов А.И. Автоматизированное проектирование гидро- и пневмоприводов. Конструкторское проектирование. Уч. пособие / МАДИ. – М., 1987. – 118с.

34. Патент 1658718 Российская федерация, МПК G01M 5/00. Стенд для испытаний опоры шасси самолета. / Сумароков В.А., Гончар Е.А. – № 4716861/23; заявл. 07.07.1989; опубл. 27.01.1995.

35. Патент 142191 Российская федерация, МПК G01M 9/00, B60V 3/06. Стенд для динамических испытаний модели шасси транспортного средства. / Долгополов А.А. – дата публикации 10.05.2005 г.

36. Патент 488109 СССР, МПК G01M 17/04. Стенд для испытания на выносливость системы выпуска-уборки летательного аппарата. / Бураков М.Л., Колобанов В.Ю., Милов А.Б., Тараканов С.Г. - № 1931510; заявл. 15.06.1973; опубл. 15.10.1975.

37. Плаксин М.А. Тестирование и отладка программ для профессионалов будущих и настоящих [Электронный ресурс] / М.А. Плаксин. – 2-е изд. (эл.). – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 167 с.

38. Половко А. М. Основы теории надежности – 2-е изд., перераб. и доп./ А. М. Половко, С. В. Гуров – СПб: БХВ-Петербург, 2008. – 704 с.

39. Свидетельство о регистрации программы ЭВМ 2014610351. Программа для информационно-измерительной системы прочностных испытаний элементов конструкции летательных аппаратов. / Егоров А.А., Сурков Д.А., Иосифов И.К. – № 2013660460, заявл. 14.11.2013, опубл. 20.02.2014.

40. Павловская О.О. Статические методы оценки надежности программного обеспечения. О.О. Павловская / Вестник ЮУрГУ. Серия: Коомпьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2009. №26 (159). С. 35-37.

41. Плаксин М.А. Тестирование и отладка программ – для профессионалов будущих и настоящих. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007.

42. Подпорин С. А. Использование нейро-нечетких контроллеров в

					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
						87
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

системах управления движением морских судов / С. А. Подпорин // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. –2012. – Вип. 4. – С. 181-187.

43. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. – М.: Машиностроение, 1976. – 424 с.

44. Рубанов, В. Г. Интеллектуальные системы автоматического управления. Нечеткое управление в технических системах: учебное пособие / В. Г. Рубанов, А. Г. Филатов; БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2-е изд., стер.– Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2010. – 170 с.

45. Руденко О.Г., Бодянский Е.В. Основы теории искусственных нейронных сетей. – Харьков: ТЕЛТЕХ, 2002. – 317 с.

46. Таликов, Н.Д. Легкий военно-транспортный самолет ИЛ-112В / Н.Д. Таликов // Авиация и космонавтика. – 2010. – №05. – С. 10-13.

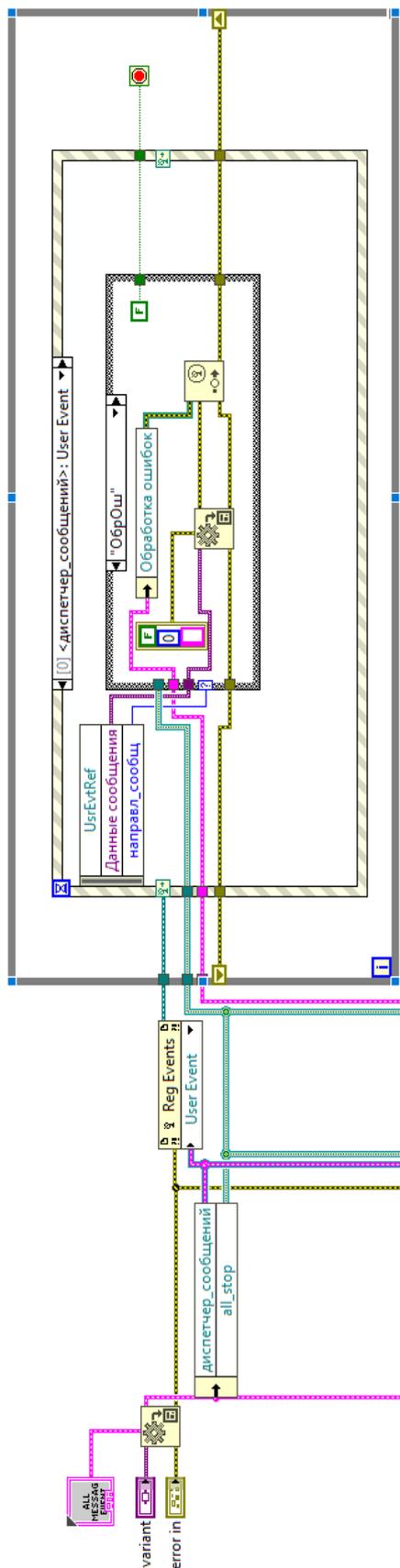
47. Типикина А.П., Певцова Л.С. Оценка программной надежности микропроцессорных релейных защит // Интернет-журнал «Науковедение» Том 7, №2 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/74TVN215.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/74TVN215

48. Федоров Д.С., Буданов С.А. Комплекс стендовых ресурсных испытаний натурной конструкции самолета-штурмовика // Труды МАИ. – 2014. – № 74. – С. 1-6.

49. Федорова, О.Р. Исследование влияния динамических свойств летательного аппарата на процесс приложения нагрузок при ресурсных испытаниях: автореферат дис. ... канд. техн. наук / О.Р. Федорова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 19 с.

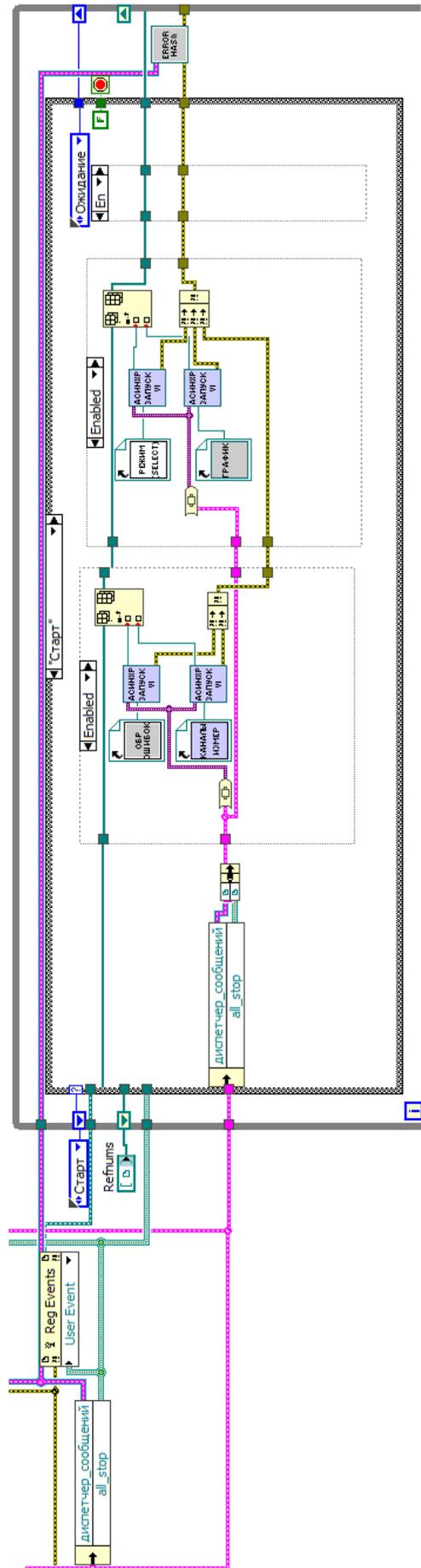
					09.04.01.2017.016.00 ПЗ	Лист
						88
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Приложение А – Подпрограмма запуска



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

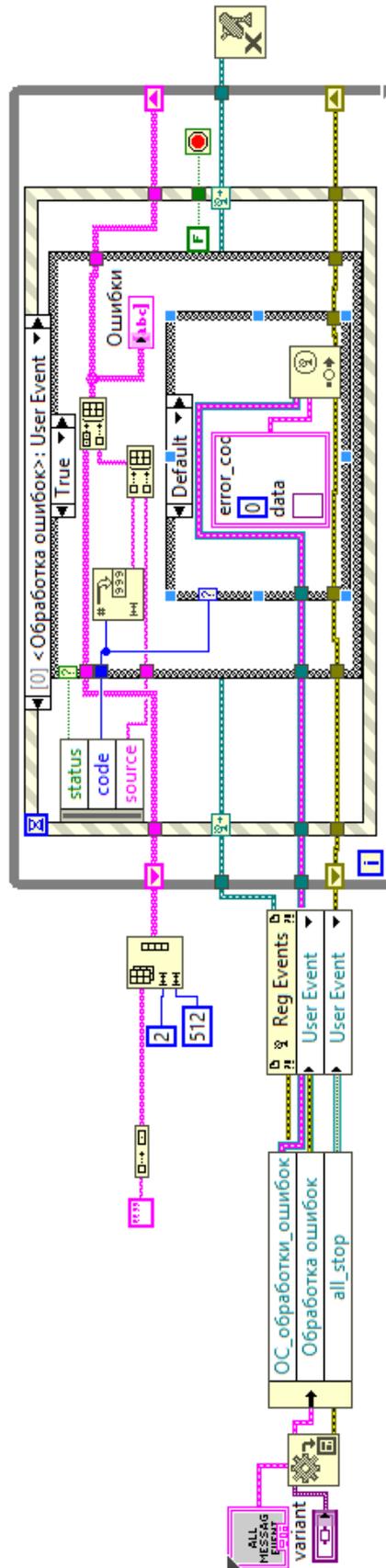
09.04.01.2017.016.00 ПЗ



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

09.04.01.2017.016.00 ПЗ

Приложение Б – ПОДПРОГРАММА ОБРАБОТЧИКА ОШИБОК



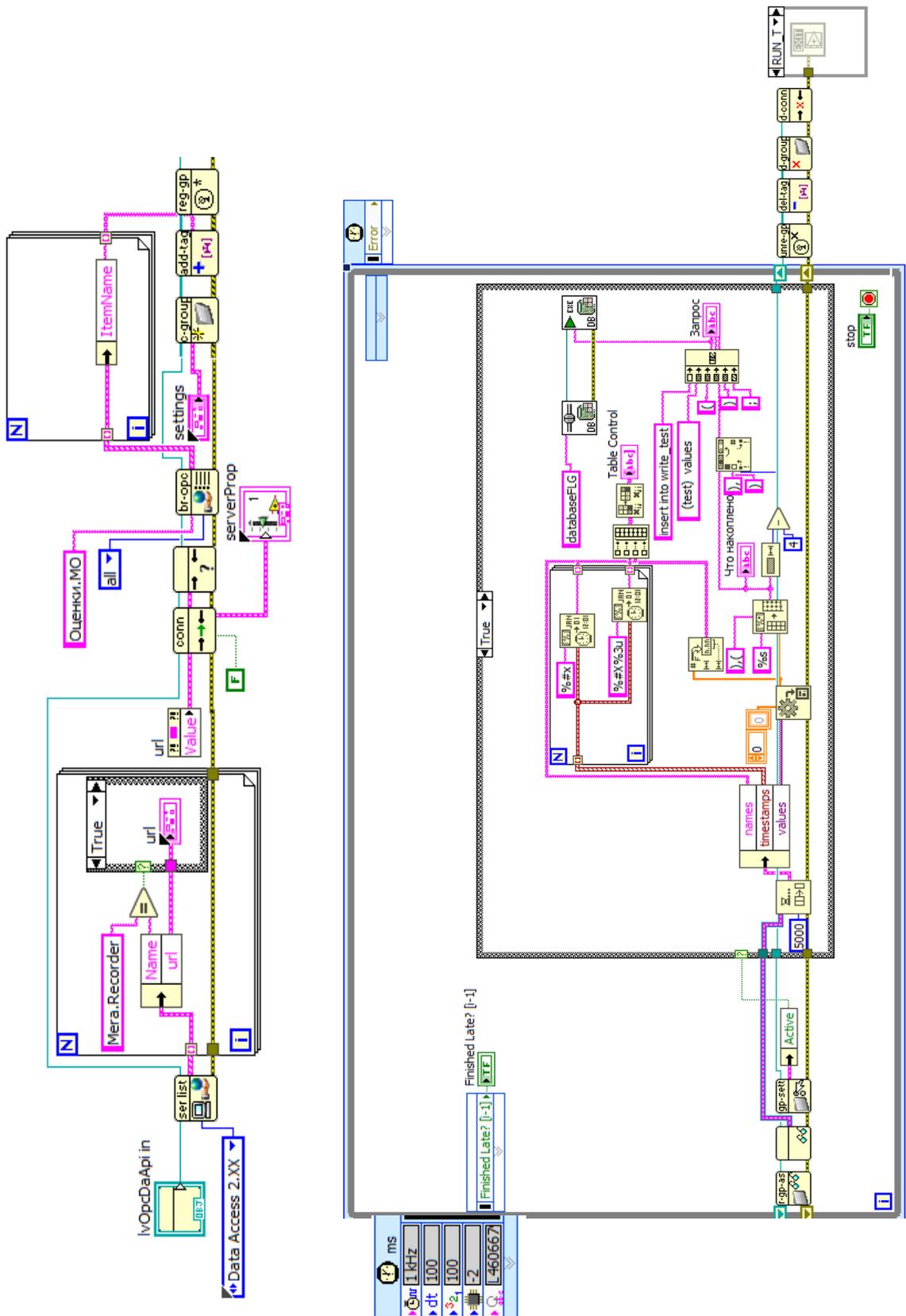
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

09.04.01.2017.016.00 ПЗ

Лист

91

ПРИЛОЖЕНИЕ В – ПОДПРОГРАММА СЧИТЫВАНИЯ ДАННЫХ С ТЕНЗОСТАНЦИИ
 ЧЕРЕЗ ПО RECORDER



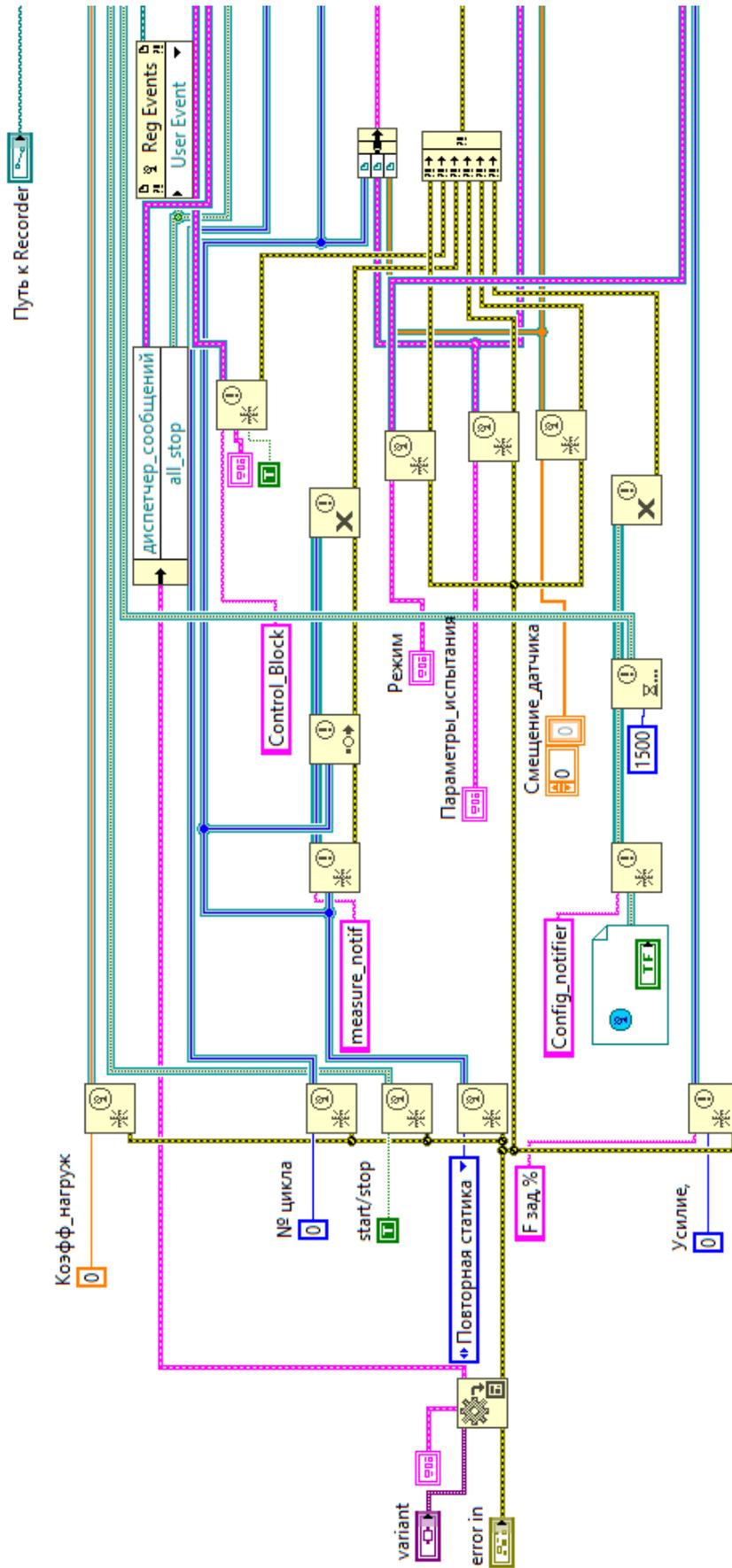
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

09.04.01.2017.016.00 ПЗ

Лист

92

ПРИЛОЖЕНИЕ Г – ПОДПРОГРАММА ВЫБОРА РЕЖИМА ИСПЫТАНИЙ

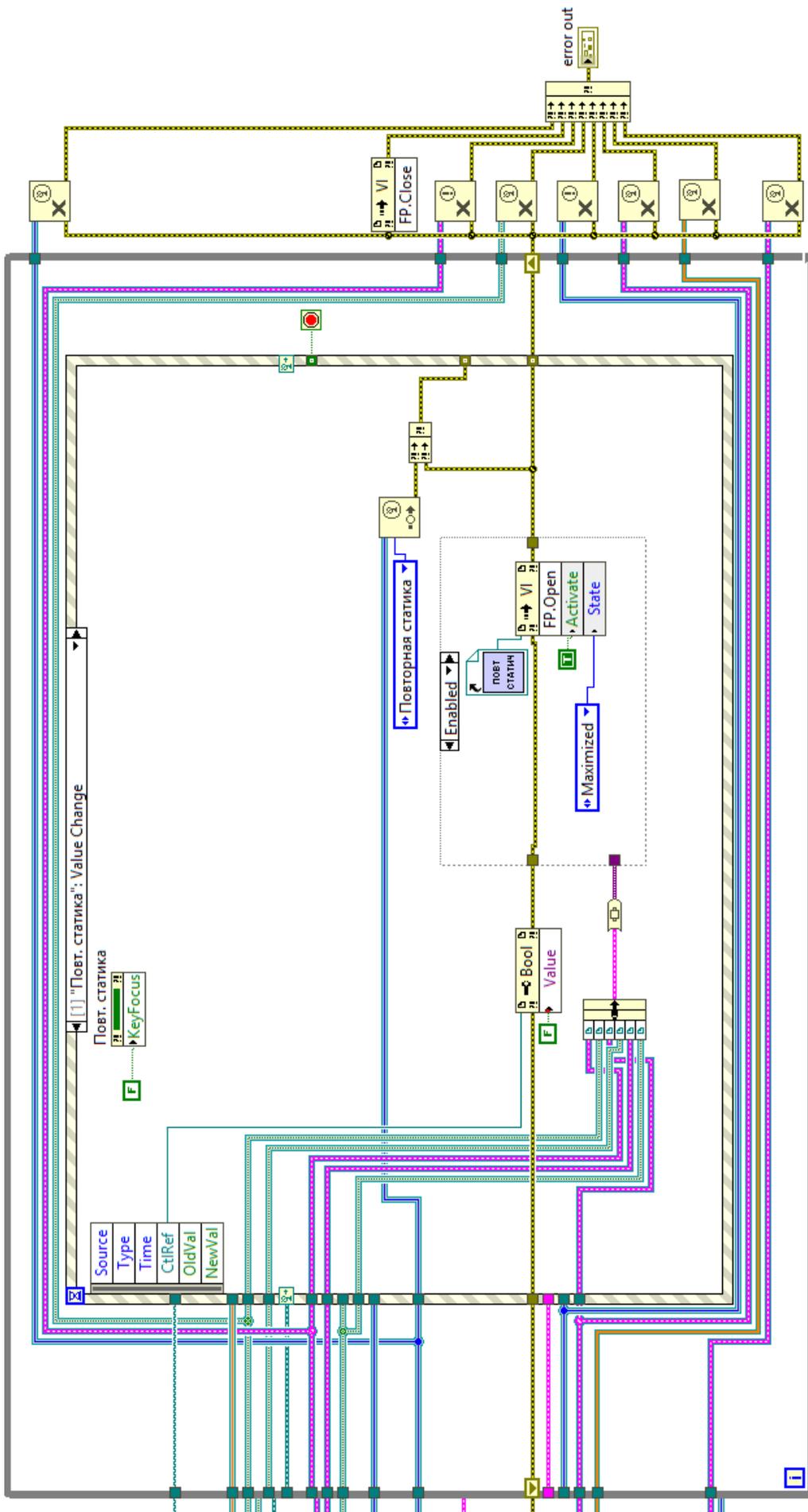


Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

09.04.01.2017.016.00 ПЗ

Лист

93



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

09.04.01.2017.016.00 ПЗ