

Акционерное общество
«Научно-технический центр Единой энергетической системы»
АО «НТЦ ЕЭС»

Программный комплекс
формирования и реализации цифровых моделей энергоблоков и регуляторов
возбуждения и мощности энергоблоков. Версия 1.8
(ПК «Регулятор» 1.8)

РУКОВОДСТВО ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

Санкт-Петербург 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. БЫСТРЫЙ СТАРТ.....	8
1.1. ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА И НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ	8
1.2. ПОДКЛЮЧЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА К ОБОРУДОВАНИЮ ЦИФРО-АНАЛОГО-ФИЗИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА.....	10
1.3. СОЗДАНИЕ НЕОБХОДИМОГО ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ В ПРОГРАММЕ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ЦИФРОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ И МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ТУРБИНОЙ.....	11
1.4. НАСТРОЙКА ПРОГРАММЫ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЖИМА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА	13
1.5. НАСТРОЙКА ПРОГРАММЫ РЕАЛИЗАЦИИ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ЭНЕРГОБЛОКОВ И РЕГУЛЯТОРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЗАДАННОЙ СТРУКТУРЫ.....	17
1.6. НАСТРОЙКА ПРОГРАММЫ УПРАВЛЕНИЯ МОДЕЛЬЮ ЭНЕРГОБЛОКА И РЕГУЛЯТОРА ВОЗБУЖДЕНИЯ	20
2. ТРЕБОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМУ ОБОРУДОВАНИЮ И СТЫКОВКА КОМПОНЕНТОВ ПТК С ЦАФК.....	25
2.1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМУ ОБОРУДОВАНИЮ ...	27
2.1.1. Аппаратные требования.....	27
2.1.2. Программные требования	28
2.2. ПОДКЛЮЧЕНИЕ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА К МОДЕЛЬНЫМ ГЕНЕРАТОРАМ ЦАФК.....	28
2.2.1. Принципиальная схема подключения программно-технического комплекса.....	29
2.2.2. Схема подключения первичных преобразователей и управляющих напряжений	30

	4
2.2.3.	Схема вторичных цепей 32
2.2.4.	Схема подключения выводов платы АЦП/ЦАП 34
2.2.5.	Принципиальная схема подключения входных токов и напряжений к платам <i>LEM-U</i> и <i>LEM-I</i> , подключения выводных сигналов ± 10 В, подключения питания плат 36
3.	ПРОГРАММА ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ЦИФРОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ И МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ТУРБИНОЙ 39
3.1.1.	Интерфейс пользователя 39
3.1.2.	Реализованные блоки 48
3.1.3.	Структура используемых файлов 56
4.	ПРОГРАММА ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЖИМА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА 56
4.1.1.	Обобщенная структура программы 60
4.1.2.	Интерфейс пользователя 61
4.1.3.	Математическое описание расчета параметров электрического режима генератора 62
4.1.4.	Структура используемых файлов 69
4.1.5.	Дополнительные возможности программы: режим проверки 69
4.1.6.	Дополнительные возможности программы: подстройка масштабных коэффициентов 73
4.1.7.	Возможные сообщения об ошибках 74
5.	ПРОГРАММА РЕАЛИЗАЦИИ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ЭНЕРГОБЛОКОВ И РЕГУЛЯТОРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЗАДАННОЙ СТРУКТУРЫ 75

	5
5.1.1.	Обобщенная структура программы 75
5.1.2.	Интерфейс пользователя 77
5.1.3.	Математическое описание 78
5.1.4.	Дополнительные возможности: два источника данных . 83
5.1.5.	Дополнительные возможности: тестирование математической модели..... 83
5.1.6.	Дополнительные возможности: сохранение измененной структуры 86
5.1.7.	Ошибки и сообщения 87
6.	ПРОГРАММА УПРАВЛЕНИЯ МОДЕЛЬЮ ЭНЕРГОБЛОКА И РЕГУЛЯТОРА ВОЗБУЖДЕНИЯ 90
6.1.1.	Обобщенная структура приложения..... 90
6.1.2.	Интерфейс пользователя 91
6.1.3.	Элементы отображения и управления 94
6.1.4.	Структура используемых файлов..... 104
6.1.5.	Описание ошибок соединения..... 105
6.2.	НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНО- ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА 107
6.2.1.	Тестирование выполнения требований быстродействия ПТК на ЦАФК 107
6.2.2.	Результаты тестирования реализованной в рамках ПТК математической модели AVR-ЗМТ 108
7.	РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОСНАЩЕНИЮ МОДЕЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ЦАФК ЦИФРОВЫМИ УСТРОЙСТВАМИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЕМ И МОЩНОСТЬЮ 124

8.	ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЗАДАНИЮ НА СОЗДАНИЕ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ.....	126
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	129

ВВЕДЕНИЕ

Руководство пользователя (далее – Руководство) содержит описание программно-технического комплекса формирования и реализации цифровых моделей энергоблоков и регуляторов возбуждения и мощности энергоблоков (далее – ПТК). ПТК включает в себя программное обеспечение (далее – ПО) и технические элементы.

ПТК разработан специально для сопряжения с цифро-аналого-физическим комплексом ОАО «НТЦ ЕЭС» (далее – ЦАФК). Применение ПТК позволяет быстро и просто реализовывать различные законы управления возбуждением и мощностью в рамках ЦАФК, что в свою очередь обеспечивает возможность адекватного воспроизведения поведения агрегатов входящих в моделируемую электроэнергетическую систему при проводимых на ЦАФК испытаниях.

Руководство включает в себя несколько частей. Раздел 1 содержит краткое описание основных элементов ПТК, процедуры его подключения, входящего в ПТК ПО и необходимых операций по его настройке. Знакомства с этой главой достаточно для проведения испытаний в рамках ЦАФК с использованием готовых моделей цифровых устройств управления и регулирования. Последующие разделы содержат расширенное описание всех элементов ПТК, подробный пример подключения ПТК к ЦАФК, структуры используемых файлов, некоторые результаты тестирования ПТК и его отдельных компонентов. Данная глава включает вопросы подготовки, настройки, отладки и апробации вновь разрабатываемых структур законов управления (далее – математические модели).

В разделе 7 предложены рекомендации по использованию ПТК совместно с оборудованием ЦАФК.

В разделе 8 обозначены основные требования к заданиям по реализации различных законов управления с точки зрения адекватности получаемого результата и удобства эксплуатации ПТК.

1. Быстрый старт

Корректное выполнение программно-техническим комплексом возлагаемых на него функций предполагает: выполнение подключения оборудования ЦАФК к ПТК, разработку и отладку математических моделей с учетом специфики оборудования ЦАФК, задач, возлагаемых на математическую модель и удобства использования при проведении испытаний, непосредственное проведение испытаний на ЦАФК с использованием ПТК. Для того чтобы приступить к работе с ПТК необходимо иметь представление о его обобщенной структуре.

1.1. Обобщенная структурная схема

программно-технического комплекса и необходимое оборудование

Обобщенная структурная схема настроенного и подключенного к ЦАФК ПТК представлена на рисунке 1. Техническая часть ПТК состоит из вычислительного оборудования – персональных компьютеров (далее – ПК), плат аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования (далее – АЦП, ЦАП) *LCard L-791*, локально-вычислительной сети (далее – ЛВС), измерительных преобразователей – датчиков *LEM* тока и напряжения. Для реализаций функций управления и регулирования возбуждением и/или мощностью одного генератора достаточно одного ПК, одной платы АЦП/ЦАП, четырех датчиков тока и четырех датчиков напряжения. ПО ПТК состоит из четырех приложений. Подготовка математических моделей и их редактирование осуществляется в программе формирования структуры цифровых регуляторов возбуждения и моделей управления турбиной (*\Form\WinFormRegul.exe*, далее – приложение для задания закона управления или *WinFormRegul*). Получение необходимых для управления параметров электрического режима генератора и выдача управляющих напряжений осуществляется программой цифровых измерений и расчета параметров электрического режима синхронного генератора (*\Measurement\MeasurementComponent.exe*, далее – измерительное приложение или *MeasurementComponent*).

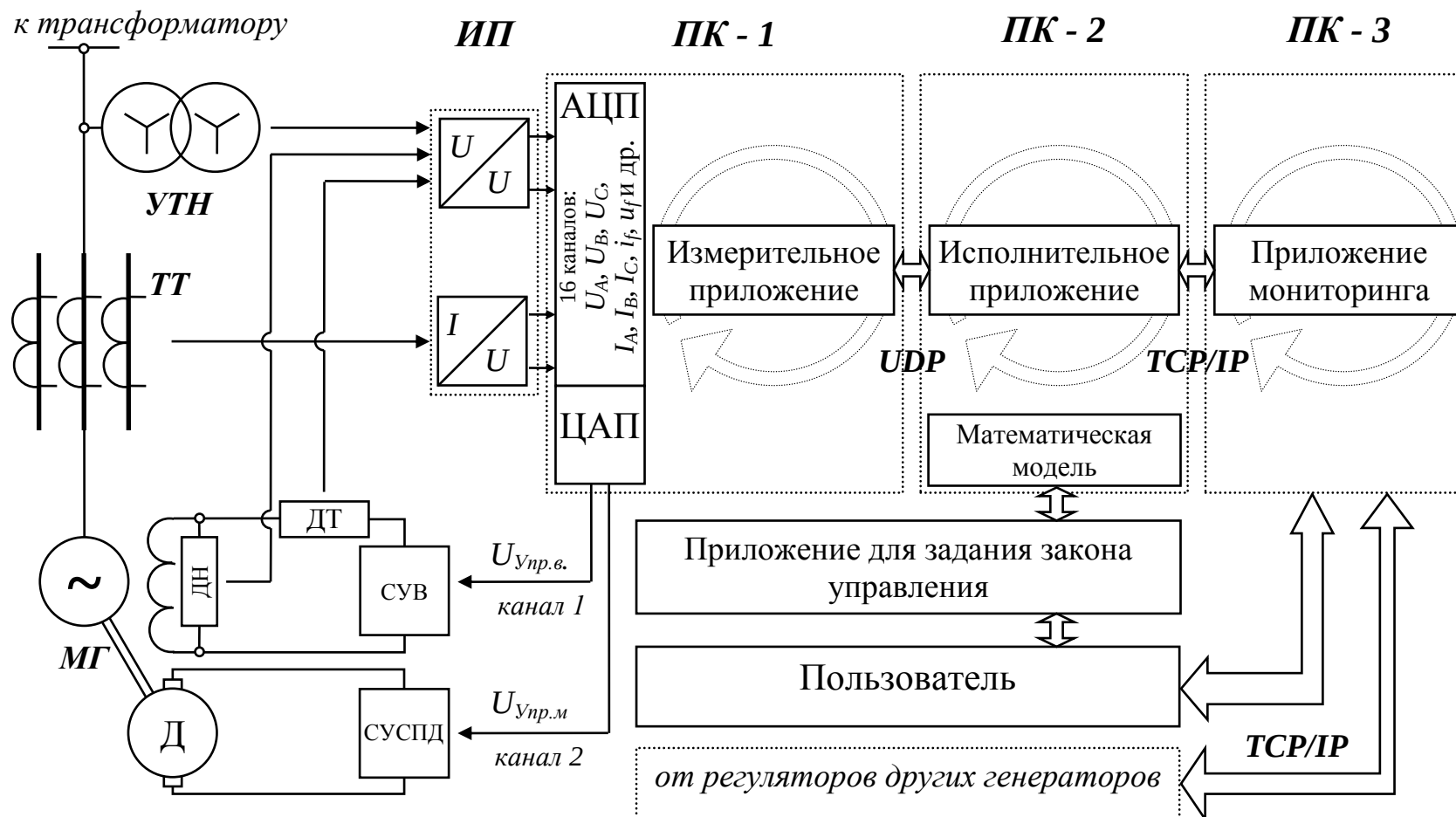


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема ПТК при его подключении к ЦАФК «НТЦ ЕЭС»

Примечание: МГ – модельный генератор, ИП – измерительные преобразователи, Д – приводной двигатель, ТТ – группа измерительных трансформаторов тока, УТН – группа универсальных измерительных трансформаторов напряжения, ДТ – датчик тока, ДН – датчик напряжения, СУВ – система управления возбуждением, СУСПД – система управления скоростью приводного двигателя, $U_{упр.в.}$ – напряжение управления возбуждением, $U_{упр.м.}$ – напряжение управления мощностью

Получение по ЛВС параметров электрического режима генератора, расчет управляющих воздействий в соответствии с готовой математической моделью осуществляется в программе реализации цифровых моделей энергоблоков и регуляторов возбуждения заданной структуры (*\Regulator\RegulatorComponent.exe*, далее – исполнительное приложение или *RegulatorComponent*). Отображение и управление внутренними расчетными параметрами математических моделей (изменение уставок, коэффициентов в рамках готовой структуры) обеспечивает программа управления моделью энергоблока и регулятора возбуждения (*\HMI\HMIComponent.exe*, далее – приложение мониторинга или *HMIComponent*).

1.2. Подключение измерительных органов программно-технического комплекса к оборудованию цифро-аналога-физического комплекса

В соответствии с обобщенной схемой ПТК необходимо осуществить подключение измерительных (АЦП) и исполнительных элементов (ЦАП) ПТК к оборудованию ЦАФК.

Для выполнения расчета параметров электрического режима генератора измерительное приложение требует подключения к плате АЦП/ЦАП сигналов по напряжению ± 10 В, соответствующих следующим параметрам генератора (порядковый номер отвечает используемому номеру канала для данного параметра):

1. переменное напряжение фазы *A* генератора (U_A);
2. переменное напряжение фазы *B* генератора (U_B);
3. переменное напряжение фазы *C* генератора (U_C);
4. переменный ток фазы *A* генератора (I_A);
5. переменный ток фазы *B* генератора (I_B);
6. переменный ток фазы *C* генератора (I_C);
7. напряжение возбуждения генератора (U_f);
8. ток возбуждения генератора (I_f).

Помимо этих сигналов к плате АЦП/ЦАП могут быть подключены еще 8 сигналов, обработка которых осуществляется как обработка постоянных сигналов – усреднение на интервале измерения (5 мс).

Выходные управляющие напряжения (с выходов каналов 1 и 2 ЦАП) в соответствии с обобщенной схемой (см. рисунок 1) подаются в системы управления возбуждением генератора и скоростью приводного двигателя.

Подробные схемы подключения, дополнительные принципиальные возможности по подключению оборудования ЦАФК представлены в разделе 2.2. Общие требования к сигналам и их подключению описаны в [1].

1.3. Создание необходимого закона управления в программе формирования структуры цифровых регуляторов возбуждения и моделей управления турбиной

Использование стандартных способов задания закона управления, известных из теории автоматического управления в виде блоков с входными и выходными параметрами позволяет создавать наглядные и понятные структуры законов управления и снижает вероятность появления ошибок.

В приложении для задания закона управления базовые операции представлены графическим объектом – прямоугольником (далее блоки). Линии со стрелками отвечают передаче выходного параметра базовой операции на вход другой (других).

Приложение для задания закона управления позволяет создавать математическую модель, редактировать ее, изменять ее параметры, сохранять в файл и вновь открывать для просмотра/редактирования.

Базовые операции (далее блоки), заносимые в файл структуры закона управления, представлены в специальном меню. В данное меню входят все блоки, реализованные в рамках ПТК. Полный список блоков и их математическое описание представлено в разделе 3.

Интерфейс пользователя приложения для задания закона управления представлен на рисунке 2. После запуска программы *WinFormRegul*, программа откроет последний файл *.dat (файлы *.dat – файлы, содержащие

математические модели), с которым осуществлялась работа ранее, и покажет математическую модель содержащейся в файле в основном рабочем поле программы. Если программа запускается на ПК впервые, программа создаст файл без математической модели.

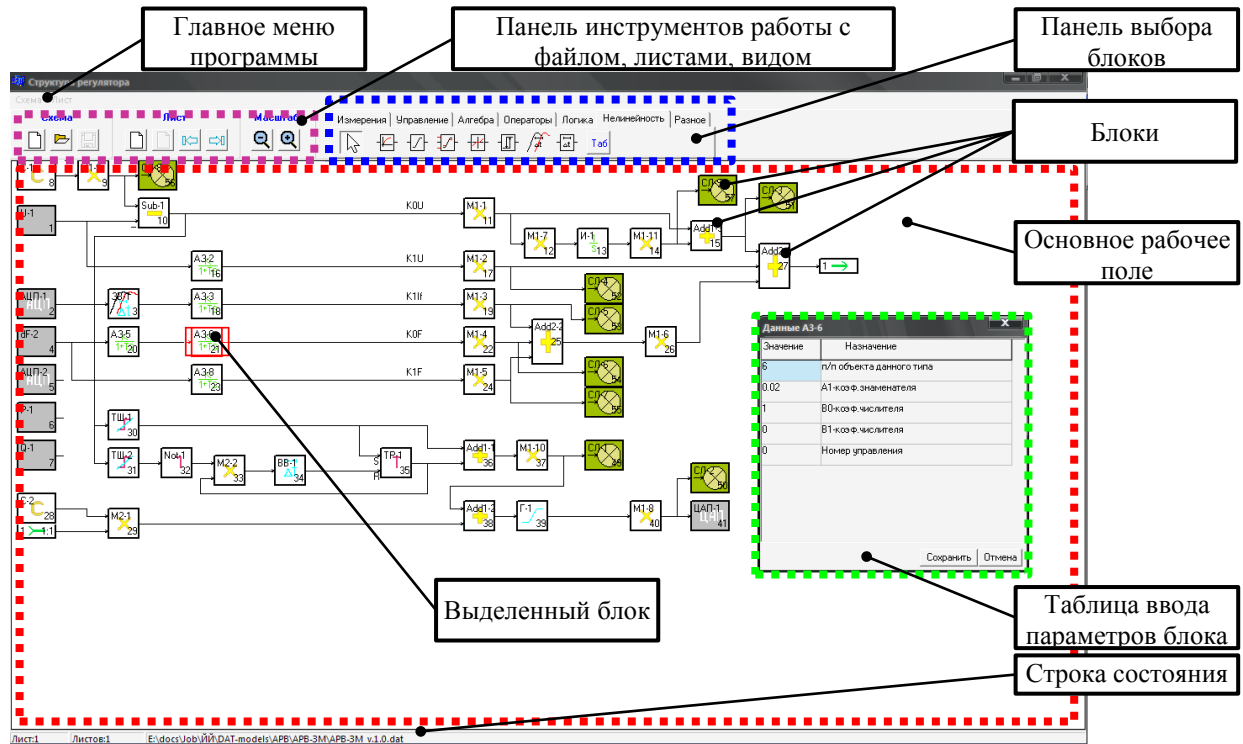


Рисунок 2 – Интерфейс пользователя приложения для задания закона управления

Добавление интересующего блока осуществляется кликом мышью по нему в меню выбора блоков и кликом мыши на пустое место основном рабочем поле. Перемещение несвязанного блока осуществляется перетаскиванием его мышью по рабочему полю.

После добавления в математическую модель необходимого блока следует задать входные параметры блока (если имеются). Это можно сделать, кликнув мышью по блоку (выделить блок) – источнику необходимого параметра, после чего вновь кликнуть мышью по правой части появившегося прямоугольника. Третий клик мыши по стрелке (слева блока) вновь добавленного блока соединит выход и вход. Перемещение связанного блока блокируется, для его перемещения необходимо вызвать контекстное меню (контекстное меню любого блока или связи вызывается кликом правой

кнопки мыши) связи и выбрать пункт «Изменить связь». После чего блок можно перетаскивать (подробнее – см. раздел 3).

Задать внутренние параметры блока можно вызовом таблицы ввода параметров блока (всех блоков). Вызов таблицы осуществляется выбором пункта «Параметры узла» («Список параметров») контекстного меню. Помимо параметров блока необходимо задать его номер в расчете. Нумерация блоков осуществляется по порядку от источников данных – констант, блоков измерений, до приемников – блоков ЦАП. Номер блока отображается в его правом нижнем углу. Удаление блоков или связей осуществляется из контекстного меню (выбором пункта «Удаление узла» или «Удалить связь»).

После создания математической модели ее необходимо сохранить в файл *.dat вызовом пункта меню работы с файлами «Схема – Сохранить» (или «Схема – Сохранить как...»). После сохранения файла, можно приступить к реализации заданного закона управления при управлении возбуждением и мощностью при использовании измерительного и исполнительного приложения (в случае если выполнена их подготовка к совместной работе).

1.4. Настройка программы цифровых измерений и расчета параметров электрического режима синхронного генератора

Настройка измерительного приложения предполагает ввод масштабных коэффициентов измеряемых величин. Данные коэффициенты отвечают принятой системе измерений (именованные, относительные единицы холостого хода, относительные единицы номинального режима). Кроме того, они учитывают передаточные элементы измерительного тракта (трансформаторов тока, трансформаторов напряжения, датчиков тока, датчиков напряжения и измерительных преобразователей). Необходимо задать масштабные коэффициенты по напряжению генератора, току генератора, напряжению возбуждения генератора, току возбуждения генератора (строки 1, 2, 3, 4 таблицы, см. рисунок 3).

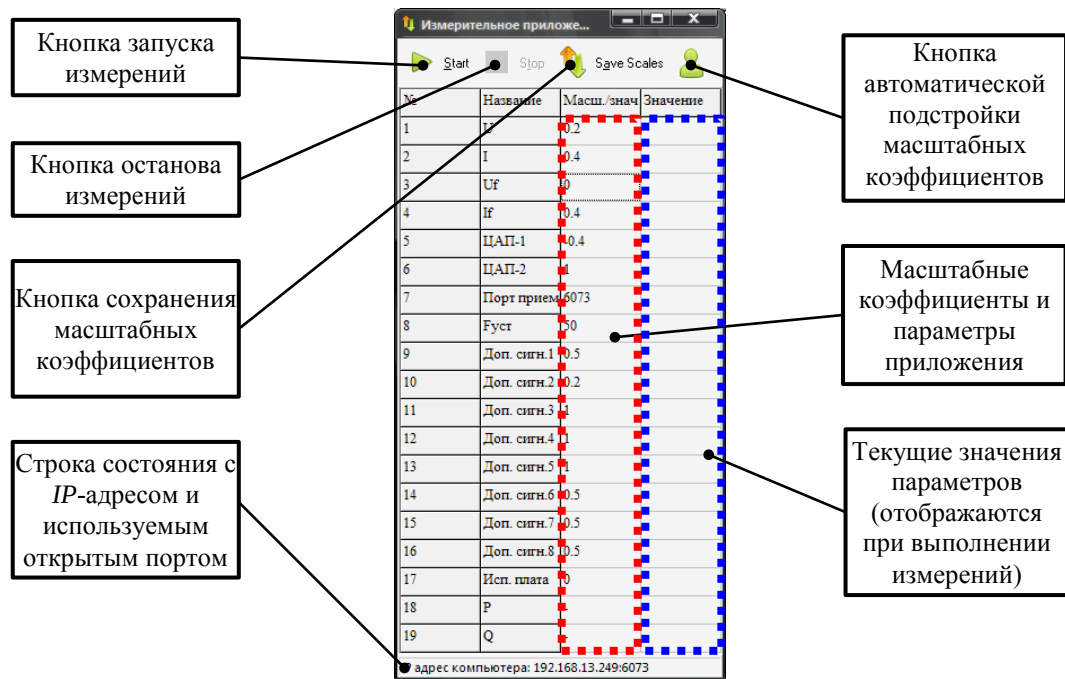


Рисунок 3. Интерфейс пользователя измерительного приложения

К примеру, действующее значение номинального линейного напряжения генератора равно 210 В. Для выполнения измерений используется группа измерительных трансформаторов напряжения (звезда – звезда) с коэффициентом трансформации $K_T = 300/100$ В (см. рисунок 4), измерительные преобразователи с коэффициентом передачи $K_{ип} = 100/10$ В.

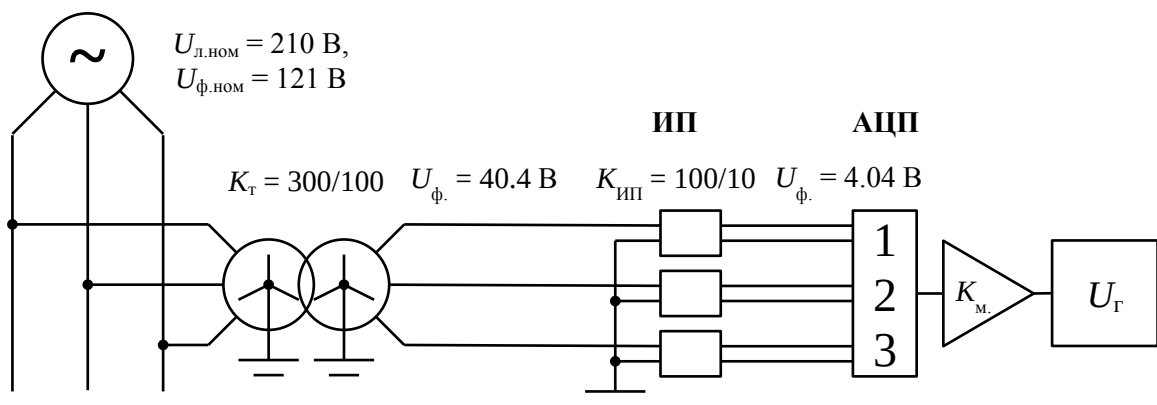


Рисунок 4 – Упрощенная схема измерительного тракта ПТК

Тогда результат преобразования – действующее значение напряжения прямой последовательности $U_{Г}$ будет вычисляться следующим образом:

$$U_{Г} = \frac{U_{л.ном}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{K_T} \cdot \frac{1}{K_{ип}} \cdot K_{м} = \frac{210}{\sqrt{3}} \cdot \frac{100}{300} \cdot \frac{10}{100} \cdot K_{м}, \quad (1)$$

где K_m – вводимый пользователем масштабный коэффициент. Необходимо использовать такие измерительные преобразователи, чтобы интересующая величина на входе каналов АЦП во всех возможных режимах не выходила за пределы ± 10 В, и при этом в номинальном режиме не была ничтожной.

Для реализации функций управления, кроме того, необходимо задать масштаб преобразования для каналов ЦАП (строки 5, 6 таблицы, см. рисунок 3). Выходные сигналы каналов ЦАП имеют выходной диапазон ± 5 В. В связи с этим рекомендуется для математических моделей регуляторов возбуждения (с потолочным значением форсировки напряжения $U_{f.пот.} = 2 U_{f.ном.н.р.}$) использовать масштабный коэффициент равный 0.4. Тогда при форсировке возбуждения генератора ($U_{APB-o.e.} = 2$ о.е.н.р.) напряжение на выходе ЦАП определяется следующим образом:

$$U_{ЦАП} = \frac{U_{APB-o.e.}}{K_m} = \frac{2}{0.4} = 5 \text{ В}, \quad (2)$$

что позволяет максимально использовать диапазон регулирования. Кроме того, при этом масштабном коэффициенте в номинальном режиме работы генератора на выходе ЦАП 2.5 В, что является базисной величиной, принятой на ЦАФК для измерения параметров возбуждения.

При использовании вновь установленной платы необходимо проверить калибровку ее кварцевого генератора. Это можно сделать, запустив измерения и подавая симметричную систему напряжений частоты 50 Гц на каналы 1, 2 3 платы АЦП/ЦАП. После запуска измерений в области текущих значений параметров (см. рисунок 3), в строке 8 будет отображаться рассчитанное текущее значение отклонения частоты от 50 Гц в мГц. Анализ расчетного алгоритма показывает, что погрешность метода не более 0.1% при отсутствии отклонения частоты от номинального значения. Поэтому, получающиеся значения отклонения частоты не должны превышать ± 50 мГц. В случае если данное условие не выполняется необходимо выполнить настройку расчетного алгоритма в соответствии с частотой кварцевого

генератора, воздействуя на масштабный коэффициент « $F_{уст}$ ». Его изменение вступает в силу только после перезапуска измерительного приложения.

Для каждого измерительного приложения на одном ПК необходимо задать используемый сетевой порт приема входящих данных от исполнительного приложения (строка 7) и номер используемой платы (нумерация по порядку, начинается с 0).

Проверка введенных масштабных коэффициентов может осуществляться пробным запуском процесса измерений (кнопка «Start» на верхней панели) и контролем величины получаемых параметров в области значений. Останов процесса измерений осуществляется кнопкой «Stop». Кроме того, на верхней панели присутствует кнопка сохранения масштабов в файл (файл «Scales.ini» в директории с *MeasurementComponent.exe*) из которого производится загрузка всех ранее введенных параметров при запуске измерительного приложения. На передней панели имеется кнопка автоматической подстройки масштабов.

В случае, если:

1. генератор работает в номинальном режиме ($U_{\Gamma} = U_{\Gamma.ном}$, $P_{\Gamma} = P_{\Gamma.ном}$, $Q_{\Gamma} = Q_{\Gamma.ном}$, $I_f = I_{f.ном}$, $U_f = U_{f.ном}$);
2. необходимо использовать систему относительных единиц номинального режима;
3. заданы соответствующие масштабные коэффициенты;
4. при этом имеется незначительное отклонение получаемых параметров от единицы,

существует возможность автоматической подстройки масштабных коэффициентов (см. рисунок 3).

После проверки результатов измерений, процесс измерения необходимо приостановить, а программу оставить работающей в ждущем режиме. Когда придет запрос от исполнительного приложения на получение результатов измерений, процесс измерений автоматически запустится, и результаты измерений будут передаваться по ЛВС по протоколу *UDP*. Для

удобства пользователя, в нижней части окна измерительного приложения отображается IP-адрес компьютера на момент запуска программы.

1.5. Настройка программы реализации цифровых моделей энергоблоков и регуляторов возбуждения заданной структуры

Настройка исполнительного приложения предполагает ввод путей к файлу математической модели *.dat, ввод путей к файлам вывода промежуточных результатов расчета (если данный вывод предусмотрен структурой). Кроме того, при необходимости можно указать имя файла, в который будут занесены значения всех коэффициентов математической модели, для последующей загрузки (такая необходимость возникает, если в процессе работы с ПТК удаленно при помощи приложения мониторинга были изменены различные коэффициенты данной математической модели и их впоследствии нужно восстановить).

Дальнейшая настройка исполнительного приложения требует ввода следующих параметров (см. рисунок 5):

1. используемый сетевой порт для входящих данных от измерительного приложения «Порт приема»;
2. IP-адрес компьютера, на котором запущено измерительное приложение (отображается в строке состояния измерительного приложения) «IP ЦАП»;
3. сетевой порт входных данных измерительного приложения (значение должно совпадать со строкой 7 рисунка 3) «Порт передачи»;
4. в случае если будет использовано приложение мониторинга – сетевой порт соединения с приложением мониторинга «Порт обмена HMI».

По желанию пользователь может ввести имя для данного исполнительного приложения, которое позволит ему идентифицировать его при попытке удаленного доступа с помощью приложения мониторинга –

«Имя регулятора» и указать номер генератора, которым будет управлять исполнительное приложение «Номер генератора».

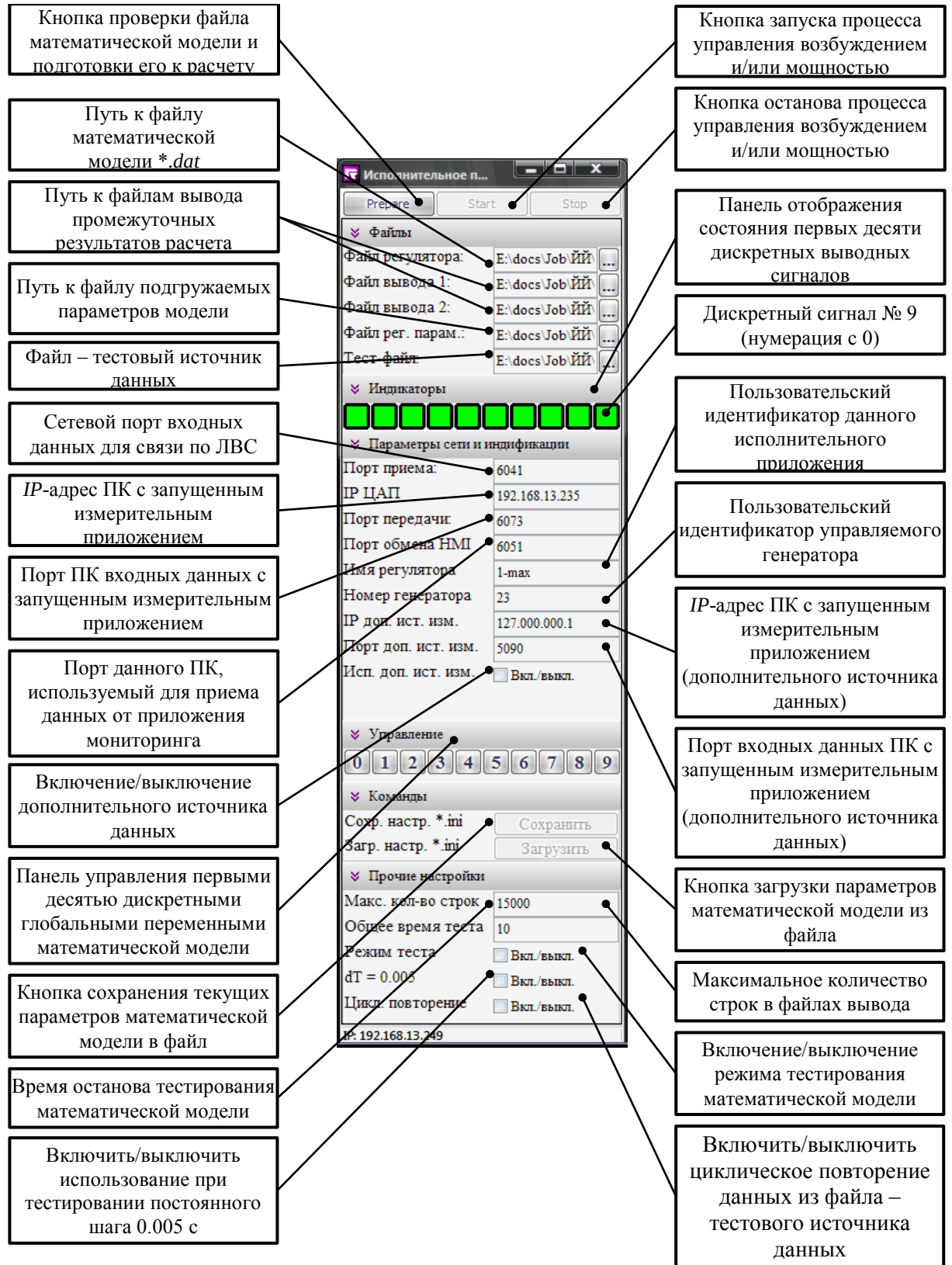


Рисунок 5 –Интерфейс пользователя исполнительного приложения

Если модель предусматривает управление параметрами генератора-1 по параметрам генератора-2 (групповое управление), существует возможность получения данных о состоянии электрического режима генератора-2. Для этого необходимо включить дополнительный источник данных («Исп. доп. ист. изм.») и указать параметры его измерительного приложения («*IP* доп. ист. изм.» и «Порт доп. ист. изм.»). Подробное использование этой и других функций см. раздел 5.

После ввода всех необходимых данных нужно выполнить проверку файла математической модели и подготовку приложения к работе при помощи кнопки «*Prepare*». Если выполнена корректная подготовка математической модели и настроек программы, исполнительное приложение не выдаст сообщений об ошибках (описание различных ошибок см. раздел 5).

Нажатие кнопки «*Start*» отправляет на измерительное приложение команду запуска процесса измерений, и при появлении входящих данных исполнительное приложение выполняет расчет в соответствии с математической моделью и состоянием внутренних глобальных логических переменных «Управление». Кроме того, придут в действие индикаторы первых десяти дискретных сигналов. С момента запуска при помощи исполнительного приложения можно управлять первыми десятью глобальными логическими переменными «Управление» кнопками на передней панели.

Нажатие кнопки «*Stop*» приостанавливает расчет управляющих воздействий, входящие данные игнорируются. На каналах ЦАП ПК с измерительным приложением значения выходных напряжений фиксируются. Повторный запуск кнопкой «*Start*» возобновляет процесс управления.

При закрытии исполнительного приложения измерительному приложению выдается команда для останова процесса измерения и управления. Выходы каналов ЦАП сбрасываются в 0 В.

Исполнительное приложение имеет несколько режимов работы. Первый режим – режим ожидания. В этом режиме исполнительное

приложение ожидает команду на запуск от приложения мониторинга. Вторым режим – режим непосредственной работы. Данный режим может быть запущен кнопкой «Start» либо удаленной командой (если исполнительное приложение запущено командой от приложения мониторинга, оно передает промежуточные результаты расчета). Третий режим предусматривает тестирование и отладку математической модели (см. раздел 5).

1.6. Настройка программы управления моделью энергоблока и регулятора возбуждения

Настройка приложения мониторинга предполагает выбор одного или нескольких необходимых для работы исполнительных приложений, осуществление подключения к ним, при необходимости удаленной корректировки настроек исполнительного приложения, выбора интересующих для отображения и изменения параметров конкретных структур и формирования способа их представления.

Выбор исполнительных приложений производится по ранее записанному IP-адресу и порту удаленного ПК, либо путем задания данных параметров в строку таблицы базы данных IP-адресов ПК с исполнительными приложениями. После задания параметров необходимо кликнуть мышью по полю «Вкл./выкл.» строки таблицы. Если параметры введены правильно, в поле «Ответ» появится сообщение о готовности («Ready»), поле «Вкл./выкл.» перейдет в состояние «True», обновятся все последующие поля строки таблицы в соответствии с параметрами опрашиваемого исполнительного приложения. Параметры опрошенных исполнительных приложений (кроме идентификаторов «Имя регулятора» и «№ ген.») при необходимости можно менять удаленно.

После выбора необходимых исполнительных приложений, осуществления корректировки их настроек существует два способа организации последующего управления. Первый предполагает предварительное создание необходимой структуры отображения промежуточных результатов расчета и, после чего, подключения к

исполнительным приложениям и привязки созданных на экране визуальных элементов к конкретным параметрам математической модели, второй – непосредственное подключение к исполнительным приложениям и создание структуры отображения сразу вместе с привязкой. Основное принципиальное различие этих двух путей в моменте пуска исполнительного приложения: как только будет произведено подключение к исполнительному приложению, будет автоматически осуществлен запуск процесса реализации математических моделей и управление возбуждением и/или мощностью.

В качестве примера будет рассмотрен первый способ. Визуальные элементы можно размещать либо на вкладке «Главный экран» (см. рисунок 7) либо на вновь создаваемых вкладках (кнопкой «Добавить вкладку», *Ctrl+T*). Лишние вкладки можно закрывать кнопкой «Закреть вкладку», *Ctrl+W*). Визуальные элементы можно добавить кликая мышью по названию нужного элемента раскрывающегося списка кнопки «Обновить экран». Чтобы переместить визуальный элемент необходимо, чтобы перетаскивание объектов было включено (кнопка «Включить/выключить перетаскивание мышью объектов мышью» находилась в положение «Unlocked»), перетащить элемент, кликая мышью по панели визуального элемента. Клик по панели визуального элемента фокусирует объект (подсвечивается красным) и позволяет просмотреть/изменить его параметры (длина, ширина, цвета, размеры и др.). Таблица параметров может быть вызвана кнопкой *F4* или кликом мышью по кнопке «>» слева приложения мониторинга. После размещения на экране всех необходимых элементов отображения для всех подключенных исполнительных приложений необходимо выполнить их запуск и получить список параметров используемых в них математических моделей. Это делается кнопкой «Опрос серверов». Состояние опроса отображает Индикатор состояния опроса ПК с исполнительными приложениями.

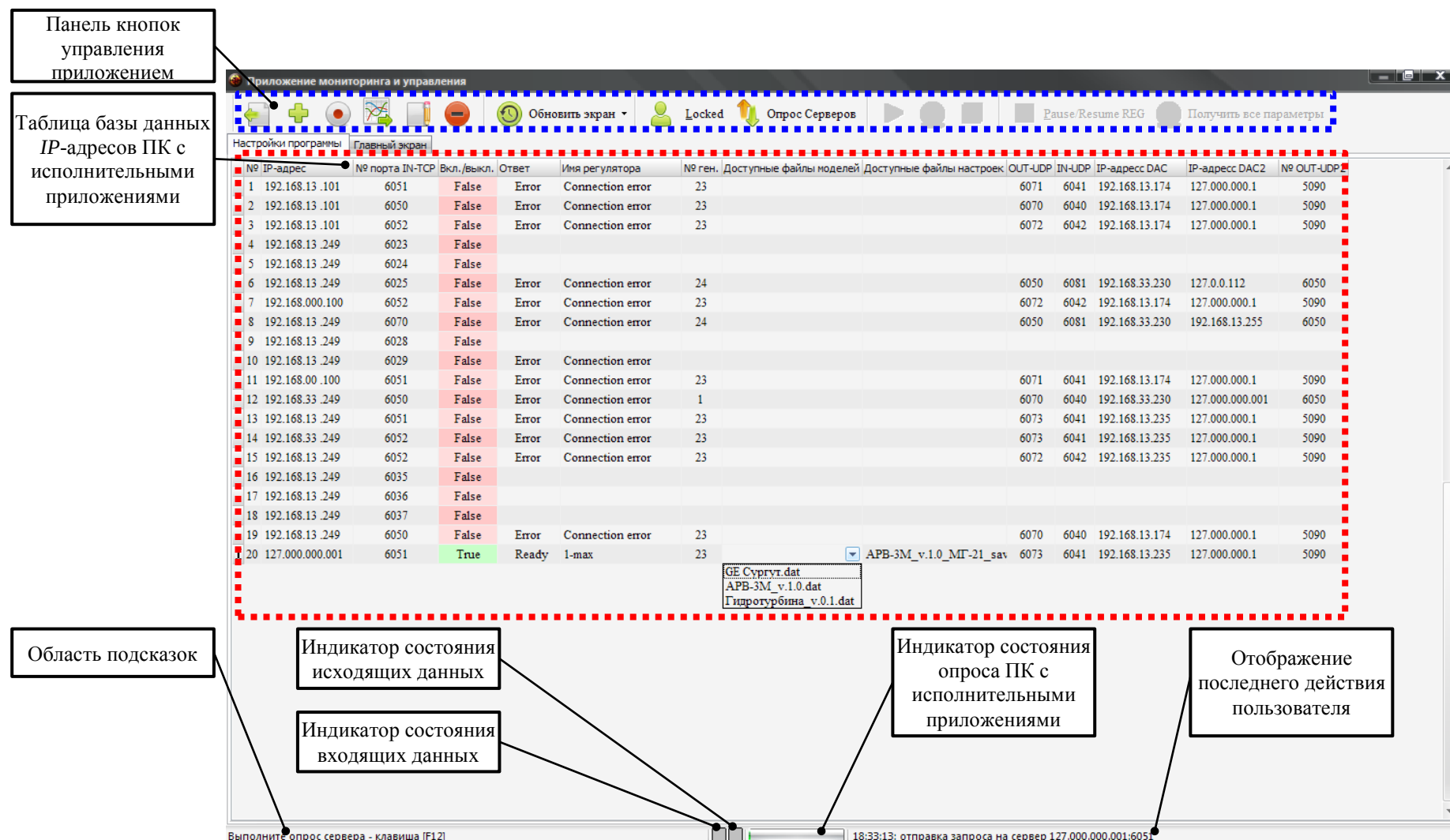


Рисунок 6. Интерфейс пользователя приложения мониторинга. Вкладка «Настройки программы»

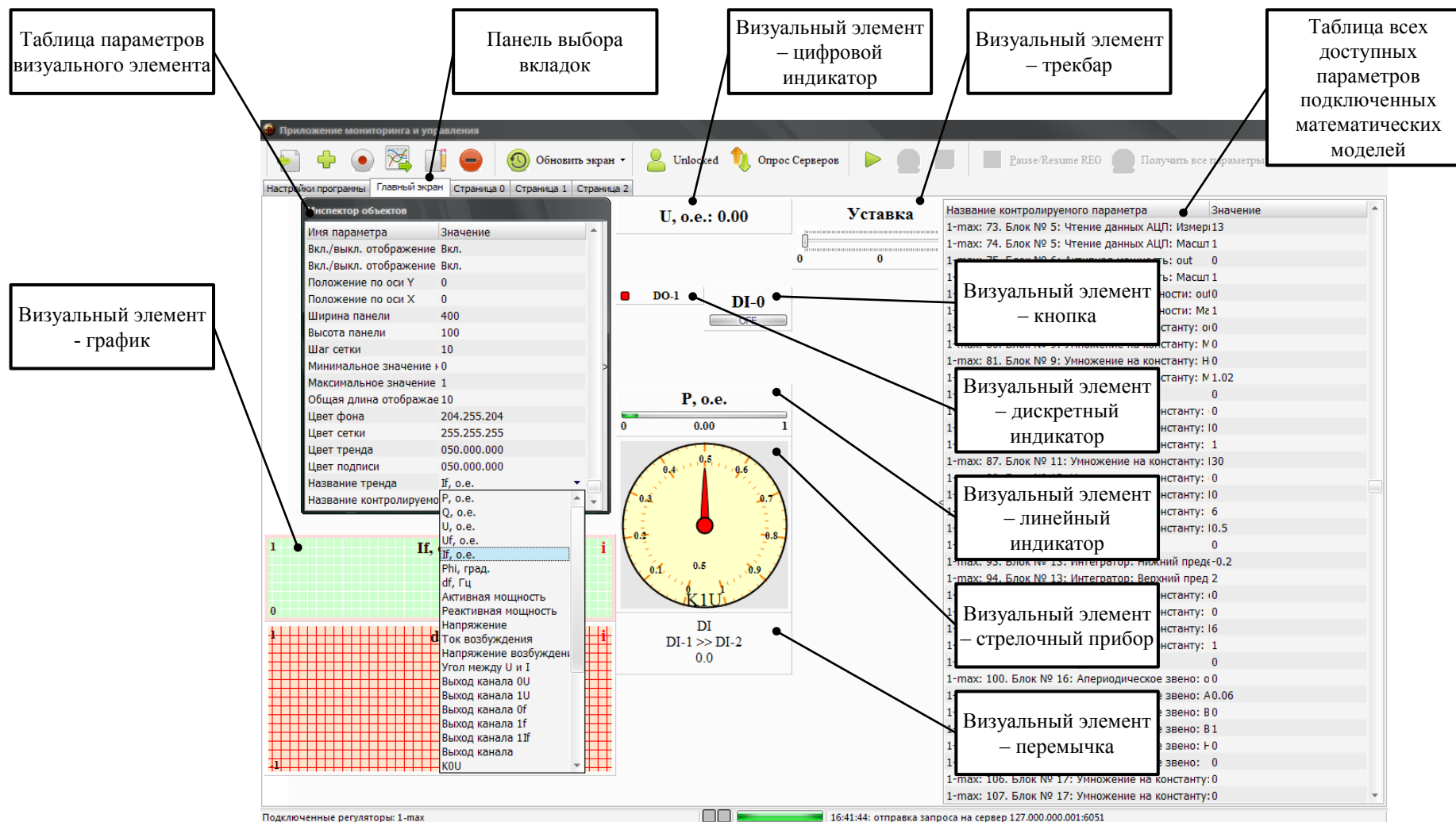


Рисунок 7. Интерфейс пользователя приложения мониторинга. Вкладка «Настройки программы»

С этого момента становится доступным список параметров математических моделей (просмотреть его можно нажатием кнопки *F6* либо кликом мышью по кнопке «<»»). Кроме того, становится доступной возможность осуществления привязки визуальных элементов к параметрам математических моделей. Привязка осуществляется изменением параметра визуального элемента «Название контролируемого параметра» на необходимый из списка. В списке параметры математических моделей обозначаются как <Идентификатор исполнительного приложения>:<№ параметра п/п>. <Блок № п/п математической модели>:<Название параметра>. Таким образом, можно однозначно привязать визуальные элементы к тому или иному параметру математической модели, зная ее структуру и идентификатор.

После привязки всех визуальных элементов целесообразно сохранить структуру отображения в файл **.hmi* командой «Сохранить в файл **.hmi*».

Далее можно непосредственно приступить к процессу наблюдения и управления командой «Начать наблюдение» (*F12*).

В процессе наблюдения будут отображаться выбранные параметры математических моделей и в случае, если пользователь меняет параметры визуальными элементами управления, новые значения параметров будут передаваться на исполнительные приложения. Средний шаг обновления значений параметров математических моделей на экране составляет около 100 мс независимо от количества подключенных исполнительных приложений.

Останов процесса отображения вызывается соответствующей командой «Полностью остановить наблюдение» (*F10*). При этом команда останова на исполнительные приложения не передается.

Сворачивание/разворачивание приложения мониторинга осуществляется двойным щелчком мыши по иконке приложения в системном трее.

2. Требования вычислительному оборудованию и стыковка компонентов ПТК с ЦАФК

Ранее был рассмотрен обобщенный вариант подключения компонентов ПТК для управления параметрами одного генератора. Общая концепция построения ПТК при управлении группой генераторов представлена на рисунке 8. В соответствии с представленной концепцией при помощи одного ПК можно осуществлять измерения электрических параметров нескольких генераторов (в зависимости от количества установленных плат АЦП/ЦАП L-791).

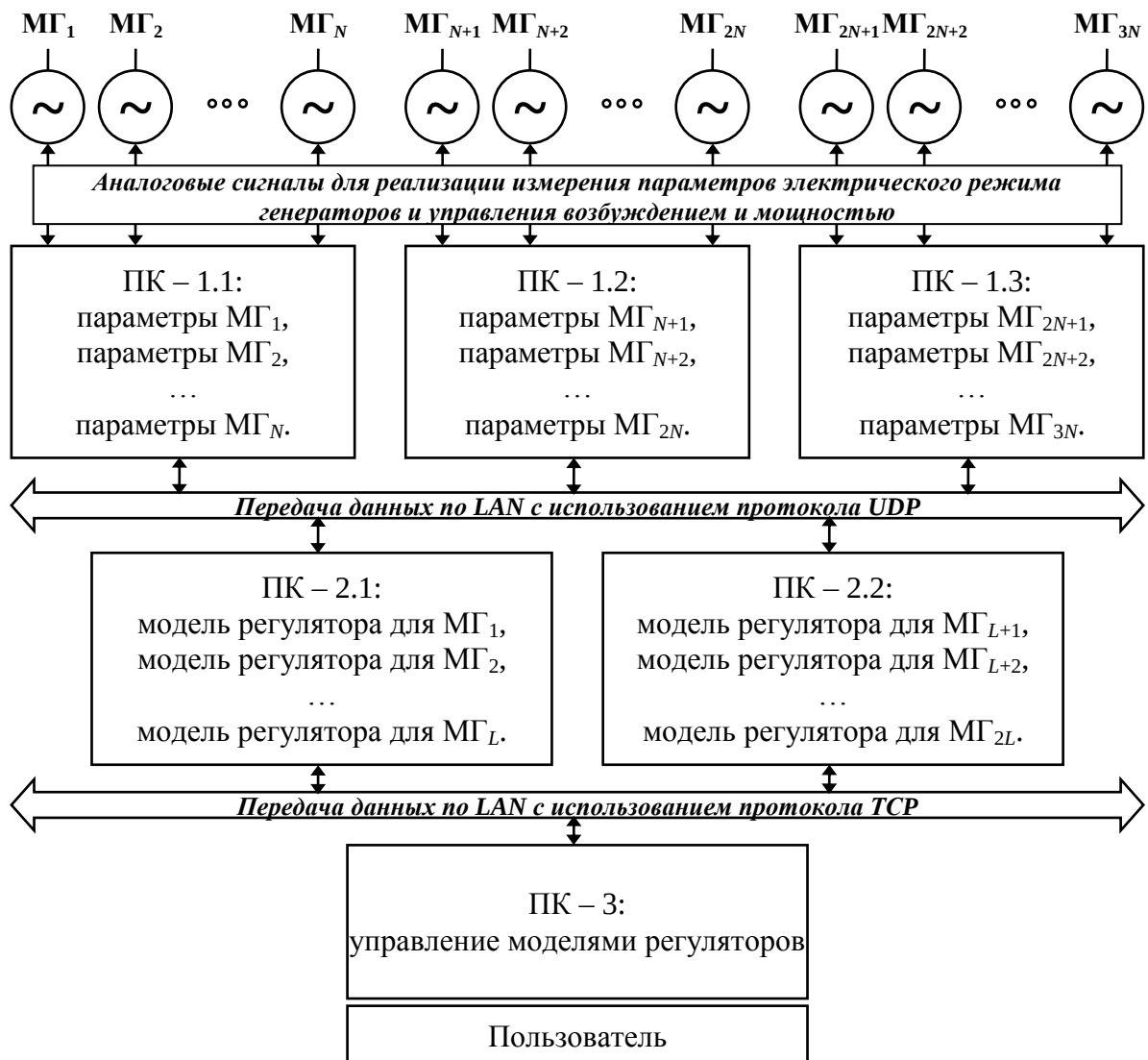


Рисунок 8 – Общая концепция построения ПТК

Так, при установке в ПК двух плат, реализуется возможность полноценного использования этих плат измерительными приложениями в

рамках ПТК. Выбор платы осуществляется изменением параметра «Исп. плата» в соответствии с ее порядковым номером в операционной системе (нумерация начинается с 0). Апробация показала пригодность данного подхода при использовании до двух плат включительно. Последующее наращивание состава оборудования не производилось, т.к. отсутствовали ПК с большим числом свободных слотов *PCI*.

Аналогично была апробирована работа исполнительных приложений совместно с измерительными в рамках одного ПК. Апробация показала пригодность данного подхода.

Естественно, что в качестве любого из дополнительных измерительных параметров могут использоваться параметры разных модельных генераторов. Таким образом, реализуется возможность создания математических моделей с функциями группового управления и регулирования. Кроме того, в рамках ПТК реализованы дополнительные связи между измерительными и исполнительными приложениями: на нижнем и верхнем уровне. Связь на нижнем уровне осуществляется с шагом 5 мс, связь на верхнем уровне с шагом 100 мс.

Исполнительное приложение предусматривает подключение одного основного источника данных и одного дополнительного – связь на нижнем уровне (с шагом 5 мс). Измерительное приложение обеспечивает передачу данных одному «главному» исполнительному приложению, и любому количеству второстепенных. При поступлении на измерительное приложение данных со значениями управляющих напряжений от исполнительных приложений, измерительное приложение проверяет, является ли источник «главным» исполнительным приложением. После чего осуществляется выдача напряжений. Т.е. управлять параметрами генератора может только одно подключенное исполнительное приложение.

Связь на верхнем уровне осуществляется при помощи приложения мониторинга элементом «Перемычка». Любой параметр одной математической модели регулятора может передаваться в качестве любого

параметра другой математической модели. Подобных «Перемычек» может быть реализовано значительное количество.

Возможный способ использования дополнительных связей показан на рисунке 9.

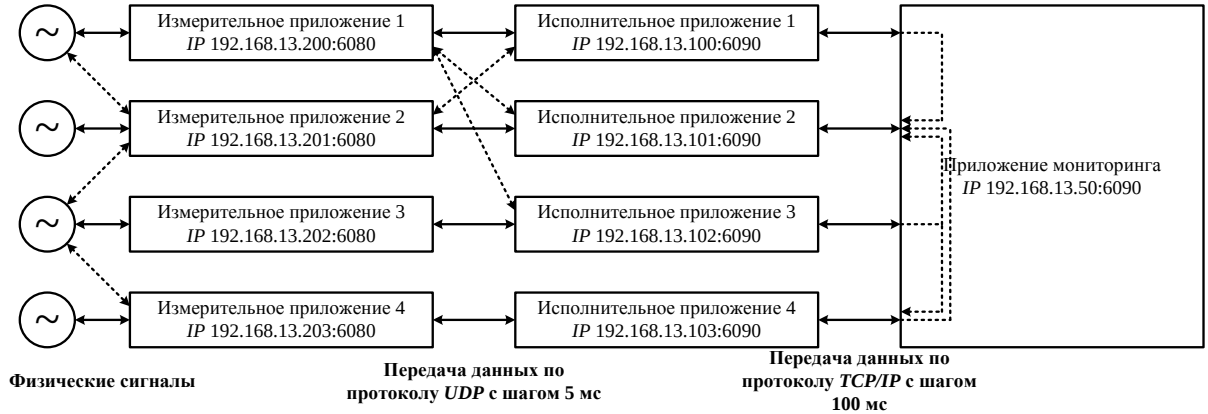


Рисунок 9 – Пояснение общих возможностей по реализации поперечных связей на физическом, нижнем и верхнем уровнях

Примечание: сплошными стрелками показаны основные связи компонентов ПТК, пунктирными стрелками – дополнительные

2.1. Общие требования к вычислительному оборудованию

Реализация функций измерений, математической обработки сигналов, расчета управляющих воздействий, взаимодействия в рамках сети *Ethernet* по протоколам *TCP/IP* и *UDP* накладывает ряд общих требований к вычислительному оборудованию. Требования предъявляются к имеющимся аппаратным средствам и программному обеспечению ПК.

2.1.1. Аппаратные требования

Измерительный ПК в своем составе должен включать следующие элементы:

1. Плата АЦП/ЦАП *L-791*,
2. Средства обеспечения связи по *LAN* (сетевая карта/*Wi-Fi*-адаптер в рамках сети *Wi-Fi*).

Реализация требований к производительности ПК проверяются пробным запуском измерительного приложения и отсутствием стопроцентной загрузки процессора.

Для работы исполнительного приложения и приложения мониторинга необходимы средства обеспечения связи по LAN. Реализация требований к производительности ПК проверяются аналогично.

2.1.2. Программные требования

На измерительном ПК должно быть установлено следующее программное обеспечение:

1. *Windows XP* (32-битная, проверялась работоспособность с *Service Pack 2* и *Service Pack 3*),
2. Драйвера платы *L-791* и поставляемые вместе с платой динамические библиотеки *DLL* (см. [1], <http://www.lcard.ru/>, <http://www.lcard.ru/download/lcomp.exe>),
3. Драйвера сетевой карты и выставленные сетевые настройки.

Для исполнительного приложения и приложения мониторинга – аналогично, за исключением драйверов платы *L-791*.

2.2. Подключение программно-технического комплекса к модельным генераторам ЦАФК

В соответствии с обобщенной концепцией построения ПТК, требованиями подключения платы *L-791*, структурой ЦАФК и имеющейся в его составе системой измерений и контрольно-измерительных вторичных цепей для апробации была предложена схема подключения ПТК к ЦАФК. Данный вариант не является эталонным и единственным в виду специфики проведения различного рода испытаний на ЦАФК.

Схема подключения состоит из трех основных частей: схема подключения первичных преобразователей и управляющих напряжений, схема вторичных цепей, схема подключения выводов платы АЦП/ЦАП. Кроме того, представлена схема принятых на ЦАФК датчиков токов и

напряжений (плат *LEM-I* и *LEM-U*), которые могут быть использованы в качестве измерительных преобразователей ПТК.

2.2.1. Принципиальная схема подключения программно-технического комплекса

Принципиальная схема подключения ПТК к ЦАФК представлена на рисунке 1. Основной задачей подключения ПТК к ЦАФК является организация подачи сигналов физического уровня (аналоговых сигналов). Данные сигналы должны отвечать напряжениям и токам фаз *A*, *B*, *C*, току возбуждения и напряжения возбуждения генератора, и быть гальванически развязаны друг от друга или объединены не более чем в одной точке (для защиты чувствительных входов платы *L-791* и ПК в целом от повреждения).

В связи с этим предлагается использовать комбинацию первичных преобразователей (измерительных трансформаторов тока и трансформаторов напряжения), и специальных измерительных преобразователей, обеспечивающих гальваническую развязку (см. рисунок 1).

Напряжения управления возбуждением и мощностью подаются в соответствующие системы управления ЦАФК. Кроме того, необходимо обеспечить гальваническую развязку выходов платы (каналов ЦАП). Это можно сделать, используя имеющийся на ЦАФК «Блок гальванической развязки» или преобразователей, аналогичных измерительным.

2.2.2. Схема подключения первичных преобразователей и управляющих напряжений

Схема подключения первичных преобразователей и управляющих напряжений представлена на рисунке 10. Обозначения на схеме:

1. СУ – система управления полупроводникового возбудителя;
2. ОВГ – обмотка возбуждения генератора;
3. Кл. Г – клеммы генератора;
4. Ст. – клеммы стеллажа генератора;
5. ПР – предохранители;
6. П.У. – клеммы панели управления генератора;
7. Шк. – шкаф клеммный генератора;
8. РВ – полупроводниковый регулятор возбуждения;
9. БПСН – блок питания стабилизированными напряжениями;

Для удобства, связи, подготовленные специально для работы ПТК и не являющиеся стационарными на ЦАФК, показаны красным цветом.

Как видно из рисунка, все сигналы физического уровня поступают в панель управления генератора. Необходимо обеспечить передачу данных сигналов к месту установки измерительных преобразователей.

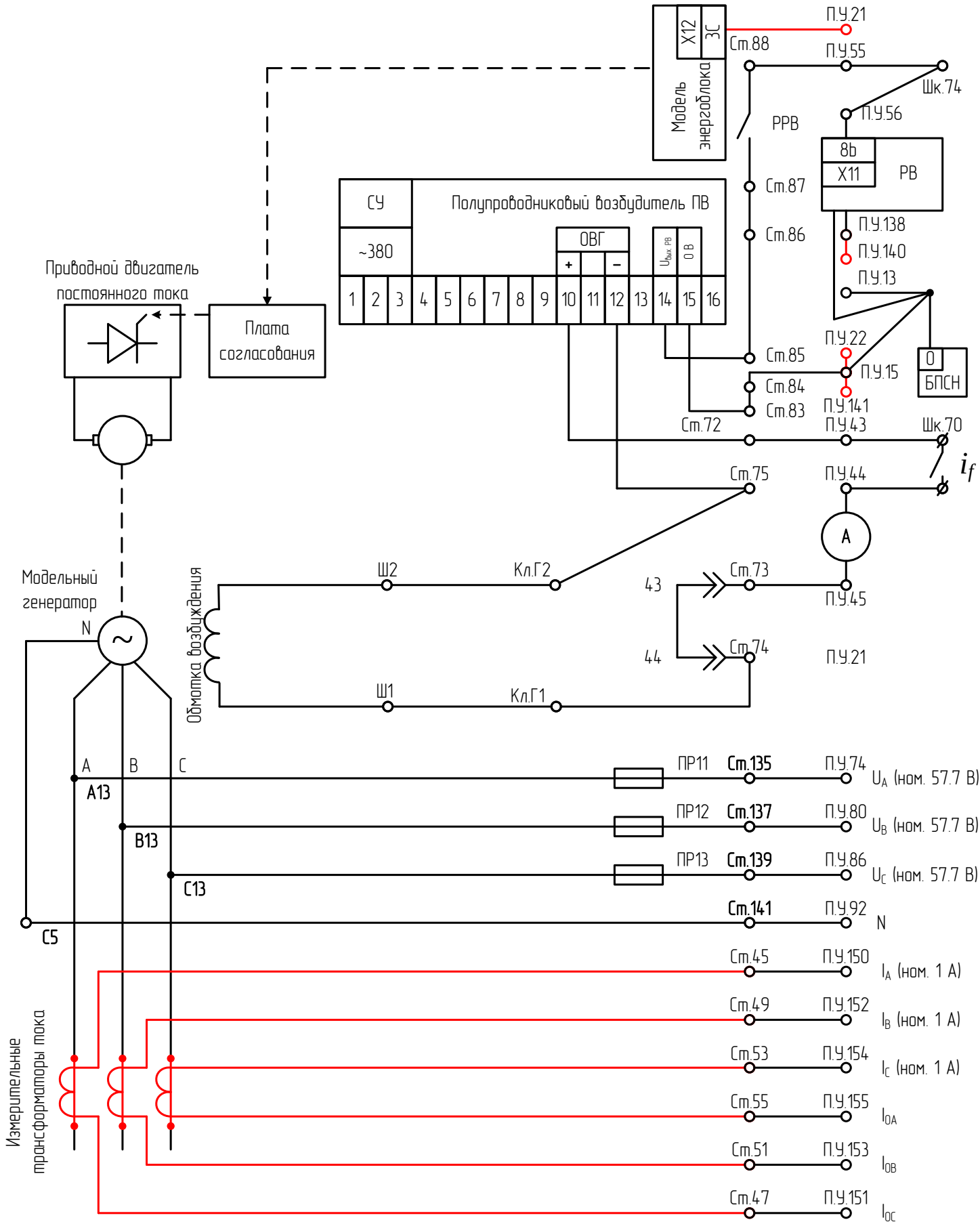


Рисунок 10 – Схема подключения первичных преобразователей и управляющих напряжений

2.2.3. Схема вторичных цепей

Вторичные цепи служат для организации передачи сигналов физического уровня непосредственно к месту установки измерительных преобразователей. Схема вторичных цепей представлена на рисунке 11.

Обозначения на схеме:

1. Шкл.ген. – шкаф клеммный генератора;
2. Ш1, Ш2 – разъемы генератора в поле разъемов лабораторного стола;
3. ПРЛС – поле разъемов лабораторного стола;
4. Шкл.ЛС – шкаф клеммный лабораторного стола;
5. ЛС – клеммы лабораторного стола.

Для удобства, связи, подготовленные специально для работы ПТК и не являющиеся стационарными на ЦАФК, показаны красным цветом.

Как видно из рисунка, сигналы физического уровня в соответствии с данной схемой поступают на клеммы лабораторного стола. Необходимо подключить измерительные преобразователи и непосредственно плату АПЦ/ЦАП L-791.

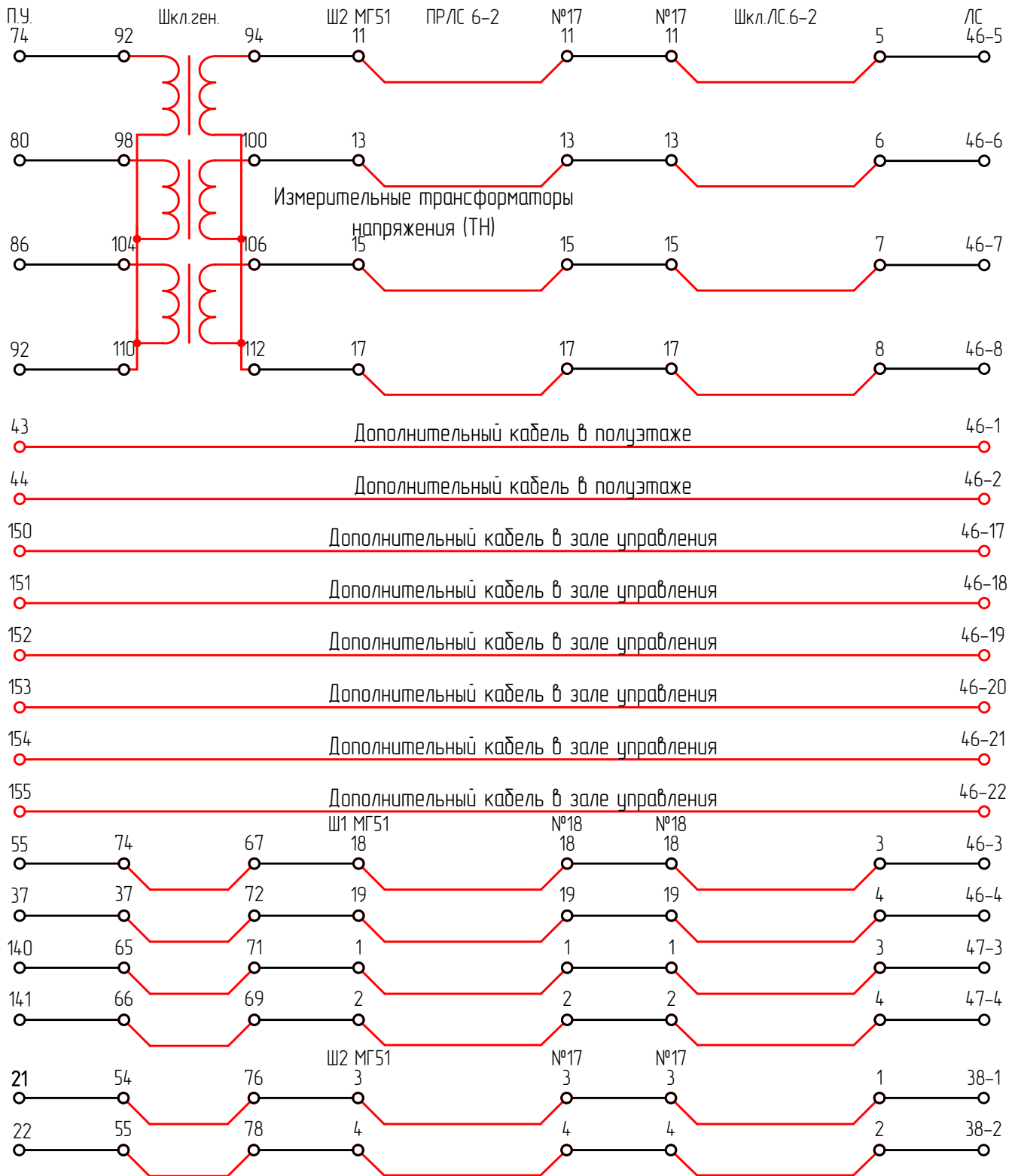


Рисунок 11 – Схема подключения вторичных цепей

2.2.4. Схема подключения выводов платы АЦП/ЦАП

Подключение платы АЦП/ЦАП осуществляется в соответствии с [1] и в соответствии с принятой системой основных сигналов физического уровня (см. п. 1.2). Схема представлена на рисунке 12. Обозначения на схеме:

1. *LEM-I* – измерительные преобразователи тока в напряжение ± 10 В;
2. *LEM-U* – измерительные преобразователи напряжения в напряжение ± 10 В;
3. *DAC1* – выход канала-1 ЦАП платы;
4. *DAC2* – выход канала-2 ЦАП платы;
5. *GND32* – в дифференциальном режиме должен быть подключен к *AGND*;
6. *AGND* – аналоговая земля *L-791*
7. *SYNC* – вход внешней синхронизации канала АЦП;
8. ТП – тиристорный преобразователь (данные точки подключения используются при измерении напряжения возбуждения непосредственно с обмотки возбуждения).

Как видно из рисунка, все основные сигналы физического уровня подключаются с помощью измерительных преобразователей – плат *LEM-U*, *LEM-I*, а выходные сигналы с ЦАП при помощи «Блоков гальванической развязки» (в качестве «Блоков гальванической развязки» можно пользоваться платами *LEM-U* с заданным коэффициентом передачи). Платы *LEM-U*, *LEM-I* являются типовым решением на ЦАФК для подключения и гальванической развязки сигналов физического уровня. Описание данных плат – приведено в следующем разделе.

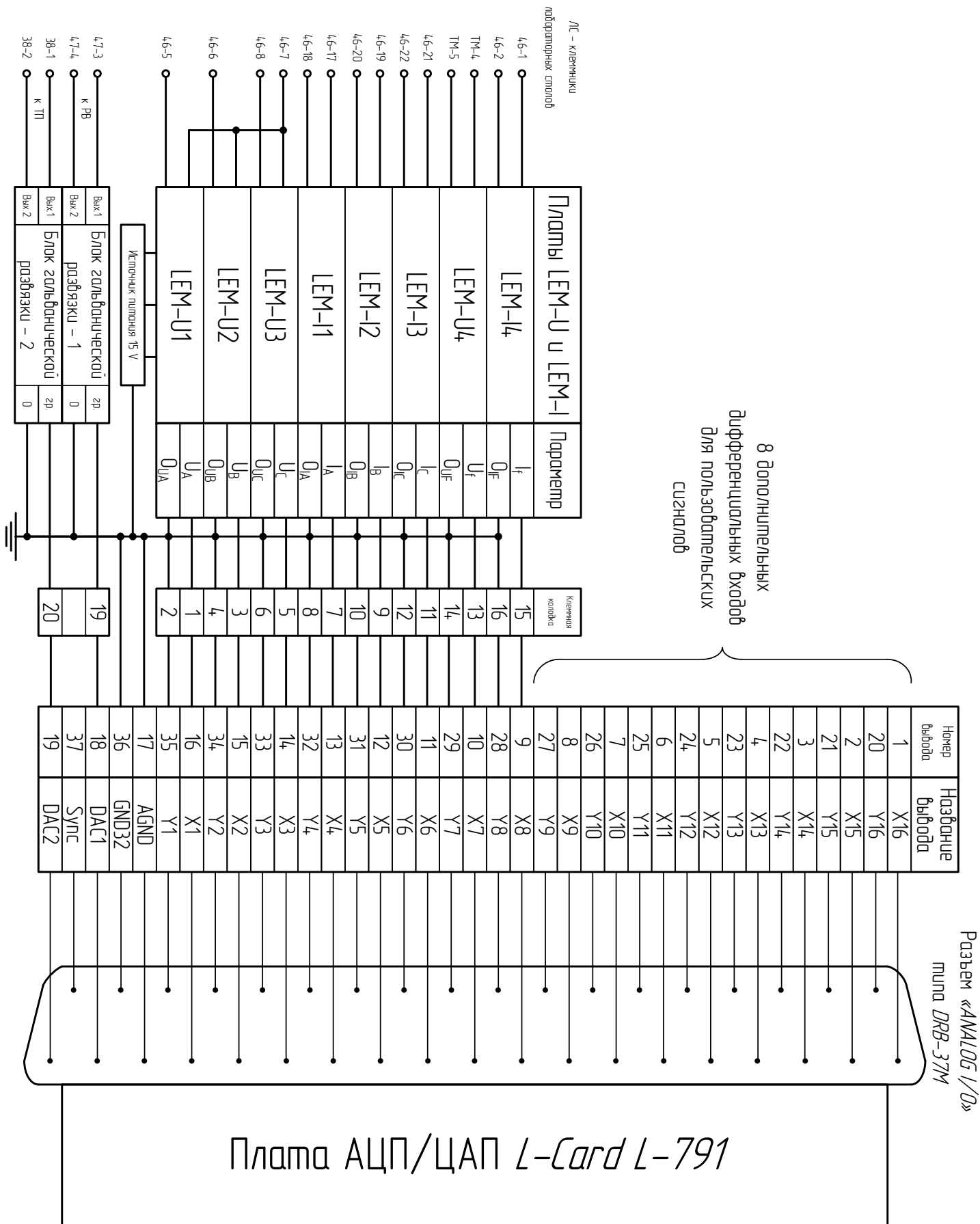


Рисунок 12 – Схема подключения выводов платы АЦП/ЦАП

2.2.5. Принципиальная схема подключения входных токов и напряжений к платам *LEM-U* и *LEM-I*, подключения выводных сигналов ± 10 В, подключения питания плат

Платы *LEM-U*, *LEM-I* позволяют выполнять преобразование сигналов физического уровня (напряжений и токов) в напряжения ± 10 В и осуществлять гальваническую развязку измерительного тракта вторичного по отношению к плате оборудования. Платы *LEM-U*, *LEM-I* являются типовым решением и разработаны специалистами ЦАФК.

Для апробации ПТК были использованы следующие величины сигналов физического уровня: значения фазных напряжений фаз А, В, С измерительного трансформатора напряжения в номинальном режиме генератора – 57.7 В (что соответствует 100 В $U_{\text{лин}}$), токи фаз А, В, С трансформатора тока в номинальном режиме генератора – 1 А, значение выходного сигнала системы возбуждения отвечающего напряжению возбуждения в номинальном режиме – 2.5 В, значение тока возбуждения генератора – 1 А.

На рисунке 13 представлена принципиальная схема плат *LEM-U*, *LEM-I*, подключение первичных измеряемых сигналов – напряжений (57.7 В) и токов (1 А), точки подключения к вторичным цепям, отвечающих сигналу по напряжению ± 10 В. В платах *LEM-U*, *LEM-I* используются преобразователи напряжения *LV25-P* и тока *LA25-P* (описание датчиков см. [2]). Питание датчиков напряжениями +15 В и -15 В обеспечивается блоками питания типа *DR-4515*.

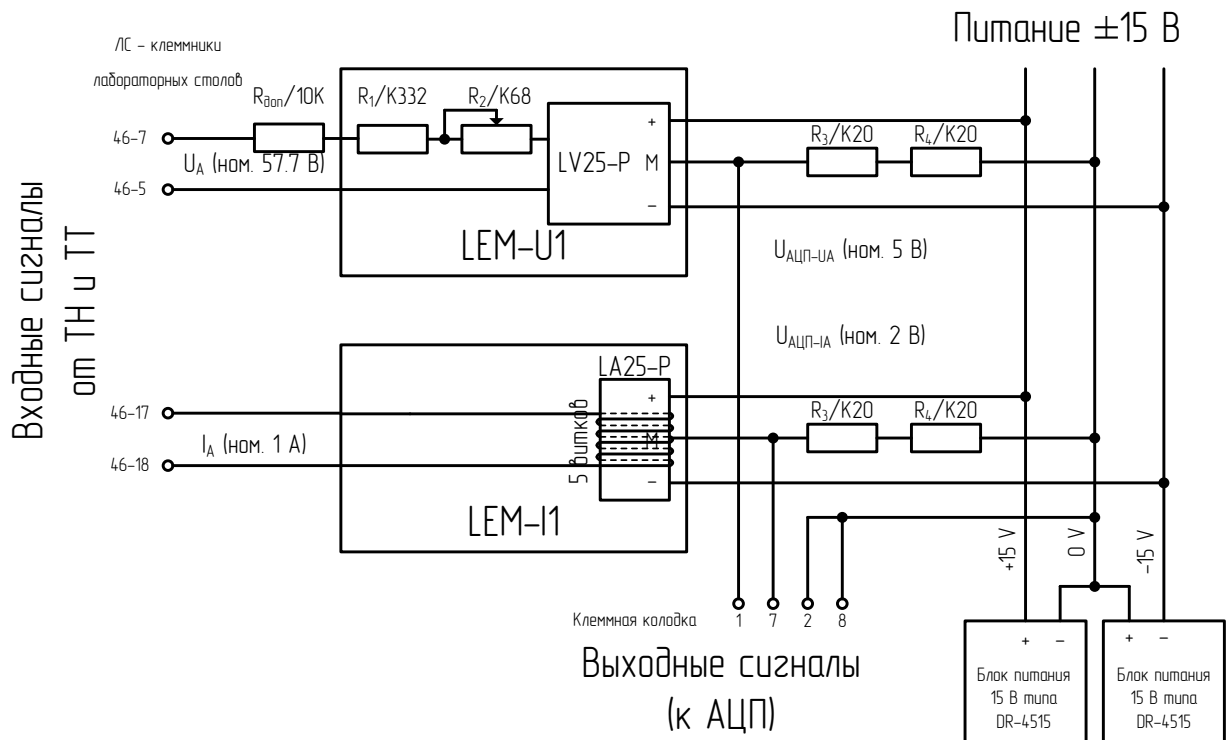


Рисунок 13 – Принципиальная схема подключения входных токов и напряжений к платам *LEM-U* и *LEM-I*, подключения выводных сигналов ± 10 В, подключения питания плат

Параметры элементов плат ($R_{доп}$, R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , количество витков, типы датчиков) подобраны в соответствии с требуемым коэффициентом передачи данных преобразователей. При необходимости расчет данных параметров может быть выполнен по аналогии со следующими выражениями:

$$U_{вх} = \frac{100}{\sqrt{3}} B = 57.7 B, \quad (3)$$

где $U_{вх}$ – номинальное значение измеряемого напряжения;

$$U_{вых} = 5 B, \quad (4)$$

где $U_{вых}$ – номинальное значение вторичного сигнала;

$$I_{вых} = \frac{U_{вых}}{R_3 + R_4} = \frac{5 B}{0.2 k\Omega + 0.2 k\Omega} = 12.5 mA, \quad (5)$$

где $I_{вых}$ – номинальное значение тока вторичной цепи платы, R_3 , R_4 – сопротивления вторичной цепи платы (см. рисунок 13);

$$I_{ex} = I_{ex}^{НОМ} \cdot \frac{I_{вых}}{I_{ex}^{НОМ}} = 10 \text{ мА} \cdot \frac{12.5 \text{ мА}}{25 \text{ мА}} = 5 \text{ мА} , \quad (6)$$

где I_{ex} – номинальное значение тока первичной цепи платы,
 $I_{ex}^{НОМ}$ – номинальное значение входного тока датчика *LEM-U* (LV25-P, см. [2],
 I_{PN} – *primary nominal current rms*),
 $I_{вых}^{НОМ}$ – номинальное значение выходного тока датчика *LEM-U* (LV25-P, см. [2], I_{SN} – *secondary nominal current rms*);

$$R_{ex} = \frac{U_{ex}}{I_{ex}} = \frac{100 / \sqrt{3} \text{ В}}{5 \text{ мА}} = 11.55 \text{ кОм} , \quad (7)$$

где R_{ex} – необходимое суммарное входное сопротивление для обеспечения необходимого коэффициента передачи;

$$R_{ex} = R_1 + R_2 + R_{вн} + R_{дон} , \quad (8)$$

где R_1, R_2 – сопротивления первичной цепи платы (см. рисунок 13),
 $R_{вн}$ – среднее внутреннее сопротивление датчика *LEM-U* (LV25-P, см. 2, R_m – *measuring resistance*; данный параметр от датчика к датчику может незначительно варьироваться, поэтому в плате *LEM-U* сопротивление R_2 выполняется регулируемым потенциометром с целью коррекции),
 $R_{дон}$ – сопротивление, обеспечивающее требуемый коэффициент передачи и оптимальный режим работы платы *LEM-U* при принятых значениях $U_{ex}, U_{вых}$ и существующих типовых схем платы *LEM-U*.

Значение $R_{дон}$ определяется из следующего выражения:

$$R_{дон} = R_{ex} - R_1 - R_2 - R_{вн} = (11.56 - 0.332 - 0.68 - 0.25) \text{ кОм} = 10.3 \text{ кОм} \quad (9)$$

Наиболее подходящее значение сопротивления из стандартного ряда выпускаемых резисторов $R_{дон} = 10 \text{ кОм}$.

Для платы *LEM-I*:

$$I_{ex} = 1 \text{ А} , \quad (10)$$

где I_{ex} – номинальное значение измеряемого тока;

$$U_{вых} = 2 \text{ В} , \quad (11)$$

где $U_{\text{вх}}$ – номинальное значение вторичного сигнала.

Напряжение $U_{\text{вх}}$ определяется из следующего соотношения:

$$U_{\text{вх}} = \frac{I_{\text{вх}} \cdot w}{I_{\text{ном}}} \cdot I_{\text{вх}} \cdot R_1 = \frac{I_{\text{вх}} \cdot w}{25 \cdot A \cdot e} \cdot 25 \cdot M \cdot A \cdot R_1(\text{кОм}) = I_{\text{вх}} \cdot w \cdot R_1(\text{кОм}), \quad (12)$$

где w – количество витков проводника первичной стороны (см. рисунок 13), $R_1(\text{кОм})$ – сопротивление вторичной цепи платы в кОм. Коэффициент передачи определяется следующим выражением:

$$k = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} = w \cdot R_1(\text{кОм}), \quad (13)$$

Тогда, чтобы обеспечить $U_{\text{вх}} = 2 \text{ В}$ при принятом числе витков $w = 5 \text{ вит.}$, необходимо принять $R_1(\text{кОм}) = 0.4 \text{ кОм}$:

$$k = 5 \text{ вит.} \cdot 0.4 \text{ кОм} = 2 \text{ В} / A. \quad (14)$$

Т.к. $R_1 = R_3 + R_4$ (см. рисунок 13) целесообразно принять $R_3 = 0.2 \text{ кОм}$ и $R_4 = 0.2 \text{ кОм}$.

Таким образом, при помощи плат *LEM-U*, *LEM-I* можно обеспечить требуемые коэффициенты передачи по напряжению и току, в зависимости от величины первичных параметров, и обеспечить гальваническую развязку первичных параметров и платы АЦП/ЦАП.

3. Программа формирования структуры цифровых регуляторов возбуждения и моделей управления турбиной

Приложение для задания закона управления является основным средством создания математических моделей для их реализации в рамках ПТК. Работа с данным приложением описана наиболее подробно, использованные принципы взаимодействия приложения и пользователя реализованы аналогично и в других компонентах (приложениях) программного обеспечения ПТК.

3.1.1. Интерфейс пользователя

Окно приложения для задания закона управления на рисунке 2. В верхней части окна находится строка главного меню приложения, под ним

панели инструментов, в нижней части – строка состояния. Оставшаяся площадь окна приложения занята основным рабочим полем, предназначенным для изображений формируемых математических моделей.

Главное меню содержит два элемента – «Схема» и «Лист» с подменю.

Подменю «Схема» содержит следующие операции:

1. «Новая» – выводит чистое рабочее поле. Имя файла сохранения математической модели (структуры) отсутствует. Если на момент начала операции в рабочем поле находилась несохраненная математическая модель, выводится запрос: «Сохранить изменения структуры?» и в случае согласия выполняется операция «Сохранить». В обратном случае, несохраненные данные пропадают;
2. «Чтение» – выводит стандартное диалоговое окно для выбора файла с сохраненной математической моделью. Если на момент начала операции в рабочем поле находилась несохраненная математическая модель, до вывода диалогового окна выводится запрос: «Сохранить изменения структуры?», и в случае согласия выполняется операция «Сохранить». В обратном случае, несохраненные данные пропадают;
3. «Сохранить» – сохраняет математическую модель в ранее назначенном файле с расширением «*.dat». Если файл сохранения ранее не был назначен, операция выполняется идентично операции «Сохранить как ...»;
4. «Сохранить как ...» – сохраняет математическую модель в файл с заданным именем с расширением «*.dat». Для задания имени сохраняемого файла выводится стандартное диалоговое окно для ввода имени файла;
5. «Записать в системный буфер» – записывает в системный буфер изображение рабочего поля приложения.

Математические модели регуляторов возбуждения или систем управления турбиной (и турбин) большой сложности могут не помещаться целиком в рабочем поле приложения. В таком случае математические модели можно формировать по частям, представляя каждую часть как отдельный лист. Листы нумеруются последовательно, начиная с единицы. Подменю «Лист» содержит следующие операции:

1. «Новый» – создает новый лист, увеличивая число листов на 1. Новый лист имеет максимальный номер и его изображение выводится на экран (рабочее поле приложения очищается);
2. «Предыдущий» – на рабочее поле приложения выводится изображение листа с номером на единицу меньше, чем текущий номер. Операция для листа с номером 1 недоступна;
3. «Следующий» – на рабочее поле приложения выводится изображение листа с номером на единицу больше, чем текущий номер. Операция для листа с максимальным номером недоступна;
4. «Удалить» – удаляет из структуры все блоки и связи расположенные на текущем листе. Номера последующих листов и общее число листов уменьшаются на единицу. На рабочее поле приложения выводится изображение следующего листа (после изменений имеет тот же номер, что удаляемый лист) или последнего листа (при удалении последнего листа);
5. «Записать в сист. буфер» – записывает в системный буфер изображение текущего листа приложения (идентична аналогичной программе подменю «Схема»).

Панели инструментов «Схема» и «Лист» дублируют операции главного меню. При наведении курсора на иконки операций во всплывающем окне появляются названия соответствующих операций. Операция «Сохранить» доступна только после внесения изменения в математическую модель.

Панель инструментов «Масштаб» позволяет увеличивать или уменьшать визуальные размеры математической модели на рабочем поле программы. Операции функционируют только для сохраненных математических моделей.

В строке состояния в нижней части окна программы находится информация о текущем номере листа, полном числе листов и имени файла сохранения математической модели. Для новой структуры число листов равно единице и имя файла не задано.

Панель инструментов содержит список всех блоков, используемых для формирования математических моделей, размещенных в закладках:

1. Измерение – данные, переданные измерительным приложением (действующие значения напряжения и тока, отклонение частоты и др.);
2. Управление – выдача данных на ЦАП, формирование управляющего сигнала (внутренних глобальных переменных) и др.;
3. Алгебра – арифметические операции, формирование константы;
4. Операторы – интеграл, апериодическое и колебательное звенья;
5. Логика – логические операции, формирователь, триггер, счетчик;
6. Нелинейность – ограничители сигналов, нелинейная функция, люфт, зона нечувствительности и др.;
7. Разное – запись параметра в файл, разрыв связи, надпись, сигнальная лампа.

Подробное описание реализованных блоков приведено в разделе 3.1.2.

Для размещения блока следует кликнуть левой клавишей мыши на изображении блока в панели инструментов, установить курсор мыши в нужном месте основного рабочего поля и кликнуть левой клавишей мыши повторно. Появившийся блок будет выделен, входы расположены слева, выход справа.

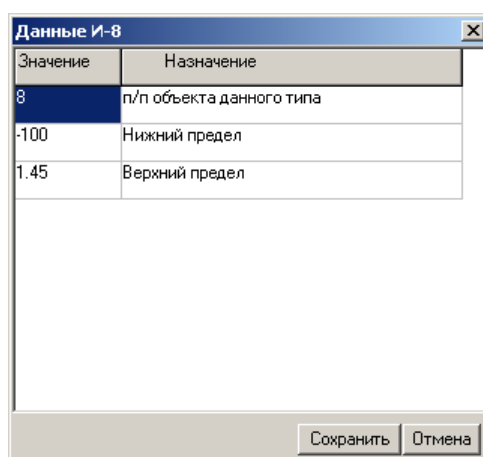
Чтобы вызвать всплывающее меню для выделенного блока, следует кликнуть правой клавишей мыши на изображение блока.

Чтобы изменить направление блока на противоположное, следует вызвать всплывающее меню, и выбрать пункт «Смена направления узла». После связывания блока (подключения других блоков к входу или выходу) эта операция становится недоступной.

Для выделения блока, следует кликнуть на изображении блока левой клавишей мыши. Выделенный блок имеет красный цвет и заключен в прямоугольник, который делит изображение блока на три зоны – входную с обрывками связей со стрелками, выходную, с обрывком связи без стрелок и среднюю зону. Для некоторых блоков входная или выходная зона, или обе эти зоны могут отсутствовать.

Чтобы удалить блок, его следует выделить, вызвать всплывающее меню и выбрать пункт «Удаление узла». Связанный блок удаляется вместе со связями.

Чтобы ввести или изменить параметры блока, следует вызвать всплывающее меню и выбрать пункт «Параметры узла» или «Список параметров». Появится окно с таблицей параметров блока (см. рисунок 14), или таблицей параметров блоков всей схемы (см. рисунок 15).



Значение	Назначение
8	п/п объекта данного типа
-100	Нижний предел
1.45	Верхний предел

Рисунок 14 – Таблица параметров блока

В первом случае таблица, кроме настроечных параметров, включает порядковый номер блока данного типа. Номер можно изменить. При этом пользователь должен сам следить за тем, чтобы в структуре не появилось

несколько однотипных блоков с одинаковыми номерами. Таблица «Список параметров» содержит только те блоки, которые имеют настроечные параметры.

Кнопка «Сохранить» закрывает окно, сохраняя все сделанные в таблице изменения. Кнопка «Отмена» закрывает окно без сохранения изменений.

В таблице «Список параметров» кнопка «Экспорт» позволяет содержание списка вывести в текстовый файл в формате csv-таблицы.

Шифр	Значение	Назначение
M1-8	0.02	Множитель
M1-8	0	Номер управления
M1-8	0	Множитель упр.
M1-9	0.0425	Множитель
M1-9	0	Номер управления
M1-9	0	Множитель упр.
M1-1	0.56	Множитель
M1-1	0	Номер управления
M1-1	0	Множитель упр.
M1-2	1.0526	Множитель
M1-2	0	Номер управления
M1-2	0	Множитель упр.
M1-3	0.0526	Множитель
M1-3	0	Номер управления
M1-3	0	Множитель упр.
M1-5	0.16	Множитель
M1-5	0	Номер управления
M1-5	0	Множитель упр.
M1-6	0.21	Множитель

Рисунок 15 – Список параметров всех блоков

После нажатия кнопки выводится форма для ввода имени создаваемого файла, представленная на рисунке 16:

Рисунок 16 – Окно задания имени файла вывода

Кнопка поиска «...» выводит стандартную форму ввода файла. Имя файла можно записать также непосредственно в окно имени файла. Кнопка

«Применить» завершает, а кнопка «Отмена» отменяет процедуру экспорта. Если экспорт осуществляется в существующий файл, выводится вопрос: «Заменить существующий файл <имя файла>?». При ответе «Нет» экспорт отменяется.

Связь двух блоков начинается на выходе первого и заканчивается на входе или одном из входов второго блока. К выходу блока можно подключить произвольное число связей, к входу блока подводится только одна связь. Связь состоит из одного горизонтального отрезка или из последовательности чередующихся горизонтальных и вертикальных отрезков.

Для того чтобы установить связь между двумя блоками, нужно выделить блок начала связи, после чего установить курсор на выходной зоне помеченного блока, и нажать левую клавишу мыши. Курсор изменяет вид, принимая форму курсора «Рука», и после опускания клавиши – перекрестия. Точки кликов оказываются соединенными ломаными из горизонтальных и вертикальных участков. Кликнув по стрелке незанятого входа блока конца связи, формирование связи завершается, и курсор приобретает форму «Стрелка». Если в процессе формирования связи кликнуть на занятый вход любого блока, незавершенная связь удаляется.

Для удаления связи можно пометить блок конца связи и кликнуть на стрелке удаляемой связи. Появится вопрос: «Удалить связь?». При утвердительном ответе связь будет удалена. Второй способ – установить курсор в любом месте удаляемой связи, и вызвать всплывающее меню, кликнув правой клавишей мыши. В появившемся меню выбрать опцию «Удалить связь». Если при вызове всплывающего меню курсор не указывает на связь, эта опция окажется недоступной.

Блоки и связи структуры можно в пределах листа перемещать. При перемещении блока перемещаются и его связи, а при перемещении части связи ее начало и конец фиксированы (не перемещаются). Эти условия накладывают ограничение на возможные перемещения.

Для того чтобы переместить блок, его необходимо пометить, и нажать клавишу в средней зоне помеченного блока. Курсор меняется, указывая допустимость перетаскивания (стрелка с прямоугольником). Не отпуская клавиши, необходимо передвинуть курсор в требуемом направлении. При этом обрамляющий блок прямоугольник смещается вместе с курсором. После отпускания клавиши блок вместе со связями займет новое место. Если перемещаемый прямоугольник попадает в зону недопустимого перемещения, курсор принимает форму «Перечеркнутый круг». В этом случае после отпускания клавиши блок остается на старом месте.

Для перетаскивания связи устанавливают на связь курсор. Если курсор не изменился, связь перетаскивать невозможно. Если курсор принял форму, указывающую на допустимость перетаскивания (два параллельных отрезка с отходящими стрелками), необходимо нажать на левую кнопку мыши. Перетаскиваемая часть связи меняет цвет на красный, после чего отрезок связи устанавливается на новое место, кнопку мыши можно отпустить. Связь восстанавливается в новом виде. Если новое положение связи недопустимо, форма курсора меняется на стандартную.

Если перетаскивание узла в некотором направлении невозможно, то надо определить причину и устранить ее. Лучше всего это показать на простом примере. Пусть структура состоит из двух блоков, связанных горизонтальной связью без изломов. Горизонтальное перемещение блоков допустимо, приводит к удлинению или укорочению связи. Вертикальному перемещению препятствует связь. При вертикальном перемещении связь должна иметь характер ломаной линии, включающей вертикальный отрезок. Чтобы сделать возможным вертикальное перемещение, надо в связь вставить вертикальную составляющую. Для этого необходимо подвести курсор к связи в месте предполагаемого излома и кликом правой клавиши мыши вызвать всплывающее меню. В меню выбрать опцию «Изменить связь». Эта команда вставляет в связь звено нулевой длины, которое при перемещении блока в вертикальном направлении увеличит свою длину до требуемого

значения. В более сложной схеме, связей, препятствующих перемещению блока, может быть несколько, и для каждой такой связи следует сформировать указанным способом свое фиктивное звено. Если сегмент связи допускает перемещение, или курсор при вызове всплывающего меню не указывает на связь, опция «Изменить связь» всплывающего меню недоступна.

Таким же образом, путем формирования фиктивных звеньев, можно перемещать непереключаемые сегменты связей. После любого перемещения блока или сегмента связи все сегменты связей нулевой длины удаляются.

С блоками связаны алгоритмы вычислений, которые исполнительным приложением обрабатываются последовательно, в порядке следования в списке блоков. Этот порядок в основном определяется последовательностью занесения блоков в математическую модель. Номер блока в списке указан в нижнем правом углу изображения блока на рабочем поле приложения. Для улучшения условий сходимости расчетного метода важно, чтобы к моменту обработки алгоритма блока, все его входные параметры были вычислены при обработке предшествующих блоков. Это не всегда возможно, т.к. в схеме могут быть обратные связи, и расчет приходится выполнять путем последовательных приближений. Тем не менее, число входных параметров, которые не вычислены к моменту их использования, должен быть минимальным.

Порядок следования блоков можно откорректировать с помощью опций «Переставить по номеру» и «Переставить по связи», входящих во всплывающее меню помеченного блока. При выборе опции «Переставить по номеру» выводится форма для ввода нового номера помеченного блока, приведенная на рисунке 17.

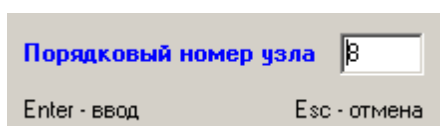
A screenshot of a software interface showing a dialog box for entering a node number. The title bar of the dialog box is light gray. Inside, the text "Порядковый номер узла" (Sequential node number) is displayed in blue. To its right is a text input field containing the number "8". Below the input field, there are two instructions: "Enter - ввод" (Enter - input) on the left and "Esc - отмена" (Esc - cancel) on the right.

Рисунок 17 – Ввод номера

Блок с номером, равным вводимому, и блоки, с номерами из промежутка между старым и новым порядковым номером помеченного блока увеличивают или уменьшают свой номер на единицу, в зависимости от того, больше вновь вводимый номер старого или меньше. При выборе опции «Переставить по связи» порядковый номер помеченного блока становится на единицу больше номера блока, непосредственно связанного с помеченным блоком по первому (верхнему) входу. При этом блоки разрыва не учитываются.

Выход из приложения мониторинга осуществляется с помощью кнопки «х» в верхнем правом углу приложения. Если математическая модель на момент завершения содержит несохраненные изменения, выводится запрос «Сохранить изменения схемы?».

3.1.2. Реализованные блоки

ПТК включает 46 различных типов блоков, позволяющих пользователю создавать различные математические модели. Общая структура библиотеки блоков приведена на рисунке 18, перечень всех блоков и их описания представлены в таблице 1.



Рисунок 18 – Размещение блоков по вкладкам приложения для задания закона управления

Таблица 1. Реализованные в ПТК блоки для задания и реализации требуемого закона управления

№	Название блока: внутренние параметры	Шифр	Краткое описание
1	Веществ. сост. напряжения: <i>Масштаб</i>	U_a	На выходе блока сигнал, равный произведению параметра «Масштаб» на значение получаемого в данный момент от измерительного приложения по сети сигнала, соответствующего вещественной составляющей напряжения генератора.
2	Мнимая сост. напряжения: <i>Масштаб</i>	U_r	Аналогично для мнимой составляющей напряжения генератора.
3	Веществ.сост.тока: <i>Масштаб</i>	I_a	Аналогично для вещественной составляющей тока генератора.
4	Мнимая сост. тока: <i>Масштаб</i>	I_r	Аналогично для мнимой составляющей тока генератора.
5	Отклонение частоты: <i>Масштаб</i>	dF	На выходе блока сигнал, равный произведению параметра «Масштаб» на значение получаемого в данный момент от измерительного приложения по сети сигнала, соответствующего отклонению частоты (в МГц) напряжения генератора.
6	Напряжение: <i>Масштаб</i>	U	На выходе блока сигнал, равный произведению параметра «Масштаб» на значение получаемого в данный момент от измерительного приложения по сети сигнала, соответствующего действующему значению напряжения генератора.
7	Ток: <i>Масштаб</i>	I	Аналогично для действующего значения тока генератора.
8	Активная мощность: <i>Масштаб</i>	P	Аналогично для действующего значения активной мощности генератора.
9	Расчет реакт. Мощности: <i>Масштаб</i>	Q	Аналогично для действующего значения реактивной мощности генератора.
10	Угол U и I : <i>Масштаб</i>	F'	На выходе блока сигнал, равный произведению параметра «Масштаб» на значение получаемого в данный момент от измерительного приложения по сети сигнала, соответствующего значению угла между током и напряжением (в град.).
11	Данные АЦП: <i>Измерительный канал Масштаб</i>	АЦП	На выходе блока сигнал, равный произведению параметра «Масштаб» на значение получаемого в данный момент от измерительного приложения по сети сигнала в буфере (см. таблицу 2) номера «Измерительный канал».

№	Название блока: внутренние параметры	Шифр	Краткое описание
12	Сумма-2	<i>Add</i>	На выходе блока сигнал, равный сумме значений двух входных сигналов.
13	Сумма-3	<i>Add2</i>	На выходе блока сигнал, равный сумме значений трех входных сигналов.
14	Разность	<i>Sub</i>	На выходе блока сигнал, равный разности значений сигналов входа-1 и входа-2.
15	Умножение на константу: <i>Множитель</i> <i>Номер управления</i> <i>Множитель упр.</i>	<i>M1</i>	На выходе блока сигнал, равный произведению параметра «Множитель упр.» на значение входного сигнала, если внутренняя глобальная расчетная переменная – управление номера «Номер управления» установлена в «Вкл.», иначе – произведение значение входного сигнала и «Множитель».
16	Перемножение чисел	<i>M2</i>	На выходе блока сигнал, равный произведению значений двух входных сигналов.
17	Деление на константу: <i>Делитель</i> <i>Номер управления</i>	<i>Div1</i>	На выходе блока сигнал, равный отношению значения входного сигнала к параметру «Делитель», если внутренняя глобальная расчетная переменная – управление номера «Номер управления» установлена в «Вкл.» и модуль параметра «Делитель» больше 0.01, иначе – на выходе блока 0.
18	Деление чисел: <i>Выход при знам.</i> <i>= 0</i>	<i>Div2</i>	На выходе блока сигнал, равный отношению значений сигналов входа-1 и входа-2, если модуль сигнала входа-2 больше 0.01, иначе – на выходе значение параметра « <i>Выход при знам. = 0</i> »
19	Константа: <i>Константа</i>	<i>C</i>	На выходе блока постоянный сигнал, равный значению параметра «Константа».
20	Минимум	<i>Min</i>	На выходе блока сигнал, равный меньшему значению из двух входных сигналов.
21	Максимум	<i>Max</i>	На выходе блока сигнал, равный большему значению из двух входных сигналов.
22	Конъюнкция	<i>And</i>	На выходе блока 1, если модули значений обоих входных сигналов больше 0.01, иначе – на выходе блока 0.
23	Дизъюнкция	<i>Or</i>	На выходе блока 0, если модули значений обоих входных сигналов меньше 0.01, иначе – на выходе блока 1.
24	Логическое отрицание	<i>Not</i>	На выходе блока 0, если модуль значения входного сигнала больше 0.01, иначе – на выходе блока 1.

№	Название блока: внутренние параметры	Шифр	Краткое описание
25	Триггер Шмитта: <i>Пороговое значение</i>	ТШ	На выходе блока 1, если значение входного сигнала превышает значение параметра «Пороговое значение», иначе 0.
26	Триггер: <i>Амплитуда выхода Номер управления</i>	ТР	На выходе блока сигнал, отвечающий предшествующему состоянию. Изменение значения выходного сигнала к значению параметра «Амплитуда выхода» происходит если: 1. внутренняя глобальная расчетная переменная – управление номера «Номер управления» установлена в «Вкл.», 2. модуль значения сигнала входа-1 ($S - Set$) больше 0.01, 3. модуль значения сигнала входа-2 ($R - Reset$) меньше 0.01. Изменение значения выходного сигнала к значению 0 происходит, если внутренняя глобальная расчетная переменная – управление номера «Номер управления» установлена в «Выкл.» или модуль значения сигнала входа-2 ($R - Reset$) больше 0.01.
27	Счетчик: <i>Заданное число Номер управления</i>	СТ	На выходе блока сигнал, равный 1, если: 1. внутренняя глобальная расчетная переменная – управление номера «Номер управления» установлена в «Вкл.», 2. внутренняя переменная блока достигла значения «Заданное число» (после чего внутренняя переменная сбрасывается). Внутренняя переменная блока изменяется, если внутренняя глобальная расчетная переменная – управление номера «Номер управления» установлена в «Вкл.». Внутренняя переменная блока увеличивается на 1, если модуль значения сигнала входа-1 ($S - Set$) больше 0.01. Если модуль значения сигнала входа-2 ($R - Reset$) больше 0.01 внутренняя переменная блока сбрасывается.

№	Название блока: внутренние параметры	Шифр	Краткое описание
28	Нелинейность	НЛ	На вход данного блока подается два параметра: первый – некоторый сигнал, второй – выход блока «Таблица», в которой пользователем задается некоторая функция парами аргумент – значение. На выходе данного блока будет сигнал, отвечающий заданной функции, аргументом которой являются значения сигнала входа-1. В случае, если значение сигнала входа-1 попадает между двумя заданными в блоке «Таблица» точками – значение выхода рассчитывается с использованием линейной аппроксимации.
29	Ограничение: <i>Нижняя граница</i> <i>Верхняя граница</i>	Г	На выходе блока сигнал равный значению входного сигнала, если значение входного сигнала больше параметра «Нижняя граница» и меньше параметра «Верхняя граница». На выходе блока сигнал, значение которого равно параметру «Нижняя граница», если значение входного сигнала меньше параметра «Нижняя граница», аналогично для «Верхней границы».
30	Управляемое ограничение	ГУ	Работа данного блока аналогична блоку «Ограничение», параметры «Верхняя граница» и «Нижняя граница» – входные сигналы.
31	Зона нечувствительности: <i>Ширина зоны</i>	ЗН	На выходе блока 0, если модуль значения входного сигнала меньше параметра «Ширина зоны», иначе: 1. если значение входного сигнал больше 0, на выходе блока будет установлено значение равное разности входного сигнала и модуля параметра «Ширина зоны», 2. если значение входной сигнал меньше 0, на выходе блока будет установлено значение равное сумме входного сигнала и модуля параметра «Ширина зоны».
32	Люфт: <i>Ширина люфта</i>	Л	Если модуль разности выходного и входного сигналов блока меньше величины «Ширина люфта», то выходной сигнал не меняется. Иначе если производная входного сигнала > 0 , на выходе блока сигнал равный значению разности входного сигнала и величины параметра «Ширина люфта», если производная входного сигнала < 0 , величина «Ширина люфта» к сигналу добавляется.

№	Название блока: внутренние параметры	Шифр	Краткое описание
33	Задержка: <i>Задержка (мс)</i> <i>Макс. задержка (мс)</i>	ЗВ	На выходе данного блока сигнал, полученный задержкой входного сигнала на время равное значению параметра «Задержка времени (мс)». Значение параметра «Задержка времени (мс)» должно быть кратно 5. Работа данного блока привязывается к моментам получения входных данных, поэтому в случае ненадежной передачи фактическое время выдержки может превышать заданное. Если часть пакетов потеряна, данные, сохраненные в памяти, отвечающие моментам времени пропущенных (потерянных) пакетов, игнорируются. Параметр «Макс. задержка (мс)» ограничивает удаленное изменение параметра «Задержка (мс)» приложением мониторинга.
34	Таблица нелинейности	Таб	Блок служит для задания таблицы нелинейной функции парами аргумент – значение. Чем больше будет задано точек – тем точнее будет восстановлено значение функции, однако тем больше потребуются операций для выбора необходимого значения блоком «Нелинейность». Возможна загрузка таблицы значений из CSV-файла.
35	Выдержка: <i>Выдержка (мс)</i>	ВВ	На выходе блока в обычном состоянии 0. Значение параметра «Выдержка времени (мс)» должно быть кратно 5. На выходе блока устанавливается 1, если заданное параметром «Выдержка (мс)» время назад значение модуля входного сигнала превысило 0.01. При запуске работы блока последующие запуски игнорируются, пока не будет выставлено значение на выходе, равное 1.
36	Запись в файл: <i>Имя параметра</i>	ЗН	Блок позволяет осуществлять запись в файл значений входного сигнала. Файл имеет структуру CSV. Файл содержит таблицу, шапка которой, включает «Время» и все входящие в структуру закона управления параметры «Имя параметра».
37	Начало разрыва	-	Блок служит для удобства представления информации и передачи входных сигналов в качестве выходных блока «Конец разрыва». Блок «Конец разрыва» может находиться на другом листе файла *.dat в приложении для задания закона управления. Блок может передавать параметры нескольким блокам «Конец разрыва».

№	Название блока: внутренние параметры	Шифр	Краткое описание
38	Конец разрыва: <i>Номер начала</i>	-	На выходе блока сигнал, являющийся входным сигналом блока «Начало разрыва» номера «Номер начала».
39	Надпись: <i>Имя параметра</i> <i>Размер шрифта</i>	-	Отображает в основном рабочем пространстве приложения для задания закона управления поясняющий текст «Имя параметра». Кегль шрифта текста меняется параметром «Размер шрифта»
40	Сигнальная лампа: <i>Номер лампы</i>	СЛ	Переключает внутреннюю глобальную переменную индикатор номера «Номер лампы» в состояние «Вкл.», если модуль значения входного сигнала больше 0.01. Сигнальные лампы отображаются на передней панели исполнительного приложения.
41	Выдача данных на ЦАП: <i>Номер ЦАП</i> <i>Масштаб</i>	ЦАП	Произведение входного параметра блока и параметра «Масштаб» заносится в ячейку буфера «Номер ЦАП» (1 или 2) для передачи измерительному приложению с последующей выдачей его в виде напряжения.
42	Блокировка: <i>Номер управления</i>	БЛ	На выходе блока входной сигнал, если внутренняя глобальная расчетная переменная – управление номера «Номер управления» установлена в «Вкл.», иначе 0.
43	Управление по сигналу: <i>Номер управления</i>	УС	Блок устанавливает внутреннюю глобальную расчетную переменную управление номера «Номер управления» в «Вкл.», если модуль значения входного сигнала блока больше 0.01, иначе переменная устанавливается в «Выкл.».
44	Интегратор: <i>Нижний предел</i> <i>Верхний предел</i>	И	На выходе блока сигнал, равный интегральной величине входного сигнала, если значение данной интегральной величины больше параметра «Нижний предел» и меньше параметра «Верхний предел». Если значение внутренней расчетной величины блока достигает значения параметра «Верхнего предела» его дальнейшее увеличение не происходит. Это позволяет выходной величине сразу изменить свое значение в случае смены знака входной величины. Аналогично для параметра «Нижний предел».

№	Название блока: внутренние параметры	Шифр	Краткое описание
45	Апериодическое звено: A1-коэф. знаменателя B0-коэф. числителя B1-коэф. Числителя Номер управления	AЗ	На выходе блока – сигнал Y, где Y определяется выражениями, описывающими апериодическое звено следующего вида: если внутренняя глобальная расчетная переменная – управление номера «Номер управления» установлена в «Вкл.», то $\boxed{X} \rightarrow \boxed{\frac{B_0 + B_1 p}{1 + A_1 p}} \rightarrow \boxed{Y}$ где X – входной сигнал блока, A_1, B_0, B_1 – соответствующие параметры блока; если внутренняя глобальная расчетная переменная – управление номера «Номер управления» установлена в «Выкл.», то выходной сигнал описывается выражением $\frac{B_0}{1 + 0.01 p}$.
46	Колебательное звено: A1-коэф. знаменателя A2-коэф. знаменателя B0-коэф. числителя B1-коэф. числителя B2-коэф. числителя Номер управления	KЗ	На выходе блока – сигнал Y, где Y определяется выражениями, описывающими колебательное звено следующего вида: если внутренняя глобальная расчетная переменная – управление номера «Номер управления» установлена в «Вкл.», то $\boxed{X} \rightarrow \boxed{\frac{B_0 + B_1 p + B_2 p^2}{1 + A_1 p + A_2 p^2}} \rightarrow \boxed{Y}$ где X – входной сигнал блока, A_1, A_2, B_0, B_1, B_2 – соответствующие параметры блока; если внутренняя глобальная расчетная переменная – управление номера «Номер управления» установлена в «Выкл.», то выходной сигнал описывается выражением $\frac{B_0}{1 + 0.01 p + 0.000025 p^2}$. Примечание: алгоритмом расчета получение блока «Апериодическое звено» из блока «Колебательное звено» не предусмотрено (при задании $A_2 = 0, B_2 = 0$) – при расчете возможны ошибки.

3.1.3. Структура используемых файлов

Приложение для создания закона управления использует две группы файлов: файлы математических моделей («*.dat») и служебные файлы. Файлы математических моделей содержат все элементы математических моделей, их параметры, а также служебные элементы, для обеспечения расчета.

Служебные файлы, обеспечивающие работу приложения, следующие:

1. *borIndmm.dll*;
2. *cc3260mt.dll*;
3. *nmfast60.bpl*;
4. *rtl60.bpl*;
5. *stlpmt45.dll*;
6. *vcl60.bpl*;
7. *vclx60.bpl*.

Эти файлы должны находиться в директории вместе с приложением *WinFormRegul.exe* для создания закона управления.

4. Программа цифровых измерений и расчета параметров электрического режима синхронного генератора

Измерительное приложение осуществляет получение параметров электрического режима генератора по мгновенным значениям напряжения статора генератора, тока статора генератора, напряжения возбуждения и тока возбуждения генератора. Кроме того, приложение осуществляет измерение до 8 пользовательских постоянных сигналов.

Измерение синусоидальных сигналов осуществляется на интервале 20 мс (при помощи кольцевого буфера и метода, описанного в [3], выдача результата выполняется каждые 5 мс), постоянных сигналов на интервале 5 мс. Интервалы 5 мс обеспечиваются при помощи использования тактирующих возможностей платы АЦП/ЦАП *L-791* (см. Прерывания [1]). Таким образом, при составлении математических моделей необходимо учитывать интервал времени (20 мс), необходимый для измерения

синусоидальных величин напряжений и токов 50 Гц, и интервал усреднения постоянных сигналов (5 мс). На рисунках 19 и 20 показаны измеряемые синусоидальные и постоянные сигналы и получаемые при их измерении результаты.

Рисунок 19 соответствует подаче напряжений фаз A , B , C в момент времени $t = 0$ к плате АЦП/ЦАП. Установление выходного сигнала (действующее значение напряжения прямой последовательности) имеет характер близкий к экспоненциальному (в пределах погрешности 10%) с постоянной времени ≈ 0.007 с.

Обычно существующие цифровые устройства выполняют измерения параметров электрического режима электротехнического оборудования аналогичным способом. Тем не менее, при создании математических моделей необходимо учитывать характеристики данного преобразования, т.к. некоторые готовые математические модели содержат элементы, назначение которых – реализация динамических характеристик первичных преобразователей и функции первичной обработки сигналов.

Рисунок 20 отражает существующие естественные задержки измерений постоянных сигналов, связанные с интервалом усреднения. Частота дискретизации измерений составляет 200 Гц, частота Найквиста составляет 100 Гц. В виду этого существуют естественные ограничения при измерении сигналов высокой частоты.

Полученные измеренные параметры передаются исполнительному приложению по сети по протоколу *UDP*. В свою очередь исполнительное приложение после расчета значений управляющих воздействий передает их значения на измерительное приложение по протоколу *UDP*. Полученные значения управляющих воздействий при помощи ЦАП преобразуются в напряжения с заданным масштабом преобразования. Данные напряжения в соответствии с обобщенной структурой ПТК и предложенной схемой должны подаваться в системы управления возбуждением и мощностью.

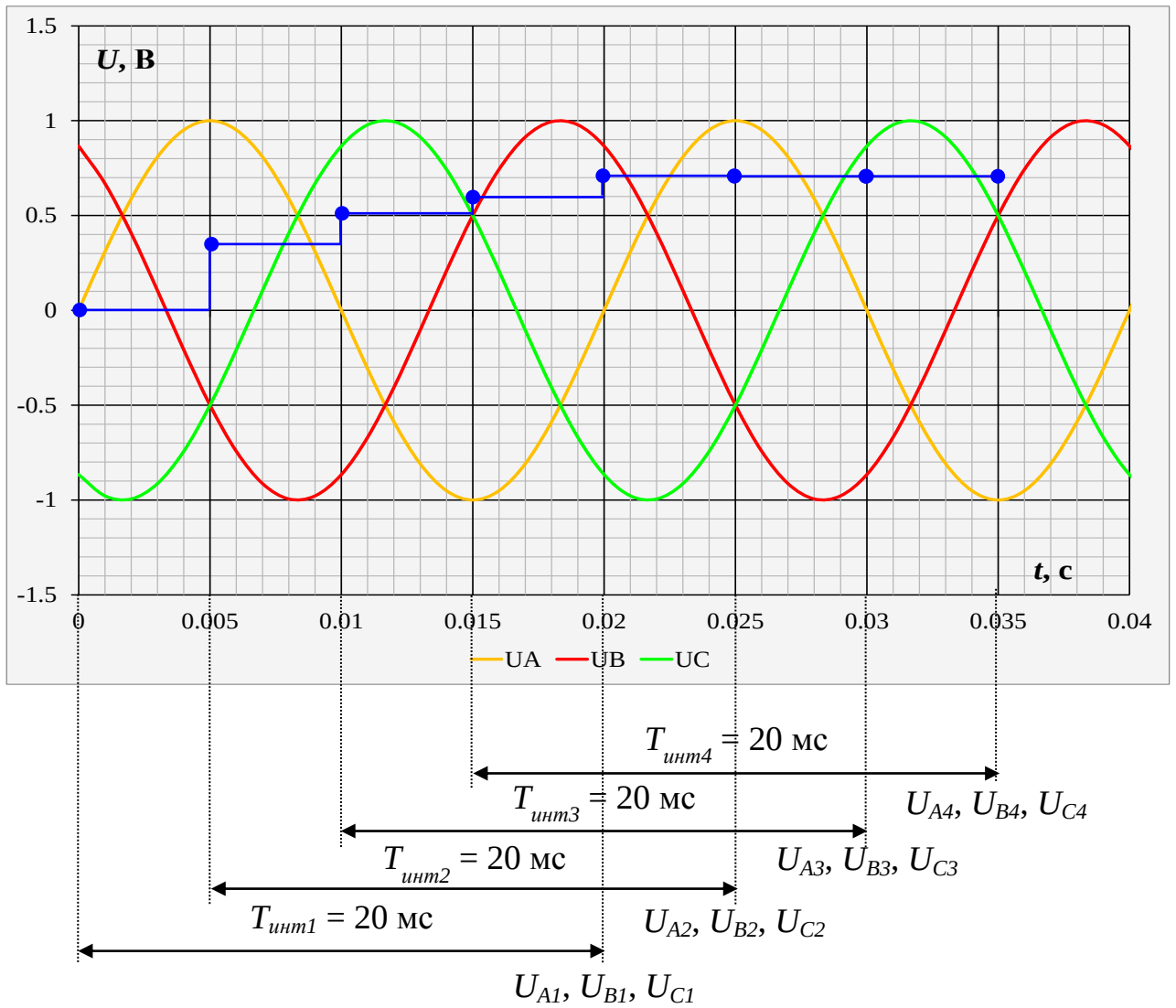


Рисунок 19 – Измерение синусоидальных величин U_A, U_B, U_C

Примечание: $T_{инт1}$ – интервал интегрирования I ,
 U_{A1}, U_{B1}, U_{C1} – напряжения фаз A, B, C, поступающие в качестве входных
 сигналов расчетного алгоритма, синим цветом показано рассчитываемое
 действующее значение напряжения прямой последовательности

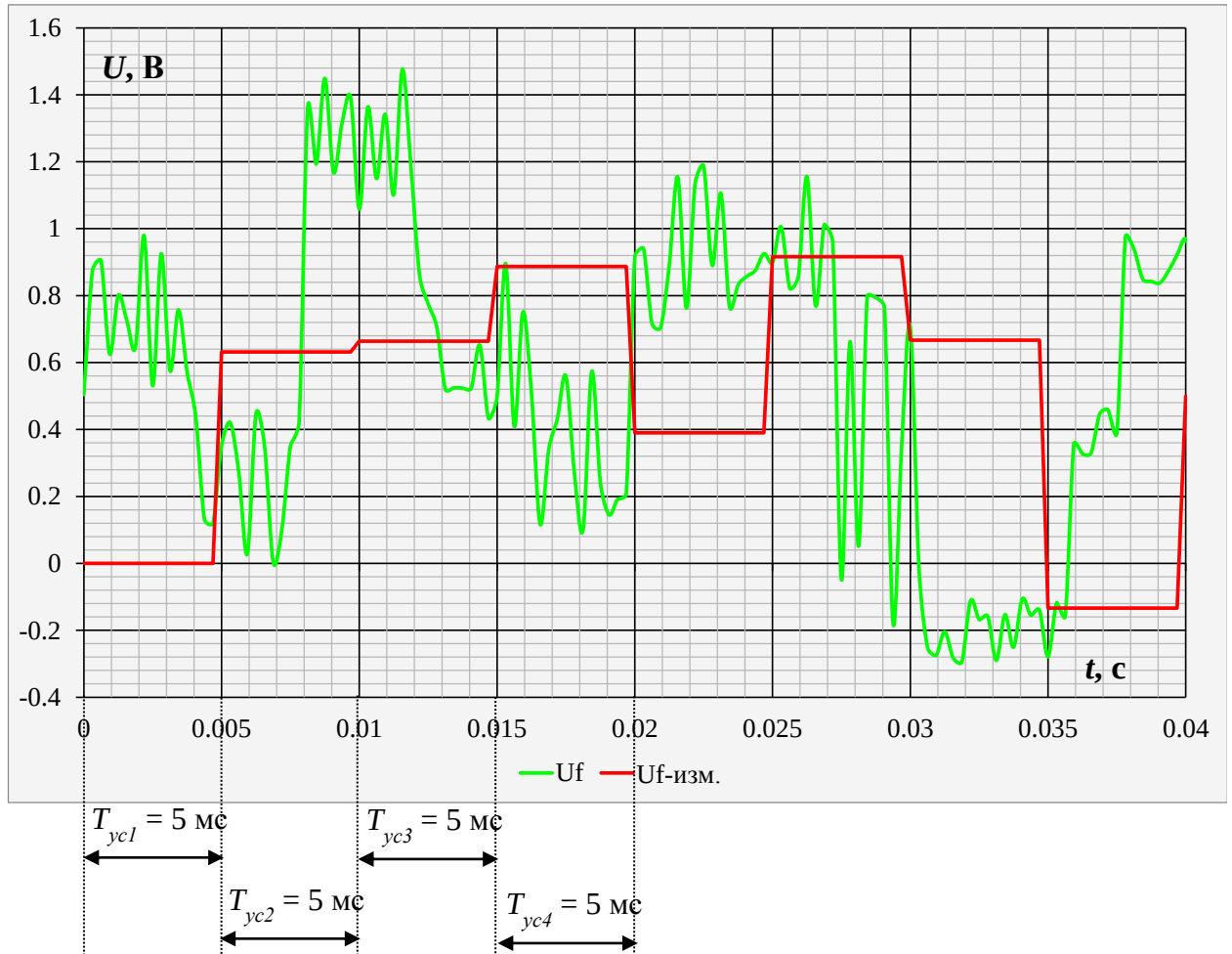


Рисунок 20 – Усреднение постоянных сигналов

Примечание: T_{yc1} – интервал усреднения 1, U_f – сигнал, поступающий в качестве входного сигнала расчетного алгоритма, рассчитываемое действующее значение сигнала

На одном компьютере может одновременно работать несколько измерительных приложений в случае, если на нем установлено несколько плат АЦП/ЦАП L-791. При этом измерительные приложения осуществляют сбор данных, каждое со своей платы (привязка платы осуществляется параметром «Исп. плата», нумерация по порядку, с 0; при изменении требуется перезапуск измерительного приложения). К одному измерительному приложению может быть подключено одно главное исполнительное приложение (получаемые от него значения управляющих воздействий будут выдаваться на каналы ЦАП) и любое количество

второстепенных. Удаленный запуск процесса измерений может быть осуществлен только главным измерительным приложением.

4.1.1. Обобщенная структура программы

Обобщенная структурная схема измерительного приложения представлена на рисунке 21. Работа измерительного приложения основана на работе двух программных потоков и драйвера платы АЦП/ЦАП *LCard L-791*.

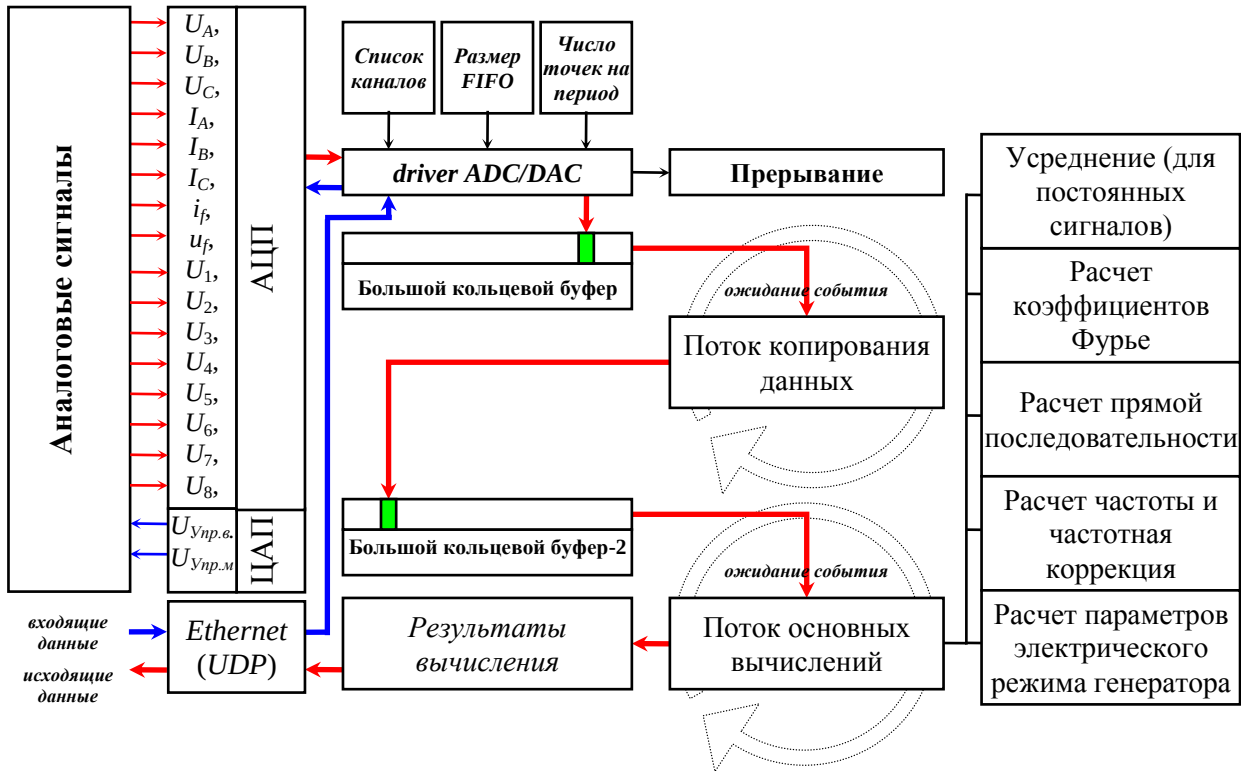


Рисунок 21 – Обобщенная структурная схема измерительного приложения

Примечание: driver ADC/DAC – драйвер, поставляемый с используемой платой, FIFO – буфер АЦП

Приложение работает следующим образом: после задания начальных данных (список каналов, размер буфера *FIFO* платы, число точек на период промышленной частоты 20 мс, равное 64) выдается команда на выполнение опроса. Драйвер платы в соответствии со своим режимом работы получает заданное размером *FIFO* количество отсчетов (мгновенных значений), отвечающее выбранным каналам и заданной частоте дискретизации (рассчитывается из требуемого количества точек на период). В заданном

режиме работы платы отсчеты при помощи драйвера платы передаются из буфера *FIFO* в оперативную память ПК (в большой кольцевой буфер). Кроме того, по событию заполнения буфера *FIFO* плата выставляет прерывание, которое ожидается потоком копирования данных. Поток копирования данных копирует новые поступившие данные в большой кольцевой буфер 2. После чего выдается разрешение потоку основных вычислений, который выполняет свои операции над набором мгновенных значений, занесенных в большой кольцевой буфер 2. В случае если команду на выполнение опроса выдавало основное исполнительное приложение, получаемые результаты вычислений передаются по протоколу *UDP* на *IP*-адрес исполнительного ПК через используемый исполнительным приложением для приема сетевой порт, выполняется передача такого же набора данных исполнительным приложениям, использующих данное измерительное приложение в качестве дополнительного источника данных (см. раздел 5).

Как видно из данной структуры, тактирование работы измерительного приложения выполняется платой АЦП/ЦАП по событию заполнения буфера *FIFO*. Буфер *FIFO* заполняется с частотой, определяемой на этапе подготовки работы приложения, зависящей только от применяемых в плате аппаратных средств. Это позволяет выдержать период дискретизации (соответственно и частоту) с высокой степенью точности. На данный момент период дискретизации составляет 5 мс (что соответствует частоте дискретизации равной 200 Гц).

4.1.2. Интерфейс пользователя

Интерфейс пользователя включает два режима работы: обычный (см. раздел 1.4) и режим проверки (см. раздел «Дополнительные возможности программы»).

4.1.3. Математическое описание расчета параметров электрического режима генератора

В соответствии с приведенной обобщенной структурой измерительное приложение выполняет следующие математические операции над набором мгновенных значений параметров электрического режима. Для постоянных сигналов (ток возбуждения и напряжение возбуждения) – усреднение на периоде дискретизации, для переменных (ток и напряжение генератора фаз A, B, C) – расчет коэффициентов Фурье первой гармоники, вычисление частоты напряжения фаз A, B, C и частотную коррекцию по результатам вычисления частоты.

Усреднение на периоде дискретизации выполняется в соответствии с соотношением:

$$y = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_i, \quad (15)$$

где: i – номер,

x_i – мгновенное i -ое значение усредняемой величины,

y – получаемое усредненное значение.

Основные используемые соотношения для реализации обработки переменных сигналов приведены в [3]. Согласно [3] синусоидальный сигнал y заданной частоты и амплитуды можно представить в виде:

$$y = a \cdot \cos 2\pi ft + b \cdot \sin(2\pi ft), \quad (16)$$

где: f – частота, a, b – составляющие амплитуды. Комплексная запись этого сигнала представляется в виде:

$$\dot{y} = a + j \cdot b, \quad (17)$$

где: j – мнимая единица.

Для реализации методов, описанных в [3], первоначально осуществляется интегрирование каждого сигнала (отвечающего току и напряжению фаз A, B, C генератора):

$$\begin{aligned}
 A_l &= \frac{2 f_0}{n} \int_0^{n/f_0} y(t) \cos 2\pi f_0 l t \, dt, \\
 B_l &= \frac{2 f_0}{n} \int_0^{n/f_0} y(t) \sin 2\pi f_0 l t \, dt,
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

где: f_0 – заданная частота выделяемой гармоники,

n – количество используемых для повышения точности периодов,

$y(t)$ – функция, подвергающаяся преобразованию,

$l = 1, 2, \dots$,

A_l и B_l – коэффициенты разложения.

Шаг для получения необходимых измерений составляет 5 мс. Если в формуле (18) разделить, приняв $n = 1$ и $l = 1$, интервал интегрирования на четыре равные части, выполнить операции по замене переменной интегрирования на $\xi = t - \frac{i}{4 f_0}$ и вновь заменить переменные:

$$\begin{aligned}
 A(i) &= 2 f_0 \int_0^{1/4 f_0} y\left(t + \frac{i}{4 f_0}\right) \cos 2\pi f_0 t \, dt, \\
 B(i) &= 2 f_0 \int_0^{1/4 f_0} y\left(t + \frac{i}{4 f_0}\right) \sin 2\pi f_0 t \, dt,
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

где $i = 0, 1, 2, 3$. Формулы для определения коэффициентов записываются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 A_1 &= A_0 + B_1 - A_2 - B_3, \\
 B_1 &= B_0 - A_1 - B_2 + A_3.
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

Вычисление значений интегралов в этих формулах выполняется на основе метода Симпсона [4]:

$$\int_{x_0}^{x_2} y(x) dx = \frac{h}{3} \cdot y_0 + 4 \cdot y_1 + y_2.
 \tag{21}$$

Поскольку частота дискретизации равна 200 Гц и количество точек на период равно 64, то на интервал интегрирования приходится 16 точек. В соответствии с выражением, получается 7 полных и 1 неполный интервал. Момент времени, отвечающий x_2 неполного интервала, фактически наступает

после получения набора мгновенных значений отвечающего периоду опроса и опережает последнюю полученную точку на величину шага между измерениями. Поэтому значение для последнего интервала y_2 неизвестно и его целесообразно вычислить при помощи линейной аппроксимации на основе двух последних полученных мгновенных значений для получения полного интервала.

После расчета коэффициентов A_1 и B_1 , отвечающих напряжениям фаз A, B, C выполняется расчет значения отклонения частоты напряжения в соответствии с [3] и с учетом выражений для расчета параметров прямой последовательности.

В [3] описан метод расчета значения отклонения частоты для одного синусоидального сигнала. На основе истинных значений коэффициентов a_1 и b_1 в текущий момент времени $t + m / f_0$ (a_1^2 и b_1^2) и на основе значений этих коэффициентов в момент t (a_1^1 и b_1^1). Согласно [3] данные коэффициенты связаны через отклонение частоты Δf :

$$\operatorname{tg} \left(2\pi m \frac{\Delta f}{f_0} \right) = \frac{a_1^2 b_1^1 - a_1^1 b_1^2}{a_1^1 a_1^2 + b_1^1 b_1^2}, \quad (22)$$

где:

f_0 – фиксированная частота (отвечает интервалу интегрирования).

После расчета Δf можно выполнить частотную коррекцию получаемого результата.

$$\begin{aligned} a &= k_{11} \cdot A_1 - k_{12} \cdot B_1, \\ b &= k_{21} \cdot A_1 + k_{22} \cdot B_1, \end{aligned} \quad (23)$$

где:

$k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22}$ – коэффициенты частотной коррекции, полученные на основе выражений из [3].

Для расчета отклонения частоты сигнала, отвечающего прямой последовательности данный метод нуждается в следующей коррекции. В общем случае, расчет коэффициентов a и b прямой последовательности производится в соответствии со следующими выражениями:

$$\begin{aligned}
 b &= b_1 - 0.5 \cdot b_2 + b_3 - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot a_2 - a_3, \\
 a &= a_1 - 0.5 \cdot a_2 + a_3 + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot b_2 - b_3,
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

где:

$a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3$ — соответствующие коэффициенты сигналов фаз A, B, C .

Выполнив подстановку из (24) в (23), получается:

$$\begin{aligned}
 a &= k_{11} \cdot A - k_{12} \cdot B + k_{21} \cdot C + k_{22} \cdot D, \\
 b &= -k_{11} \cdot C - k_{12} \cdot D + k_{21} \cdot A + k_{22} \cdot B, \\
 A &= A_1 - 0.5 \cdot A_2 + A_3, \\
 B &= B_1 - 0.5 \cdot B_2 + B_3, \\
 C &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot A_2 - A_3, \\
 D &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_2 - B_3.
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

При подстановке (25) в (22), получается:

$$\begin{aligned}
 \frac{a_1^2 b_1^1 - a_1^1 b_1^2}{a_1^1 a_1^2 + b_1^1 b_1^2} &= \frac{\frac{1}{(1+\Delta)^2} \cdot C'_1 + \frac{1}{(1+\Delta)} \cdot C'_2 + C'_3}{\frac{1}{(1+\Delta)^2} \cdot Z'_1 + \frac{1}{(1+\Delta)} \cdot Z'_2 + Z'_3}, \\
 C'_1 &= C_2 \cdot A_1 - C_1 \cdot A_2, \\
 C'_2 &= A_2 \cdot B_1 - A_1 \cdot B_2 + D_1 \cdot C_2 - D_2 \cdot C_1, \\
 C'_3 &= D_2 \cdot B_1 - D_1 \cdot B_2, \\
 Z'_1 &= A_1 \cdot A_2 + C_1 \cdot C_2, \\
 Z'_2 &= A_1 \cdot D_2 + D_1 \cdot A_2 - C_1 \cdot B_2 - B_1 \cdot C_2, \\
 Z'_3 &= B_1 \cdot B_2 - D_1 \cdot D_2,
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

где:

A_1, B_1, C_1, D_1 — коэффициенты, вычисленные по (25) для момента времени t ;

A_2, B_2, C_2, D_2 — аналогично для момента времени $t + m / f_0$;

$\Delta = \frac{\Delta f}{f_0}$ — отношение отклонения частоты прямой последовательности и

частоты f_0 .

Выражение (22) с учетом (26) приводится к виду:

$$\Delta = \frac{1}{2\pi} \cdot \arctg \left(\frac{C'_1 + (1 + \Delta) \cdot C'_2 + (1 + \Delta)^2 \cdot C'_3}{Z'_1 + (1 + \Delta) \cdot Z'_2 + (1 + \Delta)^2 \cdot Z'_3} \right), \quad (27)$$

Если ввести обозначение, то:

$$\begin{aligned} C1 &= C'_1 + C'_2 + C'_3, \\ C2 &= C'_2 + 2 \cdot C'_3, \\ C3 &= C'_3, \\ Z1 &= Z'_1 + Z'_2 + Z'_3, \\ Z2 &= Z'_2 + 2 \cdot Z'_3, \\ Z3 &= Z'_3, \\ \Delta &= \frac{1}{2\pi} \cdot \arctg \left(\frac{C1 + \Delta \cdot C2 + \Delta^2 \cdot C3}{Z1 + \Delta \cdot Z2 + \Delta^2 \cdot Z3} \right). \end{aligned} \quad (28)$$

Искомая величина входит в полученное выражение неявно. Расчет отклонения частоты напряжения прямой последовательности выполняется итеративным методом Ньютона (см. [5]).

В случае если полученное значение отклонения частоты отличается от полученного на предыдущем шаге интегрирования более чем на 5 Гц, генерируется событие, отвечающее ошибке расчета частоты, а значение отклонения частоты принимается неизменным.

Для значений напряжения прямой последовательности и тока прямой последовательности выполняется коррекция по частоте (см. [3] и (25)) на основе значения отклонения частоты, определенного на данном шаге расчета.

Полученные скорректированные значения напряжения и токов прямой последовательности умножаются на масштабный множитель, задаваемый пользователем. По полученным значениям отмасштабированных коэффициентов Фурье прямой последовательности рассчитываются активная мощность генератора, реактивная мощность генератора, угол между током и напряжением. Принятая система относительных единиц в номинальном режиме работы генератора ($U_2 = 1.0$, $I_2 = 1.0$) обеспечивает $P_2 = 1.0 \cdot \cos(\varphi_{\text{ном}})$, $Q_2 = 1.0 \cdot \sin(\varphi_{\text{ном}})$ (где $\varphi_{\text{ном}}$ – номинальный коэффициент мощности генератора).

Измерительное приложение передает по сети по протоколу *UDP* буфер (см. рисунок 22), содержащий рассчитанные параметры электрического режима генератора, а также пользовательские сигналы, представленные в таблице 2.

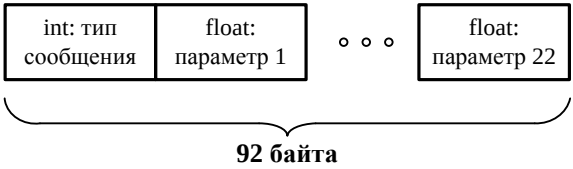


Рисунок 22 – Структура буфера передачи

Примечание: основному исполнителю приложению отправляется буфер с типом сообщения 3, дополнительному – с 6.

Таблица 2. Структура буфера результатов вычисления

№	0	1	2	3	4	5	6	7
Параметр	t	$Re(U_{\Gamma})$	$Im(U_{\Gamma})$	$Re(I_{\Gamma})$	$Im(I_{\Gamma})$	f_U	U_{Γ}	I_{Γ}
№	8	9	10	11	12	13	14	15
Параметр	P_{Γ}	Q_{Γ}	φ_{Γ}	If_{Γ}	Uf_{Γ}	$f'_{U\Gamma}$	U_1	U_2
№	16	17	18	19	20	21	-	-
Параметр	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7	U_8	-	-

Примечание: № параметра отвечает его положению в буфере передачи

где: t – относительный момент времени, отвечающий передаче, в мс,
 $Re(U_{\Gamma})$ – проекция вектора напряжения прямой последовательности генератора на вещественную ось вращающейся с частотой 50 Гц системы координат,
 $Im(U_{\Gamma})$ – то же, на мнимую ось,
 $Re(I_{\Gamma}), Im(I_{\Gamma})$ – то же для тока генератора,
 f_U – частота напряжения прямой последовательности генератора в мГц,
 U_{Γ} – действующее значение напряжения прямой последовательности генератора,
 I_{Γ} – действующее значение тока прямой последовательности генератора,
 P_{Γ} – действующее значение активной мощности генератора,

Q_{Γ} – действующее значение реактивной мощности генератора,
 φ_{Γ} – значение угла между током и напряжением прямой последовательности генератора в градусах,
 $I_{f\Gamma}$ – усредненное на периоде дискретизации значение тока возбуждения генератора,
 $U_{f\Gamma}$ – усредненное на периоде дискретизации значение напряжения возбуждения генератора,
 $f'_{U_{\Gamma}}$ – значение производной частоты напряжения генератора в Гц/с.
 $U_1 \dots U_8$ – усредненное на периоде дискретизации значение пользовательских сигналов.

Доступ к данным параметрам буфера в рамках математической модели в исполнительном приложении осуществляется соответствующими блоками (см. раздел 3.1.2) Универсальный доступ ко всем сигналам может быть осуществлен при помощи блока «Данные АЦП», с заданием в качестве параметра «Измерительный канал» номера, в соответствии с таблицей 2.

Измерительное приложение выполняет прием по протоколу *UDP* буфер (см. рисунок 23).

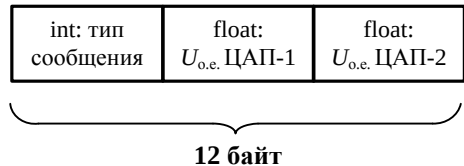


Рисунок 23 – Структура буфера приема

Применяемые типы сообщений следующие:

1. команда на запуск процесса измерений (подается основным исполнительным приложением);
2. команда останова процесса измерений (подается основным исполнительным приложением);
3. команда выдачи напряжений на ЦАП-1 и ЦАП-2 (подается основным исполнительным приложением);

4. команда на добавление в список приемников IP-адреса отправителя (подается дополнительным исполнительным приложением);
5. команда на исключение из списка приемников IP-адреса отправителя (подается дополнительным исполнительным приложением).

4.1.4. Структура используемых файлов

Все вводимые пользователем параметры измерительного приложения и масштабные коэффициенты сохраняются в текстовом файле «*Scales.ini*» в директории с *MeasurementComponent.exe* (при закрытии измерительного приложения и по команде пользователя нажатием кнопки сохранения масштабных коэффициентов). При запуске измерительного приложения эти параметры считываются из файла «*Scales.ini*». В случае отсутствия файла – выполняется загрузка стандартных параметров.

4.1.5. Дополнительные возможности программы: режим проверки

В измерительном приложении предусмотрен режим работы (режим проверки), обеспечивающий пользователю возможность записи в файл результатов измерений с целью проверки подключения входных сигналов, работы программы, ручного управления величиной выходного напряжения каналов ЦАП. Данный режим может быть активирован комбинацией клавиш «*Ctrl + Alt + Z*». При этом окно будет увеличено – появятся область для вывода результатов измерений в текстовом формате (в формате csv-таблицы с разделителем чисел «;»), слайдеры для управления напряжением ЦАП-1 и ЦАП-2, области вывода ошибок и уведомлений, области вывода значения задержки интервала времени (dT) между принятыми данными.

Включение функции вывода данных осуществляется включением чекбокса «Вывод», включением обычного режима работы измерительного приложения («*Ctrl + Alt + Z*») и повторным включением режима проверки. В

случае если процесс выполнения измерений запущен – результаты вычисления параметров будут выводиться на экран.

Результаты измерения можно сохранить в файл, кликнув по области вывода результатов (см. рисунок 24) и нажав клавишу «F8» либо «F9». Результаты измерения будут сохранены в формате csv-таблицы в файлы соответственно «Log_ON_F8.txt» и «Log_ON_F9.txt» в директории с *MeasurementComponent.exe*. Область вывода результатов можно очистить нажатием кнопки «F10».

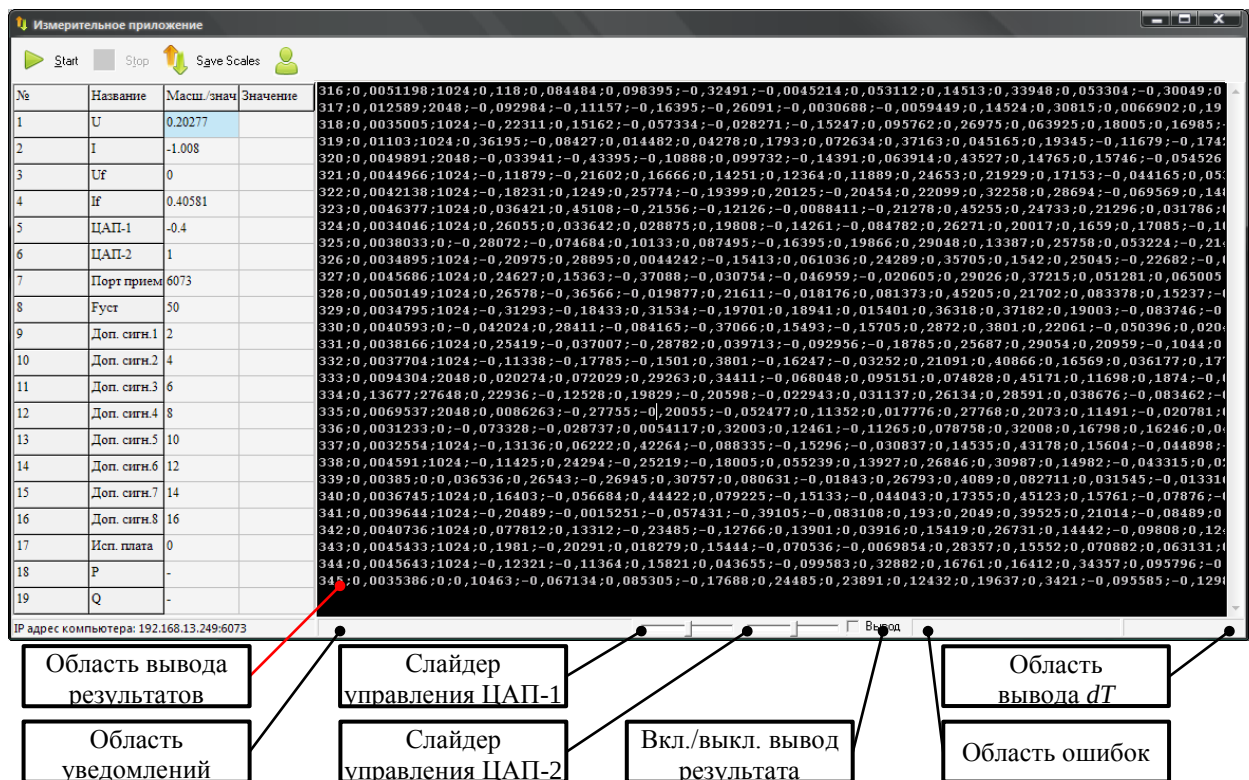


Рисунок 24 – Режим проверки работы измерительного приложения

В области вывода результатов выводятся следующие параметры по порядку:

1. *time* – номер строки (произведение данного параметра на величину шага измерений – 5 мс отвечает времени от момента запуска измерений);
2. *timescount* – фактическая величина шага измерений с учетом всех операций в секундах (с учетом действий по выводу на экран и

- т.д.), определенное по тактам работы процессора ПК, при отсутствии сбоя – равно 0.005;
3. *DeltaPTR* – изменение значения указателя при доступе к буферу данных измерений, при отсутствии сбоя и перехода к началу массива – равно 1024;
 4. *A1[0]* – коэффициент *A1* (см. раздел 4.1.3), рассчитанный для входного сигнала первого канала АЦП (U_A) в отсчетах АЦП;
 5. *B1[0]* – аналогично, коэффициент *B1*, рассчитанный для входного сигнала первого канала АЦП (U_A);
 6. *A1[1]* – аналогично, коэффициент *A1*, рассчитанный для входного сигнала второго канала АЦП (U_B);
 7. *B1[1]* – аналогично, коэффициент *B1*, рассчитанный для входного сигнала второго канала АЦП (U_B);
 8. *A1[2]* – аналогично, коэффициент *A1*, рассчитанный для входного сигнала третьего канала АЦП (U_C);
 9. *B1[2]* – аналогично, коэффициент *B1*, рассчитанный для входного сигнала третьего канала АЦП (U_C);
 10. *Amp[0]* – амплитуда, входного сигнала первого канала АЦП в отсчетах АЦП;
 11. *Amp[1]* – аналогично для второго сигнала;
 12. *Amp[2]* – аналогично для третьего сигнала;
 13. *A1[3]*, *B1[3]*, *A1[4]*, *B1[4]*, *A1[5]*, *B1[5]*, *Amp[3]*, *Amp[4]*, *Amp[5]* – аналогично для четвертого (I_A), пятого (I_B), шестого (I_C) сигналов;
 14. *time3* – передаваемое на исполнительное приложение значение времени в секундах, относительно момента старта.

Следующие параметры соответствуют передаваемым на измерительное приложение параметрам U_a , U_r , I_a , I_r , df , U , I , P , Q , Φ , U_f , i_f , F' , Доп. сигнал 1, Доп. сигнал 2, Доп. сигнал 3, Доп. сигнал 4, Доп. сигнал 5, Доп. сигнал 6, Доп. сигнал 7, Доп. сигнал 8.

Ручное управление напряжением ЦАП-1 и ЦАП-2 может осуществляться слайдерами (см. рисунок 24). Крайнее левое положение слайдера отвечает минимальному выводному напряжению $-5/K_{\text{ЦАП-1}}$ В, крайнее правое $+5/K_{\text{ЦАП-1}}$ В (масштабные коэффициенты ЦАП-1 и ЦАП-2 целесообразно задавать равными 1 – тогда выходной диапазон регулирования составит

$-5 \dots +5$ В). Ручной режим работает только в том случае, если измерительное приложение не получает данные от исполнительного приложения.

В строке состояния, области уведомлений, или области ошибок могут быть выведены следующие сообщения:

1. «IP адрес компьютера: <IP-адрес текущего ПК>:<используемый порт>» – используемый IP-адрес и сетевой порт;
2. «Лог. файл сохранен F8» – результаты измерений сохранены в файл «Log_ON_F8.txt»;
3. «Лог. файл сохранен F9» – результаты измерений сохранены в файл «Log_ON_F9.txt»;
4. «<Время>: ошибка вычисления df » – в момент времени <Время> итеративный расчет частоты не достиг результата за 200 итераций либо полученный результат расходится с ранее полученным на 5 Гц;
5. «<№>.<Время>: ошибка передачи» – аналогично, ошибка выполнения передачи данных, зафиксирована <№> раз;
6. «<Время>: <IP-адрес>:<Порт> подключился.» – в качестве основного управляющего приложения подключилось исполнительное приложение ПК с IP-адресом <IP-адрес>, работающее через сетевой порт <Порт>;
7. «<Время>: <IP-адрес>:<Порт> подключился доп. приемник №<Число i >.» – аналогично, подключился i -ый доп. приемник;
8. «<Время>: доп. приемник <IP-адрес>:<Порт> отключился» – аналогично, доп. приемник отключился;

9. «Длина принятого сообщения = <Число>» – входящее сообщение от исполнительного приложения содержит неправильный размер <Число>;
- 10.«<Время>: неверный номер команды» – пришла неверная команда от исполнительного приложения;
- 11.«[ENTER] для сохранения масштабов» – были изменены масштабные коэффициенты или др. параметры измерительного приложения, для сохранения измененных параметров и их применения следует нажать «Enter».

4.1.6. Дополнительные возможности программы: подстройка масштабных коэффициентов

Поскольку измерительный тракт включает в себя первичные измерительные преобразователи (трансформаторы тока и напряжения), протяженные линии связи, измерительные преобразователи (платы *LEM-U*, *LEM-I*), АЦП, неизбежна инструментальная погрешность, вызванная различными факторами (нагрев трансформаторов тока, взаимное влияние проводников, потери в линиях связи, паразитные сопротивления и емкости, внутренние характеристики АЦП). Поэтому не всегда масштабные коэффициенты в точности обеспечивают корректность измерений. Для автоматической коррекции масштаба на передней панели измерительного приложения существует специальная кнопка (см. рисунок 3). Использование данной функции целесообразно при выполнении условий, описанных в пункте 1.4.

Алгоритм работы данной функции следующий: производится усреднение получаемых на интервале 100 мс действующих значений напряжения U . Усредненное значение напряжения U_{cp} сравнивается с числом 0.00001. Если $U_{cp} > 0.00001$, рассчитывается коэффициент коррекции масштаба как $1/U_{cp}$. Если абсолютное значение коэффициента коррекции больше 10.0, либо меньше 0.1 выводится предупреждение «Масштаб напряжения увеличен в $<1/U_{cp}>$ раз. Проверьте корректность

преобразования!». После чего масштабный коэффициент напряжения умножается в $<1/U_{cp}>$. Аналогично корректируются масштабные коэффициенты по току генератора, току возбуждения и напряжению возбуждения. В случае если значения активной и реактивной мощности получаются отрицательными, масштабный коэффициент по току генератора умножается на -1. Если они имеют разные знаки, выводится сообщение «Проверьте чередование фаз напряжения и тока», что свидетельствует о некорректном направлении токов в первичных датчиках (необходимо поменять местами «*» и «0» в трансформаторах тока).

4.1.7. Возможные сообщения об ошибках

При некорректной работе измерительного приложения или некорректных действиях пользователя, измерительное приложение может выдавать следующие сообщения об ошибках:

1. «Критическая ошибка» – ошибка создания пользовательского прерывания в системе для работы платы АЦП/ЦАП с прерыванием;
2. «Ошибка создания прерывания – *Event*» – ошибка создания пользовательского прерывания для синхронизации потоков копирования и расчета параметров электрического режима генератора;
3. «*StartLDevice Error*» – ошибка доступа к плате АЦП/ЦАП (возможно плата занята другим приложением);
4. «Таймаут синхроимпульса» – ошибка запуска платы;
5. «Масштаб напряжения увеличен в $<\text{Число}>$ раз. Проверьте корректность преобразования!» – абсолютное значение коэффициента коррекции масштаба сигнала меньше 0.1 либо больше 10.0;
6. «Усредненное значение напряжения меньше 0.00001» – усредненное значение параметра, масштаб которого

корректируется, меньше 0.00001 в связи с чем нет возможности скорректировать данный масштаб;

7. «Не удалось вывести данные на ЦАП» – попытка вывода управляющих напряжений с помощью ЦАП привела к ошибке работы платы.

5. Программа реализации цифровых моделей энергоблоков и регуляторов возбуждения заданной структуры

Исполнительное приложение – вычислительное ядро комплекса, выполняющее реализацию требуемой математической модели по поступающим от измерительного приложения входящим данным, кроме того оно позволяет тестировать созданную структуру (см. раздел 5.1.5).

5.1.1. Обобщенная структура программы

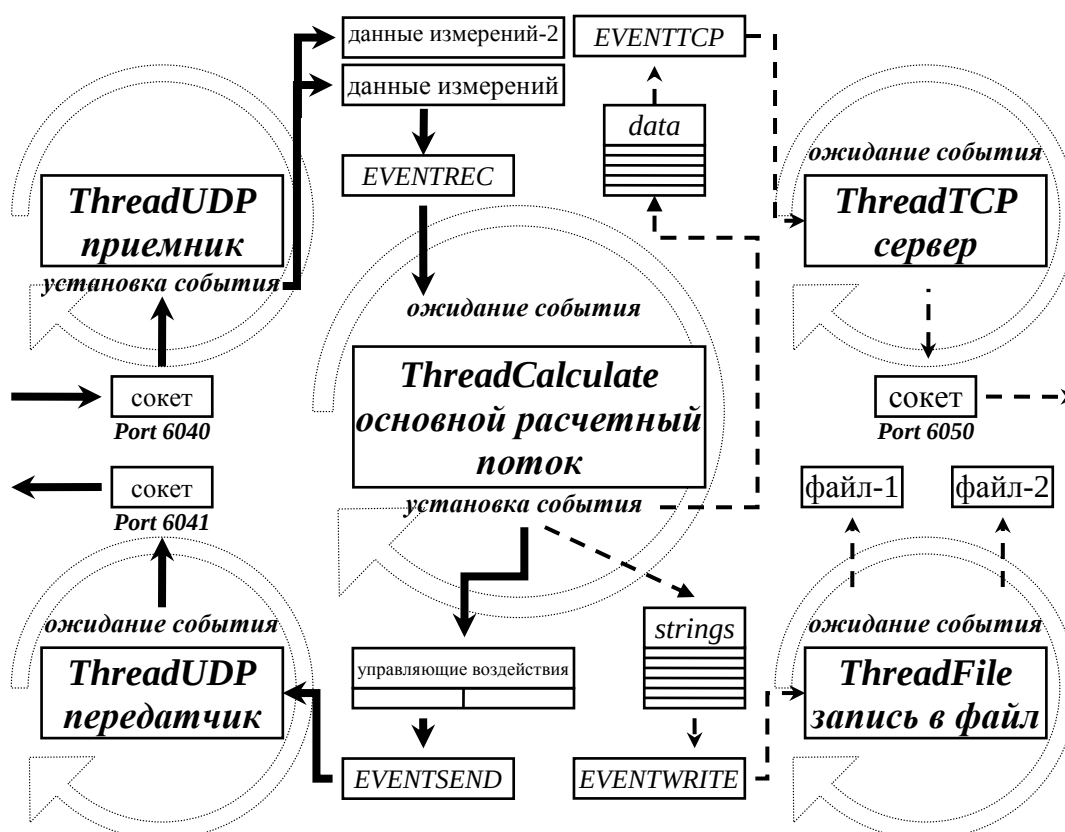
Обобщенная структурная схема исполнительного приложения представлена на рисунке 25. Для обеспечения максимального быстродействия исполнительное приложение является многопоточным: его алгоритм основан на одновременной работе и взаимодействии пяти потоков – трех основных и двух служебных.

После задания основных параметров исполнительного приложения (см. раздел 1.5), пользователь выдает команду на проверку файла математической модели и заданных параметров. Если параметры заданы верно (возможные ошибки см. раздел 5.1.7), на указанный IP-адрес и сетевой порт отправляется запрос измерительному приложению. Если измерительное приложение готово, запускается процесс измерений и начинается передача данных исполнительному приложению.

Приложение работает следующим образом: при получении данных на входной порт сетевой карты (входящие и исходящие данные передаются через разные порты) заполняется буфер данных измерений. Если данные отправлены основным измерительным приложением, генерируется событие (*EVENTREC*), ожидаемое основным расчетным потоком (если данные

приходят от измерительного приложения, заданного в качестве дополнительного источника данных – заполняется буфер данных дополнительного источника, и событие на расчет не генерируется). После выполнения расчетов заполняется буфер управляющих воздействий и генерируется событие для передачи (*EVENTSEND*), выполняется передача. В случае если пользователь в структуре реализуемого закона управления задал запись в файл – добавляется строка в массив строк (*strings*), отвечающая значениям заданных на запись сигналов. Массив строк при достижении определенного размера заносится в файл (по событию *EVENTWRITE*).

Для реализации непрерывной и надежной записи сигналов приложение осуществляет запись в два файла поочередно (файл-1 и файл-2 – «Файл вывода 1» и «Файл вывода 2»). Приложение записывает в файл-1 до тех пор, пока количество строк в файле-1 не достигнет «Макс. Кол-во строк» (должно быть задано больше 100). После чего приложение стирает данные, содержащиеся в файле-2, и начинает запись в файл-2, пока количество строк в файле-2 не достигнет «Макс. Кол-во строк». После чего вновь произойдет смена файла. Таким образом, на жестком диске сохраняются значения необходимых пользователю параметров отвечающие заданному пользователем периоду времени предшествующего режима (1 строка соответствует 5 мс). Запись строк в файл осуществляется блоками по 50 строк. На время работы исполнительного приложения файл-1 и файл-2 не блокируются (для копирования данных файлов без останова исполнительного приложения), напрямую открывать данные файлы не рекомендуется, т.к. в этом случае запись параметров будет прервана. Запись в файл осуществляется при наличии в математической модели блока (блоков) «Запись в файл».



**Рисунок 25 – Обобщенная структурная схема
исполнительного приложения**

Примечание: ThreadUDP – поток обмена данными (прием или передача),

ThreadCalculate – основной расчетный поток,

ThreadFile – поток записи в файл,

*ThreadTCP – поток обмена данными с приложением мониторинга и
удаленного доступа к регуляторам*

Если исполнительное приложение имеет соединение с приложением мониторинга и удаленного управления – генерируется событие (*EVENTTCP*) на передачу параметров каждый 20-ый раз при получении входных данных (что, в случае отсутствия потерь данных в рамках работы сети отвечает 100 мс).

5.1.2. Интерфейс пользователя

Приложение работает в трех режимах: основном (см. рисунок 5), тестовом (см. раздел 5.1.5) и расширенном тестовом (см. рисунок 26).

5.1.3. Математическое описание

Для адекватного математического описания принципов и методов, реализованных в исполнительном приложении, следует рассмотреть абстрактные объекты – элементы структур математических моделей, описываемые системой обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, разрешенных относительно производной, к которым может быть добавлено несколько равенств:

$$\begin{aligned}\frac{ds_i}{dt} &= G_i(X, S), & i &= 1, \dots, n, \\ F_j(X, S) &= 0, & j &= 1, \dots, m, \\ y_k &= H_k(S), & k &= 1, \dots, l,\end{aligned}\tag{29}$$

где: $X = (x_1, x_2, \dots, x_p)$ – вектор исходных данных,

$S = (s_1, s_2, \dots, s_q)$ – вектор состояния (промежуточных значений),

$y = (y_1, y_2, \dots, y_l)$ – вектор результатов,

$G_i()$ и $F_j()$ – функции от исходных данных и промежуточных значений.

Значения этих функций явно от времени не зависят. Как правило, аргументы каждой из функций содержат небольшое подмножество от общего числа переменных.

Вектор исходных данных задан (к примеру – результаты измерений параметров электрического режима генератора), результирующие значения вычисляются после определения вектора состояния, поэтому координаты этого вектора – это неизвестные, которые необходимо определить в первую очередь. Отсюда, если входящие в (29) уравнения независимы, следует условие:

$$q = n + m.\tag{30}$$

В качестве примера можно рассмотреть следующее уравнение:

$$ay_1' + y_1 = b_0 x_1,\tag{31}$$

где: a и b_0 – некоторые константы.

Для того чтобы привести это уравнение к виду (29), достаточно его разрешить относительно производной y_1' :

$$y_1' = \frac{b_0 x_1 - y_1}{a}. \quad (32)$$

Для получения формального соответствия с (29) остается ввести переменную:

$$s_1 = y_1. \quad (33)$$

Приведенный принцип может быть использован в подавляющем числе случаев.

При усложнении (31) получается следующее выражение:

$$ay_1' + y_1 = b_0 x_1 + b_1 x_1' \quad (34)$$

Появление в правой части уравнения производной от исходной величины не позволяет использовать простой способ приведения данного уравнения к канонической форме. После введения дополнительных переменных состояния s_1, s_2 получается:

$$\begin{aligned} s_1' &= s_2, \\ x_1 - s_1 - as_2 &= 0, \\ y &= b_0 s_1 + b_1 s_2. \end{aligned} \quad (35)$$

Для доказательства эквивалентности (34) и (35) необходимо выполнить дифференцирование второго уравнения (35) и замену в полученном выражении s_1' на s_2 , согласно первому уравнению (35). С другой стороны замену на s_2 на s_1' можно выполнить непосредственно во втором уравнении (35). В результате получатся два равенства:

$$\begin{aligned} x_1 - s_1 - as_1' &= 0, \\ x_1' - s_2 - as_2' &= 0. \end{aligned} \quad (36)$$

После умножения первого равенства на b_0 , второго на b_1 , и сложения результатов, получится, с учетом третьего уравнения (35), уравнение (34). Аналогичные уравнению (34) дифференциальные уравнения второго и более высокого порядка можно представить подобным образом.

Использование производных в выражениях, содержащих данные измерений, искаженные помехой, часто приводит к значительным ошибкам. Поэтому целесообразно вместо дифференцирования использовать

интегрирование. Для этого необходимо проинтегрировать первые n строк (29) в пределах от 0 до t (t – текущий момент времени). Если дополнительно сделать предположение, что неявные равенства могут быть разрешены относительно координат вектора состояния, система (29) представляется в следующей форме:

$$\begin{aligned} s_i &= \int_0^t G_i(X, S) dt, & i &= 1, \dots, n, \\ s_{j+n} &= f_j(X, S), & j &= 1, \dots, m, \\ y_k &= H_k(S), & k &= 1, \dots, l, \end{aligned} \quad (37)$$

где: $f_j(X, S) - s_{j+n} = k \cdot F_j(X, S)$ и $k \neq 0$ – некоторая постоянная.

Система уравнений (35) рассмотренного выше примера, с учетом сказанного приобретает следующий вид:

$$\begin{aligned} s_1 &= \int_0^t s_2 dt, \\ s_2 &= (x_1 - s_1)/a, \\ y &= b_0 s_1 + b_1 s_2. \end{aligned} \quad (38)$$

Функции G_i , F_i , f_i и H_k – алгебраические выражения. В общем случае эти выражения могут содержать переменные и константы, связанные арифметическими операциями, элементарные и специальные функции. Данные выражения не содержат комплексных чисел, производных и интегралов.

Сложное арифметическое выражение можно представить последовательностью более простых (базовых) арифметических операций. Например, второе выражение (38) есть последовательность двух операций – разности и деления на константу. При введении дополнительных координат вектора состояния в узлах сочленения базовых операций, система (37) приводится к виду, в котором все алгебраические выражения G_i , f_i и H_k будут содержать только одну математическую операцию. Так с помощью трех дополнительных координат вектора состояния система уравнений (38) представляется в виде:

$$\begin{aligned}
s_3 &= x_1 - s_1, \\
s_2 &= s_3 / a, \\
s_1 &= \int_0^t s_2 dt, \\
s_4 &= b_0 s_1, \\
s_5 &= b_1 s_2, \\
y &= s_4 + s_5.
\end{aligned} \tag{39}$$

По сравнению с (38) в представленной системе изменен порядок следования строк. Строки упорядочены так, чтобы при вычислении сверху вниз значения переменных определялись по возможности до того, как их значения будут использованы для вычислений в других строках. Это удобно при решении системы уравнений с помощью итерационного метода Зейделя.

В цифровые устройства входные данные (параметры электрического режима генератора) обычно поступают дискретно, как правило, через равные промежутки времени, однако не исключена возможность пропадания или задержки данных. Циклы работы исполнительного приложения привязываются к моментам получения входных данных, и поэтому пропуск этих входных данных вызывает автоматическое увеличение интервала между отсчетами. Таким образом, в общем случае следует считать, что данные измерений поступают с переменным шагом дискретизации.

Для определения интеграла от подынтегральной функции необходимо воспользоваться численными методами интегрирования. Поскольку моменты измерений независимы, целесообразно использовать квадратурные формулы Ньютона–Котеса. Следует рассмотреть формулу, которая легко модифицируется для интегрирования данных с переменным шагом – интегрирование по формуле прямоугольников.

Пусть функция $g(t)$ задана в точках t_i , $i = 0, 1, \dots, n$. Если ввести обозначение $h_i = t_i - t_{i-1}$, $i = 1, 2, \dots, n$ – шаг дискретизации по времени и $g_i = g(t_i)$. Тогда по формуле прямоугольников приближенную величину интеграла функции $g(t)$:

$$I_n = \int_0^{t_n} g(t) dt, \quad (40)$$

можно определить по итерационной формуле:

$$I_n = \begin{cases} I_{n-1} + g_{n-1} \cdot h_n, & n > 0, \\ 0 & n = 0. \end{cases} \quad (41)$$

Достоинство данной формулы в том, что значение интеграла в данный момент времени t_n определяется исключительно значениями переменных в предшествующие моменты, поэтому строки, содержащие интеграл могут быть при решении системы уравнений (37) из итераций исключены. Система уравнений (39) при использовании итеративных методов решается за одну итерацию. Сама величина интеграла определяется только в момент t_n , поскольку только тогда становится известным значение h_n . Остаточный член формулы прямоугольников R для одного шага интегрирования равен:

$$R = \frac{h_n^2}{2} g'(\xi), \quad (42)$$

где $\xi \in (t_{n-1}, t_n)$.

В начале каждого шага расчета вычисляются значения интеграла при интегрировании по формуле прямоугольников. Также, если в системе уравнений присутствуют элементы задержки, определяются значения задержанных величин. Эти значения были определены на предыдущих шагах расчета, и поэтому в ходе последующего итерационного процесса не изменяются.

В ходе итерационного процесса определяются текущие значения переменных состояния. При использовании метода Зейделя рассчитанные значения переменных состояния используются немедленно в последующих расчетах на том же шаге итерации. Это обстоятельство упрощает организацию вычислений. Итерационный процесс заканчивается, когда изменения переменных становятся незначительными. Величина Δ_i есть максимальное изменение переменной состояния на i -том шаге итераций:

$$\Delta_i = \max_k |s_k^i - s_k^{i-1}|, \quad (43)$$

Если постоянная ε задает допустимую погрешность вычислений, то итерационный процесс будет завершен при выполнении следующего условия:

$$\Delta_i < \varepsilon, \quad (44)$$

Значение ε в рамках исполнительного приложения установлено 1×10^{-7} . После определения переменных состояния могут быть вычислены координаты вектора результатов y .

5.1.4. Дополнительные возможности: два источника данных

Для обеспечения функций группового управления и ряда нестандартных законов управления иногда требуется в рамках одной математической модели иметь параметры электрического режима основного элемента (объекта управления) и дополнительного.

В соответствии с рисунком 9 измерительное приложение позволяет получать параметры электрического режима генератора с шагом 5 мс от основного и дополнительного измерительных приложений. Доступ к параметрам дополнительного измерительного приложения в рамках математической модели осуществляется блоком «Данные АЦП». Порядок каналов отвечает таблице 2, нумерация параметров (t , $Re(U)$ и др.) начинается с 22.

5.1.5. Дополнительные возможности: тестирование математической модели

Тестирование подготовленной математической модели с целью получения частотных характеристик, проверки алгоритмических решений и т.д. может осуществляться с помощью исполнительного приложения двумя способами. Первый подразумевает наличие в математической модели блоков записи внутренних параметров (см. раздел «Реализованные блоки»). Данный подход не всегда удобен, если математическая модель большая и проверяется

впервые. Поэтому для тестирования математических моделей предусмотрен второй способ, который позволяет записывать значения всех выходных параметров всех блоков, дискретных переменных ввода-вывода (для доступа к данному способу тестирования необходимо нажать сочетание клавиш «Ctrl+Alt+Z» и включить «Вывод»; функция вывода доступна, если математической модели нет блоков «Запись в файл»).

Для реализации режима тестирования необходимо выставить общее время теста «Общее время теста» (в секундах, отвечающих времени расчета), включить «Режим теста». Задать путь к файлу «Тест-файл», в котором в виде csv-таблицы заданы входные параметры для математической модели в соответствии с таблицей 2. Кроме того, необходимо указать источник меток времени. Если проверяется общая работа математической модели без учета потерь данных, то следует включить « $dT = 0.005$ », если необходимо учесть потери данных (т.е. использовать записанные в файле метки времени), то « $dT = 0.005$ » необходимо выключить. Параметр «Цикл. повторение» используется для оценки работы структуры в случае если «Общее время теста» превышает количество соответствующих записей в тест-файле. Если «Цикл. повторение» вкл., то при достижении строки, отвечающей концу файла, исполнительное приложение будет использовать данные из файла сначала. Если данный параметр выключен, то измерительные данные перестанут обновляться. Расширенный тестовый режим исполнительного приложения представлен на рисунке 26. Необходимая структура тестового файла представлена на рисунке 27 (пример файла \Regulator\Для проверки математической модели.csv).

В тестовом файле параметры отвечают данным от основного и дополнительного приложений (параметры дополнительного приложения обозначены цифрой «2»). Время (t) в тестовом файле указывается в с, отклонение частоты в мГц, угол φ в градусах, все остальные параметры в соответствии с необходимой системой относительных единиц.

[illegible]

При использовании расширенного тестового режима данные, выведенные на экран по команде «*Stop*» автоматически сохраняются в файл в директории с файлом математической модели с именем математической модели, копия с соответствующей меткой времени сохраняется в директории `\RR_csv\` (если необходимо анализировать несколько файлов).

5.1.6. Дополнительные возможности: сохранение измененной структуры

При удаленном управлении математической моделью с помощью приложения мониторинга пользователь может изменить ряд коэффициентов усиления, постоянные времени и другие внутренние параметры математической модели.

Измененные параметры математической модели можно сохранить в файл конфигурации *.ini нажатием кнопки «Сохранить» в процессе работы исполнительного приложения. Файл конфигурации имеет структуру csv-таблицы, включает количество блоков, названия блоков (в порядке нумерации в математической модели), служебные параметры (которые позволяют обеспечить поиск блоков в математической модели, если в нее были добавлены новые блоки после сохранения файла конфигурации и общий порядок блоков изменился). Таким образом, с использованием служебных параметров существует возможность использовать сохраненные параметры файлов конфигурации для расширенных математических моделей. Кроме того, служебные параметры ограничивают загрузку параметров одной математической модели в другую, не полученную из первой (но полностью не исключают ее).

Перед загрузкой параметров исполнительное приложение проверяет файл конфигурации на наличие ошибок, и в случае отсутствия ошибок – загружает параметры из файла конфигурации.

Загрузка параметров из файла конфигурации (путь к файлу задается параметром «Файл рег. парам.») возможна локально и удаленно (по команде от приложения мониторинга). Для загрузки параметров «на месте» необходимо остановить процесс вычисления кнопкой «Stop». По команде от приложения мониторинга на время загрузки параметров процесс вычисления автоматически прерывается.

5.1.7. Ошибки и сообщения

При некорректной работе исполнительного приложения или некорректных действиях пользователя, исполнительное приложение может выдавать следующие основные сообщения об ошибках, сообщения и подсказки:

1. «Сохранить новые настройки данной структуры закона управления в файл <Имя файла>_МГ-<Номер генератора>» – предлагает пользователю сохранить в файл текущие значения параметров данной математической модели. В процессе удаленного управления см. раздел 6 пользователь может изменить внутренние параметры математической модели. Для того, чтобы эти изменения не производить каждый раз, их можно сохранить в файл конфигурации *.ini данной математической модели и впоследствии его загрузить. Так для одной и той же математической модели можно иметь различные настройки;
2. «Настройки структуры сохранены в файл <Имя файла>_МГ-<Номер генератора>_save.ini» – параметры математической модели были сохранены в файл <Имя файла>_МГ-<Номер генератора>_save.ini;
3. «Номер порта состоит из четырех цифр» – в качестве номера сетевого порта необходимо задавать четырехзначное число;
4. «Файл не существует» – файл, заданный в качестве источника данных не существует;
5. «Неправильный адрес» – в качестве IP-адресов основного и дополнительного исполнительных приложений заданы некорректные IP-адреса;
6. «Слишком маленькое количество строк» – максимальное количество строк, записываемых в файлы вывода меньше 100;

7. «Данное количество строк отвечает более чем 10 минутам времени» – максимальное количество строк, записываемых в файлы вывода больше 120000;
8. «Неверное число» – неправильно задано число (используемый приложением разделитель целой и дробной части – точка «.»);
9. «Ошибка создания прерывания – *Event*» – ошибка создания пользовательского прерывания для синхронизации основного расчетного потока и потока приема данных (аналогично «Ошибка создания прерывания – *EventForSend*» – основного расчетного потока и потока передачи данных, «Ошибка создания прерывания – *EventForASU*» – основного расчетного потока и потока обмена данными с приложением мониторинга и удаленного доступа к регуляторам;
10. «Пустой файл <Имя файла>. Расчет невозможен» – в качестве файла со структурой математической модели задан пустой файл;
11. «Нет рабочих блоков. Расчет невозможен» – файл «*.dat» имеет неправильную структуру или поврежден;
12. «Размер буфера 0. Расчет невозможен» – файл «*.dat» имеет неправильную структуру или поврежден;
13. «Ошибка выделения памяти. Расчет невозможен» – недостаточно оперативной памяти для работы математической модели;
14. «Файл <Имя файла> не существует» – файл математической модели не существует;
15. «Ошибка чтения блока. Расчет невозможен» – файл «*.dat» имеет неправильную структуру или поврежден;
16. «У блока типа <Номер типа блока> нет входного параметра <Номер входа>. Записать 0?» – в файле математической модели у блока типа <Номер типа блока> не задан входной параметр. На вход может быть записано число «0»;

- 17.«Неверный номер <Число> управления у блока <Номер типа блока>. Записать 0?» – в файле математической модели задан слишком большой номер управления у блока типа <Номер типа блока> (доступны номера управления $Z \in [0; 29]$);
- 18.«Неверный номер <Число> лампы <Номер типа блока>. Записать 0?» – в файле математической модели задан слишком большой номер лампы у блока типа <Номер типа блока> (доступны номера лампы $Z \in [0; 29]$);
- 19.«Деление на 0 в блоке <Номер типа блока>. Записать 1?» – в качестве делителя блока задано число 0;
- 20.«Слишком маленькое значение постоянной времени в блоке <Номер типа блока>. $T = \langle \text{Значение} \rangle$. Записать $abs(0.0051)?$ » – постоянные времени в блоках апериодических и колебательных звеньев имеют слишком маленькое значение (доступные постоянные времени $R \in (0.005; 10^{10})$);
- 21.«Неправильный номер вывода ЦАП <Номер типа блока>. Записать 1?» – некорректный номер канала ЦАП (доступны номера 1 или 2);
- 22.«Неправильный номер канала данных АЦП <Номер типа блока>. Записать 0?» – некорректный номер канала данных АЦП (доступны номера $Z \in [0; 43]$);
- 23.«У одного из блоков 'Конец разрыва' неверно заданы параметры. Расчет невозможен» – в файле математической структуры некорректно заданы связи между блоками «Начало разрыва» и «Конец разрыва»;
- 24.«Некорректное использование блоков 'Начало разрыва' и/или 'Конец разрыва'. Расчет невозможен» – аналогично;
- 25.«Аварийный выход из расчетного цикла главного расчетного процесса» – расчет по методу Зейделя «разошелся» (возможная причина – некорректная математическая модель);

26.«Аварийный выход из расчетного цикла главного расчетного процесса».

6. Программа управления моделью энергоблока и регулятора возбуждения

Приложение мониторинга создано с целью отображения и контроля внутренних расчетных параметров группы математических моделей, управляющих возбуждением и/или возбуждением одного или группы генераторов. Приложение мониторинга может осуществлять подключение к различному числу (но не более 20) исполнительных приложений (в зависимости от требований пользователя). Краткая настройка приложения мониторинга приведена в разделе Настройка программы управления моделью энергоблока и регулятора возбуждения 1.6.

6.1.1. Обобщенная структура приложения

Обобщенная структура приложения представлена на рисунке 28. Пользователь вводит сетевые параметры удаленных компьютеров в таблицу, указывая, параметры каких математических моделей ему необходимо наблюдать и изменять. После подачи команды «Опрос серверов» по выбранным *IP*-адресам отправляется команда запуска процесса управления возбуждением и/или мощностью и команда запуска передачи списка доступных для наблюдения и изменения параметров для исполнительных приложений («*SendMeInit*»).

После выбора интересующих параметров математических моделей и расположения элементов управления на экране и запуска процесса мониторинга, приложение мониторинга передает поочередно на все подключенные исполнительные приложения информацию о выбранных пользователем параметрах. Исполнительные приложения формируют пакеты данных на основе данной информации и обновляют содержание данных пакетов во время работы. Приложение мониторинга циклически передает команду о готовности приема данных («*Step*»). При приеме данной команды

исполнительные приложения высылают текущие значения выбранных параметров приложению мониторинга. По появлении входящих данных они переносятся в таблицы параметров (каждая для своего исполнительного приложения) и обновляются элементы отображения.

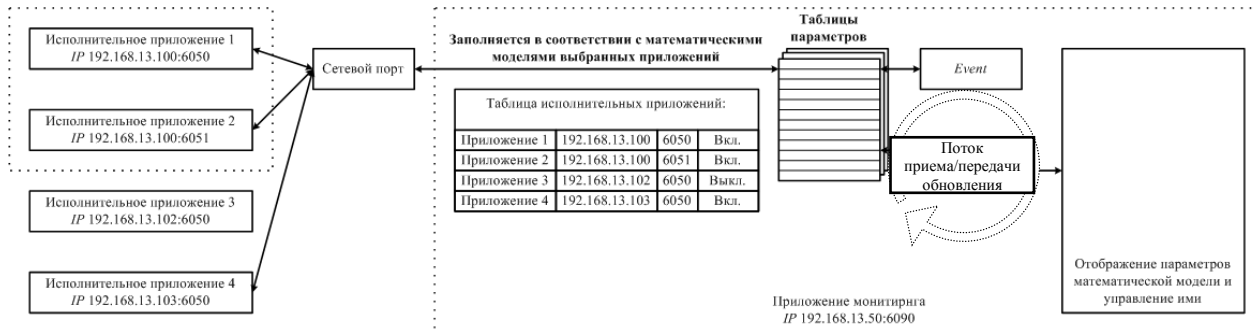


Рисунок 28 – Обобщенная структура приложения мониторинга

6.1.2. Интерфейс пользователя

Управление работой приложения мониторинга осуществляется путем использования основных команд и ввода параметров в таблицу базы данных (далее – БД) IP-адресов ПК с исполнительными приложениями (см. рисунок 6), ввода параметров элементов отображения. Основные команды управления приложением следующие (на панели кнопок управления приложением по порядку):

1. «Открыть файл» (*Ctrl + O*) – открывает необходимый файл структуры отображения *.hmi;
2. «Добавить элементы на активную страницу из файла HMI» (*Ctrl + A*) – добавляет из файла визуальные элементы структуры отображения на открытую страницу;
3. «Сохранить в файл HMI» (*Ctrl + S*) – сохраняет в файл *.hmi все созданные вкладки и визуальные элементы структуры отображения, расположенные на них;
4. «Сохранить элементы страницы» – сохраняет в файл *.hmi визуальные элементы структуры отображения, расположенные на активной странице;

5. «Добавить вкладку» (*Ctrl* + *T*) – добавляет вкладку для размещения визуальных элементов;
6. «Закрыть вкладку» (*Ctrl* + *W*) – закрывает созданную ранее вкладку и удаляет все визуальные элементы;
7. «Обновить экран» (*F5*) – выполняет перерисовку всех визуальных элементов структуры отображения. Подпункты этой вкладки добавляют на активную страницу визуальные элементы структуры отображения – график, трекбар («Управление»), линейный индикатор, дискретный индикатор, кнопку, цифровой индикатор, стрелочный прибор, переключку данных, таблицу параметров;
8. «Включить/выключить перетаскивание мышью объектов мышью» – фиксирует или снимает фиксацию визуальных элементов на экране;
9. «Опрос серверов» (*F12*) – выполняет опрос включенных исполнительных приложений, получает списки доступных для наблюдения и управления параметров;
10. «Начать наблюдение» (*F12*) – передает команду запуска и передачи данных на подключенные исполнительные приложения и запускает процесс отображения интересующей информации о состоянии математических моделей (далее – процесс отображения);
11. «Приостановить/продолжить наблюдение» (*F11*) – приостанавливает процесс отображения;
12. «Полностью остановить наблюдение» (*F10*) – останавливает процесс отображения при завершении работы либо для выбора другого состава интересующих исполнительных приложений либо структуры отображения;
13. «Приостановить регулятор» – посылает команду «*Stop*» всем подключенным исполнительным приложениям (значения

управляющих напряжений в 0 В при этом не сбрасываются). При повторном нажатии – посылает команду «Start»;

14. «Получить все параметры» – посылает команду исполнительным приложениям о передаче значений всех параметров математических моделей в момент прихода команды (данная команда может привести к кратковременной задержке работы исполнительных приложений, применять ее рекомендуется только на этапе отладки математической модели).

Выбор необходимых для работы исполнительных приложений осуществляется при помощи БД. БД рассчитана на хранение информации о 20 исполнительных приложениях и содержит следующие поля:

1. «IP-адрес» – IP-адрес ПК с исполнительным приложением, вводится пользователем;
2. «№ порта *IN-TCP*» – номер порта, используемый исполнительным приложением для приема данных от приложения мониторинга (должен соответствовать параметру «Порт обмена *HMI*» исполнительного приложения), вводится пользователем;
3. «Вкл./выкл.» – поле, позволяющее включать удаленное исполнительное приложение в процесс мониторинга и управления, вводится пользователем;
4. «Ответ» – указывает состояние удаленного исполнительного приложения в ответ на попытку подключения к нему, выводится автоматически;
5. «Имя регулятора» – указывает идентификатор «Имя регулятора» удаленного исполнительного приложения в ответ на попытку подключения к нему, выводится автоматически;
6. «№ ген.» – указывает идентификатор «Номер генератора» удаленного исполнительного приложения в ответ на попытку подключения к нему, выводится автоматически;

7. «Доступные файлы моделей» – файлы математических моделей, расположенные в папке *Models* исполнительного приложения (папка *Models* должна находиться в корневом каталоге вместе с *RegulatorComponent.exe*), выводится автоматически. Изменяя данный параметр, можно менять математическую модель исполнительного приложения;
8. «Доступные файлы настроек» – аналогично для файлов подгружаемых параметров модели (в папке *Models*);
9. «OUT-UDP» – соответствует параметру «Порт передачи» исполнительного приложения, выводится автоматически, можно изменять;
10. «IN-UDP» – соответствует параметру «Порт приема» исполнительного приложения, выводится автоматически, можно изменять;
11. «IP-адрес DAC» – аналогично, параметру «IP ЦАП»;
12. «IP-адрес DAC2» – аналогично, параметру «IP доп. ист. изм.»;
13. «№ OUT-UDP2» – аналогично, параметру «Порт доп. ист. изм.».

6.1.3. Элементы отображения и управления

Внутренние параметры математических моделей могут быть выведены (введены) элементами отображения и управления, представленные на рисунке 29. Каждый элемент отображения и управления обладает определенным набором параметров. Для применения изменений в параметры элемента необходимо перейти к следующему или предыдущему параметру в списке.



Рисунок 29 – Представление и задание параметров в приложении мониторинга

Элемент отображения «График» позволяет отображать на экране изменение контролируемого параметра во времени и имеет следующие параметры:

1. «Вкл./выкл. тренд» – управляет отображением графика;
2. «Вкл./выкл. сетка тренда» – управляет отображением сетки графика;
3. «Вкл./выкл. отображение текущего значения» – управляет отображением числового значения наблюдаемого параметра;
4. «Вкл./выкл. отображение пределов» – управляет отображением верхнего и нижнего пределов сетки графика (сетка графика задается пользователем, если наблюдаемый параметр выходит за заданные пределы, их автоматическая подстройка не производится);
5. «Вкл./выкл. отображение названия тренда» – управляет отображением текстового названия тренда;

6. «Положение по оси Y» – текущее положение панели с графиком на экране по вертикальной оси (можно задавать здесь, или перетаскивать элемент непосредственно мышью);
7. «Положение по оси X» – текущее положение панели с графиком на экране по горизонтальной оси (можно задавать здесь, или перетаскивать элемент непосредственно мышью);
8. «Ширина панели» – горизонтальный размер панели с графиком;
9. «Высота панели» – вертикальный размер панели с графиком;
10. «Шаг сетки» – размер сетки в пикселах на графике;
11. «Минимальное значение на тренде» – нижний предел на графике;
12. «Максимальное значение на тренде» – верхний предел на графике;
13. «Цвет фона» – цвет графика;
14. «Цвет сетки» – цвет линий сетки;
15. «Цвет подписи» – цвет всех надписей на графике;
16. «Название тренда» – отображаемое название графика;
17. «Название контролируемого параметра» – контролируемый параметр из списка параметров математических моделей подключенных исполнительных приложений (выбирается после выполнения команды «Опрос серверов»).

Элемент отображения и управления «Управление» позволяет менять параметры математической модели регулятора и имеет следующие параметры (часть параметров аналогична ранее описанным, поэтому их описание не приводится):

1. «Вкл./выкл. трекбар»;
2. «Горизонтальный трекбар» – переключает трекбар в горизонтальный режим;
3. «Вкл./выкл. метки» – управляет отображением меток на шкале;
4. «Вкл./выкл. отображение текущего значения»;
5. «Вкл./выкл. отображение пределов»;

6. «Вкл./выкл. отображение названия»;
7. «Положение по оси Y»;
8. «Положение по оси X»;
9. «Ширина панели»;
- 10.«Высота панели»;
- 11.«Минимальное значение трекбара» – значение контролируемого параметра в крайнем левом (нижнем) положении ползунка трекбара;
- 12.«Максимальное значение трекбара» – аналогично в крайнем правом (верхнем) положении;
- 13.«Начальное значение трекбара» – значение параметра в момент запуска процесса наблюдений;
- 14.«Шаг трекбара» – минимально возможное изменение контролируемого параметра при помощи трекбара;
- 15.«Название трекбара»;
- 16.«Название контролируемого параметра».

Элемент отображения «Линейный индикатор» позволяет отображать текущее значение контролируемого параметра в виде горизонтальной или вертикальной шкалы и имеет следующие параметры:

1. «Вкл./выкл. прогрессбар»;
2. «Вертикальный прогрессбар»;
3. «Вкл./выкл. отображение пределов»;
4. «Вкл./выкл. отображение текущего значения»;
5. «Вкл./выкл. отображение названия прогрессбара»;
6. «Положение по оси Y»;
7. «Положение по оси X»;
8. «Ширина панели»;
9. «Высота панели»;
- 10.«Минимальное значение прогрессбара»;
- 11.«Максимальное значение прогрессбара»;

- 12.«Шаг прогрессбара»;
- 13.«Название трекбара»;
- 14.«Название контролируемого параметра».

Элемент отображения «Индикатор дискретный» позволяет отображать дискретные сигнал, сравнивая значение контролируемого параметра с параметром «Порог срабатывания» и имеет следующие параметры:

1. «Вкл./выкл. фигуру»;
2. «Вкл./выкл. отображение названия фигуры»;
3. «Положение по оси Y»;
4. «Положение по оси X»;
5. «Ширина панели»;
6. «Высота панели»;
7. «Порог срабатывания» – если контролируемый параметр превосходит данный, то «Индикатор дискретный» имеет цвет, отвечающий параметру «Цвет в положении Вкл.», иначе – «Цвет в положении Откл.»;
8. «Цвет в положении Вкл.» – цвет в включенном состоянии;
9. «Цвет в положении Откл.» – цвет в выключенном состоянии;
- 10.«Название фигуры»;
- 11.«Название контролируемого параметра».

Элемент управления «Кнопка» позволяет приравнивать значение контролируемого параметра к одному из двух значений и имеет следующие параметры:

1. «Вкл./выкл. кнопку»;
2. «Начальное положение: Вкл./выкл.» – положение «Кнопки» в момент запуска процесса наблюдений;
3. «Вкл./выкл. отображение состояния кнопки» – управляет отображением на экране состояния кнопки;
4. «Вкл./выкл. отображение имени кнопки»;

5. «Текущее состояние кнопки» – положение «Кнопки» в текущий момент процесса наблюдений (обновляется при нажатии на кнопку);
6. «Положение по оси Y»;
7. «Положение по оси X»;
8. «Ширина панели»;
9. «Высота панели»;
- 10.«Присваиваемое значение параметра при переводе в состояние ON» – значение, которое будет присвоено контролируемому параметру при переводе кнопки в положение «ON»;
- 11.«Присваиваемое значение параметра при переводе в состояние OFF» – аналогично, в «OFF»;
- 12.«Название контролируемого параметра».

Элемент отображения «Цифровой индикатор» позволяет отображать значение контролируемого параметра в виде числа разных цветов в зависимости от значения и имеет следующие параметры:

1. «Вкл./выкл. подпись (цифровой индикатор)»;
2. «Положение по оси Y»;
3. «Положение по оси X»;
4. «Ширина панели»;
5. «Высота панели»;
6. «Размер шрифта подписи» – используемый размер шрифта;
7. «Оптимальное значение параметра» – число, относительно которого определяется отклонение контролируемого параметра;
8. «Величина нормального отклонения параметра» – величина, отклонения, при котором цвет «Цифрового индикатора» будет отвечать параметру «Цвет оптимального значения параметра»;
9. «Величина повышенного отклонения параметра» – аналогично, «Цвет значения при нормальном отклонении параметра»;

- 10.«Величина критического отклонения параметра» – аналогично,
«Цвет значения при критическом отклонении параметра»;
- 11.«Цвет оптимального значения параметра»;
- 12.«Цвет значения при нормальном отклонении параметра»;
- 13.«Цвет значения при повышенном отклонении параметра»;
- 14.«Цвет значения при критическом отклонении параметра»;
- 15.«Название панели»;
- 16.«Название контролируемого параметра».

Элемент отображения «Стрелочный прибор» позволяет отображать значение контролируемого параметра в виде круговой, полукруглой или дуговой шкалы и указательной стрелки и имеет следующие параметры:

1. «Вкл./выкл. стрелочный прибор»;
2. «Вкл./выкл. отображение имени»;
3. «Вкл./выкл. отображение цифровых меток шкалы» – управляет отображением цифровых подписей прибора;
4. «Вкл./выкл. отображение больших делений прибора» – управляет отображением основных делений;
5. «Вкл./выкл. отображение малых делений прибора» » – управляет отображением дополнительных делений;
6. «Вкл./выкл. отображение окружности прибора» – управляет отображением обводки;
7. «Вкл./выкл. цифровое значение измеряемой величины» – управляет отображением дополнительного числового значения контролируемого параметра;
8. «Вкл./выкл. гладкость линий» – управляет использованием технологии *GDIPlus*;
9. «Положение по оси Y»;
- 10.«Положение по оси X»;
- 11.«Ширина панели»;
- 12.«Высота панели»;

13. «Размер шрифта»;
14. «Тип прибора 0 - круглый, 1 - полукруглый, 2 - дуга» – управляет типом прибора;
15. «Градусная мера дуги» – отвечает градусной мере дуги «Стрелочного прибора» с типом 2;
16. «Максимальное значение шкалы»;
17. «Минимальное значение шкалы»;
18. «Шаг больших делений шкалы» – отвечает шагу в единицах контролируемого параметра для основных делений;
19. «Шаг малых делений шкалы» – аналогично, для дополнительных делений;
20. «Толщина линий делений шкалы»;
21. «Длина линий больших делений шкалы»;
22. «Длина линий малых делений шкалы»;
23. «Коэффициент расположения подписей шкалы (< 1.0)» – позволяет регулировать расстояние численных подписей к радиусу (1.0 – надписи будут расположены на расстоянии радиуса окружности);
24. «Коэффициент длины стрелки подписей шкалы (< 1.0)» – аналогично, для длины стрелки;
25. «Коэффициент доп. шкалы подписей шкалы (< 1.0)» – аналогично, для дополнительной шкалы;
26. «Коэффициент расчета дуги (< 0.5)» – управляет коэффициентом эллиптичности «Стрелочного прибора» типа 2;
27. «Цвет фона»;
28. «Цвет стрелки»;
29. «Цвет делений»;
30. «Цвет окружности»;
31. «Цвет круга»;
32. «Название прибора»;

33.«Название контролируемого параметра».

Элемент управления «Перемишка данных» позволяет передавать значение одного контролируемого параметра в качестве значения другого контролируемого параметра, полукруглой или дуговой шкалы и указательной стрелки и имеет следующие параметры:

1. «Вкл./выкл. перемишку данных»;
2. «Вкл./выкл. отображение имени перемишки»;
3. «Вкл./выкл. отображение имен сигналов» – управляет отображением присвоенных пользователем имен сигналов;
4. «Вкл./выкл. отображение текущего значения» – управляет отображением значения передаваемого параметра;
5. «Положение по оси Y»;
6. «Положение по оси X»;
7. «Ширина панели»;
8. «Высота панели»;
9. «Размер шрифта»;
- 10.«Параметр-источник» – отвечает контролируемому параметру, значение которого передается;
- 11.«Параметр-приемник» – отвечает контролируемому параметру, значение которого задается;
- 12.«Имя параметра-источника» – отображаемое имя передаваемого контролируемого параметра;
- 13.«Имя параметра-приемника» – отображаемое имя задаваемого контролируемого параметра;
- 14.«Название перемишки данных»;
- 15.«Название контролируемого параметра» (здесь – формальный параметр, должен быть такой же как «Имя параметра-источника»).

Элемент управления «Таблица» позволяет отображать и задавать значение группы контролируемых параметров (до 10 шт.) и имеет следующие параметры:

1. «Вкл./выкл. таблицу параметров»;
2. «Вкл./выкл. отображение имени таблицы»;
3. «Положение по оси Y»;
4. «Положение по оси X»;
5. «Ширина панели»;
6. «Высота панели»;
7. «Количество строк (< 10)» – включает заданное число строк «Таблицы»;
8. «Параметр 1» – контролируемый параметр 1 (далее – аналогично);
9. «Параметр 2»;
10. «Параметр 3»;
11. «Параметр 4»;
12. «Параметр 5»;
13. «Параметр 6»;
14. «Параметр 7»;
15. «Параметр 8»;
16. «Параметр 9»;
17. «Параметр 10»;
18. «Начальное значение параметра 1» – значение контролируемого параметра 1 в момент запуска процесса наблюдений (далее – аналогично);
19. «Начальное значение параметра 2»;
20. «Начальное значение параметра 3»;
21. «Начальное значение параметра 4»;
22. «Начальное значение параметра 5»;
23. «Начальное значение параметра 6»;

- 24.«Начальное значение параметра 7»;
- 25.«Начальное значение параметра 8»;
- 26.«Начальное значение параметра 9»;
- 27.«Начальное значение параметра 10»;
- 28.«Отображаемое имя параметра 1» – отображаемое имя контролируемого параметра 1 в «Таблице» (далее – аналогично);;
- 29.«Отображаемое имя параметра 2»;
- 30.«Отображаемое имя параметра 3»;
- 31.«Отображаемое имя параметра 4»;
- 32.«Отображаемое имя параметра 5»;
- 33.«Отображаемое имя параметра 6»;
- 34.«Отображаемое имя параметра 7»;
- 35.«Отображаемое имя параметра 8»;
- 36.«Отображаемое имя параметра 9»;
- 37.«Отображаемое имя параметра 10»;
- 38.«Название таблицы»;
- 39.«Название контролируемого параметра» (здесь – формальный параметр, должен быть такой же как «Параметр 1»).

6.1.4. Структура используемых файлов

Приложение мониторинга использует две группы файлов. Первая группа файлов – файлы отображения структуры управления (включает либо все элементы структуры отображения всех вкладок «*.hmi», созданных пользователем либо элементы структуры отображения одной выбранной вкладки и вкладки «Главный экран»).

Вторая группа – служебные файлы, обеспечивающие работу с базами данных (*Borland Database Engine*) и непосредственно файлы БД (в директории \BD):

1. *bantam.dll*;
2. *blw32.dll*;
3. *charset.cvb*;

4. *idapi32.cfg*;
5. *idapi32.dll*;
6. *idasci32.dll*;
7. *idbat32.dll*;
8. *idddr32.dll*;
9. *idpdx32.dll*;
10. *idr20009.dll*;
11. *idsql32.dll*;
12. *other.btl*.

Файлы БД содержат таблицу базы данных *IP*-адресов, автоматически сохраняются при изменении таблицы приложением мониторинга:

1. *ips.DB*;
2. *ips.PX*;
3. *ips.VAL*;
4. *ips.XG0*;
5. *ips.YG0*.

6.1.5. Описание ошибок соединения

При некорректной работе приложения мониторинга или некорректных действиях пользователя, измерительное приложение может выдавать следующие сообщения об ошибках:

1. «Ошибка – *Event*» – ошибка создания пользовательского прерывания для синхронизации приема и обновления значений контролируемых параметров на экране;
2. «Сервер не отвечает» – запрос параметров математической модели исполнительного приложения выполнен по неверному *IP*-адресу и/или сетевому порту либо произошел сбой в работе исполнительного приложения;
3. «Неправильный сервер» – запрос параметров математической модели исполнительного приложения выполнен по неверному *IP*-адресу и/или сетевому порту либо произошел сбой в работе

исполнительного приложения, при этом удаленный ПК ответил на запрос, но неправильно;

4. «Таймаут сервера» – отправленный запрос параметров математической модели исполнительного приложения выполнен правильно, но по какой-либо причине превышен интервал ожидания входящих данных от исполнительного приложения;
5. «Ошибка передачи имени» – аналогично, не передан параметр «Пользовательский идентификатор исполнительного приложения»;
6. «Ошибка передачи параметра <Название>» – ошибка передачи параметра математической модели <Название>;
7. «Ошибка соединения при передаче списка параметров» – ошибка установки соединения с исполнительными приложениями для передачи списка выбранных пользователем параметров математической модели;
8. «Ошибка соединения при передаче списка параметров: сервер не отвечает» – ошибка соединения с исполнительным приложением при попытке передачи списка выбранных пользователем параметров математической модели;
9. «Ошибка передачи при передаче списка параметров» – ошибка передачи списка выбранных пользователем параметров математической модели;
10. «Список серверов ограничен числом 20» – задано некорректное число для привязки элементов отображения и управления из файла к исполнительным приложениям;
11. «Нет подключения с данным номером регулятора» – попытка привязки элементов отображения и управления из файла к неподключенному исполнительному приложению;
12. «Некорректный номер» – введено неправильное число;

13.«Устаревшая версия файла» – открываемый файл был создан в старой версии приложения мониторинга.

6.2. Некоторые результаты тестирования программно-технического комплекса

Для оценки адекватности работы ПТК в целом и его отдельных компонентов был выполнен ряд тестов. Тестирование выполнялось для двух случаев: оценка выполнений требований быстродействия ПТК для обеспечения возможности проведения испытаний в рамках ЦАФК с представлением различных математических моделей, тестирование реализованной в рамках ПТК математической модели автоматического регулятора возбуждения (АРВ) AVR-ЗМТ с использованием промышленного образца AVR-ЗМТ. Тестирование математической модели осуществлялось в рамках программно-технического симулятора, функционирующего в реальном времени (*Real Time Digital Simulator*, далее – *RTDS*) с целью создания идентичных условий работы промышленного образца AVR-ЗМТ и математической модели ПТК и сопоставления получаемого результата.

6.2.1. Тестирование выполнения требований быстродействия ПТК на ЦАФК

Перед ПТК была поставлена задача создания принципиальной возможности реализации в рамках ЦАФК различных математических моделей систем управления возбуждением, турбин и их систем управления при работе с модельными генераторами ЦАФК. Теория и практика проводимых на ЦАФК исследований, показала, что особые требования с точки зрения быстродействия предъявляются к устройствам автоматических регуляторов возбуждения. Поэтому с целью тестирования быстродействия было предложено подготовить математическую модель регулятора возбуждения и провести часть испытаний в соответствии с [6].

Была подготовлена математическая модель в ПТК автоматического регулятора возбуждения (АРВ) AVR-ЗМТ, по имеющейся в рамках ОАО

«НТЦ ЕЭС» математической модели, созданной для программно-вычислительного комплекса *EUROSTAG*. Результаты тестирования быстродействия ПТК приведены в [7].

6.2.2. Результаты тестирования реализованной в рамках ПТК математической модели AVR-ЗМТ

В рамках *RTDS* (см. [8]) с целью проверки корректности реализации общих принципов построения ПТК, работы математической модели в ПТК была подготовлена испытательная схема, состоящая из двух несвязанных идентичных подсистем. Каждая из этих подсистем включает математические модели генератора, трансформатора, линии электропередачи, шин неизменного напряжения, турбины (см. рисунок 30). К генератору первой подсистемы подключен промышленный образец автоматического регулятора возбуждения *AVR-ЗМТ* (с использованием аналогового выхода) в соответствии с [9], к генератору второй подсистемы подключены измерительные органы ПТК (см. рисунок 31). Подготовлены элементы, обеспечивающие подачу тестовых возмущений в обе подсистемы (однофазное короткое замыкание длительностью 40 мс – ТИ-1; и ступенчатое изменение напряжения на шинах электрической станции путем подключения емкости – ТИ-2), элементы, обеспечивающие регистрацию параметров электрического режима, обеспечивающую запись следующих параметров:

1. активная мощность генераторов подсистем 1 и 2 – $P(I)$, $P(II)$ в МВт
2. напряжение статора генераторов подсистем 1 и 2 – $U_{\Gamma}(I)$, $U_{\Gamma}(II)$ в о.е.;
3. напряжение возбуждения генераторов подсистем 1 и 2 – $U_f(I)$, $U_f(II)$ в о.е.х.х.;
4. ток возбуждения генераторов подсистем 1 и 2 – $I_f(I)$, $I_f(II)$ в о.е.х.х.

Данные параметры представлены на двух осциллограммах для каждого эксперимента. На первой осциллограмме представлены $P(I)$ (красным цветом), $P(II)$ (синим цветом), на второй – $U_{\Gamma}(I)$ (красным цветом), $U_{\Gamma}(II)$ (розовым цветом), $U_f(I)$ (синим цветом), $U_f(II)$ (голубым цветом), $I_f(I)$ (зеленым цветом), $I_f(II)$ (черным цветом).

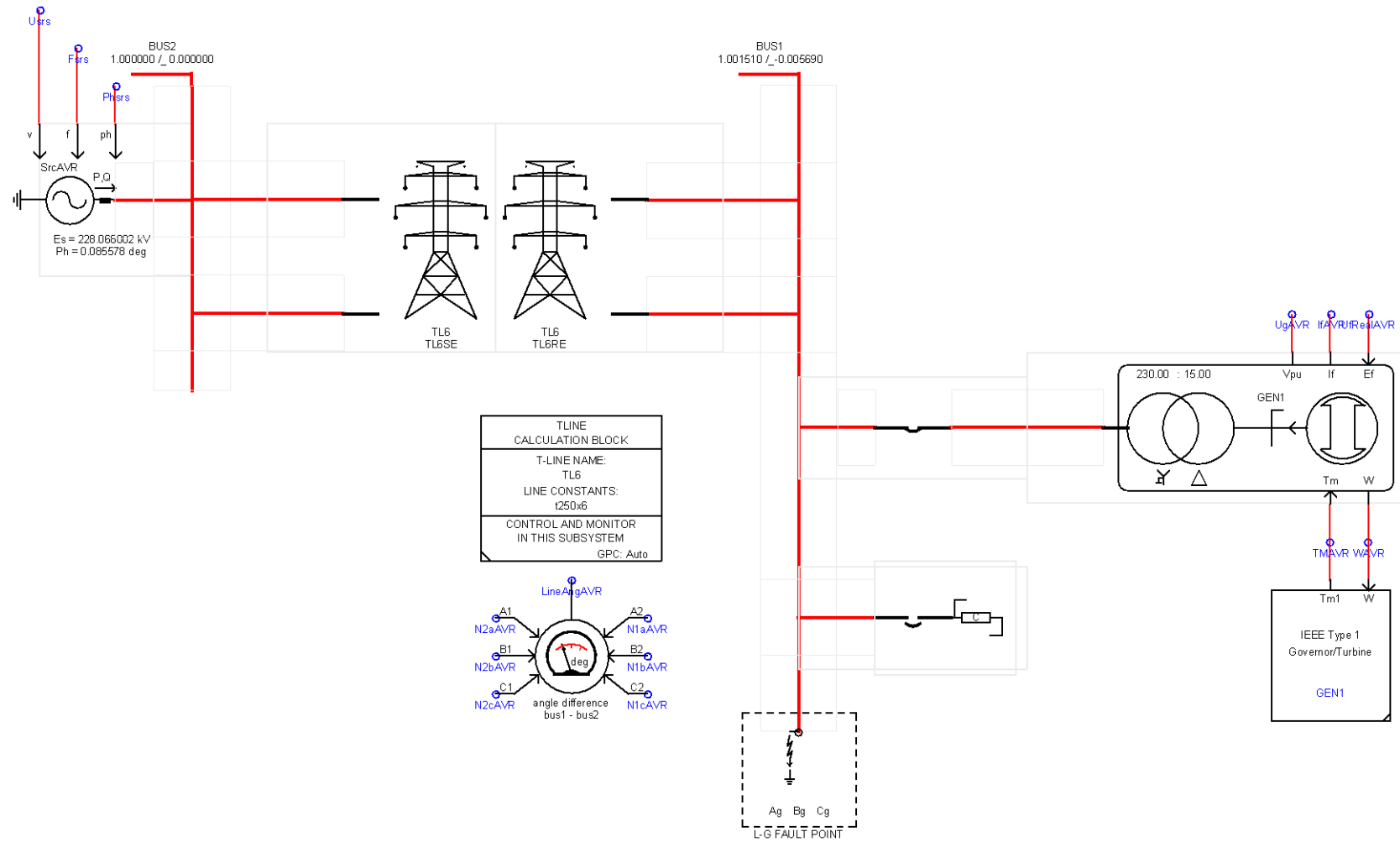


Рисунок 30 – Испытательная схема для оценки корректности работы ПТК

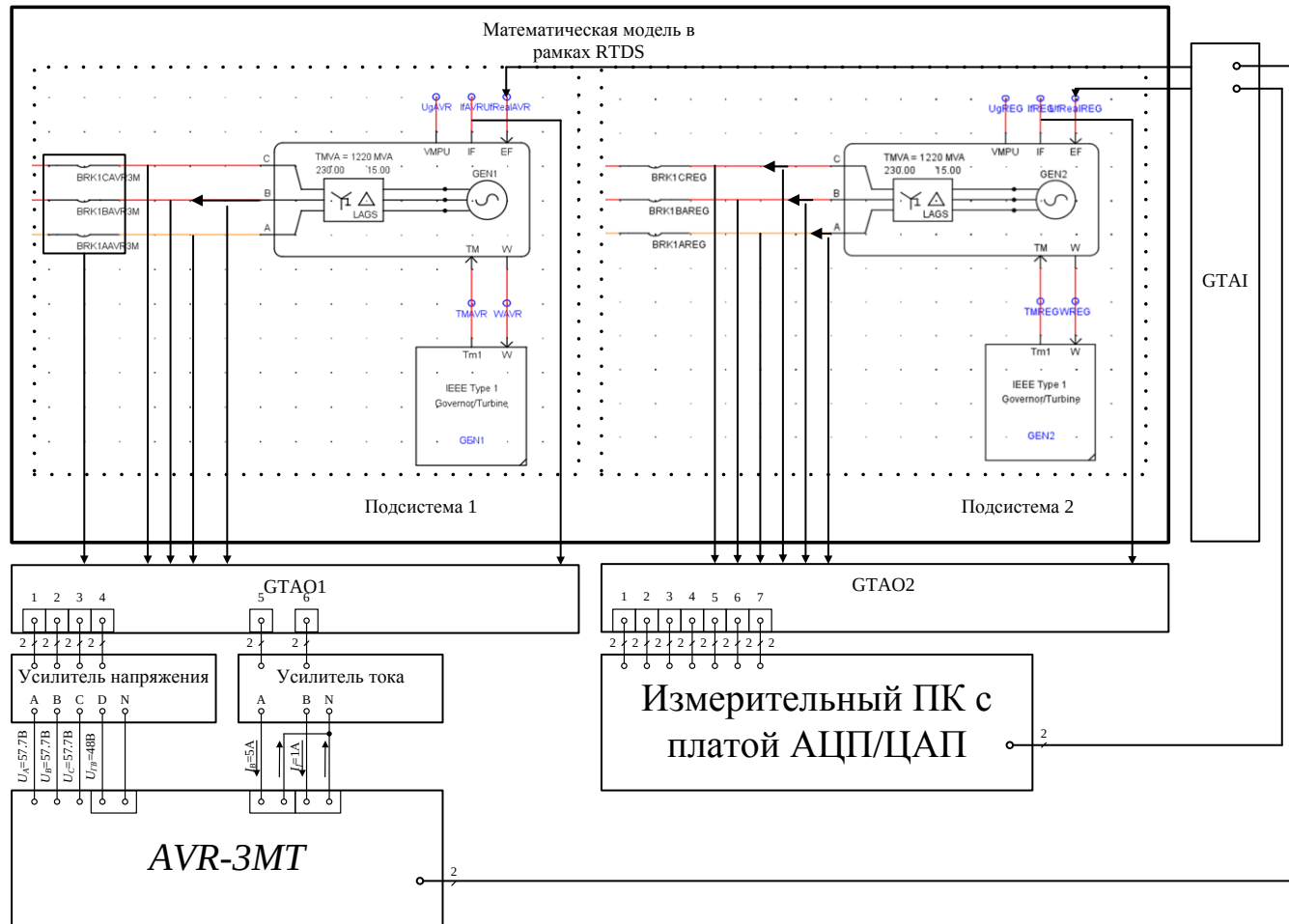


Рисунок 31 – Подключение промышленного образца автоматического регулятора возбуждения AVR-3MT и измерительно ПК к комплексу RTDS

Примечания: GTAO – плата аналогового вывода, GTAI – плата аналогового ввода

Примеры полученных осциллограмм переходных процессов при одинаковых настройках *AVR-3MT* и его математической модели, функционирующей в рамках ПТК, приведены на рисунках 32 – 55.

Как видно из рисунков, математическая модель, работающая в рамках ПТК, обеспечивает характер демпфирования электромеханических колебаний, соответствующий работе промышленного образца *AVR-3MT*.

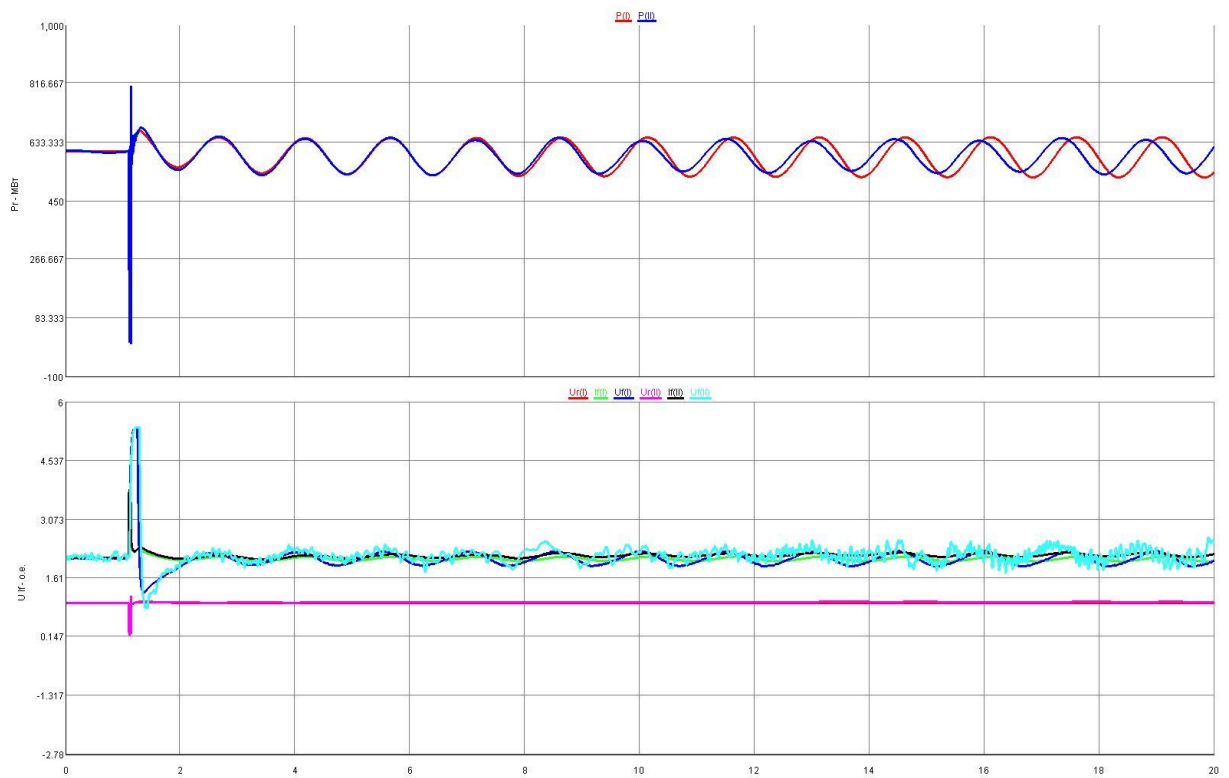


Рисунок 32 – ТИ1. $KOU^1 = 15$. Интегратор выведен

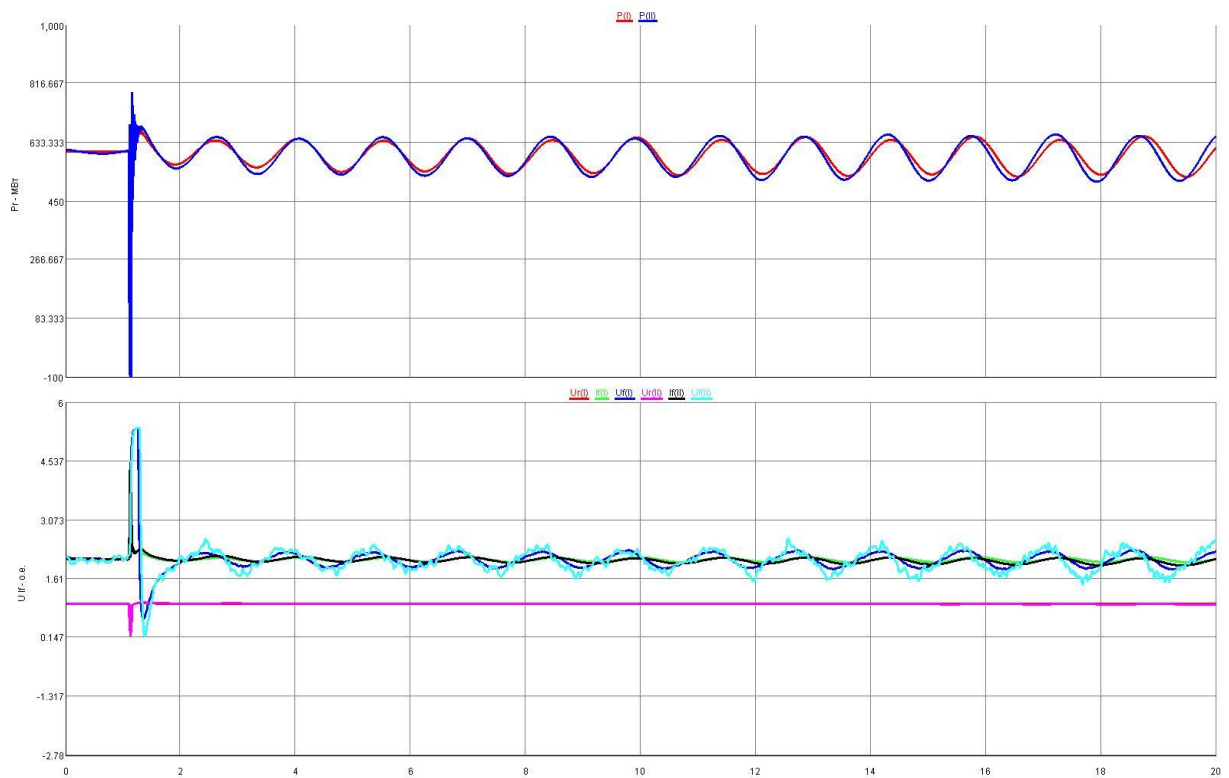


Рисунок 33 – ТИ1. $KOU = 25$. Интегратор выведен

¹ KOU – коэффициент усиления по отклонению напряжения статора генератора

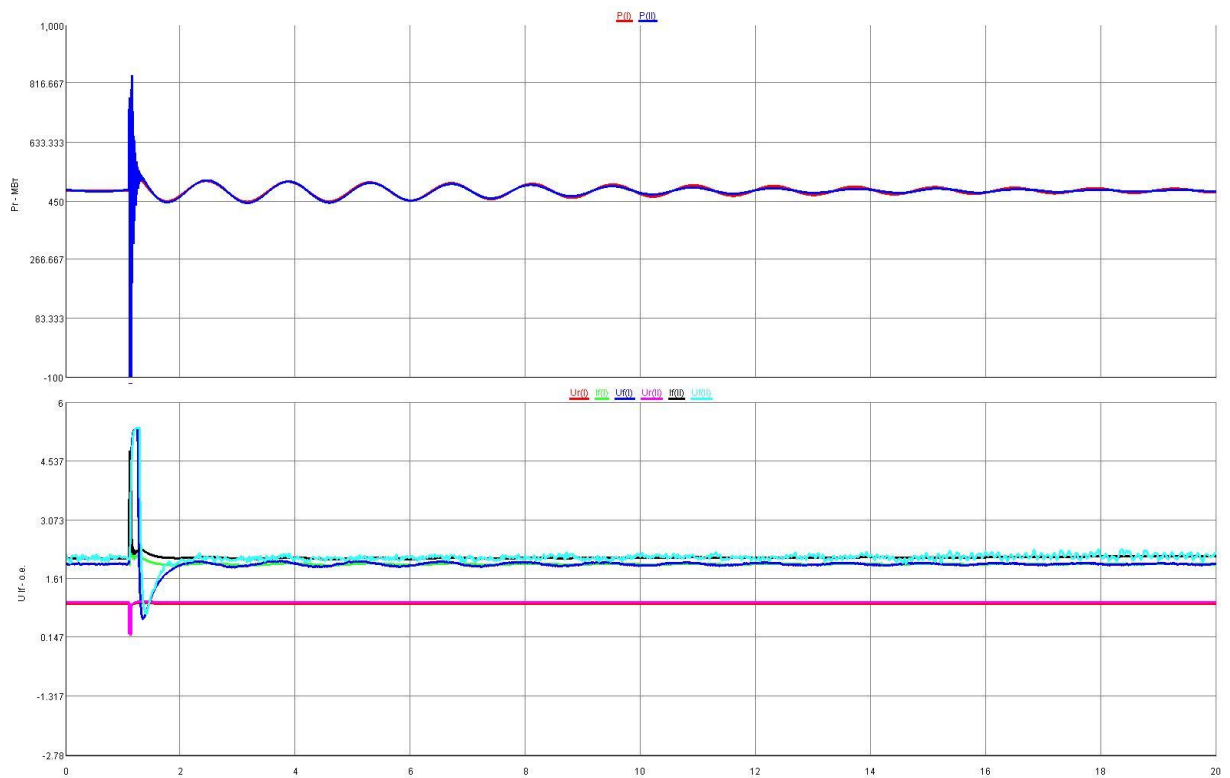


Рисунок 34 – ТИ1. $K0U = 20$. Интегратор введен

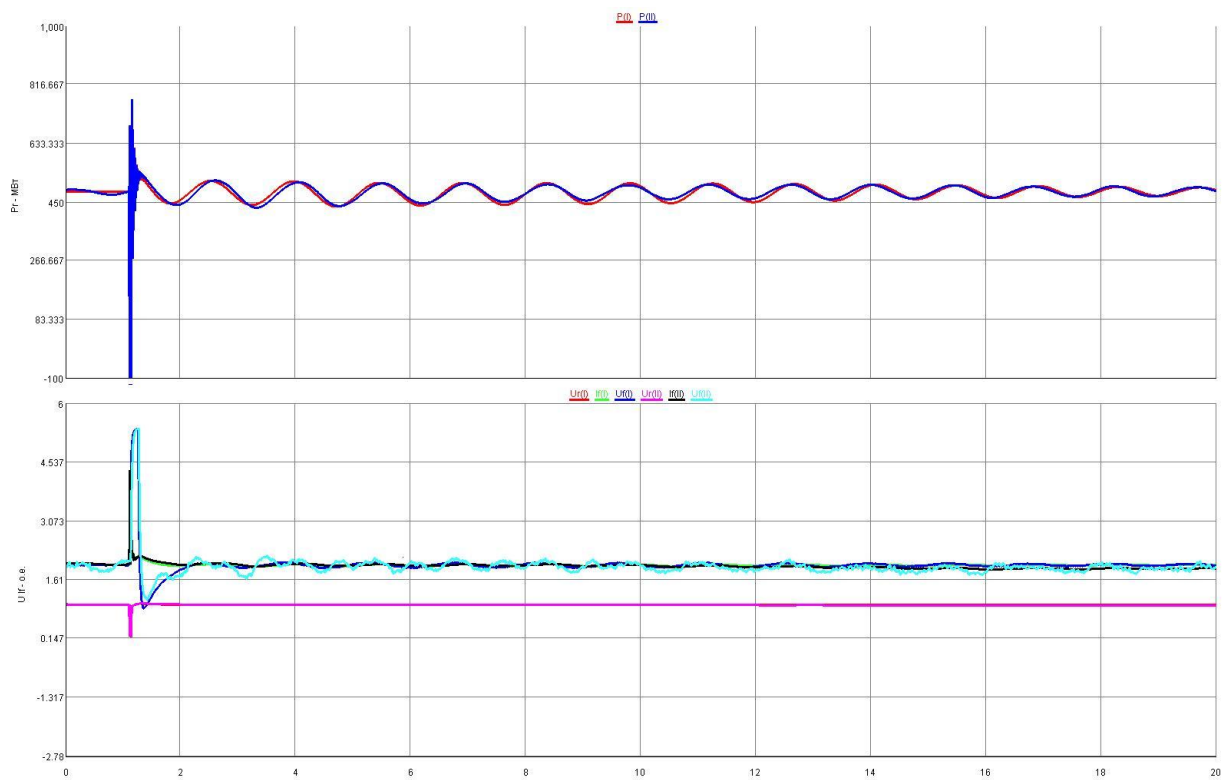


Рисунок 35 – ТИ1. $K0U = 15$. Интегратор введен

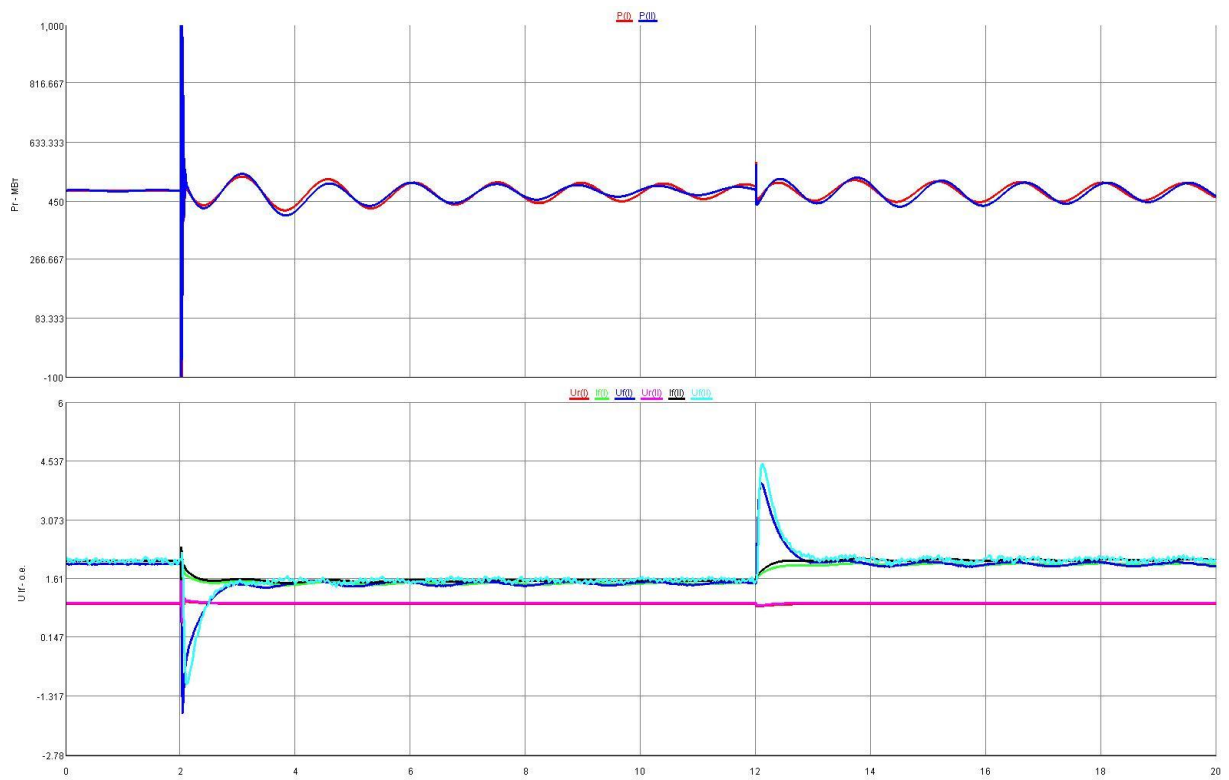


Рисунок 36 – ТИ2. $K0U = 15$, $T_{\text{инт}}^2 = 2$ с

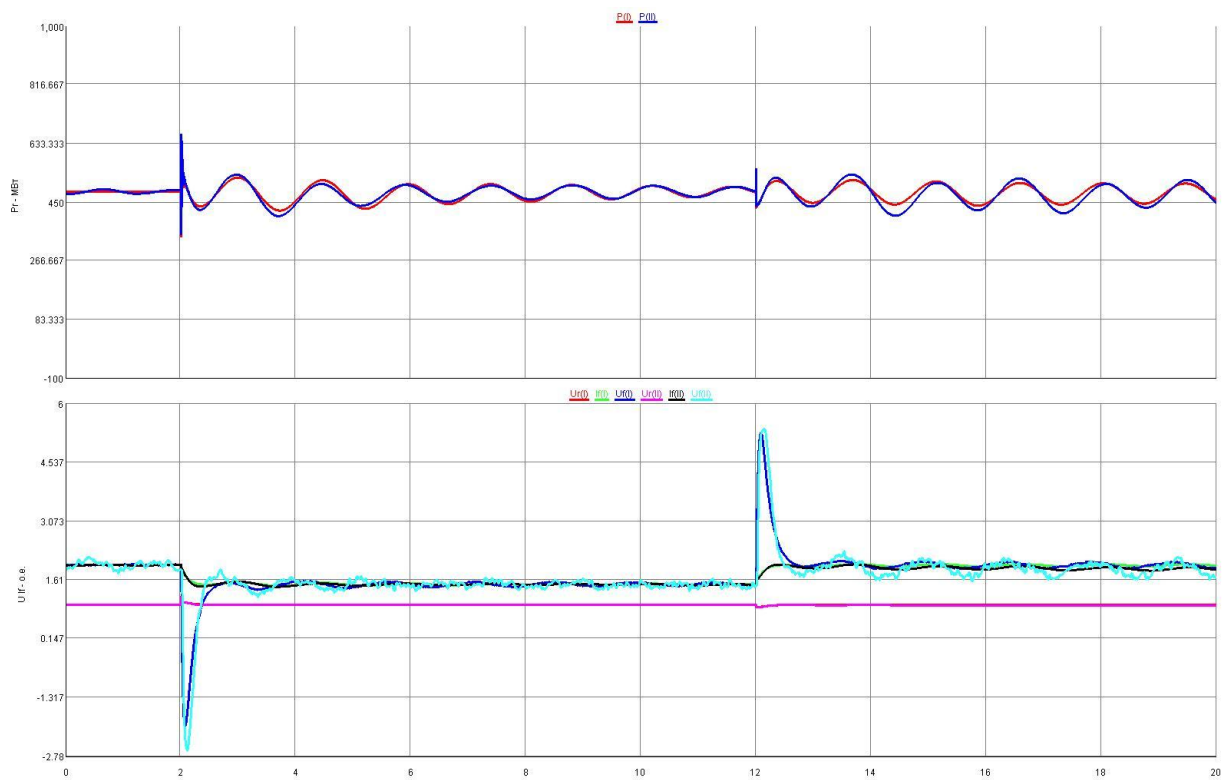


Рисунок 37 – ТИ2. $K0U = 25$, $T_{\text{инт}} = 2$ с

² $T_{\text{инт}}$ – постоянная времени интегрирования в контуре регулирования напряжения статора



Рисунок 38 – ТИ1. $K0U = 15$, $K1U^3 = 1$, $T_{\text{инт}} = 2$ с

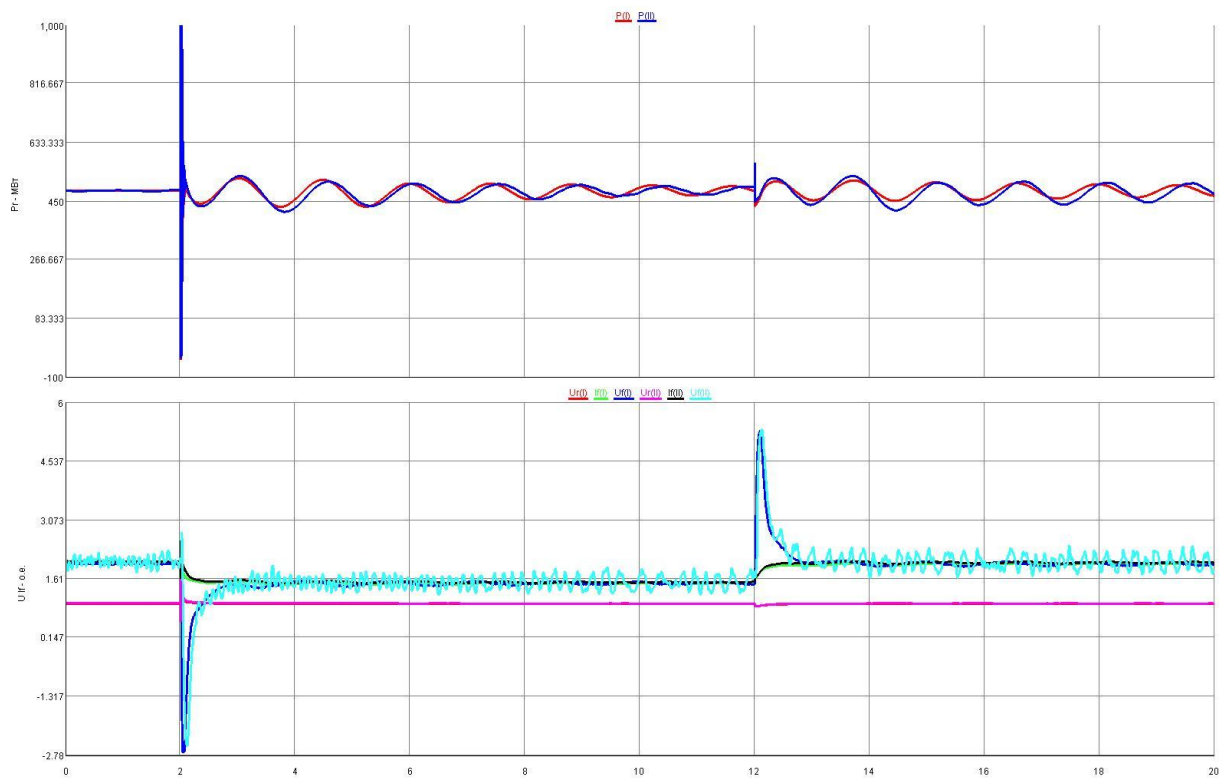


Рисунок 39 – ТИ2. $K0U = 15$, $K1U = 1$, $T_{\text{инт}} = 2$ с

³ $K1U$ – коэффициент усиления канала по производной напряжения статора

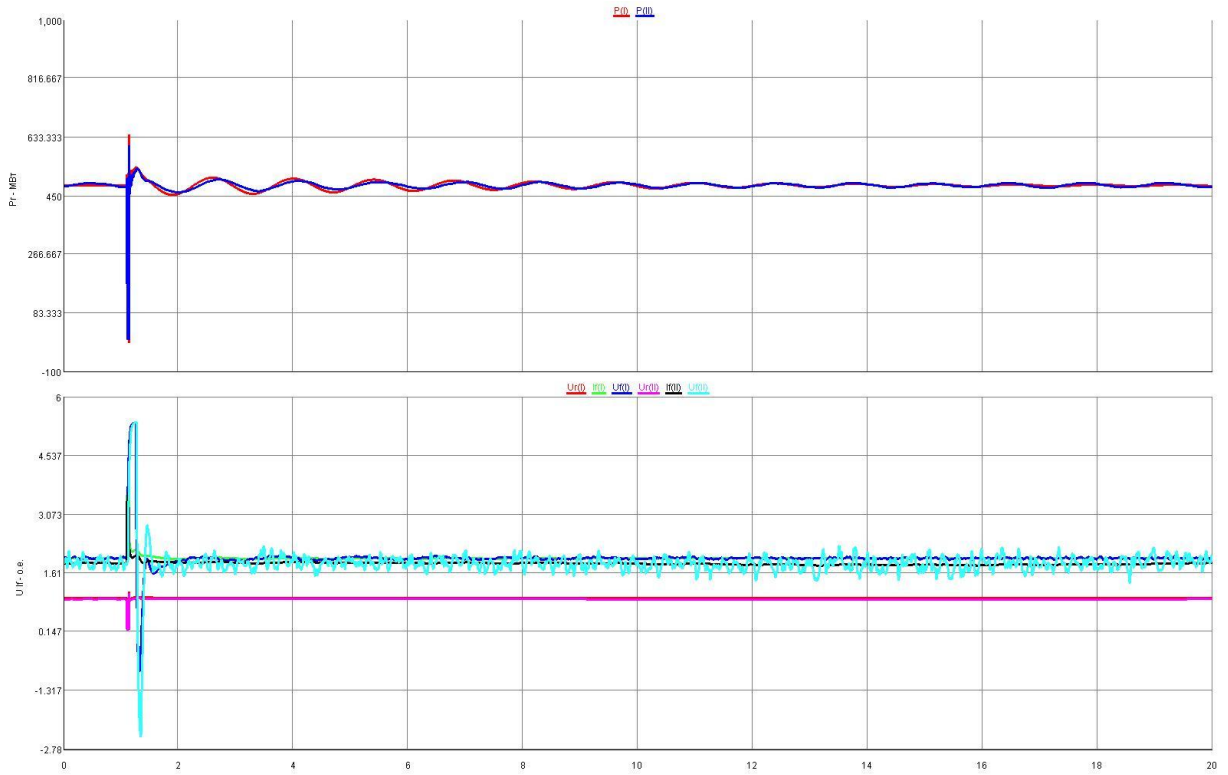


Рисунок 40 – ТИ1. $K0U = 15$, $K1U = 3$, $T_{\text{инт}} = 2$ с

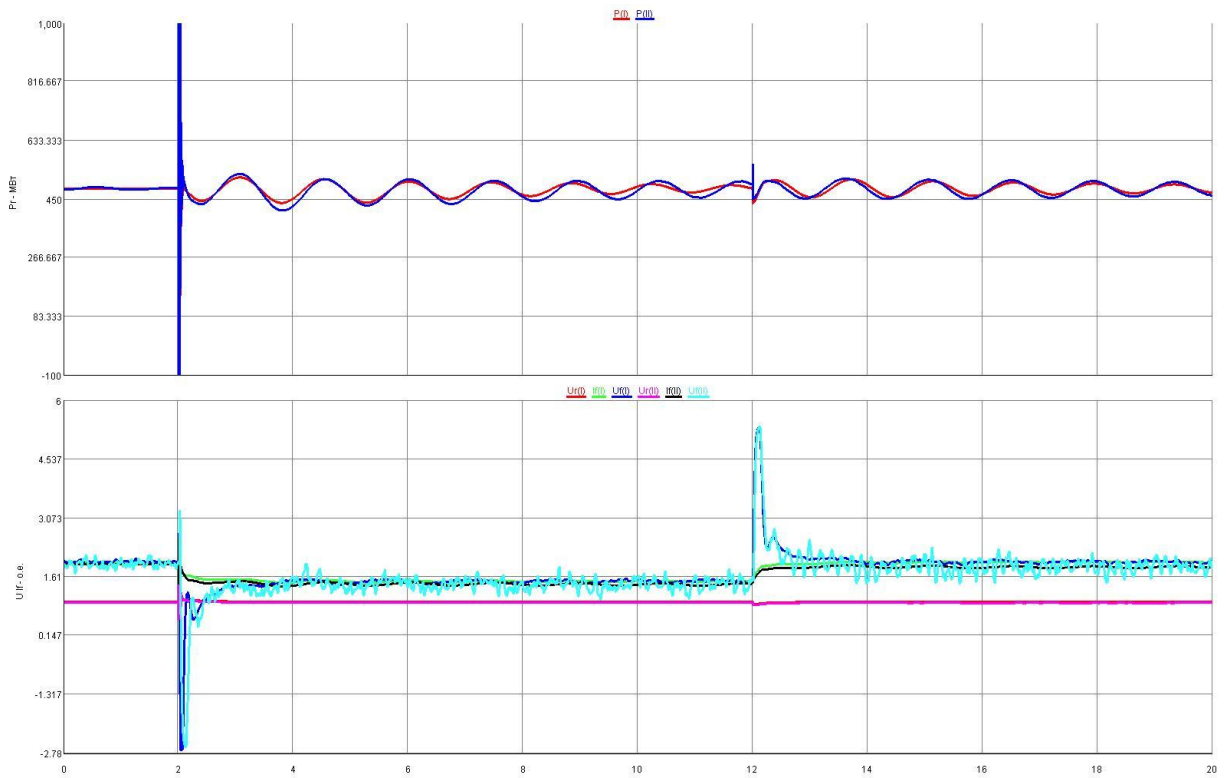


Рисунок 41 – ТИ2. $K0U = 15$, $K1U = 3$, $T_{\text{инт}} = 2$ с

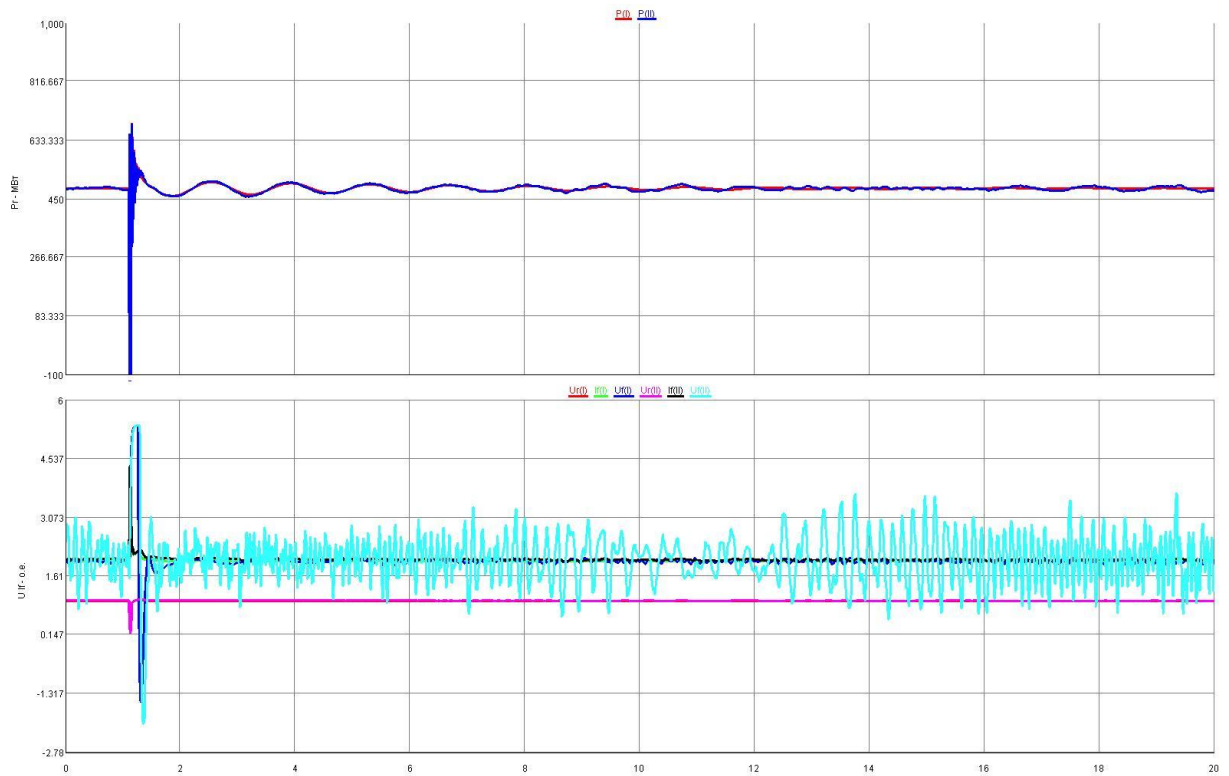


Рисунок 42 – ТИ1. $K0U = 15$, $K1U = 3$, $K0f^4 = 1$, $T_{\text{инт}} = 2$ с

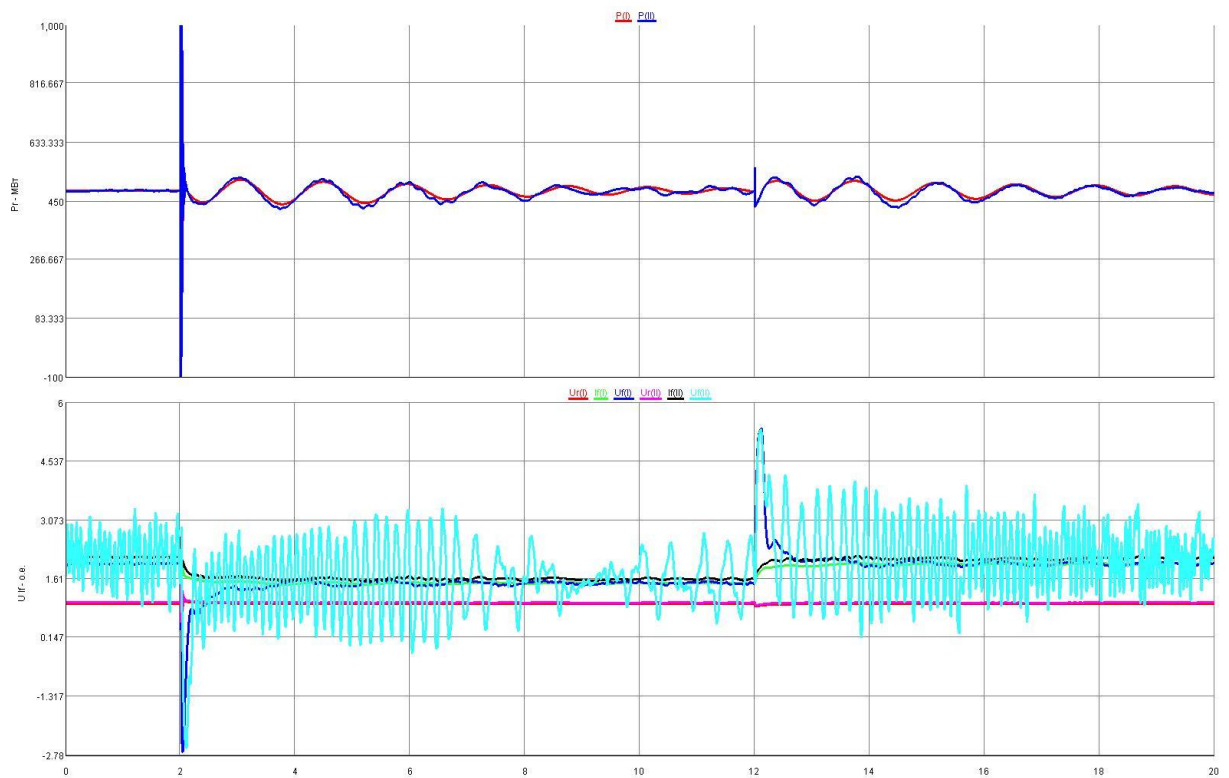


Рисунок 43 – ТИ2. $K0U = 15$, $K1U = 3$, $K0f = 1$, $T_{\text{инт}} = 2$ с

⁴ $K0f$ – коэффициент усиления канала по отклонению частоты

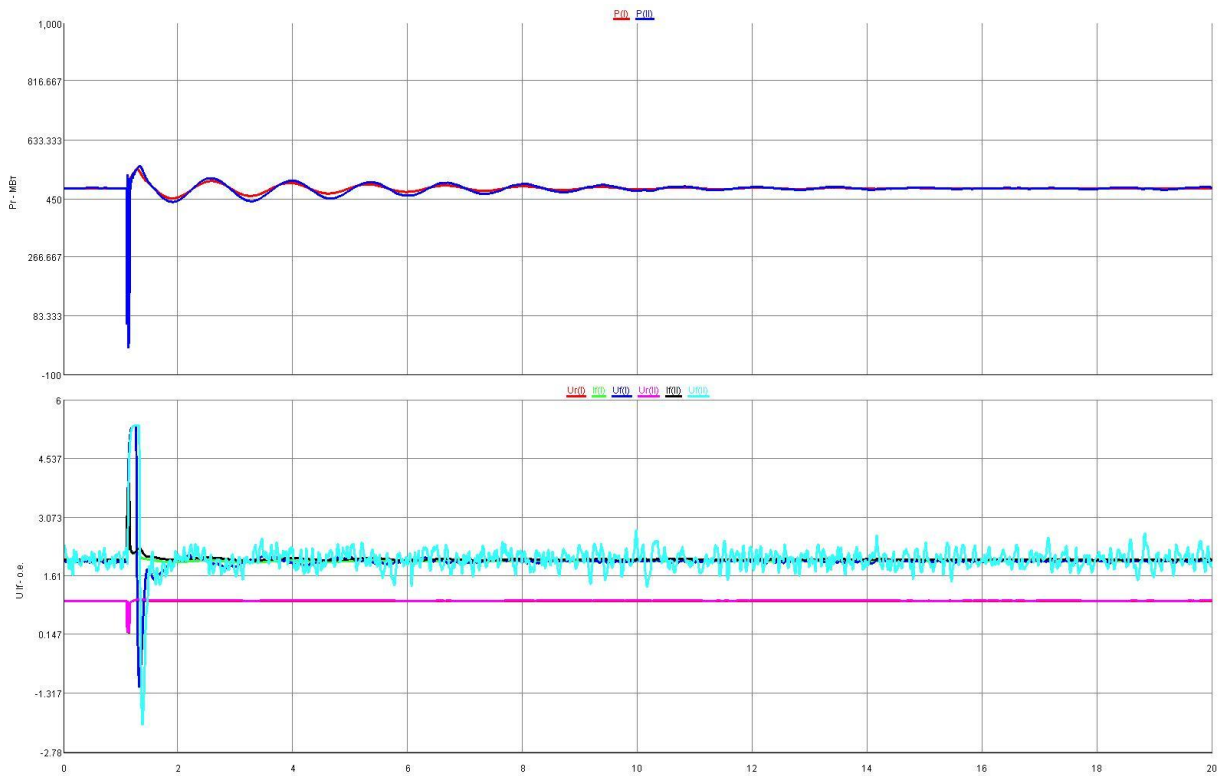


Рисунок 44 – ТИ1. $K0U = 15$, $K1U = 3$, $K0f = 4$, $T_{инт} = 2$ с

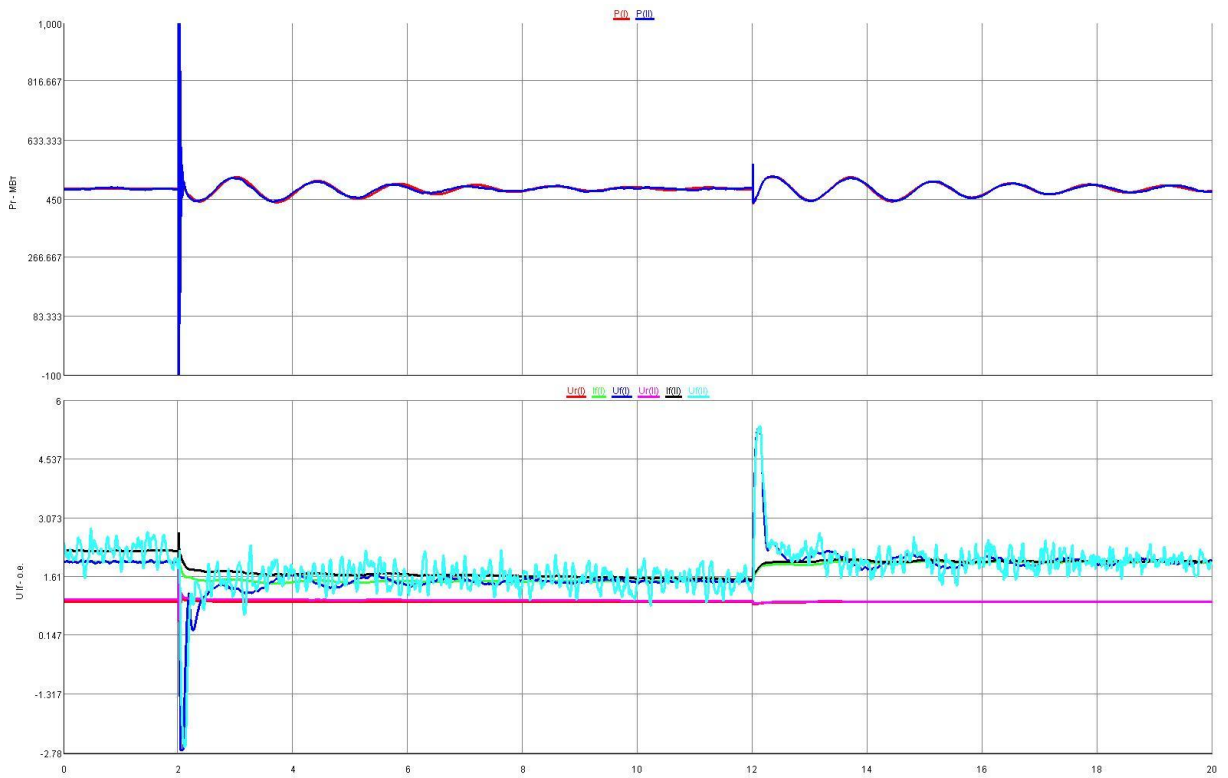


Рисунок 45 – ТИ2. $K0U = 15$, $K1U = 3$, $K0f = 4$, $T_{инт} = 2$ с

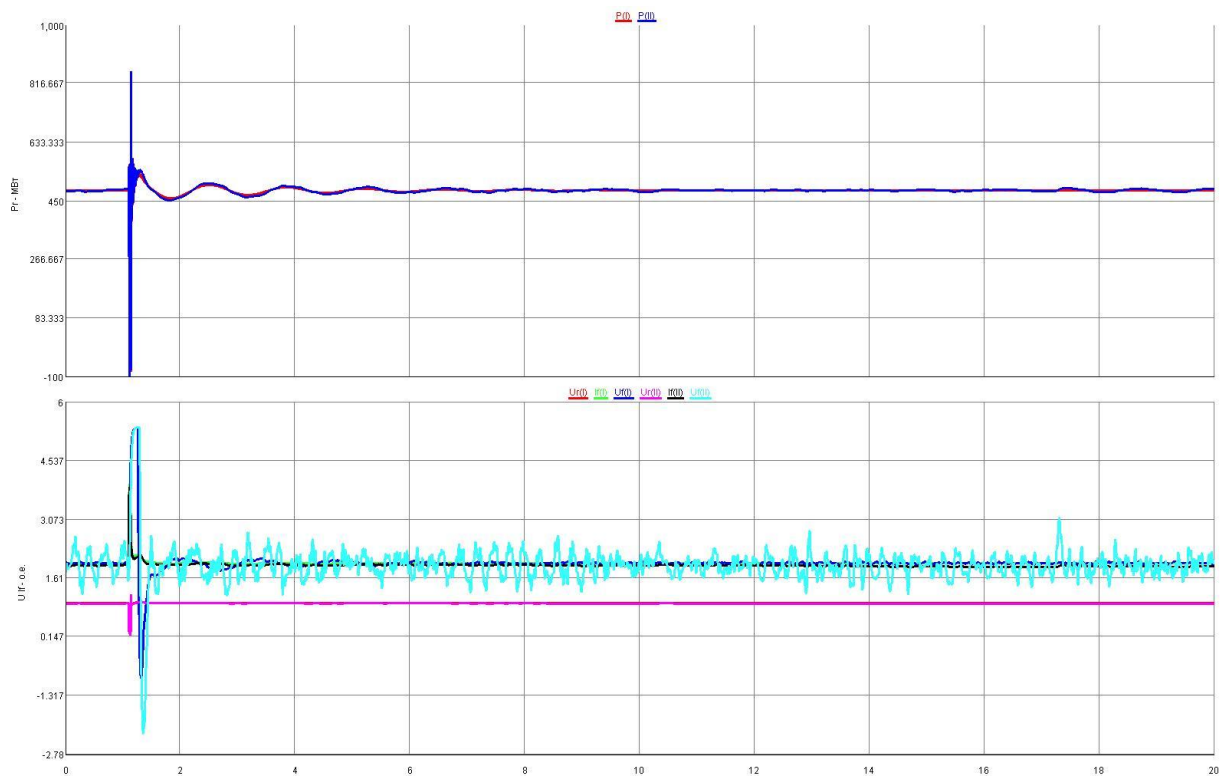


Рисунок 46 – ТИ1. $K0U = 15$, $K1U = 3$, $K0f = 4$, $K1f^5 = 1$, $T_{\text{инт}} = 2$ с

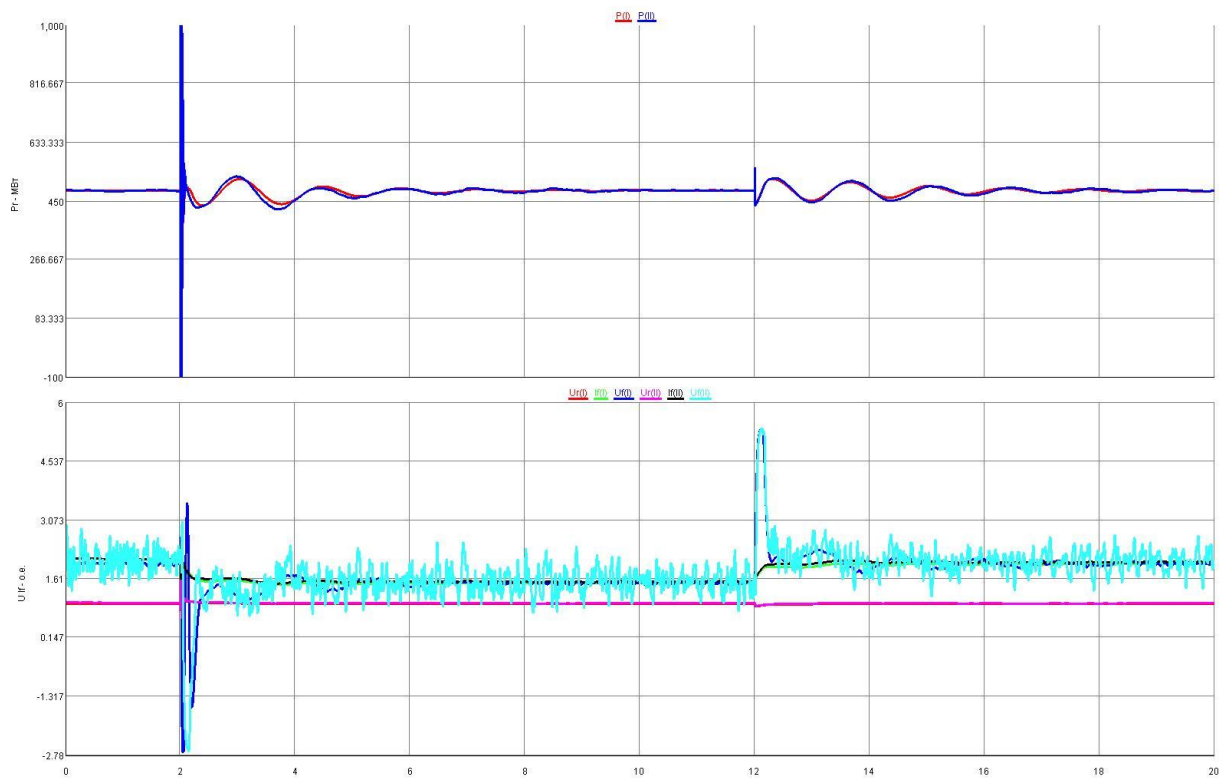


Рисунок 47 – ТИ2. $K0U = 15$, $K1U = 3$, $K0f = 4$, $K1f = 1$, $T_{\text{инт}} = 2$ с

⁵ $K1f$ – коэффициент усиления канала по производной частоты

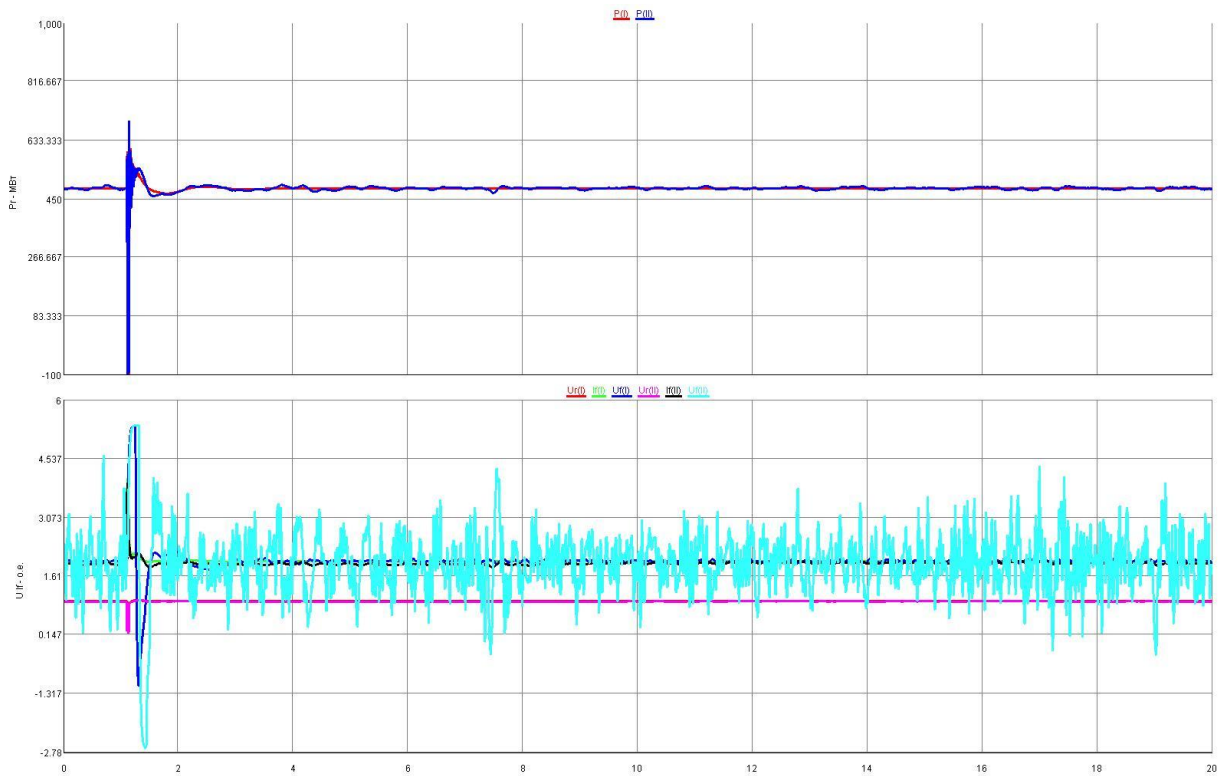


Рисунок 48 – ТИ1. $K0U = 15$, $K1U = 3$, $K0f = 4$, $K1f = 5$, $T_{\text{инт}} = 2$ с

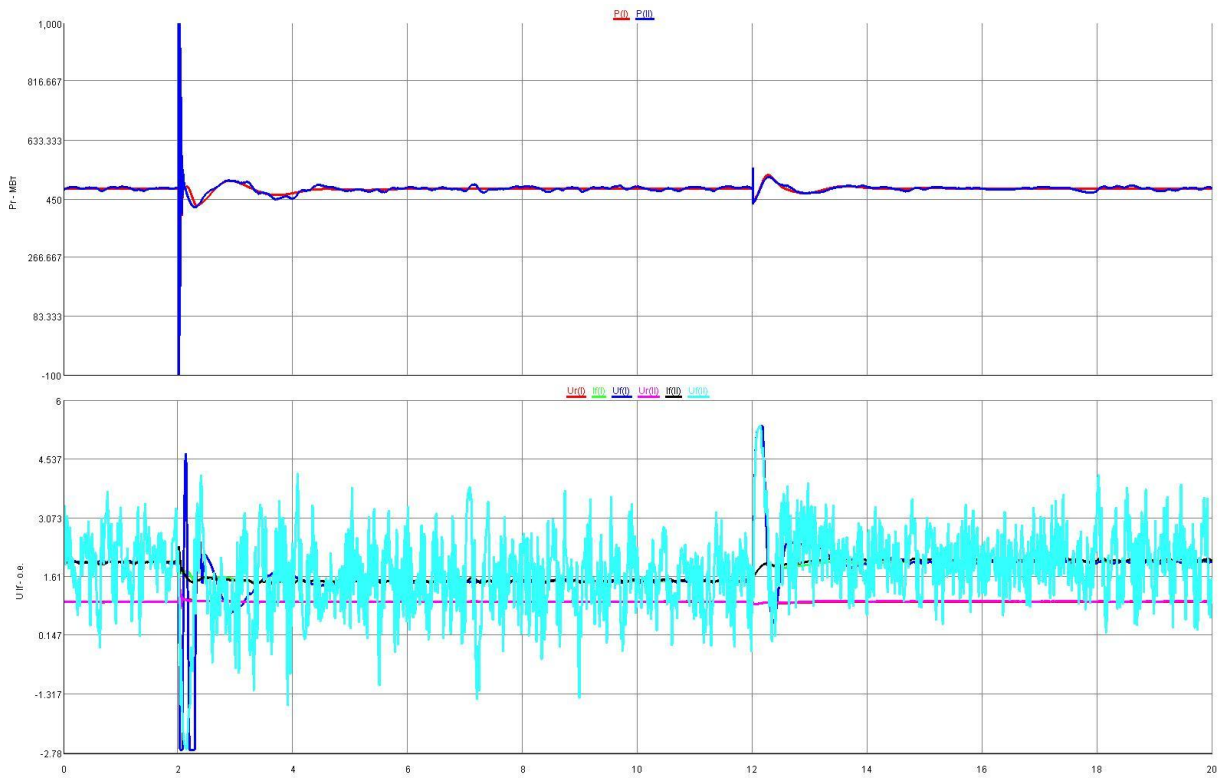


Рисунок 49 – ТИ2. $K0U = 15$, $K1U = 3$, $K0f = 4$, $K1f = 5$, $T_{\text{инт}} = 2$ с

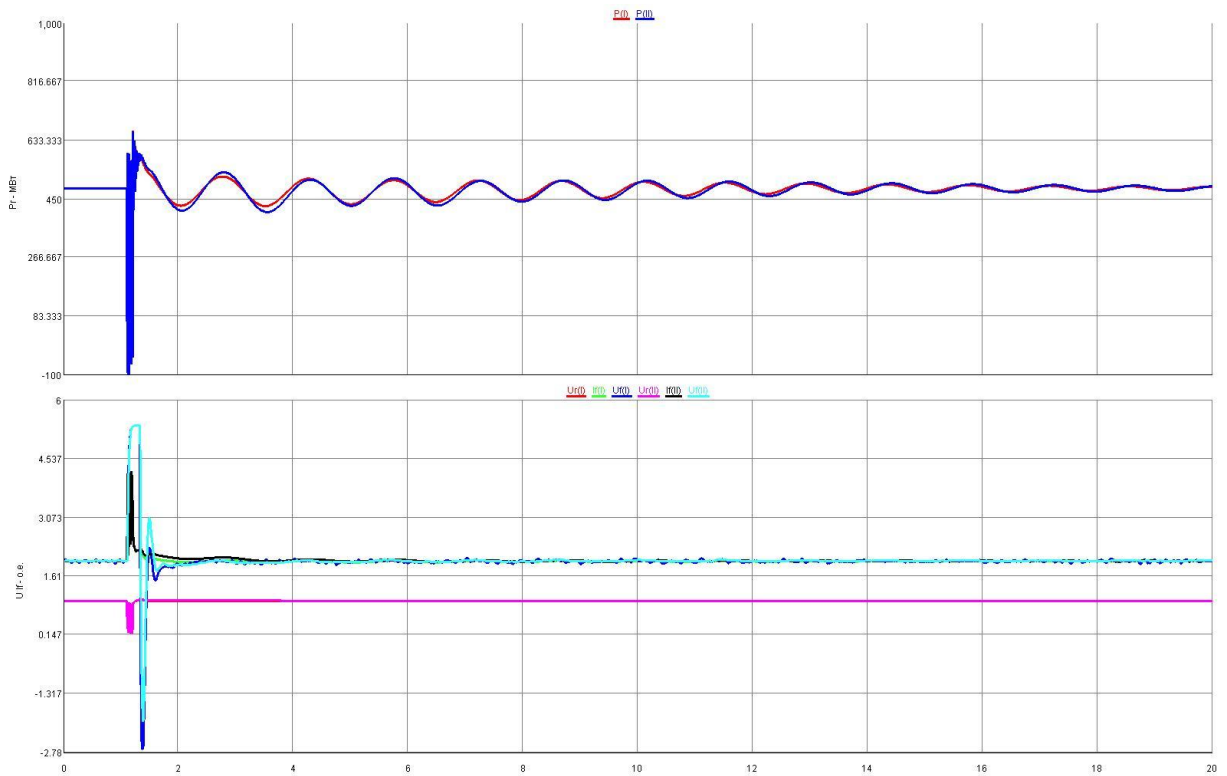


Рисунок 50 – ТИ1. $K0U = 15$, $K1U = 3$, $K1If^6 = 1$, $T_{инт} = 2$ с

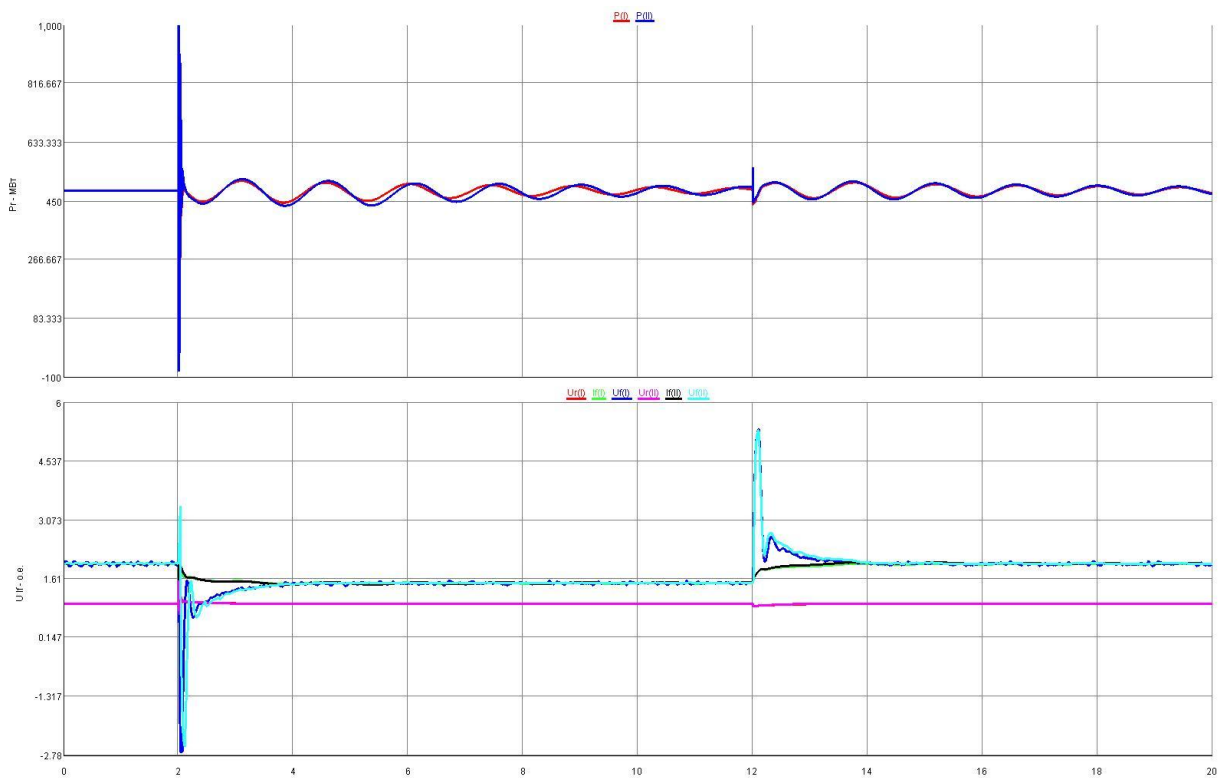


Рисунок 51 – ТИ2. $K0U = 15$, $K1U = 3$, $K1If = 1$, $T_{инт} = 2$ с

⁶ $K1If$ – коэффициент усиления канала по производной тока ротора

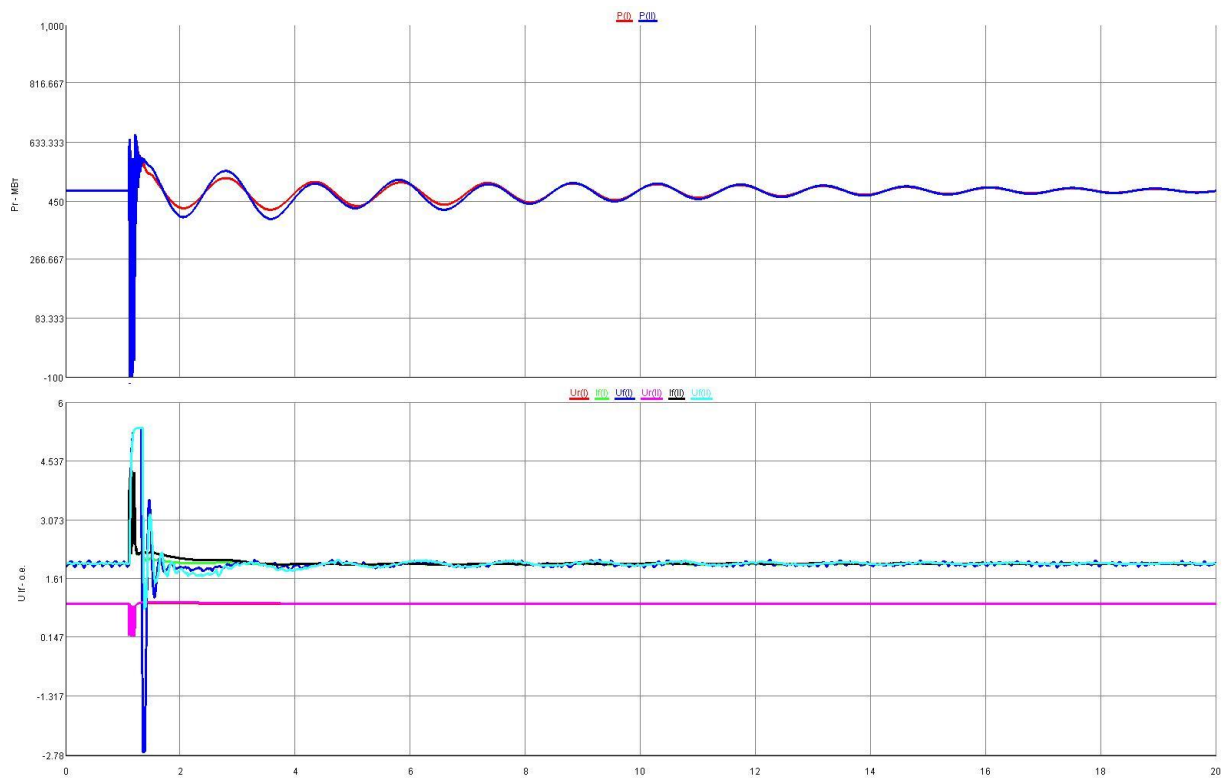


Рисунок 52 – ТИ1. $K0U = 15$, $K1U = 3$, $K1If = 1$, $T_{\text{инт}} = 2$ с

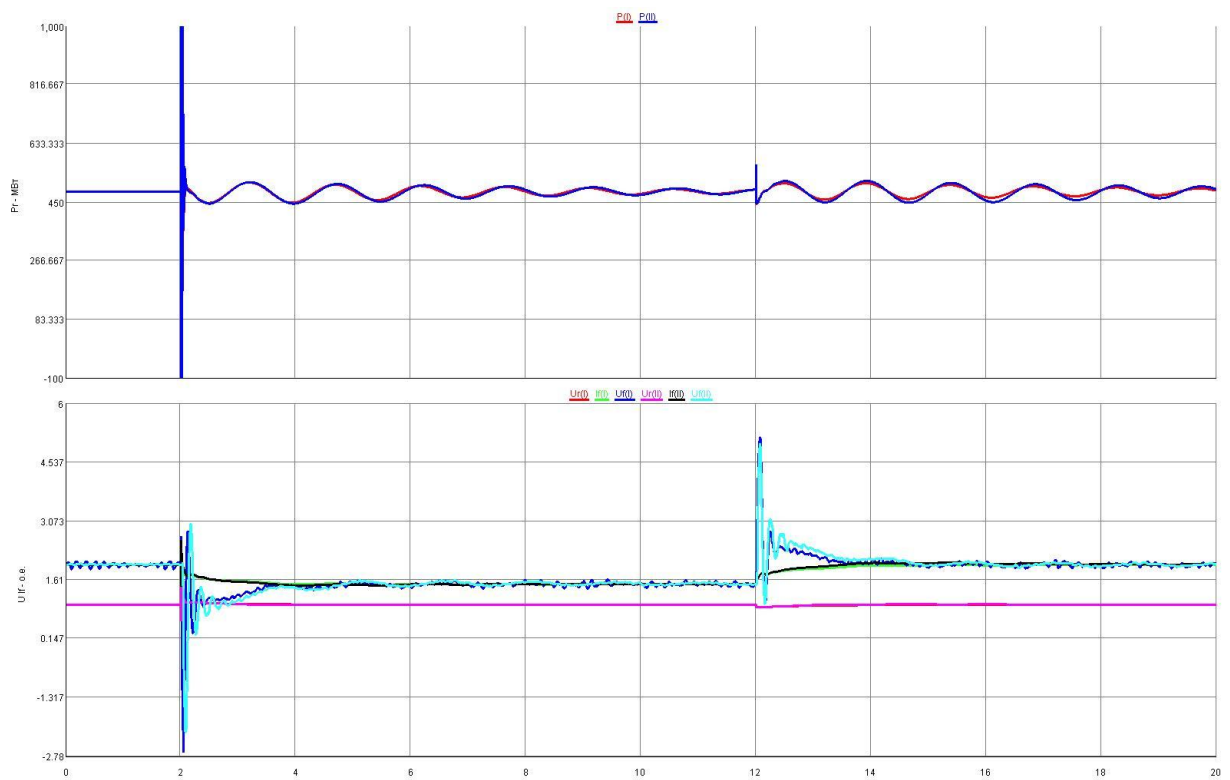


Рисунок 53 – ТИ2. $K0U = 15$, $K1U = 3$, $K1If = 1$, $T_{\text{инт}} = 2$ с

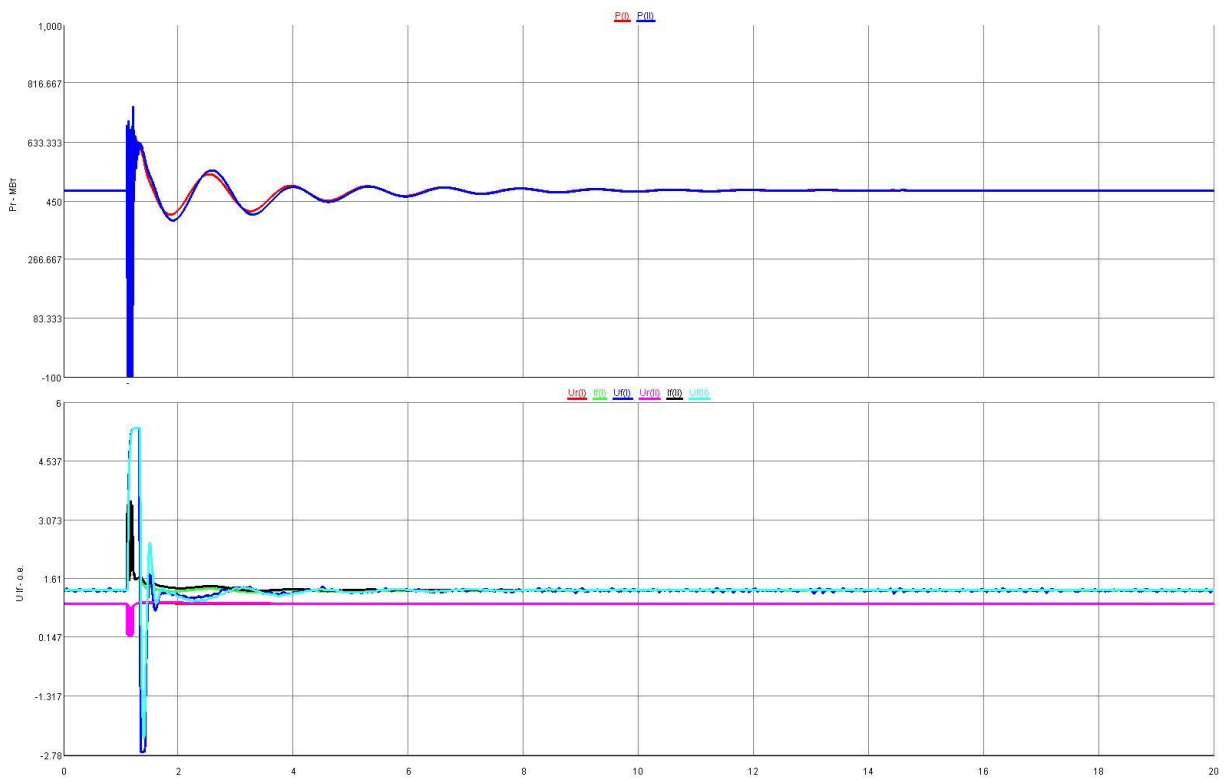


Рисунок 54 – ТИ1. $K0U = 15$, $K1U = 3$, $K1If = 1$, $T_{\text{инт}} = 2$ с

Реактивная мощность генераторов ≈ 0 Мвар

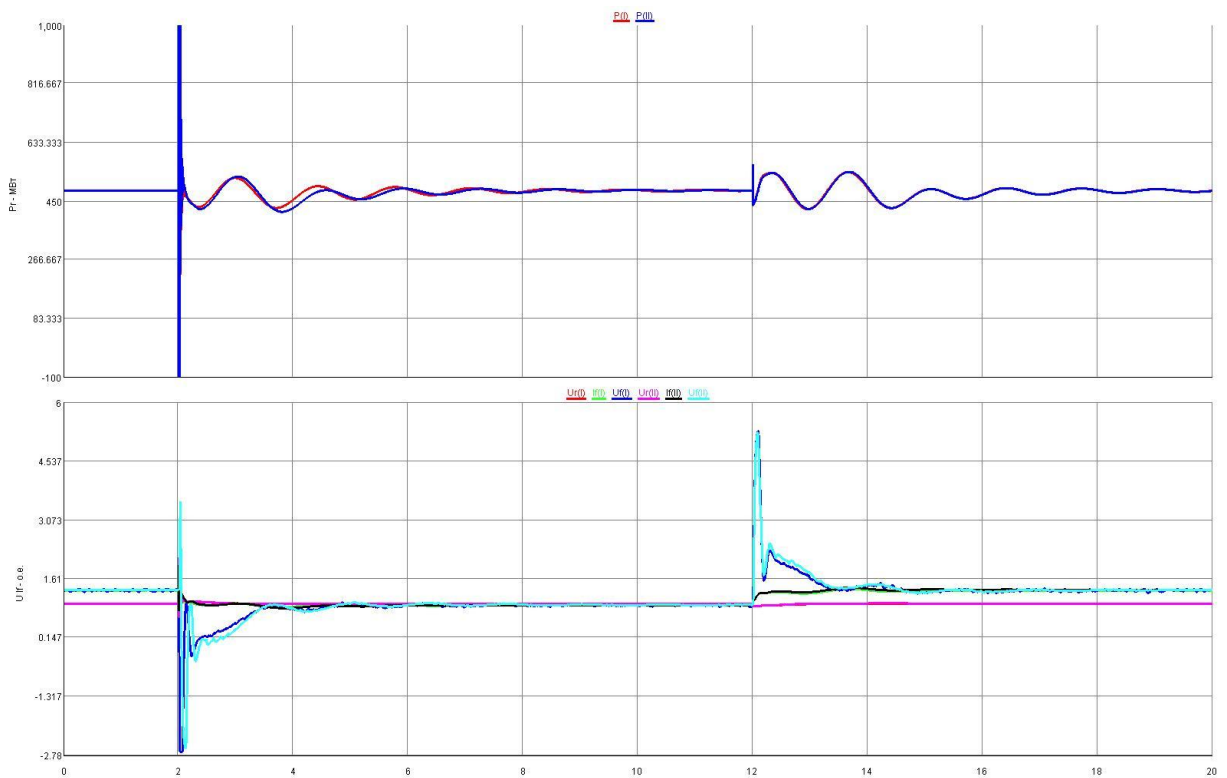


Рисунок 55 – ТИ2. $K0U = 15$, $K1U = 3$, $K1If = 1$, $T_{\text{инт}} = 2$ с

Реактивная мощность генераторов ≈ 0 Мвар

7. Рекомендации по оснащению модельных генераторов ЦАФК цифровыми устройствами для управления и регулирования возбуждением и мощностью

Как видно из обобщенной структуры ПТК, общей концепции построения ПТК, схем подключения ПТК (см. рисунки 1, 8, 10, 11, 12, 13), подключение ПТК требует с одной стороны подключение сигналов физического уровня к измерительному ПК, с другой – подключения к сети *Ethernet*.

В виду специфики работы на ЦАФК (физические модели энергосистем могут использовать любой из имеющихся генераторов), ограниченном количестве вычислительного оборудования (платы АЦП/ЦАП, ПК), необходимости наличия гальванической развязки платы АЦП/ЦАП, отсутствия необходимого запаса свободных клемм стеллажей и шкафов, сложностью прокладки дополнительных кабелей в соответствии с рисунком 11, выглядит целесообразным размещение измерительных ПК с платой АЦП/ЦАП и платами *LEM-I* и *LEM-U* в стеллаже генератора (или рядом). Вопрос отсутствия в стеллажах генератора возможности подключения к сети *Ethernet* может быть решен использованием беспроводных сетей *Wi-Fi*.

Предлагается подготовить стойку, включающую клеммы (для подключения необходимых токов и напряжений с первичных преобразователей – трансформаторов тока и напряжения, к платам *LEM-I* и *LEM-U* и выходные сигналы с ЦАП, подаваемые в системы управления возбуждением и мощностью); сами платы *LEM-I* и *LEM-U*; систему подключения питания (~220 В); источник бесперебойного питания; ПК (с платой АЦП/ЦАП и *USB Wi-Fi* адаптером). Наличие подобной стойки позволит оперативно осуществлять переключение измерительных органов от одного (неиспользуемого в данный момент) генератора к другому без трудоемкой работы по прокладыванию дополнительных кабелей на ЦАФК.

ПК в рамках данной стойки может быть настроен на автоматический запуск измерительного приложения при загрузке, и на автоматическое удаленное управление с целью проверки его работы и корректировки внутренних параметров операционной системы или измерительного приложения. Кроме того, на данном компьютере (при необходимости) может быть запущено исполнительное приложение.

Контроль и управление параметрами математических моделей, как уже отмечалось, будет выполняться при помощи приложения мониторинга. Приложение мониторинга целесообразно использовать на ПК в Зале Управления ЦАФК.

8. Общие требования к заданию на создание законов управления

Обобщенная математическая модель в рамках ПТК может содержать большое количество параметров, элементов и подсистем, которые в общем случае могут обеспечивать помимо реализации математической модели автоматических регуляторов возбуждения и скорости дифференциальные уравнения системы возбуждения, турбины, учитывать динамические характеристики объекта управления (СУВ и СУСПД генератора), обеспечивать введение/вывод различных элементов модели (см. рисунок 56).



Рисунок 56 – Обобщенная математическая модель

Учет всех возможных условий использования математической модели в виду специфики проводимых в рамках ЦАФК испытаний невозможен (кроме того, использование «больших» математических моделей не всегда требуется и не всегда является удобным).

Поэтому, целесообразно выполнение подготовки математических моделей в общем виде отдельными вводимыми/выводимыми подсистемами (к примеру, математические модели автоматического регулятора возбуждения, системного стабилизатора, различные ограничители), и их адаптация под конкретные испытания на ЦАФК (данная процедура должна включать выставление коэффициентов, проверку математической модели по

частотным характеристикам/откликам, апробацию с генератором на предмет правильности выставления масштабных коэффициентов в каналах измерительного тракта).

На этапе создания и подготовки физической модели при выдаче различных заданий на настройку модельных генераторов, трансформаторов, линий, целесообразно подготовить задание на создание необходимых математических моделей. Задание должно быть тщательно продумано и включать в себя следующее:

1. количество управляемых объектов и тип управления (к примеру, необходимо 3 генератора с математическими моделями, реализующими автоматический регулятор возбуждения);
2. необходимая структура закона управления в графическом виде или в виде дифференциальных уравнений, включающая все известные и необходимые к реализации блоки (уравнения);
3. все необходимые параметры данной структуры устройства управления (коэффициенты, постоянные времени и т.д.);
4. имеющиеся экспериментальные или расчетные данные о структуре закона управления (к примеру, частотные характеристики, статические характеристики, реакции системы на различные воздействия – функцию Хевисайда, функцию Дирака и т.п.), по которым готовый закон управления в рамках математической модели ПТК может быть верифицирован;
5. список необходимых алгоритмических подсистем математической модели (в случае, если необходимая алгоритмическая подсистема ранее не была реализована – алгоритм работы данной подсистемы и список требований к ней);
6. список параметров, которые необходимо изменять/наблюдать в процессе отладки модели и/или в процессе выполнения испытаний на ЦАФК вместе с ПТК;

7. список глобальных переменных управления структурами, необходимых к выводу на переднюю панель исполнительного приложения в виде кнопок (к примеру, кнопка 1 – возбуждение/гашение возбуждения генератора, кнопка 2 – изменение уставки, кнопка 9 – сбросить выходы ЦАП в 0 В);
8. наличие/отсутствие поперечных связей между элементами ПТК (на физическом, нижнем и верхних уровнях с учетом требований по быстродействию данных поперечных связей и возможностей по их реализации);
9. дополнительные возможности математической модели, которые необходимы в ходе отладки модели/проведения испытаний (к примеру, учет динамических характеристик объектов управления);
- 10.используемая система измерений: будут ли использоваться в качестве входных сигналов мгновенные значения токов и напряжений или же на каналы платы АЦП/ЦАП будут поданы сигналы, отвечающие действующим значениям с внешних датчиков ЦАФК;
- 11.примерные сроки, к которым должна быть подготовлена неопробованная математическая модель, и сроки, к которым математическая модель должна быть полностью готова и апробирована.

Данный состав задания обусловлен спецификой проводимых на ЦАФК испытаний и существующей реализацией принципов построения ПТК.