

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Институт компьютерных наук и технологий

Работа допущена к защите  
зав. кафедрой  
\_\_\_\_\_ В.М. Ицыксон  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**  
**РАЗРАБОТКА УПРАВЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА КАЛИБРАТОРА**  
**СУБ-НАНОСЕКУНДНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ**

по направлению 03.09.01 «Информатика и вычислительная техника»  
по образовательной программе  
03.09.01\_01 «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети»

Выполнил

студент гр. 3530101/80101 <подпись>

Д.В. Пешков

Руководитель

к.т.н.,

доцент,

<подпись>

А.А. Лавров

Консультант

ассистент

<подпись>

А.А. Антонов

Консультант

по нормоконтролю

<подпись>

А.Г. Новопашенный

Санкт-Петербург  
2022

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПЕТРА ВЕЛИКОГО**

**Институт компьютерных наук и технологий**

УТВЕРЖДАЮ

зав. кафедрой

\_\_\_\_\_ В.М. Ицыксон

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

студенту Пешкову Даниилу Валерьевичу гр. 3530101/80101

1. Тема работы: Разработка управляющего устройства калибратора суб-наносекундной синхронизации.
2. Срок сдачи студентом законченной работы<sup>1</sup>: дд.мм.202X.
3. Исходные данные по работе<sup>2</sup>: статистические данные с сайта [gosstat], а также из репозитория [uci]; основным источником литературы является монография [Book] и статья [Article].
4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов):
  - 4.1. Обзор литературы по теме ВКР.
  - 4.2. Исследование программных продуктов.
  - 4.3. Разработка метода/алгоритма/программы.
  - 4.4. Апробация разработанного метода/алгоритма/программы.
5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей):
  - 5.1. Схема работы метода/алгоритма.
  - 5.2. Архитектура разработанной программы/библиотеки.
6. Консультанты по работе<sup>3</sup>:
  - 6.1. Ассистент, А.А. Антонов.

<sup>1</sup> Определяется руководителем ОП, но не позднее последнего числа преддипломной практики и/или не позднее, чем за 20 дней до защиты в силу п. 6.1. «Порядка обеспечения самостоятельности выполнения письменных работ и проверки письменных работ на объем заимствований».

<sup>2</sup> Текст, который подчеркнут и/или выделен в отдельные элементы нумерационного списка, приведён в качестве примера.

<sup>3</sup> Подпись консультанта по нормоконтролю пока не требуется. Назначается всем по умолчанию.

6.2. Должность, степень, А.Г. Новопашенный (нормоконтроль).

7. Дата выдачи задания<sup>4</sup>: дд.мм.202Х.

Руководитель ВКР \_\_\_\_\_ А.А. Лавров

Консультант<sup>5</sup> \_\_\_\_\_ А.А. Антонов

Задание принял к исполнению дд.мм.202Х

Студент \_\_\_\_\_ Д.В. Пешков

---

<sup>4</sup>Не позднее 3 месяцев до защиты (утверждение тем ВКР по университету) или первого числа преддипломной практики или по решению руководителя ОП или подразделения (открытый вопрос).

<sup>5</sup>В случае, если есть консультант, отличный от консультанта по нормоконтролю.

## РЕФЕРАТ

На 12 с., 4 рисунка, 0 таблиц, 2 приложения

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: СТИЛЕВОЕ ОФОРМЛЕНИЕ САЙТА, УПРАВЛЕНИЕ КОНТЕНТОМ, PHP, MYSQL, АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ.<sup>6</sup>

Тема выпускной квалификационной работы: «Разработка управляющего устройства калибратора суб-наносекундной синхронизации»<sup>7</sup>.

В данной работе изложена сущность подхода к созданию динамического информационного портала на основе использования открытых технологий Apache, MySQL и PHP. Даны общие понятия и классификация IT-систем такого класса. Проведен анализ систем-прототипов. Изучена технология создания указанного класса информационных систем. Разработана конкретная программная реализация динамического информационного портала на примере портала выбранной тематики...<sup>8</sup>

В данной работе изложена сущность подхода к созданию динамического информационного портала на основе использования открытых технологий Apache, MySQL и PHP. Даны общие понятия и классификация IT-систем такого класса. Проведен анализ систем-прототипов. Изучена технология создания указанного класса информационных систем. Разработана конкретная программная реализация динамического информационного портала на примере портала выбранной тематики...

## ABSTRACT

12 pages, 4 figures, 0 tables, 2 appendices

KEYWORDS: STYLE REGISTRATION, CONTENT MANAGEMENT, PHP, MYSQL, SYSTEM ARCHITECTURE.

---

<sup>6</sup>Всего **слов**: от 3 до 15. Всего **слов и словосочетаний**: от 3 до 5. Оформляются в именительном падеже множественного числа (или в единственном числе, если нет другой формы), оформленных по правилам русского языка. *Внимание! Размещение сноски после точки является примером как запрещено оформлять сноски.*

<sup>7</sup>Реферат **должен содержать**: предмет, тему, цель ВКР; метод или методологию проведения ВКР; результаты ВКР: область применения результатов ВКР; выводы.

<sup>8</sup>ОТ 1000 ДО 1500 печатных знаков (ГОСТ Р 7.0.99-2018 СИБИД) на русский или английский текст. Текст реферата повторён дважды на русском и английском языке для демонстрации подхода к нумерации страниц.

The subject of the graduate qualification work is «Title of the thesis».

In the given work the essence of the approach to creation of a dynamic information portal on the basis of use of open technologies Apache, MySQL and PHP is stated. The general concepts and classification of IT-systems of such class are given. The analysis of systems-prototypes is lead. The technology of creation of the specified class of information systems is investigated. Concrete program realization of a dynamic information portal on an example of a portal of the chosen subjects is developed...

In the given work the essence of the approach to creation of a dynamic information portal on the basis of use of open technologies Apache, MySQL and PHP is stated. The general concepts and classification of IT-systems of such class are given. The analysis of systems-prototypes is lead. The technology of creation of the specified class of information systems is investigated. Concrete program realization of a dynamic information portal on an example of a portal of the chosen subjects is developed...

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	7
Глава 1. Анализ предметной области .....	9
1.1. White Rabbit .....	9
1.2. калибровка .....	9
1.2.1. Название первого подпараграфа первого параграфа первой главы для демонстрации переноса слов в содержании.....	11
1.3. Название параграфа .....	11
1.4. Выводы .....	12
Приложение 1. Краткие инструкции по настройке издательской системы L <sup>A</sup> T <sub>E</sub> X .....	13
Приложение 2. Некоторые дополнительные примеры .....	17

## ВВЕДЕНИЕ

Для надёжного функционирования распределённых систем потоковой обработки данных, работающих в режиме реального времени, на исполняемые в них операции накладываются строгие временные ограничения. Многочисленные узлы таких систем могут находиться друг от друга на значительных расстояниях, что приводит к длительным (и не всегда одинаковым) задержкам при передаче сигналов между ними. Возникающие задержки приводят к рассинхронизации работы устройств систем, что влечёт за собой возникновение потенциально некорректных результатов выполнения операций.

С целью согласования всех устройств и обеспечения общего представления времени во всей сети применяются системы синхронизации часов. Такие системы гарантируют, что часы всех устройств сети отсчитывают время с одинаковой скоростью (выдают одинаковые показания в каждый момент времени).

Для передачи информации при синхронизации могут использоваться различные протоколы. Наибольшее распространение получили следующие два: NTP и RTP (Precision Time Protocol). Протокол NTP способен обеспечивать точность синхронизации времени до одной миллисекунды, а протокол RTP – до десяти.

Протоколы NTP и RTP не подходят для случая, когда необходима синхронизация с субнаносекундной точностью. Например, такая высокая точность требуется в распределённых системах, применяемых в экспериментах по физике высоких энергий. Там они используются для потоковой обработки информации, поступающей с детекторов и ускорителей частиц.

Системы субнаносекундной синхронизации применяются в Большом Адронном Коллайдере, расположенном в ЦЕРН, в Швейцарии. Они также планируются к применению в строящемся комплексе «NICA» Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ) в Дубне. Другим приложением субнаносекундной синхронизации являются системы радиочастотного позиционирования, использующие технологию сверхширокополосной связи (UWB) и алгоритм позиционирования TDoA (Time Difference of Arrival).

**Цель работы:** разработка управляющего устройства для устройства, выполняющего калибровку систем суб-наносекундной синхронизации.

**Решаемые в данной работе задачи:** портирование и интеграция существующих открытых модулей в систему на кристалле, реализация модулей для проведения измерений по принципу стробоскопического осциллографа, написание

драйверов для используемой периферии, написания управляющей программы для процессорного ядра, реализация протокола для управления проведением измерений с персонального компьютера, тестирование и отладка, калибровка полученного устройства.



## ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

### 1.1. White Rabbit

White Rabbit – система синхронизации часов. Разработана при сотрудничестве множества институтов и компаний. Изначально проект был начат для улучшения текущей системы синхронизации в Церне. Предполагалось использование для физических экспериментов, однако в процессе было создано обобщенное решение, которое нашло своё применение в различных сферах.

Характеристики:

- Суб-наносекундная точность
- Большое количество синхронизируемых узлов
- Расстояния в десятки километров
- Канал передачи между двумя узлами — 1 Gbps
- Открытый исходный код

Достоинствами White Rabbit являются полностью открытый исходный код и аппаратура, а также использование существующих стандартов (Ethernet, PTP и т. д.).

### 1.2. калибровка

Синхронизация в сети White Rabbit выполняется по протоколу WR PTP — модифицированному протоколу PTP. (IEEE 1588). Однако для достижения суб-наносекундной точности необходима дополнительная калибровка.

Обмен данными между двумя устройствами происходит по одной линии оптоволокну, работающей в полнодуплексном режиме. Для передачи в одну и другую сторону используется свет с разной длиной волны, поэтому возникает асимметричность в задержках распространения сигнала. Из-за этого устройство не может само определить задержки, отправив эхо запрос другому устройству — время распространения сигнала в одну и другую сторону не равны.

Определение коэффициента асимметричности оптоволокну позволит протоколу White Rabbit PTP обеспечить требуемую точность синхронизации устройств сети.

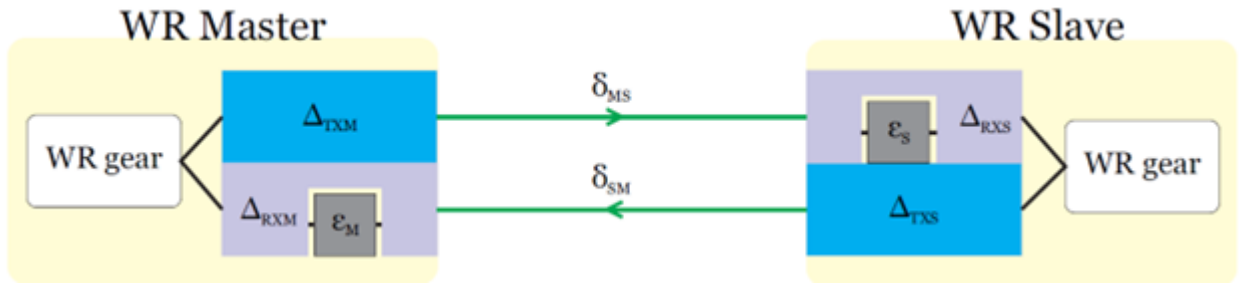


Рис.1.1. Модель соединения между двумя устройствами

На рис.1.1 изображены возникающие задержки, требующие калибровки. Внутри каждого устройства возникают задержки на приёме и отправке ( $\Delta_{TXM}, \Delta_{RXM}, \Delta_{TXS}, \Delta_{RXS}, \epsilon_M, \epsilon_S$ ), которые являются результатом задержек в SFP (Small Form-factor Pluggable) модуле, в электрических цепях и электронных компонентах. Эти задержки калибруются отдельно на каждом устройстве и не являются предметом рассмотрения в данной работе.

Суммарная задержка распространения сигнала от ведущего устройства к ведомому устройству и обратно считается по формуле:

$$delay_{MM} = \Delta_{TXM} + \Delta_{RXS} + \epsilon_S + \Delta_{TXS} + \Delta_{RXM} + \epsilon_M + \delta_{MS} + \delta_{SM} \quad (1.1)$$

В данной работе рассматривается калибровка задержек  $\delta_{MS}$  и  $\delta_{SM}$  – задержек распространения сигнала по оптоволокну.

Когда оптоволокну ещё не установлено, измерить задержки и вычислить коэффициент асимметричности можно без особых усилий. Коэффициент асимметричности определяется, как:

$$\alpha = \frac{\delta_{MS} - \delta_{SM}}{\delta_{SM}} \quad (1.2)$$

Измеряется коэффициент при помощи дополнительного короткого оптоволоконного кабеля, с известной задержкой.

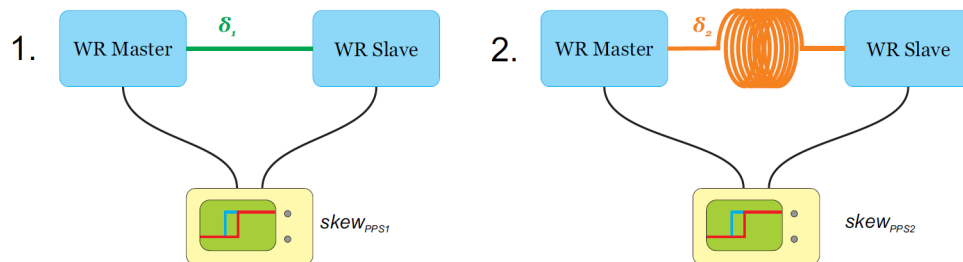


Рис.1.2. Измерение асимметричности про помощи дополнительного оптоволоконного кабеля

Два устройства подключаются калибруемым оптоволоконном ( $\delta_2$ ) и дополнительным ( $\delta_1$ ) отдельно, далее два устройства синхронизируются. После этого измеряется разность фаз синхросигналов 1-PPS (Pulse Per Second), генерируемых ведущим и ведомым устройством.

$$skew_{PPS} = t_{PPS_S} - t_{PPS_M} \quad (1.3)$$

По измеренным значениям можно определить коэффициент асимметричности, как:

$$\alpha = \frac{2 (skew_{PPS2} - skew_{PPS1})}{\frac{1}{2}\delta_2 - (skew_{PPS2} - skew_{PPS1})} \quad (1.4)$$

### ***1.2.1. Название первого подпараграфа первого параграфа первой главы для демонстрации переноса слов в содержании***

Содержание первого подпараграфа первого параграфа первой главы.

Одиночные формулы оформляют в окружении equation, например, как указано в следующей одиночной нумерованной формуле:

$$\pi \approx 3,141. \quad (1.5)$$



Рис.1.3. Вид на гидробашню СПбПУ [spbpu-gallery]

На рис.1.3 изображена гидробашня СПбПУ, а в табл.?? приведены данные, на примере которых коротко и наглядно будет изложена суть ВКР.

### 1.3. Название параграфа

Формулы могут быть размещены в несколько строк. Чтобы выставить номер формулы напротив средней строки, используйте окружение `multlined` из пакета `mathtools` следующим образом [Ganter1999]:

$$\begin{aligned} (A_1, B_1) &\leq (A_2, B_2) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow A_1 \subseteq A_2 \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow B_2 \subseteq B_1. \end{aligned} \tag{1.6}$$

Используя команду `\labelcref` из пакета `cleveref`, допустимо следующим образом оформлять ссылку на несколько формул: (1.4 и 1.5). На рис.1.4 приведены три картинki под общим номером и названием, но с отдельной нумерацией подрисунков посредством пакета `subcaption`.

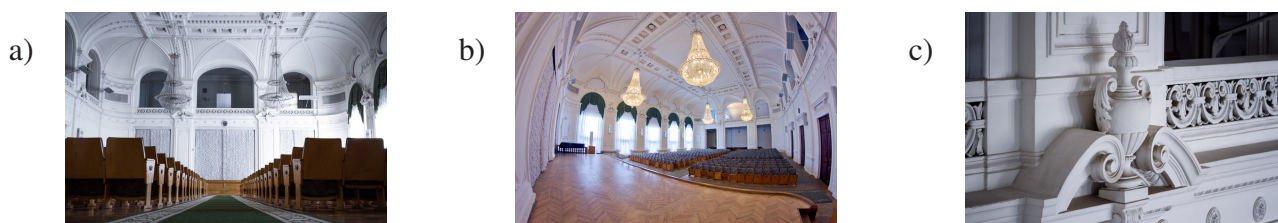


Рис.1.4. Фотографии Белого зала СПбПУ [spbpu-gallery], в том числе: *a* — со стороны зрителей; *b* — со стороны сцены; *c* — барельеф

Далее можно ссылаться на три отдельных рисунка: рис.1.4а, рис.1.4b и рис.1.4с.

Пример ссылок [Article; Book; Booklet; Conference; Inbook; Incollection; Manual; Mastersthesis; Misc; Phdthesis; Proceedings; Techreport; Unpublished; badiou:briefings], а также ссылок с указанием страниц, на котором отображены номера страниц [Naidenova2017] или в виде мультицитаты на несколько источников [Naidenova2017; Ganter1999]. Часть библиографических записей носит иллюстративный характер и не имеет отношения к реальной литературе.

### 1.4. Выводы

Текст выводов по главе 1.

Кроме названия параграфа «выводы» можно использовать (единообразно по всем главам) следующие подходы к именованию последних разделов с результатами по главам:

- «выводы по главе N», где N — номер соответствующей главы;
- «резюме»;
- «резюме по главе N», где N — номер соответствующей главы.

Параграф с изложением выводов по главе *является обязательным*.

## Приложение 1

### Краткие инструкции по настройке издательской системы L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

В SPbPU-BCI-template автоматически выставляются необходимые настройки и в исходном тексте шаблона приведены примеры оформления текстово-графических объектов, поэтому авторам достаточно заполнить имеющийся шаблон текстом главы (статьи), не вдаваясь в детали оформления, описанные далее. Возможный «быстрый старт» оформления главы (статьи) под Windows следующий<sup>П1.1</sup>:

- A. Установка полной версии MikTeX [latex-miktex]. В процессе установки лучше выставить параметр доустановки пакетов «на лету».
- B. Установка TexStudio [latex-texstudio].
- C. Запуск TexStudio и компиляция my\_chapter.tex с помощью команды «Build&View» (например, с помощью двойной зелёной стрелки в верхней панели). Иногда, для достижения нужного результата необходимо несколько раз скомпилировать документ.
- D. В случае, если не отобразилась библиография, можно
  - воспользоваться командой Tools → Commands → Biber, затем запустив Build&View;
  - настроить автоматическое включение библиографии в настройках Options → Configure TexStudio → Build → Build&View (оставить по умолчанию, если сборка происходит слишком долго): txs:///pdflatex | txs:///biber | txs:///pdflatex | txs:///pdflatex | txs:///view-pdf.

В случае возникновения ошибок, попробуйте скомпилировать документ до последних действий или внимательно ознакомьтесь с описанием проблемы в log-файле. Бывает полезным переход (по подсказке TexStudio) в нужную строку в pdf-файле или запрос с текстом ошибки в поисковиках. Наиболее вероятной проблемой при первой компиляции может быть отсутствие какого-либо установленного пакета L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X.

В случае корректной работы настройки «установка на лету» все дополнительные пакеты будут скачиваться и устанавливаться в автоматическом режиме. Если доустановка пакетов осуществляется медленно (несколько пакетов за один запуск

<sup>П1.1</sup> Вниманию! Пример оформления подстрочной ссылки (сноски).



компилятора), то можно попробовать установить их в ручном режиме следующим образом:

1. Запустите программу: меню → все программы → MikTeX → Maintenance (Admin) → MiKTeX Package Manager (Admin).
2. Пользуясь поиском, убедитесь, что нужный пакет присутствует, но не установлен (если пакет отсутствует воспользуйтесь сначала MiKTeX Update (Admin)).
3. Выделив строку с пакетом (возможно выбрать несколько или вообще все неустановленные пакеты), выполните установку Tools → Install или с помощью контекстного меню.
4. После завершения установки запустите программу MiKTeX Settings (Admin).
5. Обновите базу данных имен файлов Refresh FNDB.

Для проверки текста статьи на русском языке полезно также воспользоваться настройками Options → Configure TexStudio → Language Checking → Default Language. Если русский язык «ru\_RU» не будет доступен в меню выбора, то необходимо вначале выполнить Import Dictionary, скачав из интернета любой русскоязычный словарь.

Далее приведены формулы (П1.2), (П1.1), рис.П1.2, рис.П1.1, табл.П1.2, табл.П1.1.

$$\pi \approx 3,141. \quad (\text{П1.1})$$



Рис.П1.1. Вид на гидробашню СПбПУ [spbpu-gallery]

Представление данных для сквозного примера по ВКР [Peskov2004]

$G$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$K$
$g_1$	0	1	1	0	1
$g_2$	1	2	0	1	1
$g_3$	0	1	0	1	1
$g_4$	1	2	1	0	2
$g_5$	1	1	0	1	2
$g_6$	1	1	1	2	2

## П1.1. Параграф приложения

### П1.1.1. Название подпараграфа

Название подпараграфа оформляется с помощью команды `\subsection{...}`.  
Использование подпараграфов в основной части крайне не рекомендуется.

#### П1.1.1.1. Название подподпараграфа

$$\pi \approx 3,141. \quad (\text{П1.2})$$



Рис.П1.2. Вид на гидробашню СПбПУ [spbpu-gallery]



Представление данных для сквозного примера по ВКР [Peskov2004]

$G$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$K$
$g_1$	0	1	1	0	1
$g_2$	1	2	0	1	1
$g_3$	0	1	0	1	1
$g_4$	1	2	1	0	2
$g_5$	1	1	0	1	2
$g_6$	1	1	1	2	2

Приложение 2

Некоторые дополнительные примеры

В приложении<sup>П2.1</sup> приведены формулы (П2.2), (П2.1), рис.П2.2, рис.П2.1, табл.П2.2, табл.П2.1

$$\pi \approx 3,141.$$

(П2.1)



Рис.П2.1. Вид на гидробашню СПбПУ [spbpu-gallery]

Таблица П2.1

Представление данных для сквозного примера по ВКР [Peskov2004]

$G$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$K$
$g_1$	0	1	1	0	1
$g_2$	1	2	0	1	1
$g_3$	0	1	0	1	1
$g_4$	1	2	1	0	2
$g_5$	1	1	0	1	2
$g_6$	1	1	1	2	2

<sup>П2.1</sup>Внимание! Пример оформления подстрочной ссылки (сноски).

П2.1. Подраздел приложения

$$\pi \approx 3,141.$$

(П2.2)



Рис.П2.2. Вид на гидробашню СПбПУ [spbpu-gallery]

Таблица П2.2

Представление данных для сквозного примера по ВКР [Peskov2004]

<i>G</i>	<i>m</i> <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>4</sub>	<i>K</i>
<i>g</i> <sub>1</sub>	0	1	1	0	1
<i>g</i> <sub>2</sub>	1	2	0	1	1
<i>g</i> <sub>3</sub>	0	1	0	1	1
<i>g</i> <sub>4</sub>	1	2	1	0	2
<i>g</i> <sub>5</sub>	1	1	0	1	2
<i>g</i> <sub>6</sub>	1	1	1	2	2