

На правах рукописи



ЛАПТЕВ ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ СЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ МЕТОДОМ СОВПАДЕНИЯ**

Специальность:

05.11.16

Информационно-измерительные и управляющие системы
(в промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Пасынков Юрий Алексеевич.

Официальные оппоненты: **Бирюков Сергей Владимирович**
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет», профессор кафедры «Физика»;
Гребенников Андрей Владимирович
кандидат технических наук,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет», заведующий базовой кафедрой «Радиоэлектронная техника информационных систем».

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Сибирский государственный научно-исследовательский институт метрологии».

Защита состоится «31» марта 2015г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.173.05 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте <http://www.nstu.ru>.

Автореферат разослан «20» февраля 2015г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., доцент



Чехонадских Александр Васильевич

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Измерение частоты широко используется в радиотехнике, связи, навигации, телекоммуникации и т.д. Измерение частоты это одно из наиболее точных измерений на данный момент, т.к. существуют высокоточные стандарты частоты (нестабильность частоты $\sim 10^{-13}$). Частотные сигналы обладают хорошей помехозащищенностью и измерения выполняются с получением результата в дискретной форме. Это способствует широкому применению частотных сигналов и цифровых частотомеров.

При построении современных частотомеров наибольшее распространение получили методы измерения частоты прямого счета. Существует два режима работы таких частотомеров: в первом режиме за целое число периодов образцовой частоты подсчитывают число периодов измеряемой частоты; во втором режиме за целое число периодов измеряемой частоты подсчитывают число периодов образцовой частоты. Абсолютная максимальная методическая погрешность дискретизации по модулю в первом случае равна периоду измеряемой частоты, во втором случае периоду образцовой частоты. Для уменьшения данной погрешности разработано множество приемов и методов. Например, синхронизация начала образцового интервала времени с началом первого периода измеряемой частоты; нониусный метод; метод задержанных совпадений, и другие. К недостаткам подобных приемов и методов можно отнести увеличение времени измерения, усложнение аналоговой части схемы устройства и др.

Одним из методов уменьшения погрешности дискретизации является метод совпадения. Суть метода состоит в том, что формируют импульсы измеряемой и образцовой частоты с заданной длительностью, подсчитывают периоды измеряемой и образцовой частоты за интервал времени между моментами совпадения импульсов измеряемой и образцовой частот. При этом абсолютная максимальная методическая погрешность дискретизации по модулю равна длительности формируемых импульсов.

Степень разработанности проблемы. Разработка устройств на основе метода совпадения выполнялась как зарубежными специалистами (П.И. Ричардс, К.С. Миллер, Х.Д. Фрейдман и др.), так и отечественными (А.А. Осьминин, В.Е. Тырса, В.В. Дюшняев, А.Д. Зеня, О.Ю. Сергиенко и др.). Показано, что при сличении частот с уровнем относительной методической погрешности дискретизации 10^{-9} методом совпадения время измерения на два порядка меньше по сравнению с методами прямого счета. Однако, до настоящего времени измере-

ние частоты методом совпадения не получило широкого распространения в практике измерения частот, так как было выполнено исследование его работы только в качестве метода поверки генераторов образцовых частот.

Целью диссертационной работы является расширение диапазона измеряемых частот методом совпадения при заданном уровне относительной максимальной методической погрешности дискретизации (далее – методической погрешности). Для достижения цели в работе необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ существующих методов измерения частоты и методов уменьшения методической погрешности.
2. Разработать модель статистических испытаний и вероятностную модель измерения частоты методом совпадения, на основе которых выполнить моделирование измерения частоты в широком диапазоне частот.
3. Провести анализ влияния заданного уровня методической погрешности, скважности импульсов, отношения значений измеряемой и образцовой частот на время измерения частоты методом совпадения.
4. Выполнить сравнительный анализ времени измерения методом совпадения и методами прямого счета на основе результатов полученных при моделировании.
5. Разработать лабораторный образец, реализующий метод совпадения. Выполнить экспериментальные исследования измерения частоты методом совпадения.

Методы исследования. В работе использованы положения теории измерений, теории информационно-измерительных систем, теории вероятностей и математической статистики, методы вычислительной математики. Имитационное моделирование, расчеты и обработка результатов выполнены с помощью ПО Matlab 6.5. Натурный эксперимент проводился путем создания макетного образца.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректной постановкой задач, адекватностью применения математического аппарата, а также результатами имитационного моделирования и натурального эксперимента.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Обоснование работы метода совпадения в широком диапазоне частот.
2. Модель статистических испытаний и вероятностная модель измерения частоты методом совпадения, а также результаты, полученные по данным моделям.

3. Зависимость времени измерения частоты методом совпадения от заданного уровня методической погрешности, отношения значений измеряемой и образцовой частот, скважности импульсов.

4. Зависимость оптимальных значений скважности от заданного уровня методической погрешности и отношения значений измеряемой и образцовой частот.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Показана возможность измерения частоты методом совпадения в широком диапазоне частот.

2. Определены границы диапазона измеряемых частот, в котором при заданном уровне методической погрешности измерение частоты методом совпадения выполняется быстрее, чем методами прямого счета.

3. Получена аналитическая зависимость времени измерения частоты методом совпадения от отношения значений измеряемой и образцовой частот, заданного уровня методической погрешности и скважности импульсов.

4. Установлено, что существуют оптимальные значения скважности импульсов, при которых достигается наименьшее время измерения частоты методом совпадения. Получена аналитическая зависимость оптимальных значений скважности.

Практическая ценность. В ходе выполнения работы разработаны рекомендации по проектированию частотомеров, основанных на методе совпадения. Результаты работы используются в учебном процессе кафедры ЗИ НГТУ и при создании поверочного технологического стенда электросчетчиков, используемого на предприятии ЗАО «Радио и микроэлектроника» (г. Новосибирск), имеются акты внедрения.

Работа выполнена в соответствии с пп. 6 специальности 05.11.16 Паспорта специальностей ВАК Российской Федерации.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 9 международных и всероссийских научно-технических конференциях: всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2009, 2011, 2012); международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (Новосибирск, 2010, 2014); международной научно-практической конференции «Измерения в современном мире» (Санкт-Петербург, 2011, 2013); международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, ин-

форматизация» (Барнаул, 2012); Летняя школа по информационно-коммуникационным технологиям «IBSWorkshop» (Германия, Хемниц, 2013).

Научные публикации. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в числе которых – 3 в изданиях рекомендованных ВАК, 2 патента РФ, 10 – в сборниках трудов международных и всероссийских конференций.

Личный вклад автора. Автор лично разработал модель статистических испытаний и вероятностную модель, выполнил моделирование и анализ результатов, принял участие в разработке и изготовлении лабораторного образца, реализующего метод совпадения, а также в его экспериментальной апробации.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Основное содержание работы составляет 134 страницы, включая 42 рисунка, 7 таблиц. Список литературы содержит 106 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель и основные задачи исследования. Приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор аналоговых методов и приборов измерения частоты. Среди аналоговых частотомеров наибольшее распространение получили частотомеры, основанные на следующих методах: резонансные методы (механический или электрический резонанс), метод заряда и разряда конденсатора, осциллографические методы (с помощью фигур Лиссажу, калиброванной развертки, круговой развертки), измерение частоты с помощью мостов переменного тока.

Рассмотрены цифровые методы измерения частоты – прямого (последовательного) счета измерения частоты за целое число периодов образцовой или измеряемой частоты. Показаны максимальные методические погрешности дискретизации (далее – методические погрешности) при применении этих методов.

Проанализированы методы снижения методической погрешности, используемые при измерении частот цифровыми методами. Выявлен ряд наиболее распространенных методов. Метод синхронизации начала образцового интервала времени с началом первого периода измеряемой частоты позволяет уменьшить в два раза методическую погрешность.

Метод растяжения (однократная растяжка) интервала времени (остатка), который определяется разницей в положение импульсов образцовой частоты с измерительным интервалом времени. Растяжение данного интервала времени осуществляется за счет преобразования время-напряжение-время.

Метод поразрядной оценки (многократной растяжки), осуществляется следующим образом, при использовании n -разрядной системы исчисления, подсчитывают число периодов образцовой частоты в течение n периодов измеряемой частоты. При этом остаток растягивают в n раз, затем растянутый остаток заполняют периодами образцовой частоты, получают второй остаток, который растягивают в n раз и так далее до тех пор, пока не будет достигнута требуемая точность.

Нониусный метод измерения интервалов времени основан на совмещении импульсов образцовой частоты и импульсов нониусной частоты, начало которых сдвинуты друг относительно друга на длительность измеряемого интервала, а период образцовой частоты отличаются от периода нониусной частоты на требуемое значение ступени квантования.

Метод задержанных совпадений заключается в следующем – длительность импульсов образцовой частоты задают равной $1/n$ длительности периода образцовой частоты. Подают импульсы образцовой частоты на n параллельно включенных элементов «И» и $n-1$ последовательно включенных линий задержки, выходы которых подключены к элементам «И», таким образом, период образцовой частоты разбивают на n равных интервалов. Корректируют результат измерения в соответствии с номерами элементов «И», которые сработали в момент начала и конца измерения. Методическая погрешность уменьшена в n раз.

Метод совпадения, суть которого состоит в том, что формируют импульсы измеряемой и образцовой частоты с заданной длительностью, подсчитывают периоды измеряемой и образцовой частоты за интервал времени между моментами совпадения импульсов измеряемой и образцовой частот. Показано, что абсолютная методическая погрешность снижена до суммарной длительности импульсов измеряемой и образцовой частот.

Существующие подходы к измерению частоты методом совпадения имеют следующие недостатки: выполнено исследование его работы только для измерения близких либо кратных частот к образцовой частоте; не рассмотрена возможность измерения частоты методом совпадения в широком диапазоне частот; не выявлены зависимости времени измерения от заданного уровня мето-

дической погрешности, отношения измеряемой и образцовой частот, и длительности формируемых импульсов; не выполнено сравнение времени измерения частоты методом совпадения и методами прямого счета.

Во второй главе рассмотрена модель статистических испытаний, с помощью которой выполнено моделирование измерения частоты методом совпадения.

На рисунке 1 приведены временные диаграммы, характеризующие модель измерения частоты методом совпадения. На оси времени 1 располагаются импульсы с минимальной длительностью, которые формируются с периодом измеряемой частоты. На оси времени 2 располагаются импульсы с заданной длительностью, которые формируются с периодом образцовой частоты.

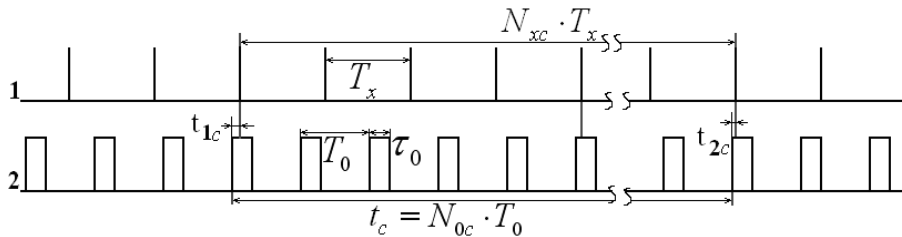


Рисунок 1 – Временная диаграмма измерения частоты методом совпадения

Приняты следующие обозначения: T_0 – длительность периодов образцовой частоты; $F_0 = 1/T_0$ – образцовая частота; T_x – длительность периодов измеряемой частоты; $F_x = 1/T_x$ – измеряемая частота; t_0 – длительность импульсов образцовой частоты; h – скважность образцовых импульсов ($h = t_0/T_0$); N_{0c} – число подсчитанных периодов образцовой частоты за время измерения частоты методом совпадения; N_{xc} – число подсчитанных периодов измеряемой частоты за время измерения частоты методом совпадения; t_c – время измерения при измерении частоты методом совпадения; t_{1c} и t_{2c} – абсолютные погрешности дискретизации.

Максимальное абсолютное значение погрешности дискретизации по модулю не превышает длительности образцовых импульсов

$$\max|(t_{1c} - t_{2c})| \leq t_0.$$

Уравнение преобразования метода совпадения имеет вид

$$F_{xc} = \frac{N_{xc}}{N_{0c}} \times \left(1 \pm \frac{h}{N_{0c}}\right). \quad (1)$$

Из выражения (1) следует, что модуль относительной максимальной методической погрешности дискретизации (ММП) при измерении частоты методом совпадения можно определить по формуле

$$g_c = h / N_{0c} . \quad (2)$$

Время измерения частоты с использованием метода совпадения определяется исходя из заданного уровня ММП и задается выражением

$$t_c = h \times T_0 / g_c . \quad (3)$$

При статистическом моделировании рассматривались частоты, нормированные путем деления на образцовую частоту F_0 . Это позволяет переносить результаты моделирования нормированных частот на реальную частоту, путем умножения нормированных частот на значение F_0 .

Осуществлено несколько выборок, объем которых составил 1400, 14000, 140000 случайных чисел, с равномерным распределением по интервалам группировки, которые сформированы по логарифмической шкале (10^{-7} – 10^{-6} , ..., 10^0 – 10^1 , ..., 10^6 – 10^7).

Вычисления проходили при двух различных подходах, а именно, первый – измерение начинается с нулевой начальной фазой между импульсами измеряемой и образцовой частот, а второй – измерение начинается со случайной фазой между импульсами измеряемой и образцовой частот. Во втором случае выполнялось 30 измерений со случайными фазами, затем было выполнено усреднение полученных результатов. Под начальной фазой в данном случае понимается интервал времени от переднего фронта первого импульса образцовой частоты до переднего фронта первого импульса измеряемой частоты.

Измерение частоты моделируется следующим образом. Задается пара конструктивных параметров (скважность, ММП) и значение измеряемой нормированной частоты. Подсчитывают число периодов измеряемой и образцовой частоты от момента первого совпадения до каждого последующего момента совпадения импульсов измеряемой и образцовой частот. В моменты совпадения вычисляется ММП, если вычисленное значение меньше заданного уровня ММП, то измерение заканчивается и вычисляется значение измеряемой частоты и время измерения частоты. Далее таким образом, производятся измерения на всей выборке частот. Затем один из конструктивных параметров изменяется, производится следующая серия измерений частот методом совпадения на всей выборке частот. Таким образом, выполняется перебор всех заданных конструктивных параметров:

- скважность (h) импульсов образцовой частоты: 0,75; 0,5; 0,25; 0,1; 0,075; 0,05; 0,025; 0,01; 0,0075; 0,005; 0,0025; 0,001; 0,00075; 0,0005; 0,00025; 0,0001; 0,000075; 0,00005; 0,000025; 0,00001.

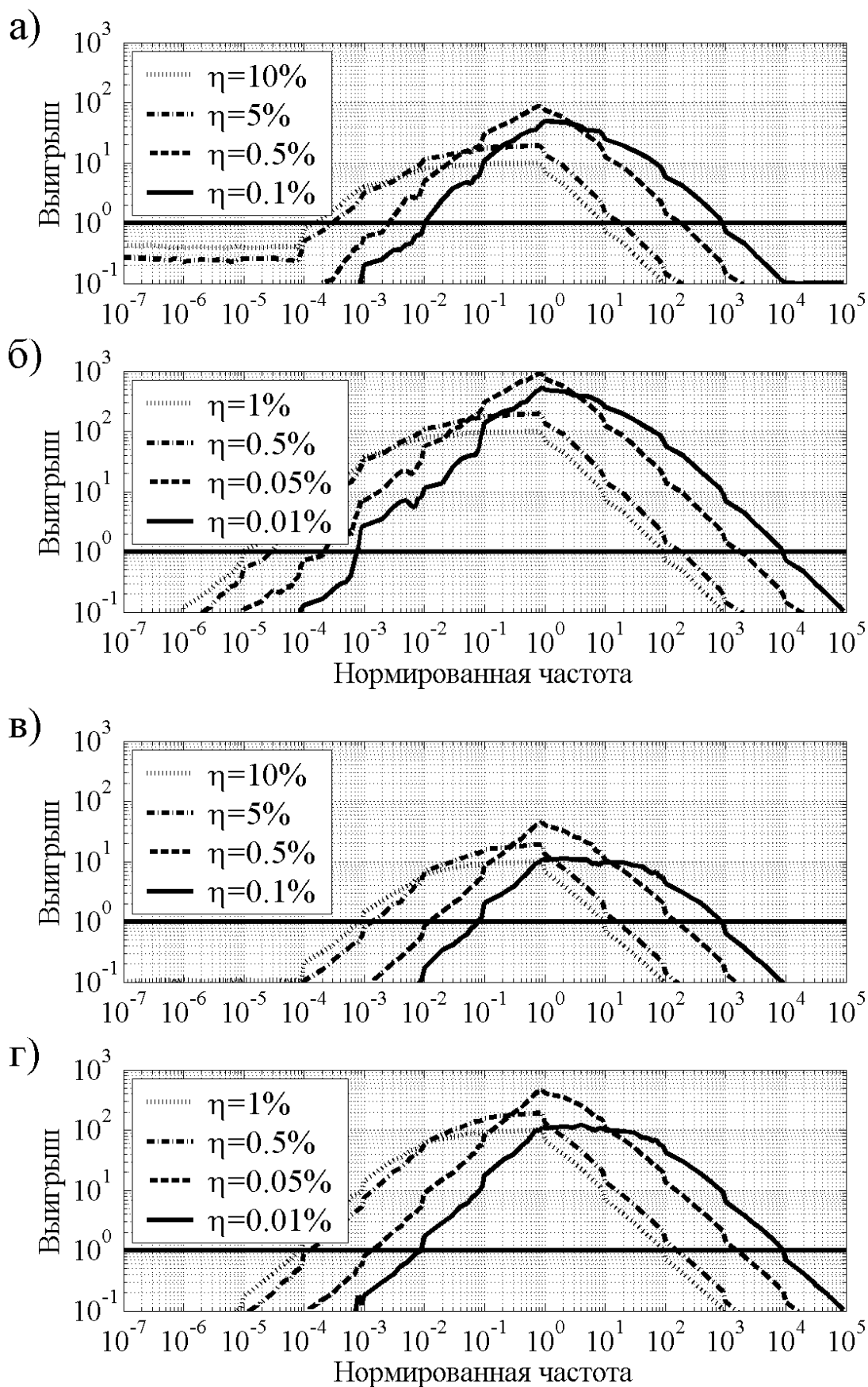


Рисунок 2 – Графики, характеризующие выигрыш по быстродействию метода совпадения по сравнению с методами прямого счета, построенные на основе статистического моделирования

- ММП (g) измерения частоты: 0,1%; 0,05%; 0,01%; 0,005%; 0,001%; 0,0005%; 0,0001%; 0,00005%; 0,00001%; 0,00001%; 0,00001%; 0,000005%; 0,000001%.

Для сравнения времени измерения методом совпадения и методами прямого счета используется понятие выигрыш по быстродействию, который определяется как отношение времени измерения частоты методом совпадения к времени измерения частоты методами прямого счета при одинаковой методической погрешности. При измерении частот меньших, чем образцовая частота для сравнения используется метод прямого счета, при котором подсчитывается количество периодов образцовой частоты за целое число периодов измеряемой частоты. При измерении частот больших, чем образцовая частота для сравнения используется метод прямого счета, при котором подсчитывается количество периодов измеряемой частоты за целое число периодов образцовой частоты.

Для примера, на рисунке 2 приведены результаты статистического моделирования. Рисунок 2.а и 2.б – для измерений с нулевой начальной фазой, ММП 0,01% и 0,0001% соответственно. Рисунок 2.в и 2.г – для измерений со случайной начальной фазой, ММП 0,01% и 0,0001% соответственно.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы.

По мере уменьшения заданного уровня методической погрешности увеличивается время измерения и диапазон частот, в котором наблюдается выигрыш по быстродействию.

Выигрыш по быстродействию: растет с уменьшением заданного уровня методической погрешности; имеет максимум при близких значениях измеряемой и образцовой частот; зависит от скважности импульсов.

Выявлены оптимальные значения скважности, при которых достигается наибольший выигрыш. Оптимальные значения скважности импульсов уменьшаются с уменьшением заданного уровня методической погрешности и увеличением отношения измеряемой и образцовой частот.

Предложено для увеличения быстродействия изменять значения скважности в зависимости от заданного уровня методической погрешности и отношения значений измеряемой и образцовой частот.

С ростом скважности импульсов диапазон частот, в котором наблюдается выигрыш по быстродействию, смещается в область более низких частот.

При измерении частоты со случайной фазой значения выигрыша по быстродействию, диапазон частот, в котором наблюдается выигрыш по быстродей-

ствию, меньше чем при измерении частоты с нулевой фазой. А оптимальные значения скважности больше, чем при измерении частоты с нулевой фазой.

Например, при частоте образцового генератора 1МГц, измерении частоты со случайной начальной фазой, заданном уровне методической погрешности 0,0001% на рисунке 2.г видно, что, выигрыш по быстродействию более двух раз наблюдается в диапазон частот от 200Гц до 4ГГц.

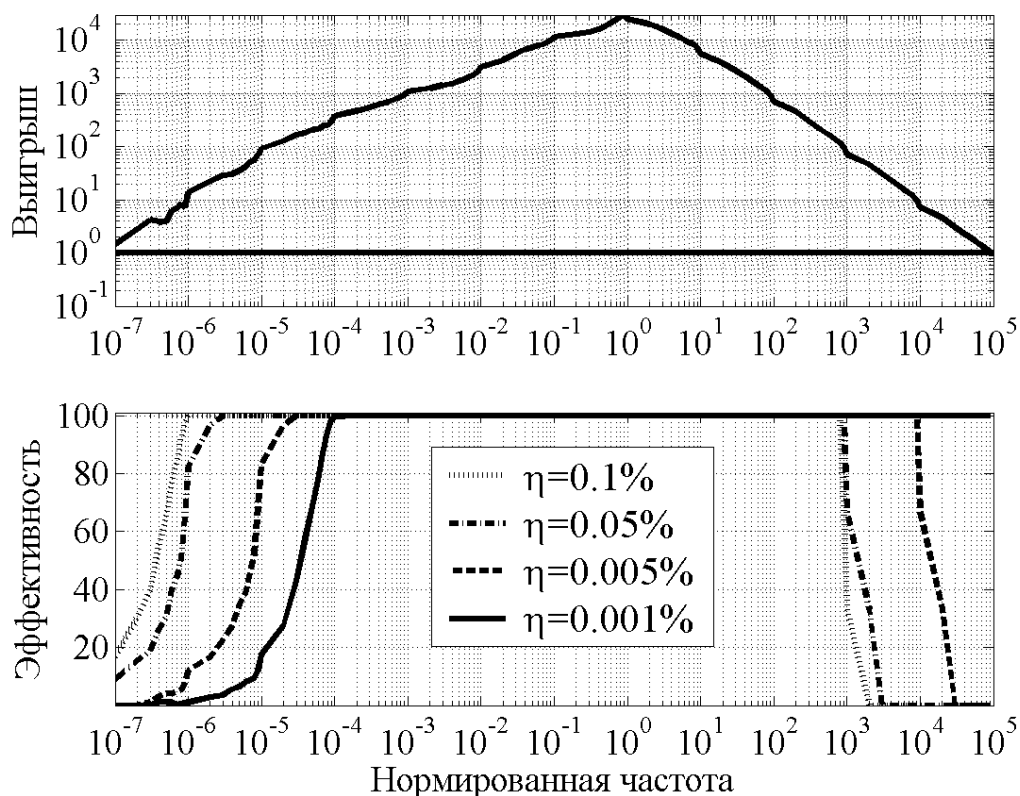


Рисунок 3 – График выигрыша по быстродействию и графики эффективностей метода совпадения по сравнению с методами прямого счета

Для оценки диапазона частот, в котором метод совпадения имеет преимущество, используется понятие эффективности. Под эффективностью понимается отношение количества измерений частот методом совпадения выигрыш по быстродействию, которых составляет больше единицы к общему количеству измеряемых частот на интервале группировки. На рисунке 3 приведен пример графика выигрыша по быстродействию при оптимальных значениях скважности и графики эффективности метода совпадения по сравнению с методами прямого счета при заданном уровне ММП 0,0000001%. Диапазон частот, в котором эффективность составляет более 99%, растет с уменьшением заданного уровня методической погрешности, смещается в область более высоких частот с уменьшением скважности импульсов. В диапазоне частот, где средний выигрыш по быстродействию метода совпадения меньше единицы, наблюдается не-

которое количество измерений частоты, которые выполнены методом совпадения быстрее, чем методами прямого счета. Для примера на рисунке 3 при различных значениях скважности диапазон частот, в котором эффективность более 99%, составляет от 10^{-6} до $2 \cdot 10^5$.

В случае если частота образцового генератора используемого для измерения частоты методами прямого счета больше частоты образцового генератора используемого для измерения частоты методом совпадения наблюдается следующие зависимости – с уменьшением частоты образцового генератора используемого для измерения частоты методом совпадения по отношению к частоте образцового генератора используемого для измерения частоты методами прямого счета уменьшаются оптимальные значения скважности, выигрыш по быстрдействию и диапазон частот, в котором наблюдается выигрыш по быстрдействию.

Одной из важных инструментальных погрешностей при использовании метода совпадения является погрешность формирования длительности импульсов. При положительных значениях погрешности формирования длительности импульсов возможно возникновение измерений с недостоверными результатами. Из результатов моделирования следует, что доля измерений с погрешностью больше чем заданный уровень ММП, растет с увеличением погрешности формирования длительности импульсов и увеличением задаваемых значений скважности. При отрицательных значениях погрешности формирования длительности импульсов возможно увеличение времени измерения.

В третьей главе рассматривается вероятностная модель измерения частоты методом совпадения. Принято, что импульсы образцовой частоты формируются минимальной длительности, а импульсы измеряемой частоты формируются с заданной длительностью. При этом выражение для вычисления измеряемой частоты принимает вид

$$F_x = \frac{N_{xc}}{N_{0c}} \times \frac{1}{T_0} \pm \frac{h_x}{N_{0c}} \frac{\delta}{\delta} \quad (4)$$

Вероятность возникновения совпадения импульсов при n испытаниях определяется следующим выражением

$$P(n) = 1 - (1 - h_x \times F_x / F_0)^n \quad (5)$$

Из формулы (5) можно получить выражение для числа периодов, которое требуется для совпадения импульсов измеряемой и образцовой частот

$$n = \frac{\ln(1 - P(n))}{\ln(1 - h_x \times F_x / F_0)}. \quad (6)$$

Время измерения частоты методом совпадения можно разбить на три интервала времени. Первый – интервал времени, от начала измерения до первого совпадения импульсов измеряемой и образцовой частоты. Второй – интервал времени, требуемый для достижения количества периодов образцовой частоты необходимых для обеспечения заданного уровня ММП. Третий – интервал времени необходимый для очередного совпадения импульсов измеряемой и образцовой частоты. Тогда выражение для времени измерения частоты методом совпадения принимает вид

$$t_{cp} = \frac{1}{g_c} h_x + \frac{\ln(1 - P(n))}{\ln(1 - h_x \times F_x / F_0)} \frac{1}{g_c} T_0. \quad (7)$$

Учитывая (7) можно получить выражение выигрыша метода совпадения по быстрдействию по сравнению с методом измерения частоты прямого счета за целое число измеряемых периодов

$$W_{pT} = \frac{1}{h_x + g \times \frac{\ln(1 - P(n))}{\ln(1 - h_x \times F_x / F_0)}}. \quad (8)$$

Аналогичное выражение можно получить для сравнения с методом измерения частоты прямого счета за целое число образцовых периодов

$$W_{pF} = \frac{1}{h_x + g \times \frac{\ln(1 - P(n))}{\ln(1 - h_x \times F_x / F_0)} \frac{F_x}{F_0}}. \quad (9)$$

Из (8) и (9) используя функцию Ламберта можно получить выражение, которое описывает зависимость оптимальной скважности от заданного уровня ММП, вероятности и отношения измеряемой и образцовой частот

$$h_{xW} = \frac{F_x \times g \times \ln(1 - P(n)) / F_0 + 4 \times \frac{1}{2 \sqrt{-F_x \times g \times \ln(1 - P(n)) / F_0}}}{4 \times \frac{1}{2 \sqrt{-F_x \times g \times \ln(1 - P(n)) / F_0}}}. \quad (10)$$

Для упрощения анализа выражения (10) в (8) и (9) можно логарифм заменить первым членом степенного ряда, при выполнении условия сходимости степенного ряда. Таким образом, аналитическая оценка выражения (10) принимает вид

$$h_{xW} = \sqrt{-g \times F_0 \times \ln(1 - P(n)) / F_x}. \quad (11)$$

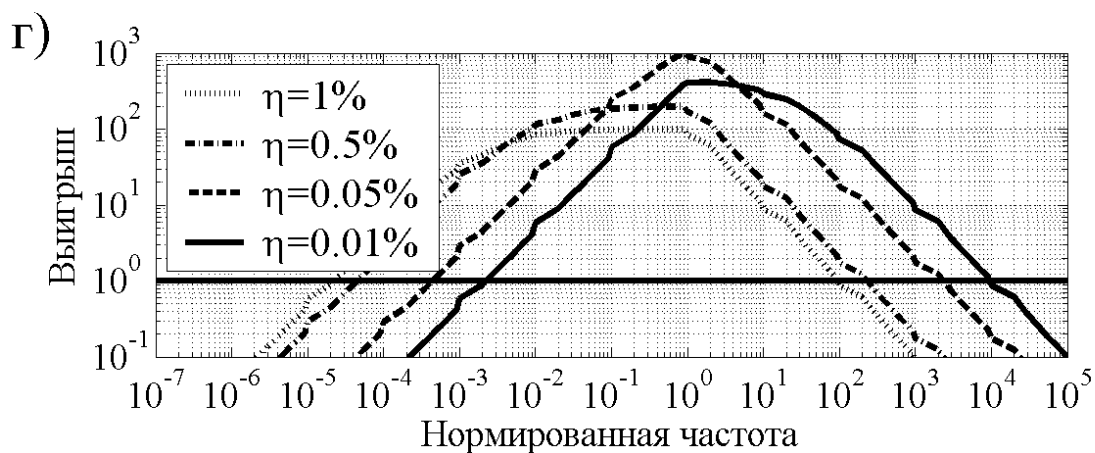
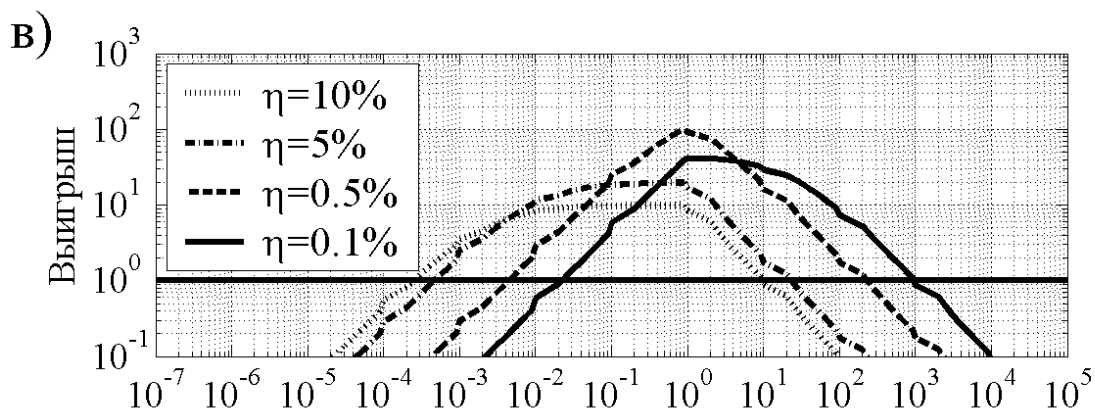
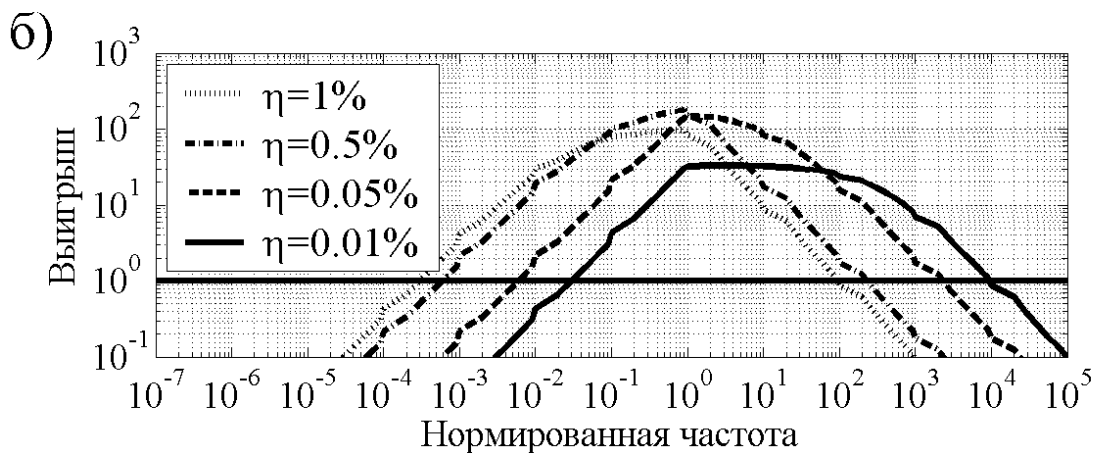
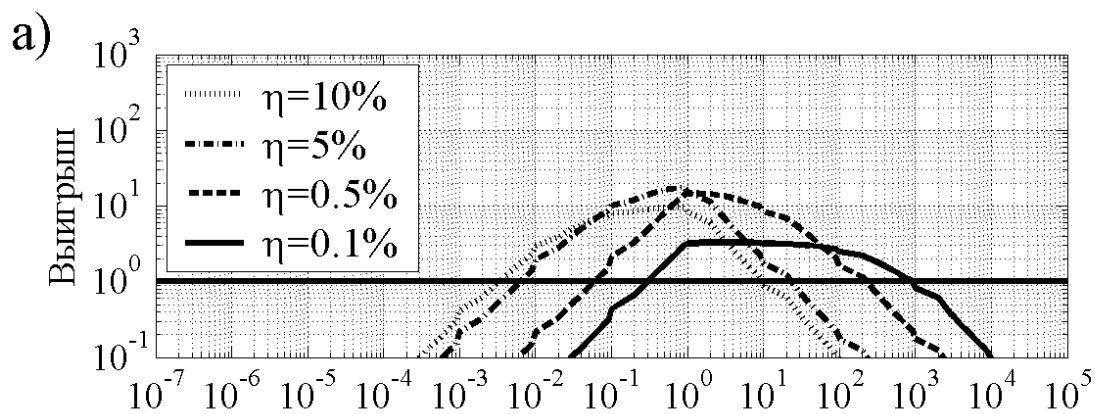


Рисунок – 4 Графики, характеризующие выигрыш по быстродействию метода совпадения по сравнению с методами прямого счета, построенные на основе вероятностных оценок

Для примера, на рисунке 4 приведены результаты вычислений вероятностных оценок выигрыша метода совпадения по сравнению с методом измерения частоты прямым счетом за целое число периодов измеряемой частоты. Рисунок 4.а и 4.б – при заданном уровне вероятности 0,95, ММП 0,01% и 0,0001% соответственно. Рисунок 4.в и 4.г – при заданном уровне вероятности 0,2, ММП 0,01% и 0,0001% соответственно. По результатам вычислений вероятностных оценок сделаны следующие выводы.

Диапазон частот, в котором наблюдается выигрыш по быстрдействию метода совпадения по сравнению с методами прямого счета, увеличивается с уменьшением заданного уровня методической погрешности и уменьшением заданного уровня вероятности.

Выигрыш по быстрдействию метода совпадения растет с уменьшением заданного уровня методической погрешности и уменьшением заданного уровня вероятности.

Максимальный выигрыш по быстрдействию достигается при близких значениях измеряемой и образцовой частот. При уменьшении заданного уровня методической погрешности, уменьшении заданного уровня вероятности и увеличении отношения измеряемой и образцовой частот уменьшаются значения оптимальной скважности. Данные зависимости согласуются с полученным аналитическим выражением (10) оптимальных значений скважности.

Проведен сравнительный анализ результатов, полученных путем статистического моделирования и результатов, полученных на основе вероятностных оценок. В результате проведения анализа показано, что зависимости времени измерения частоты методом совпадения от отношения измеряемой и образцовой частот, заданного уровня методической погрешности, и скважности импульсов, полученные по вероятностным оценкам, повторяют зависимости, полученные на основе модели статистических испытаний, при этом результаты наиболее близки при заданном уровне вероятности 0,2.

В четвертой главе разработаны функциональные и принципиальные схемы цифровых частотомеров:

- с автоматическим выбором режима измерения частоты за целое число периодов измеряемой или образцовой частоты;
- реализующего метод совпадения;
- с автоматическим выбором режима измерения частоты методами прямого счета либо методом совпадения.

Построены временные диаграммы работы разработанных приборов, изготовлены их макетные образцы, на которых проведены измерения частоты различных сигналов. Приведены результаты натуральных экспериментов полученных на макетных образцах.

В частотомере с автоматическим выбором режима работы выполняется измерение частоты методами прямого счета либо методом совпадения. Оценка времени измерения выполнена следующим образом, одновременно производится измерение частоты методами прямого счета и методом совпадения, при этом измерение завершается при достижении заданного уровня методической погрешности по одному из методов. Затем вычисляется время измерения в соответствии с количеством подсчитанных периодов образцовой частоты, за интервал времени от начала измерения до момента достижения заданного уровня методической погрешности. На базе данного частотомера разработан частотомер с мультиплицированным входом, который позволяет подключать до 8 сигналов одновременно, при этом измерение частоты производится поочередно.

Стоит отметить, что алгоритм с автоматическим выбором режима измерения частоты методами прямого счета либо методом совпадения исключает возможность увеличения времени измерения частоты по сравнению с методами прямого счета.

В заключении. В соответствии с целью и задачами исследования в диссертации разработана модель статистических испытаний и вероятностная модель, выполнено математическое моделирование, изготовлен макетный образец и проведены натурные эксперименты. На основе полученных данных сформулированы основные результаты работы, которые сводятся к следующему:

1. Показано, что измерение частоты методом совпадения осуществляется в широком диапазоне частот.
2. Рассмотрены зависимости времени измерения частоты методом совпадения от заданного уровня относительной максимальной методической погрешности дискретизации (далее – методической погрешности), скважности импульсов и отношения значений измеряемой и образцовой частот. В рамках вероятностной модели получено аналитическое выражение, позволяющие производить оценку времени измерения частоты методом совпадения.
3. Выполнен сравнительный анализ времени измерения частоты методом совпадения и методами прямого счета.

3.1. Установлено, что измерение частоты методом совпадения выполняется быстрее, чем методами прямого счета в широком диапазоне частот.

3.2. Определено, что с уменьшением заданного уровня методической погрешности увеличивается диапазон частот, в котором наблюдается выигрыш по быстродействию.

3.3. Выигрыш по быстродействию метода совпадения растет с уменьшением заданного уровня методической погрешности, имеет максимум при близких значениях образцовой и измеряемой частот и зависит от заданной скважности импульсов.

4. По результатам моделирования выявлено, что большую роль играет скважность импульсов.

4.1. Существуют оптимальные значения скважности импульсов, при которых достигается наименьшее время измерения частоты методом совпадения. В рамках вероятностной модели получено аналитическое выражение, позволяющее производить оценку оптимальных значений скважности импульсов.

4.2. Предложено для увеличения быстродействия изменять скважность импульсов в зависимости от заданного уровня методической погрешности и отношения значений измеряемой и образцовой частот.

5. Показано влияние точности формирования длительности импульсов на результат измерения. При положительных значениях погрешности формирования длительности импульсов появляются измерения с недостоверными результатами. При отрицательных значениях погрешности формирования длительности импульсов увеличивается время измерения частоты методом совпадения.

6. Предложены функциональные и принципиальные схемы частотомеров реализующих измерение частоты методом совпадения. Реализован макетный образец частотомера, кроме того, результаты работы использованы при выполнении НИР по созданию поверочного технологического стенда электросчетчиков на ЗАО «Радио и микроэлектроники» (ЗАО РИМ).

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ:

Научные работы в изданиях рекомендованных ВАК:

1. Лаптев, Д.В. Вероятностная оценка метода совпадения при измерении частоты / Д.В. Лаптев, Ю.А. Пасынков // Ползуновский вестник. – 2013. – №2. – С. 158–162.
2. Лаптев, Д.В. Влияние скважности импульсов на быстродействие метода совпадения при измерении частоты / Д.В. Лаптев // Ползуновский вестник. – 2013. – №2. – С. 162–165.

3. Лаптев, Д.В. Статистическое исследование измерения частоты методом совпадения / Д.В. Лаптев, Ю.А. Пасынков // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – №1(31) . – С. 78–83.

Научные работы в изданиях, индексируемых в системе Scopus:

4. Laptev, D.V. Comparison of statistical and probabilistic model of the frequency measurement by method coincidence / D.V. Laptev, I. A. Pasyнков // 2014 12th International conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) proceedings. Vol.1. October 2–4, 2014, Novosibirsk, Russia. – 2014, pp. 290–292. [Сравнение статистической и вероятностной модели измерения частоты методом совпадения].

Патенты:

5. Пат. 110499 РФ, МПК G01R23/02. Периодочастотомер / Лаптев Д.В., Пасынков Ю.А.; заявитель и патентообладатель: Новосибирский Государственный Технический Университет (RU); заявл. 30.03.2011; опубл. 20.11.2011. Бюл. № 32. – 2 с. : ил.

6. Пат. 2530445 РФ, МПК G01R23/00. Способ измерения частоты / Лаптев Д.В. (RU), Пасынков Ю.А. (RU); заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет»(RU); заявл. 20.03.2013; опубл. 10.10.2014. Бюл. № 28. – 18 с. : ил.

Другие издания:

7. Лаптев, Д.В. Измерение частоты / Д.В. Лаптев, Ю.А. Пасынков // Наука. Технологии. Инновации. Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых. (Новосибирск, 4-5 декабря, 2009 г.), Новосибирск: Изд. НГТУ, 2009. – Ч. 2. – С. 30.

8. Лаптев, Д.В. Измерение частоты с заданным уровнем методической погрешности / Д.В. Лаптев // Материалы VIII международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». (Новосибирск, 22-24 сентября, 2010 г.), Новосибирск: Изд. НГТУ, 2010. – Т. 3. – С. 131–133.

9. Колесников, А.А. Умножитель частоты прямого преобразования / А.А. Колесников, Д.В. Лаптев, Ю.А. Пасынков // Материалы VIII международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». (Новосибирск, 22-24 сентября, 2010 г.), Новосибирск: Изд. НГТУ, 2010. – Т. 3. – С. 154–157.

10. Лаптев, Д.В. Измерение частоты методом совпадения / Д.В. Лаптев, Ю.А. Пасынков // Измерения в современном мире – 2011. Сборник научных трудов. Третьей междунар. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 17-20 мая, 2011 г.), СПб: Изд. Политех. ун-та, 2011. – С. 50–51.
11. Лаптев, Д.В. Реализация метода совпадения при измерении частоты (периода) / Д.В. Лаптев, Ю.А. Пасынков // Наука. Технологии. Инновации. Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых. (Новосибирск, 2-4 декабря, 2011 г.), Новосибирск: Изд. НГТУ, 2011. – Ч. 1. – С. 8–11.
12. Лаптев, Д.В. Исследование метода совпадения при измерении частоты в широком диапазоне частот / Д.В. Лаптев, Ю.А. Пасынков // Измерение, контроль, информатизация: Материалы тринадцатой международной научно-технической конференции. (Барнаул, 28-29 марта, 2012 г.), Барнаул: Изд. АлтГТУ, 2012. – Т. 1. – С. 146–148.
13. Лаптев, Д.В. Вероятностная оценка метода совпадения при измерении частоты / Д.В. Лаптев, Ю.А. Пасынков // Наука. Технологии. Инновации. Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых. (Новосибирск, 29 ноября - 2 декабря, 2012 г.), Новосибирск: Изд. НГТУ, 2012. – Ч. 2. – С. 26–27.
14. Лаптев, Д.В. Устройство для измерения частоты / Д.В. Лаптев // Измерения в современном мире – 2013: сборник научных трудов. 4-й междунар. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 3–5 июня, 2013 г.), СПб: Изд. Политех. ун-та, 2013. – С. 49–50.
15. Laptev, D.V. A frequency meter / D.V. Laptev // International summer workshop "E-learning, Embedded Systems and International Cooperation", July 17–19, 2013, Chemnitz, Germany. – 2013. – pp. 22–23. [Частотомер].

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Формат 60 X 84 1/16, объём 1,25 п.л. тираж 100 экз.
Заказ № 237 подписано в печать 28.01.2015 г.
тел./факс (383) 3460857