

Повышение точности и надежности измерения разности фаз

Вадим А. Жмудь^{1,2}, Владимир М. Семибаламут³, Любомир В. Димитров⁴

¹Институт лазерной физики СО РАН, Россия;

³Сибирское отделение геофизической службы СО РАН, Россия; НГТУ, Россия;

⁴Технический университет Софии, Болгария

Аннотация: Измерения разностей фаз электрических сигналов чрезвычайно важно для метрологии. Наиболее точные из измерений – это электрические измерения, а наиболее точные из электрических измерений – это измерения частоты. Действительно, такие измерения ранее осуществлялись методом подсчета количества импульсов за единицу времени, и этот метод был наиболее надежен, меньше подвержен действию помех и иных видов искажений при обработке, передаче на расстояние и преобразовании такого сигнала в сравнении со всеми другими электрическими измерениями. Поэтому традиционно наиболее точные датчики неэлектрических величин стремились сделать на основе устройств, преобразующих эти величины в частоту. Лазерные методы измерений принципиально построены также на этом принципе, в них измеряемые величины преобразуются в приращения частот или фаз. Измерения фазовых соотношений – это новый, более высокий уровень по точности, в сравнении с измерениями частоты. Традиционные методы фазовых измерений уже недостаточно точны, поэтому крайне актуальна разработка новых методов, основанных на иных принципах. В статье детально рассматривается новый метод измерения разностей фаз с высшей точностью. Этот метод иллюстрируется на примерах сигналов, полученных методом численного моделирования

Ключевые слова: измерение разности фаз, цифровая обработка сигналов, моделирование, фазометр, метрология, погрешность, точность, шумы измерений, модуляция, смещение, помеха

ВВЕДЕНИЕ

В метрологии крайне актуально измерения частот [1–21]. Ранее измерения частот осуществляли путем подсчета количества импульсов за единицу времени. Ясно, что при достаточно большом времени измерения можно насчитать сколь угодно большое количество импульсов измеряемой частоты, поэтому частоту можно измерять с очень высокой точностью. Этот метод позволяет измерять лишь среднюю частоту. Часто бывает

необходимо измерять текущее значение частоты, то есть среднюю частоту на очень малых интервалах. В этом случае простой подсчет количества импульсов за интервал времени уже не позволяет осуществить достаточно точное измерение.

Измерение разностей фаз двух сигналов сложнее, но дает более точные результаты. Также зачастую требуется измерение фазовых соотношений между несколькими парами сигналов, но эта задача решается простым дублированием аппаратной части. Поэтому основной проблемой является решение задачи для случая сравнения хотя бы фаз двух разных сигналов.

1. СЧЕТНЫЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗНОСТИ ФАЗ

Один из наиболее ранних вариантов измерения фазовых соотношений основан на измерении времени между соответствующими фронтами двух разных сигналов. Действительно, если, например, имеется два прямоугольных сигнала U_1 и U_2 на частоте $f_1 = 1 \text{ МГц}$, то период таких сигналов равен $T = 1/f = 1 \text{ мкс}$. Предположим, мы имеем сигнал образцовой частоты, равной $f_2 = 100 \text{ МГц}$. Можно в момент прихода фронта от сигнала U_1 начать подсчет импульсов образцовой частоты, и прекратить этот подсчет в момент прихода фронта от сигнала U_2 . Тогда количество насчитанных импульсов даст информацию о разности фаз с дискретностью, соответствующей одному проценту от периода. Для повышения точности следует увеличивать образцовую частоту, что имеет свои ограничения. В данном примере образцовая частота выше 1 ГГц представляет значительную трудность, поэтому минимальная ошибка таких измерений составляет $0,1 \%$. Кроме того, возникают дополнительные трудности и источники погрешности в преобразовании гармонического сигнала в прямоугольный. Если же исходный сигнал содержит высокочастотные шумы, или амплитудную модуляцию, или смещение нуля, каждая из таких особенностей вносит свой вклад в погрешность, а в совокупности они могут вообще исключить возможность достоверного измерения.

Никакие технические решения не позволяют устранить принципиальные недостатки рассмот-

ренного выше счетного способа измерения разности фаз. Наличие шумов в сигнале приводит к сдвигу фаз. Прерывание сигнала даже на короткое время приводит к нарушению работы фазометра, что может дать ошибочный сдвиг на целый период или несколько периодов. Эти проблемы такого фазометра неустранимы, поскольку после преобразования гармонического сигнала в прямоугольные импульсы теряется много информации, содержащейся в исходном сигнале. В полученном прямоугольном сигнале информация содержится только во времени фронтов импульса, так как на его формирование влияет только момент пересечения входным сигналом уровня срабатывания компаратора или триггера. В исходном сигнале информации намного больше, она имеется также в форме этого сигнала.

2. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СИГНАЛА НА АЦП С ПОЛУЧЕНИЕМ РАЗНОСТНОЙ ЧАСТОТЫ

Как правило, при аналого-цифровом преобразовании сигнала требуется получение информации не только об амплитуде этого сигнала, но также и относительно его формы. Если преобразуется сигнал, изменяющийся по гармоническому закону, то для восстановления его формы требуется получение достаточно большого количества отсчетов на один период такого сигнала. Если мы точно знаем, что сигнал имеет гармоническую форму, то количество таких отсчетов может быть существенно уменьшено, так как при обработке результата можно использовать эти знания о форме сигнала.

Если осуществлять одно мгновенное измерение на один период частоты измеряемого сигнала, то на выходе получим константу, так как каждый раз измерение будет происходить в момент той же самой фазы входного сигнала. Если же равенство периода входного сигнала и периода измерений лишь приближенное, то в результате будем получать отсчеты разностной частоты. Этот метод позволяет каждый раз наиболее успешно измерять разность фаз между входным сигналом и сигналом опорной частоты, управляющей действием АЦП, после чего для вычисления разности фаз остается лишь вычесть полученные результаты измерения фаз каждого сигнала друг из друга. Поэтому далее будем рассматривать лишь работу одного канала измерения фазы.

Проиллюстрируем это на примере сигналов, получаемых при численном моделировании в программе *VisSim*.

Рассмотрим гармонический сигнал с частотой, равной $f_1 = 1$ Гц. На *Рис. 1* показан результат моделирования этого сигнала.

Этот сигнал изменяется по закону синуса от времени. Если задать сдвиг фазы на четверть периода, т.е. примерно на 1,59 с, то получим сигнал со сдвигом фазы на четверть периода,

который изменяется по закону косинуса от времени. Этот сигнал показан на *Рис. 2*.

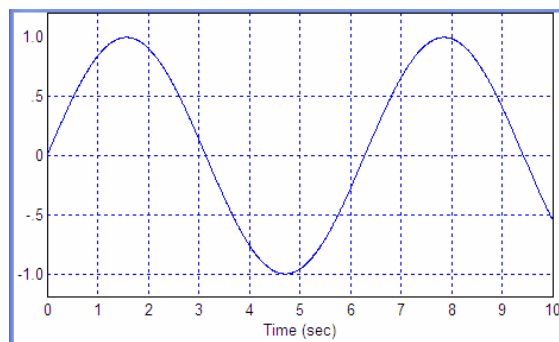


Рис. 1. Результат моделирования гармонического сигнала в виде синуса от времени

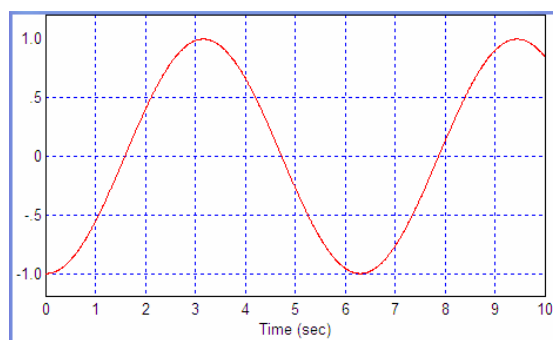


Рис. 2. Результат моделирования гармонического сигнала в виде косинуса от времени

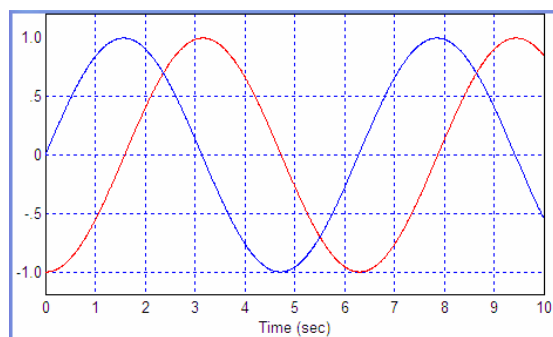


Рис. 3. Совмещение двух графиков: по *Рис. 1* и по *Рис. 2*

На *Рис. 3* показаны оба сигнала в одних осях, что облегчает их сопоставление.

Если к сигналу добавляется помеха в виде высокочастотного сигнала, это искажает его форму. На *Рис. 4* показан график сигнала с добавлением помехи, частота которой в 10 раз выше, а амплитуда в 10 раз меньше.

Если добавить низкочастотную помеху к сигналу, показанному на *Рис. 1*, то получим искажение, которое не слишком заметно при рассмотрении сигнала на интервале одного периода, как показано на *Рис. 5*. Для сравнения там же красным цветом дан исходный сигнал.

Если к исходному сигналу, показанному на *Рис. 1* добавить постоянное смещение, например, на величину 0.1, то получим сигнал,

показанный на *Рис. 6*. Для сравнения там же красным дан исходный сигнал.

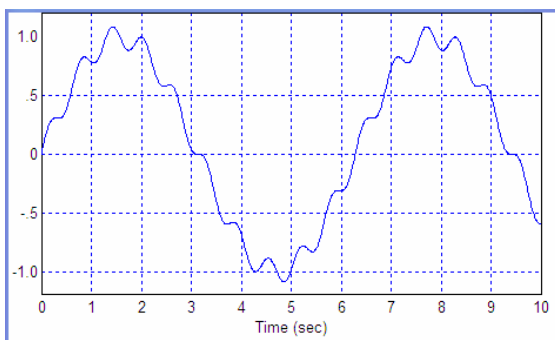


Рис. 4. График по *Рис. 1* после добавления высокочастотной помехи

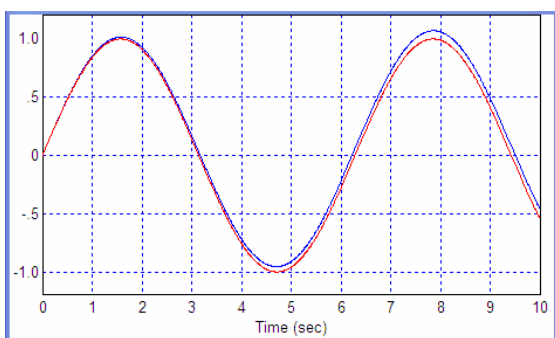


Рис. 5. График по *Рис. 1* после добавления низкочастотной помехи

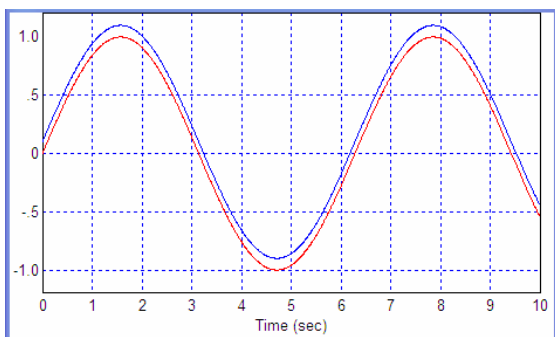


Рис. 6. График по *Рис. 1* после добавления постоянного смещения

Также сигнал может содержать высокочастотные шумы, как показано на *Рис. 7*. Если от исходного синусоидального сигнала брать строго один отсчет на период, то результат преобразования будет постоянным, в зависимости от фазовых соотношений между преобразуемым сигналом и сигналом, управляющим взятием отсчетов. В частности, если время взятия отсчета совпадает со временем положительного пересечения этим сигналом нулевого уровня, то каждый отсчет будет строго равен нулю. Если же частота взятия отсчета не в точности совпадает с частотой сигнала, то будем получать сигнал разностной частоты. При нулевой разности фаз и при рассмотрении сигнала преобразования на интервале в 10 с этот

сигнал почти все время будет нулевым. Если же увеличить время наблюдения этого сигнала, то можно увидеть разностную частоту. Соответствующий сигнал разностной частоты, полученный моделированием устройства выборки-хранения, которое имитирует работу АЦП, показан на *Рис. 9*.

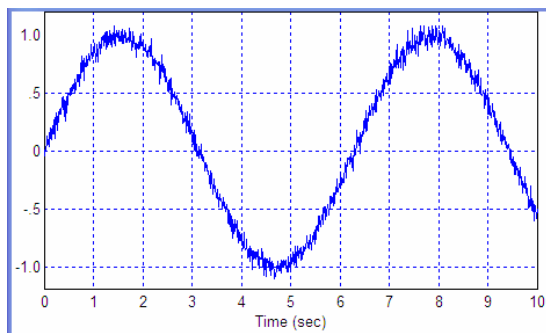


Рис. 7. График по *Рис. 1* после добавления высокочастотного Гауссова шума

Если все указанные факторы действуют одновременно, то искаженный в результате сигнал показан на *Рис. 8*. Для сравнения исходный сигнал показан красной линией.

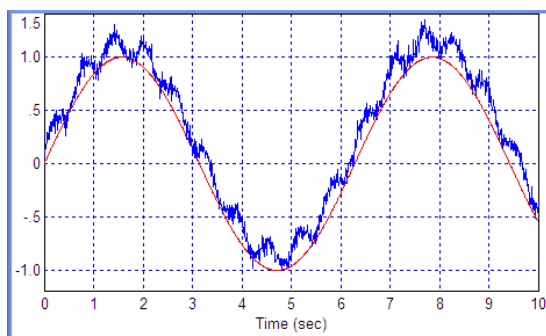


Рис. 8. Сигнал при действии всех указанных выше помех

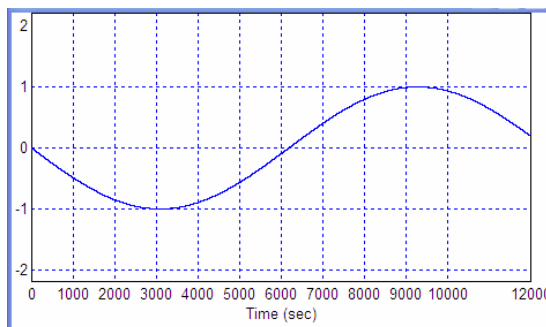


Рис. 9. Результат получения отсчетов на частоте, близкой к частоте исходного сигнала: получается разностная частота

Если частоту взятия отсчетов сдвинуть на половину ее периода, то получим также сигнал разностной частоты, но он будет сдвинут по фазе на половину периода, то есть будет инвертирован по отношению к предыдущему сигналу, как показано на *Рис. 10*. Этот сигнал

также получен моделированием и именно по такому алгоритму.

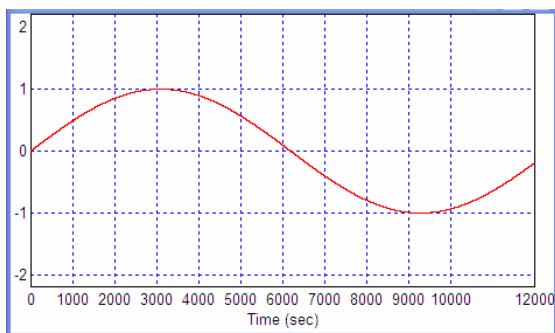


Рис. 10. Результат получения отсчетов на частоте, близкой к частоте исходного сигнала: получается разностная частота после сдвига сигнала, управляющего работой УВХ (или АЦП) на половину периода

Как видим, указанные сигналы противоположны по величине. Если из первого сигнала вычесть второй, то получим сигнал с удвоенной амплитудой, как показано на Рис. 11.

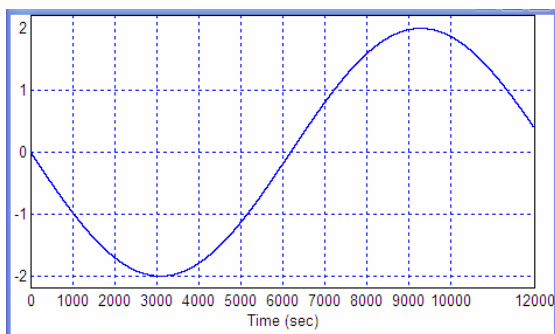


Рис. 11. Сигнал разностной частоты с удвоенной амплитудой, полученный вычитанием второго сигнала из первого

Если аналого-цифровому преобразованию подвергнуть сигнал, показанный на Рис. 8, результат преобразования будет зашумленным, как показано на Рис. 12. Гармонический сигнал можно различить, но его форма подвержена существенным искажениям. Кроме того, имеется постоянный сдвиг фазы.

Если использовать два результата преобразования, как сказано выше, и получить разностный сигнал, то результат действия смещения, высокочастотной помехи и низкочастотной помехи будут существенно подавлены. Останутся заметными только результаты воздействия высокочастотного шума, как показано на Рис. 13.

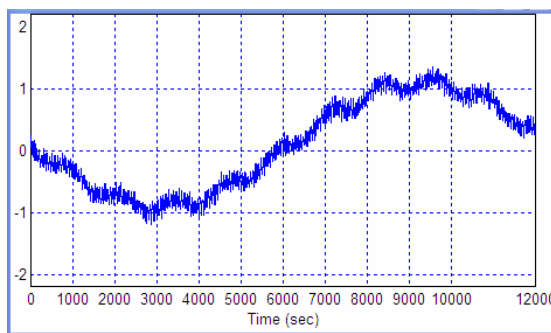


Рис. 12. Результат преобразования сигнала, показанного на Рис. 8.

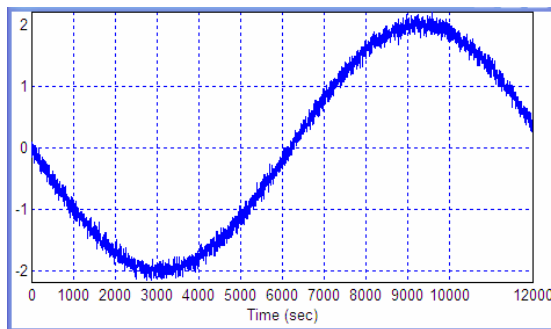


Рис. 13. Результат преобразования сигнала, показанного на Рис. 8, с использованием вычитания двух последовательностей

Далее будет показано, что при дальнейшем способе обработки сигнала высокочастотный шум не является слишком большой проблемой. Кроме того, отметим, что современные АЦП осуществляют фильтрацию. Покажем, что при отсутствии высокочастотных шумов эффект компенсации всех прочих видов помех весьма существенен.

На Рис. 14 показан результат работы только одного канала в случае действия всех видов помех, кроме шумов.

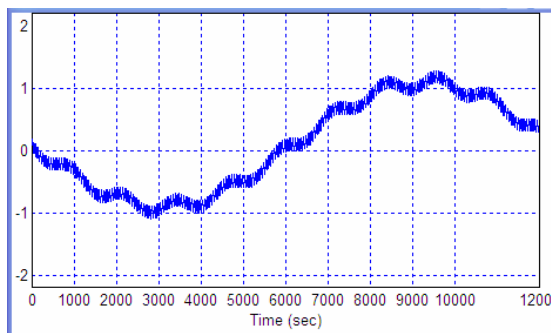


Рис. 14. Результат работы только одного канала в случае действия всех видов помех, кроме шумов

На Рис. 15 показан результат работы только второго канала, при этом результат инвертирован. На Рис. 16 показан результат вычитания этих сигналов.

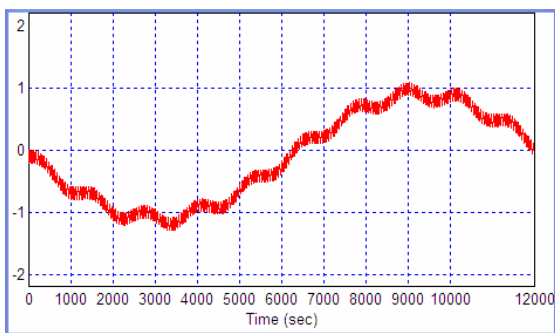


Рис. 15. Результат работы только второго канала, при этом результат инвертирован

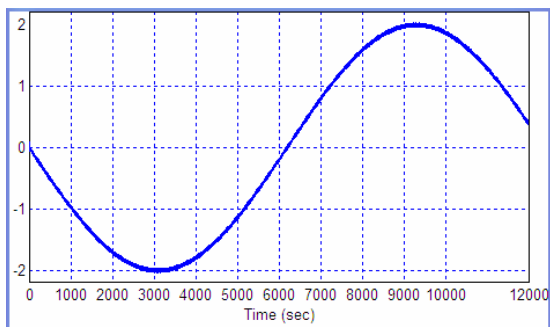


Рис. 16. Результат вычитания этих сигналов

2. КОМПЕНСАЦИЯ ШУМОВ И ПРИВЕДЕНИЕ К ЕДИНУМУ МОМЕНТУ ОТСЧЕТА

Как мы увидели, беря один отсчет на период входной частоты, мы можем получить сигнал разностной частоты. С помощью двух отсчетов на период можем получить пару сигналов разностной частоты, сдвинутые по фазе друг относительно друга на половину периода. Сдвиг по фазе на половину периода равнозначен инвертированию. При этом постоянное смещение в каждом из сигналов одинаковое. Поэтому если из первой последовательности отсчетов вычесть попарно вторую последовательность отсчетов, то в результате входное смещение будет исключено из результата, а информативная компонента удвоится. Это наглядно иллюстрируют Рис. 14–16. При этом на Рис. 14 и 15 показаны сигналы разностной частоты, полученные только из одного отсчета, а на Рис. 6 показан результат их вычитания. Видно, что устранено не только начальное смещение нуля, но также существенно подавлены шумы, и в особенности высокочастотная модуляция. Для наглядности на Рис. 17 все три графика даны в одних осях.

Обратим внимание на тот факт, что отсчеты были взяты в разные моменты времени, а их суммирование осуществлено без соответствующего сдвига. Действительно, каждый четный отсчет был взят через половину периода после взятия предыдущего нечетного отсчета. Можно предложить внесение запаздывания на половину периода в первую последова-

тельность, после чего полученные две последовательности отсчетов суммировать. Проверим эффективность совмещения отсчетов по времени путем математического моделирования.

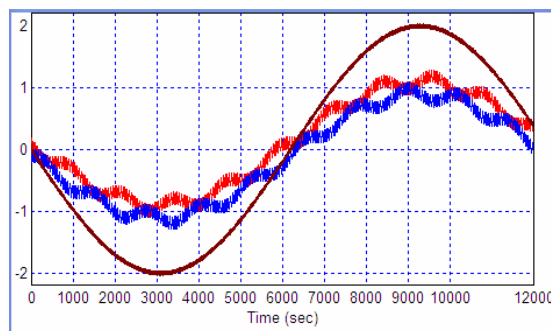


Рис. 17. Для наглядности графики, показанные ранее на Рис. 14–16 объединены

В ранее показанных графиках отсчеты взяты на интервалах, отстоящих друг от друга по времени на половину периода разностной частоты. Для совмещения их по времени следует ввести в первый канал такое же запаздывание, которое имеется во втором канале, а сложение осуществлять лишь после этого. В результате получится более адекватный сигнал. На Рис. 18 показана схема для моделирования такого способа обработки в программе VisSim. Здесь блоки устройства выборки-хранения, обозначенные символами S&H, имитируют работу АЦП, а блоки с экспонентой внутри вносят запаздывание на величину, показанную на входном генераторе константы. В данном случае эта величина составляет 3,14 единиц. На Рис. 18а показана структура для моделирования без соответствующего запаздывания, а на Рис. 18б показана структура с внесением этого запаздывания.

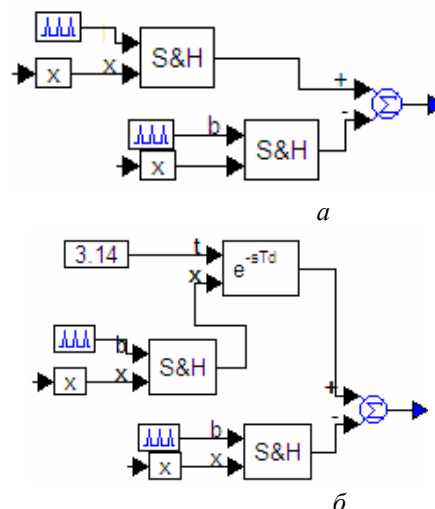


Рис. 18. Структуры моделей для получения приведенных выше графиков: а) без запаздывания; б) с запаздыванием

На *Рис. 19* показан результат преобразования сигнала при малой разности фаз без компенсирующей задержки, а на *Рис. 20* – тот же сигнал с введением компенсирующей задержки. На *Рис. 21* даны оба эти графика в одних осях для наглядности.

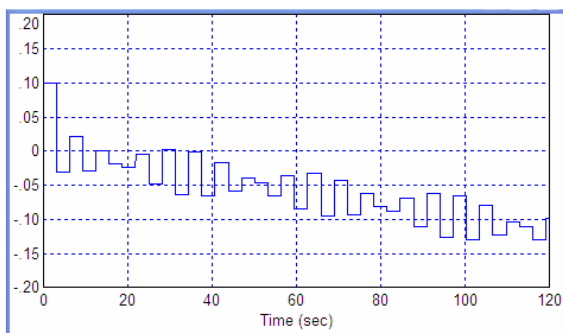


Рис. 19. Результат преобразования сигнала при малой разности фаз без компенсирующей задержки (по *Рис. 18а*)

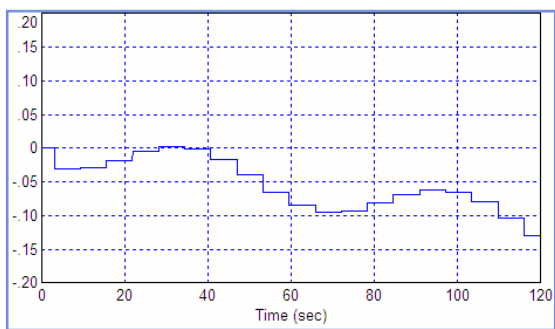


Рис. 20. Тот же сигнал, что и на *Рис. 19*, но с предварительным введением компенсирующей задержки (по *Рис. 18б*)

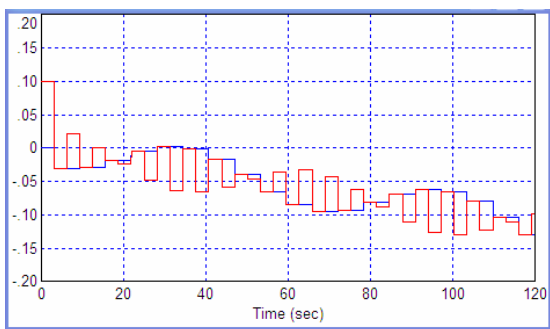


Рис. 21. Совмещенные графики по *Рис. 19* и *20*

Видно, что привязка результатов преобразования к единому моменту эффективно подавляет некоторую часть помех.

3. НЕОБХОДИМОСТЬ И ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ ПАРЫ СИГНАЛОВ: КОГЕРЕНТНОГО И КВАДРАТУРНОГО

Путем сдвига времени преобразования на половину периода мы получили сдвиг преобразованного сигнала на ту же половину периода. Аналогично, вводя сдвиг на четверть и на три четверти периода, мы можем получить

сигналы разностной частоты с таким же сдвигом фаз. Аналогичным образом, вычитая один из другого, можно получить второй сигнал, который имеет сдвиг фаз на половину периода по отношению к ранее полученному сигналу.

Эта пара сигналов называется когерентным (синхронным) и квадратурным сигналами, соответственно, а в совокупности они называются аналитическим сигналом.

Аналитический сигнал можно трактовать как проекции вращающегося вектора на оси абсцисс и ординат, соответственно. В этом случае вычисление фазы осуществляется из простого геометрического соотношения. Фаза угла наклона вектора равна арктангенсу отношения квадратурной компоненты к когерентной, либо арккотангенсу обратного отношения.

Как видим, аналитический сигнал легко получается и легко использовать для вычисления фазы.

Проиллюстрируем это на сигналах, получаемых математическим моделированием.

Ранее, как показано на *Рис. 17*, получен когерентный сигнал разностной частоты. С помощью такой же модели, отличающейся только сдвигами фаз сигналов, подаваемых на УВХ, легко получить квадратурный сигнал. На *Рис. 22* показаны два сигнала – когерентный и квадратурный. Разница между ними состоит только в сдвиге фаз моментов взятия отсчетов входной частоты, общий сдвиг второго канала по отношению к первому составляет четверть периода взятия частоты. Здесь в каждом канале использована компенсация запаздывания.

Теперь остается только когерентного и квадратурного сигналов измерить разность фаз.

Вместо вычисления арктангенсов, можно построить график изменения вектора аналитического сигнала в фазовой плоскости. Это достаточно наглядно иллюстрирует возможности определения фазы. Действительно, любая точка в фазовой плоскости отмечает текущее в данный момент времени положение конца вектора, который представлен своими проекциями и виде аналитического сигнала. Если начало координат соединить с этой точкой, получим сам вектор, а угол между этим вектором и осью абсцисс и есть искомая фаза. Преимущество такого представления состоит в том, что можно определять угол во всех четырех квадрантах, и даже в большем диапазоне, отслеживая поворот вектора. Если получаем круг (или при неравенстве масштабов по осям – эллипс), то это – идеальный результат обработки сигнала. Наличие шумов в сигнале даст некоторые отклонения графика от идеального круга. Это породит некоторые девиации вектора по длине и по углу его поворота, но если при подобных девиациях конец вектора не проходит через начало координат вследствие шумов, то измерение

фазы будет осуществляться непрерывно и без срывов слежения за фазой.

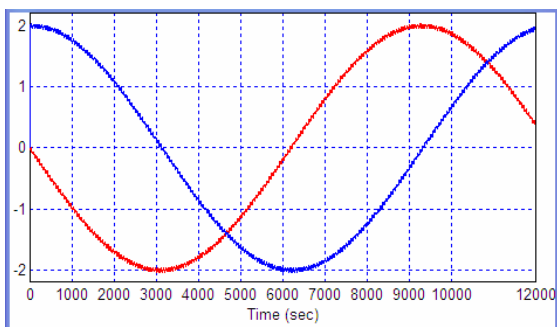


Рис. 22. Два сигнала – когерентный и квадратурный (разность фаз между ними четверть периода)

На Рис. 23 показан фазовый портрет, полученный из этих сигналов. В этом случае один из сигналов откладывается по оси абсцисс, а другой – по оси ординат. На Рис. 24 показан такой же сигнал, полученный в присутствии шумов.

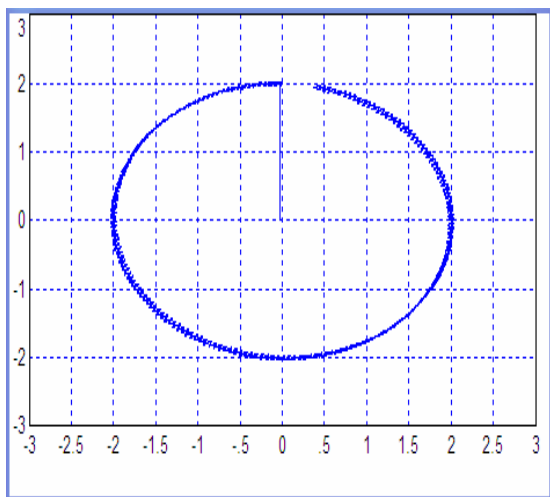


Рис. 23. Фазовый портрет, полученный из сигналов, показанных на Рис. 22

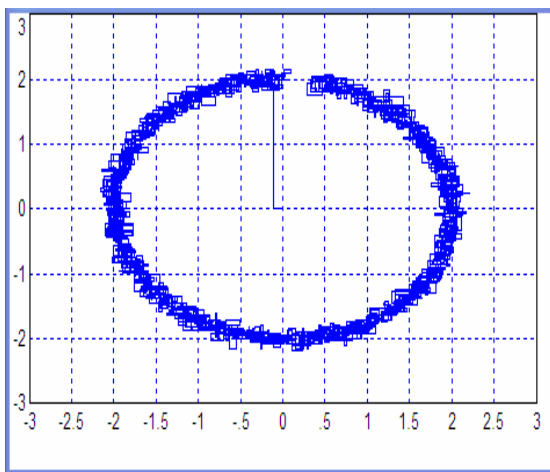


Рис. 24. Такой же сигнал, полученный в присутствии шумов.

На Рис. 25 показан такой же сигнал при еще большем увеличении шумов, а именно, в стандартное отклонение в два раза больше, чем на Рис. 24.

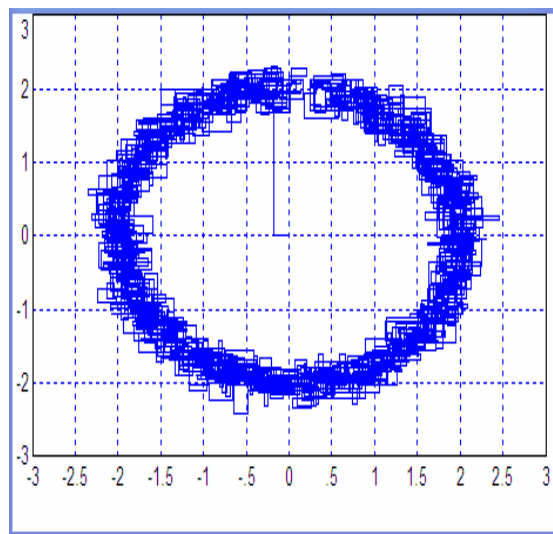


Рис. 25. Такой же сигнал при увеличении шумов в два раза больше, чем на Рис. 24

Из Рис. 25 видно, что измерение фазы было бы осуществлено без сбоев. Входной сигнал для этого случая показан на Рис. 26. Дальнейшее увеличение шумов вдвое также не приводит к срыву измерений, что видно из Рис. 27, где показан соответствующий фазовый портрет. Входной сигнал для этого случая показан на Рис. 28. Полученные в результате обработки сигналы в виде функций времени по отдельности, когерентная и квадратурная компоненты, показаны на Рис. 29. Это те же сигналы, что показаны на Рис. 27 в фазовой плоскости.

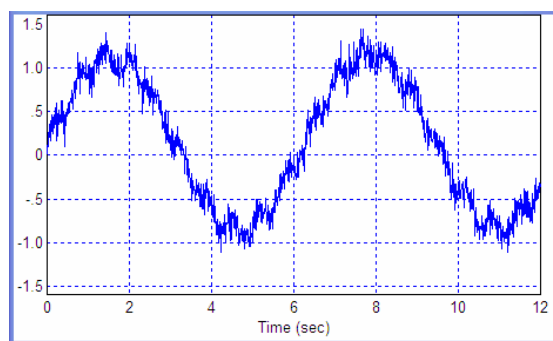


Рис. 26. Входной сигнал для случая фазового портрета, полученного на Рис. 25

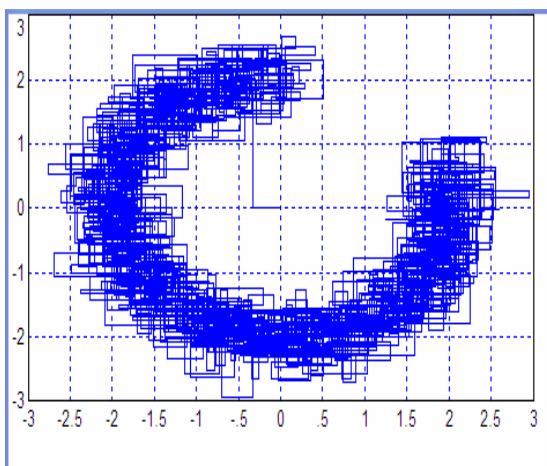


Рис. 27. Такой же сигнал при увеличении шумов в четыре раза больше, чем на Рис. 24.

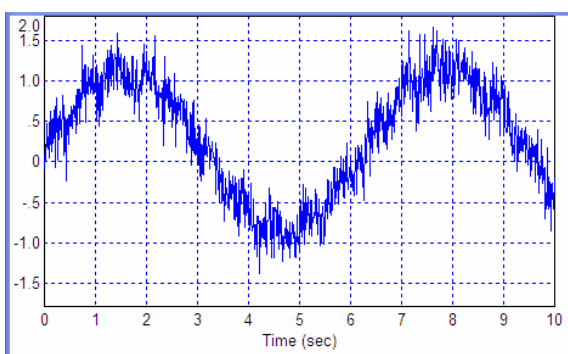


Рис. 28. Входной сигнал для случая фазового портрета, полученного на Рис. 27

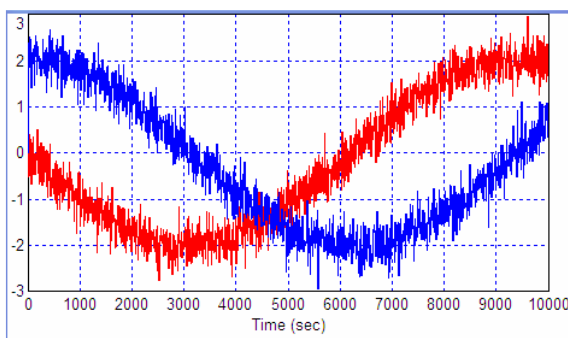


Рис. 29. Те же сигналы, что на Рис. 27, когерентный и квадратурный, но в виде функций времени

4. ЭФФЕКТИВНОЕ ПОДАВЛЕНИЕ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Рассмотренный метод обработки сигналов очень эффективен для подавления амплитудной модуляции. Введем в исходный сигнал глубокую амплитудную модуляцию. Входной сигнал для этого случая показан на Рис. 30. На Рис. 31 показан результат обработки такого сигнала рассмотренным выше способом. Круг преобразовался в фигуру в виде незаконченной восьмерки. Как видим, это не мешает определить фазу. Если построить вектор из начала координат к каждой текущей точке этого

графика и проследить угол его поворота, то получим искомые изменения фазы входного сигнала. Если частоту фазовой модуляции удвоить, получим сигнал, показанный на Рис. 32, а результат его обработки показан на Рис. 33.

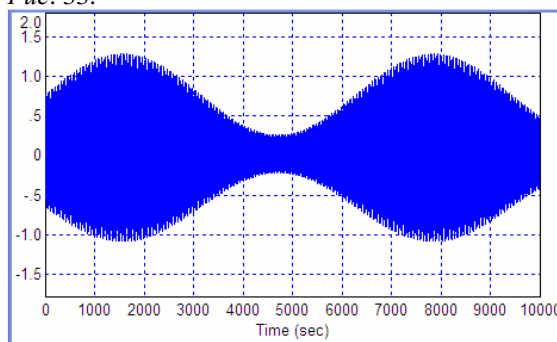


Рис. 30. Входной сигнал с глубокой амплитудной модуляцией

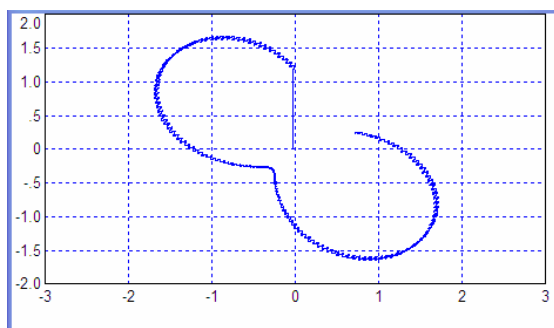


Рис. 31. Результат обработки сигнала, показанного на Рис. 30, в виде фазового портрета

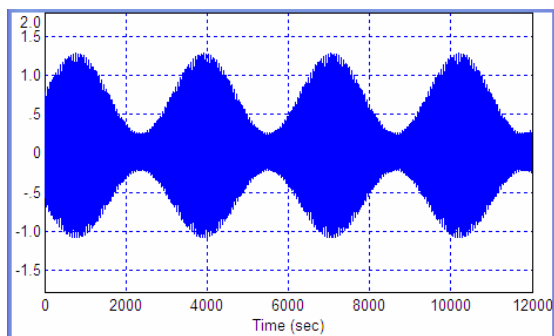


Рис. 32. Увеличенная вдвое по частоте амплитудная модуляция

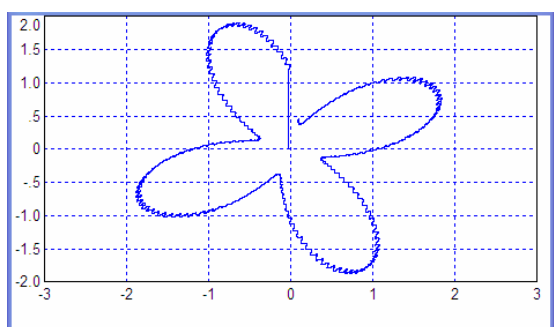


Рис. 33. Результат обработки сигнала, показанного на Рис. 32

На *Рис. 34* показаны отдельно когерентная и квадратурная компоненты аналитического сигнала как функции времени.

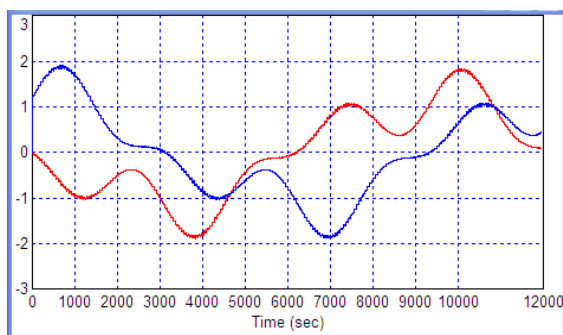


Рис. 34. Когерентная и квадратурная компоненты сигнала, показанного ранее на *Рис. 34* в виде фазового портрета

Если частоту модуляции увеличить еще в 1,5 раза, получим результат, показанный на *Рис. 35*. Как видим, и здесь не будет происходить срыва восстановления фазы, поскольку вектор из начала координат к каждой точке графика можно провести достаточно надежно, неконтролируемого вращения такого вектора не может произойти.

Все выше перечисленные операции по модуляции делались в отсутствие шума. Если добавить шум, получим фазовый портрет, показанный на *Рис. 36*. Восстановление фазы по такому фазовому портрету будет вносить некоторый фазовый шум, но все же фатального срыва измерений не будет, так как зашумленный сигнал не доходит до точки начала координат.

Отметим, что начальный участок входа в режим измерений присутствует на всех графиках и не определяет точность системы, при обработке этот участок можно учесть, как входение в режим и исключить из результата. Обсуждаемый фазометр предназначен для непрерывной работы, поэтому необходимость накопления нескольких отсчетов для входения в режим не сказывается на функциональной полезности фазометра, такое имеет место только в первый момент включения.

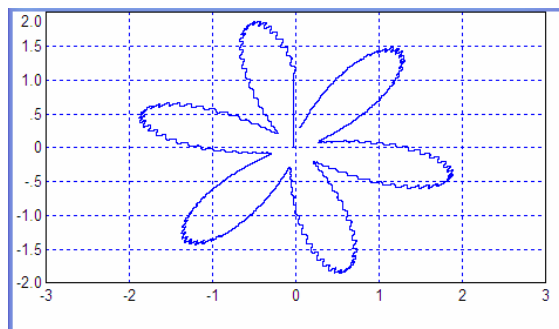


Рис. 35. Результат обработки сигнала с увеличенной втрое частотой амплитудной модуляции

На *Рис. 37* показан вид исходного сигнала, обработка которого дала фазовый портрет, приведенный на *Рис. 36*.

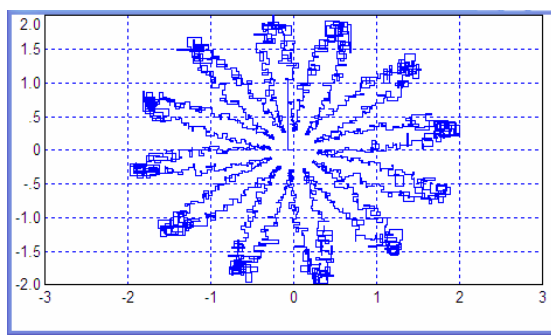


Рис. 36. Результат обработки сигнала с еще большей частотой амплитудной модуляции и добавленными шумами: видно, что при этом методе обработки срыва фазы все равно не происходит, так как вращение вектора, направленного из центра координат к текущей точке, можно проследить безошибочно

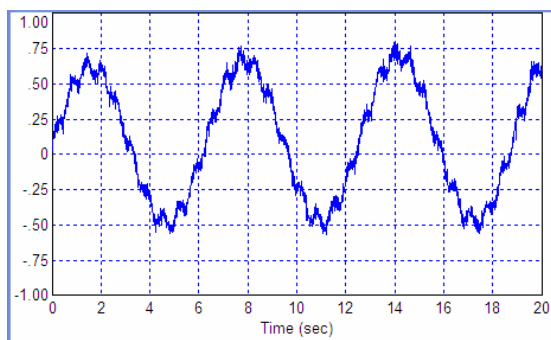


Рис. 37. Соответствующий входной сигнал, по обработке которого построен сигнал изменения фазы, показанный на *Рис. 36*; амплитудная модуляция не видна вследствие малой длительности приведенного фрагмента

5. АППАРАТНАЯ ЧАСТЬ ФАЗОМЕТРА

Аппаратная часть фазометра, реализующего этот способ измерения фазы, предельно проста. *Рис. 38* показывает упрощенную схему предлагаемого измерителя разности фаз.

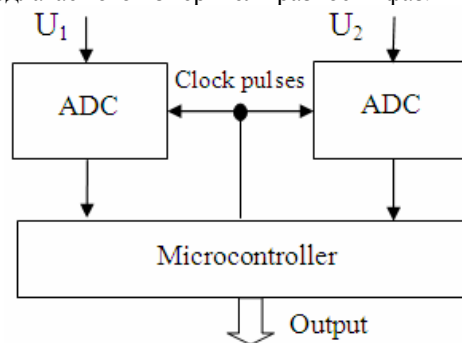


Рис. 38. Упрощенная схема измерителя разности фаз

Устройство содержит лишь два аналого-цифровых преобразователя (АЦП) и микроконтроллер. Микроконтроллер задает частоту

работы АЦП, которая приблизительно (но не в точности) в четыре раза превышает частоту входного сигнала.

Этот фазометр работает следующим образом. В результате преобразования сигналов входной частоты $f_1 = 1 \text{ МГц}$ с частотой преобразования $f_0 = 4 \text{ МГц} + \Delta f$ на выходах АЦП формируются сигналы разностной частоты Δf . Наличие четырех отсчетов на период входной частоты позволяет отдельно вычислить когерентную и квадратурную компоненты сигнала разностной частоты, то есть синус и косинус. Это позволяет вычислить фазу этого сигнала как арктангенс отношения квадратурной компоненты к когерентной. Некоторая дополнительная теория этого преобразования позволяет более точно привязать получаемые отсчеты сигнала к единому времени, отличающемуся от фактического времени их получения. Также использование более сложной функции, чем арктангенс, позволяет восстановить фазу во всем диапазоне ее изменений всех четырех квадрантах.

Вычисления разности фаз могут быть осуществлены по простому алгоритму, который позволяет осуществлять быструю обработку потока данных.

Пусть первый сигнал имеет вид:

$$U_1(t) = a_0 \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1) + n(t), \quad (1)$$

где a_0 – амплитуда, f_1 – частота, φ_1 – фаза, $n(t)$ – шум. Соответственно, второй сигнал имеет вид:

$$U_2(t) = b_0 \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2) + m(t), \quad (2)$$

с аналогичными обозначениями: b_0 – амплитуда, f_2 – частота, φ_2 – фаза, $m(t)$ – шум.

Фазометр должен измерять разность фаз этих сигналов $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, с наименьшим вкладом в результат измерения всех мешающих факторов, таких, как ВЧ и НЧ аддитивный шум $n(t)$ и $m(t)$, амплитудная модуляция несущей частоты (изменение величин a_0 и b_0 во времени, то есть мультипликативный шум), смещение нулевого уровня.

Микроконтроллер формирует тактирующие сигналы U_0 с точно известной частотой $f_0 \approx 4 f_1$, подаваемые на оба АЦП. Каждый из двух АЦП преобразует аналоговые входные сигналы в цифровые отсчеты с частотой преобразования f_0 , являющиеся численным значением величины входных аналоговых сигналов в моменты, соответствующие поступлению тактовых импульсов от микроконтроллера.

Каждый из АЦП формирует по четыре последовательности отсчетов входных сигналов. Каждые из четырех отсчетов используются для вычисления когерентной X и квадратурной Y компонент сигнала разностной частоты $\Delta f = f_1 -$

f_0 . При этом фаза когерентной компоненты X равна разности фаз входного сигнала U_1 (или U_2) и виртуального опорного сигнала U_0^* , частота которого в четыре раза меньше, чем частота опорного сигнала U_0 , а фаза по этой причине изменяется в четыре раза медленнее. Фаза квадратурной компоненты Y отличается на $\pi/2$ от фазы когерентной компоненты. Частота следования отсчетов когерентной и квадратурной компонент на выходе каналов обработки равна $f_T = f_0/4$. Пара когерентной и квадратурной компонент $\{X, Y\}$ называется аналитическим сигналом, для вычисления его фазы имеются простые соотношения. Микроконтроллер при необходимости дополнительно фильтрует эти отсчеты применением программного цифрового потокового фильтра. После такой фильтрации, микроконтроллер вычисляет фазы каждого из аналитических сигналов по известному соотношению:

$$A_i = (X_i^2 + Y_i^2)^{1/2}, \quad (3)$$

$$\varphi_i = \text{atan2}(X_i, Y_i). \quad (4)$$

Здесь $\text{atan2}(X, Y)$ – стандартная функция, равная $\arctg(Y/X)$ для $|Y| < |X|$ и $\text{arcsctg}(X/Y)$ для $|Y| > |X|$. Эта функция определена на всем множестве $\{X_i, Y_i\}$. Если амплитуда сигнала не требуется, то вычислять достаточно только фазу по соотношению (4). Это соотношение позволяет устранить влияние амплитудной модуляции на результат вычисления фазы.

Каждый из каналов обработки вычисляет и формирует первую пару $\{X_1, Y_1\}$ по первым восьми отсчетам входного сигнала, и далее вычисляет и формирует каждую последующую пару $\{X_i, Y_i\}$ по каждому новым четырем отсчетам входного сигнала. Эпюры этих сигналов показаны на Рис. 39, где u_{ij} – отсчеты АЦП первого канала, x_{ij} и y_{ij} – результаты вычислений разностей отсчетов АЦП первого канала.

Из эпюр видно, как работает устройство. Последовательно взятые отсчеты входного сигнала разбиваются на четыре последовательности, которые заполняются поочередно. Далее из первой последовательности вычитается третья, а из второй последовательности вычитается четвертая. Получаемые в результате сигналы показаны ниже. Это – удвоенные отсчеты разностной частоты, соответственно, когерентный и квадратурный сигналы. Далее из них следует вычислять фазу в соответствии с соотношением (4). Два канала таких фазометров позволяют измерять разность фаз, поскольку в конце обработки получаемые результаты просто достаточно вычесть, один из другого.

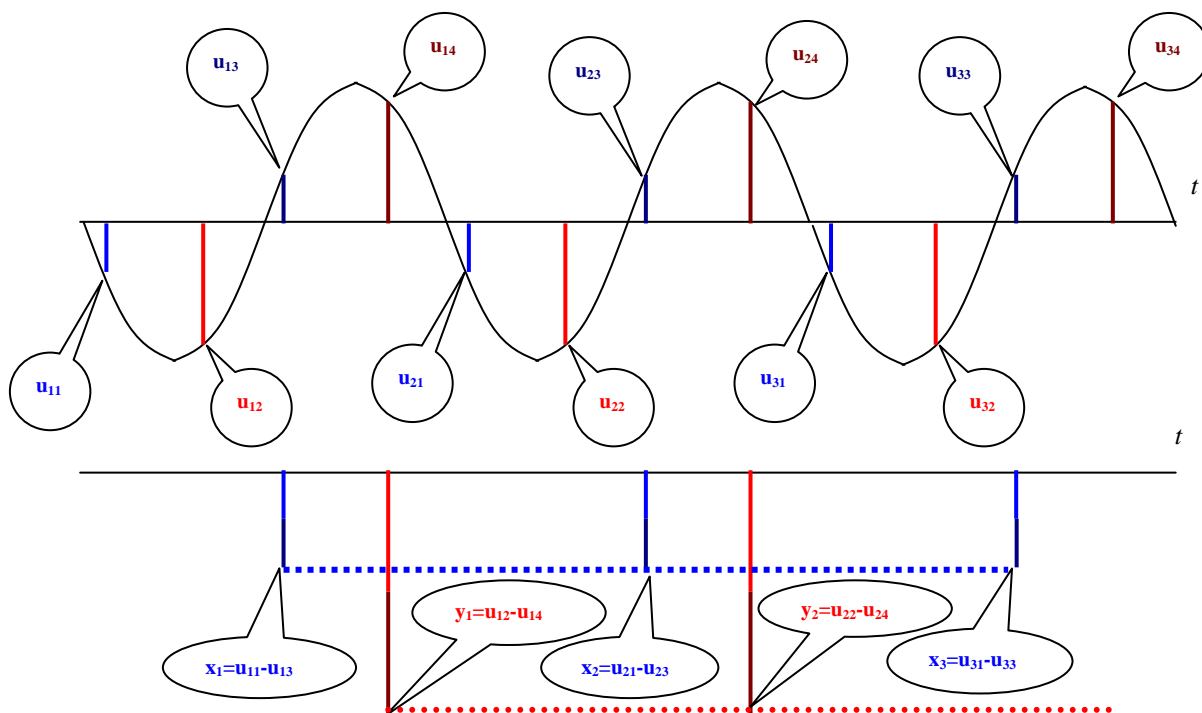


Рис. 39. Условные эпохи сигналов в фазометре

Из Рис. 39 видно, что в полученных соотношениях не в полной мере осуществлена привязка результатов обработки к единым моментам времени. Действительно, если, например, величина x_1 вычисляется из отсчетов u_{11} и u_{13} , причем эти отсчеты берутся с одинаковыми коэффициентами, то результатом вычисления является среднее значение соответствующего сигнала, которое следует отнести к моменту времени, лежащему точно посередине интервала между этими отсчетами. Это отражено на Рис. 39 соответствующим размещением этого результата на оси времени.

Желательно, чтобы оба отсчета, были привязаны к одному и тому же моменту времени, если требуется измерять высокочастотную компоненту разности фаз. Для большинства применений высокочастотная компонента не требуется, поэтому рассмотренный фазометр может быть успешно применен во многих практических задачах. Если же требуется измерение высокочастотной компоненты, привязка к единой шкале времени необходима.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод обработки сигнала для фазовых измерений очень важен для таких применений, как обнаружение предвестников землетрясений путем непрерывного мониторинга лунно-солнечных приливных колебаний скальных пород, а также для мониторинга состояний дамб, мостов, плотин и других крупных инженерных сооружений с целью предотвращения техногенных катастроф [22–30].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гончаренко А.М., Васильев В.А., Жмудь В.А. Метод повышения чувствительности лазерных виброметров. Автометрия. 2003. Т. 39. № 2. С. 43-47.
- [2] Orlov V.A., Parushkin M.D., Tereshkin D.O., Fomin Yu.N., Zhmud V.A. The usability of the laser methods in monitoring of earth seismic dynamics. В сборнике: Proceedings RFBR and DST Sponsored "The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics" 2011. С. 176-183.
- [3] Воевода А.А., Гончаренко А.М., Жмудь В.А. Фазометры для радиочастотных и лазерных измерителей перемещений и вибраций. ч.1. // Научный вестник НГТУ. 2009. - N 4(37). С.25-32.
- [4] Воевода А.А., Гончаренко А.М., Жмудь В.А. Фазометры для радиочастотных и лазерных измерителей перемещений и вибраций. ч.2. // Научный вестник НГТУ. 2010. - N 1(38). С.35-74.
- [5] Бугров С.В., Жмудь В.А., Прохоренко Е.В., Гончаренко А.М. Методы и средства нановиброметрии. В сборнике: Актуальные проблемы электронного приборостроения материалы X Международная конференция: в 7 т. 2010. С. 119-123.
- [6] Прохоренко Е.В., Бугров С.В., Жмудь В.А. Методы вибрационной диагностики состояния инженерных сооружений, конструкций и агрегатов. Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2010. № 2 (60). С. 59-64.
- [7] Borisov B.D., Goncharenko A.M., Vasiliev V.A., Zhmud V.A. Precise measurements of high-stable lasers radiation frequency and phase. В сборнике: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Seventh International Symposium on Laser Metrology Applied to Science, Industry, and Everyday Life. Editors: Y.V. Chugui,

- S.N. Bagayev, A. Weckenmann, P.H. Osanna. Novosibirsk, 2002. С. 162-166.
- [8] Voevoda A.A., Zhmud V.A., Goncharenko A.M., Gololobov V.I., Liapidevskiy A.V. The use of modelling for the speed precision phase meter metrological attestation under the condition of the absence of primary standard measuring devices. В сборнике: Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009 18th IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009. Palma de Mallorca, 2009. С. 160-164.
- [9] Zhmud V., Liapidevskiy A. Real time digital super-high accuracy vibrations measurements: methods, devices and mathematical modeling for the metrology. В сборнике: Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control, AsiaMIC 2010. Сеп. "Proceedings of the 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control, AsiaMIC 2010" Phuket, 2010. С. 343-347.
- [10] Гончаренко А.М., Васильев В.А., Жмудь В.А. Фазометр с гетеродинным преобразованием частоты. Патент на изобретение RUS 2225012 19.04.2002
- [11] Гончаренко А.М., Бугров С.В., Жмудь В.А. Мониторинг фазовых приращений прерывистого сигнала. Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. 2007. Т. 2. № 1. С. 61-64.
- [12] Жмудь В.А., Терешкин Д.О., Ляпидевский А.В., Захаров А.В., Гололобов В.И. Повышение быстродействия цифрового прецизионного фазометра. Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2011. № 4 (66). С. 23-34.
- [13] Гончаренко А.М., Жмудь В.А. Прецизионный высокочастотный фазометр для измерений нановибраций. Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2009. № 1 (55). С. 92-98.
- [14] Гончаренко А.М., Жмудь В.А., Лисовой Р.А., Ляпидевский А.В. Разработка радиочастотного измерителя перемещений. Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2011. № 3. С. 83-88.
- [15] Zhmud V.A., Goncharenko A.M. Modern problems of high-precision measurements of the phase differences. В сборнике: Труды XIII Международной научно-технической конференции актуальные проблемы электронного приборостроения. Proceedings: in 12 volumes. 2016. С. 314-318.
- [16] Гончаренко А.М., Бугров С.В., Воевода А.А., Жмудь В.А. Метрологические испытания цифрового прецизионного фазометра. Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2009. № 2 (56). С. 109-114.
- [17] Жмудь В.А. Факторы, ограничивающие быстродействие цифрового фазометра с гетеродинным преобразованием частоты. Автоматика и программная инженерия. 2014. № 3 (9). С. 89-94.
- [18] Жмудь В.А., Воевода А.А., Семибаламут В.М., Гончаренко А.М., Бугров С.В. Фазометр с гетеродинным преобразованием частоты. Патент РФ 2470312. Заявка от 2010-09-28. Опубликовано 20.12.2012. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2470312>
- [19] Zhmud V.A., Tereshkin D.O., Prokhorenko E.V., Liapidevskiy A.V. Precision fault-tolerant phase measurements for radio frequency and laser measurers of the super small displacements. В сборнике: Proceedings RFBR and DST Sponsored "The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics" 2011. С. 117-124.
- [20] Жмудь В.А., Гончаренко А.М. Современные проблемы высокоточного измерения разностей фаз. В сборнике: Актуальные проблемы электронного приборостроения труды XII международной конференции: АПЭИ-2014. 2014. С. 221-225.
- [21] Zhmud V.A., Prokhorenko E.V., Liapidevskiy A.V. The problem of precision fault-tolerance phase measurements and its decision. В сборнике: Proceedings RFBR and DST Sponsored "The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics" 2011. С. 34-38.
- [22] V.A. Orlov, M.D. Parushkin, D.O. Tereshkin, Yu.N. Fomin, V.A. Zhmud. The usability of the laser methods in monitoring of Earth seismic dynamics // Proceedings of DST-RFBR-Sponsored Second Indo-Russian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics. NSTU, Novosibirsk, Russia. 9th – 12th September 2011. Новосибирск, НГТУ. pp. 176–183.
- [23] Orlov V.A., Tereshkin D.O., Fomin Yu.N., Zhmud V.A. The essence of the laser methods and optic setup structures for the monitoring of earth seismic dynamics. В сборнике: Proceedings RFBR and DST Sponsored "The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics" 2011. С. 76-82.
- [24] Жмудь В.А., Терешкин Д., Ляпидевский А.В., Захаров А.В. Радиочастотный метод измерения сверхмалых перемещений и вибраций. Автоматика и программная инженерия. 2012. № 1 (1). С. 17-34.
- [25] Жмудь В.А., Терешкин Д.О., Ляпидевский А.В., Захаров А.В. Модификация радиочастотного измерителя малых перемещений и вибраций. Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2012. № 2 (68). С. 43-56.
- [26] Жмудь В.А., Гололобов В.И., Ляпидевский А.В. Измеритель линейных перемещений. Патент на полезную модель RUS 87252 28.05.2009
- [27] Жмудь В.А., Терешкин Д.О., Ляпидевский А.В., Захаров А.В. Перспективы развития высокоточной метрологии перемещений и вибраций: опыт взаимодействия с вузами. Вестник академии военных наук. 2012. № 3 (40). С. 103-108.
- [28] Zhmud V., Tereshkin D. Modification of software for the control of laser measurer of super small deformations. В сборнике: 8th International Forum on Strategic Technology 2013, IFOST 2013 - Proceedings 2013. С. 260-264.
- [29] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, Yu.N. Fomin. Optoelectronic intellectual systems for monitoring of Earth seismic dynamics: results and developing directions. 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016. Conference proceedings. Book 1. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining.

Volume III. P. 567–574. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2016B13. URL: www.sgem.org.

- [30] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, D.O. Tereshkin. Software structure for the laser sensor of the Earth crust Lunar-Solar tide deformations. 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016. Conference proceedings. Book 1. Science and Technologies in Geology, Eploration and Mining. Volume III. P. 615–622. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2016B13. URL: www.sgem.org.

Improving the Accuracy and Reliability of Measuring the Phase Difference

VADIM ZHMUD, VLADIMIR SEMIBALAMUT, LUBOMIR DIMITROV

Abstract: Measurements of the phase differences of electrical signals are extremely important for metrology. The most accurate measurements are electrical measurements, and the most accurate of electrical measurements are frequency measurements. Indeed, such measurements were previously carried out by the method of counting the number of pulses per unit of time, and this method was the most reliable, less subject to interference and other distortions during processing, transmission and transformation of such a signal in comparison with all other electrical measurements. Therefore, traditionally, scientists for the most accurate sensors of non-electric values have sought to make on the basis of devices that convert these values into frequency. Laser measurement methods are also fundamentally constructed on this principle, in which the measured values are converted into increments of frequencies or phases. Measurements of phase differences are more new and accurate ones in comparison with frequency measurements. Traditional methods of phase measurements are not precise enough; therefore, it is extremely important to develop new methods based on other principles. The paper deals in detail with a new method for measuring phase differences with the highest accuracy. This method is illustrated by examples of signals obtained by numerical modeling.

Key words: phase difference measurement, digital signal processing, simulation, phase meter, metrology, error, accuracy, measurement noise, modulation, offset, interference

REFERENCES

- [1] Goncharenko A.M., Vasil'ev V.A., Zhmud' V.A. Metod povysheniya chuvstvitel'nosti lazernykh vibrometrov. Avtometriya. 2003. T. 39. № 2. S. 43-47.
- [2] Orlov V.A., Parushkin M.D., Tereshkin D.O., Fomin Yu.N., Zhmud V.A. The usability of the laser methods in monitoring of earth seismic dynamics. V sbornike: Proceedings RFBF and DST Sponsored "The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics" 2011. S. 176-183.
- [3] Voevoda A.A., Goncharenko A.M., Zhmud' V.A. Fazometry dlja radiochastotnyh i lazernykh izmeritelej peremeshhenij i vibracij. ch.1. // Nauchnyj vestnik NGTU. 2009. - N 4(37). S.25-32.
- [4] Voevoda A.A., Goncharenko A.M., Zhmud' V.A. Fazometry dlja radiochastotnyh i lazernykh izmeritelej peremeshhenij i vibracij. ch.2. // Nauchnyj vestnik NGTU. 2010. - N 1(38). S.35–74.
- [5] Bugrov S.V., Zhmud' V.A., Prohorenko E.V., Goncharenko A.M. Metody i sredstva nanovibrometrii. V sbornike: Aktual'nye prob-lemy jelektronnogo priboroostro-enija materialy X Mezhdunarodnaja konferencija: v 7 t. 2010. S. 119-123.
- [6] Prohorenko E.V., Bugrov S.V., Zhmud' V.A. Metody vibracionnoj diagnostiki sostojaniya inzhenernykh sooruzhenij, konstrukcij i agregatov. Sbornik nauchnyh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2010. № 2 (60). S. 59-64.
- [7] Borisov B.D., Goncharenko A.M., Vasiliev V.A., Zhmud V.A. Precise measurements of high-stable lasers radiation frequency and phase. V sbornike: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Seventh International Symposium on Laser Metrology Applied to Science, Industry, and Everyday Life. Editors: Y.V. Chugui, S.N. Bagayev, A. Weckenmann, P.H. Osanna. Novosibirsk, 2002. S. 162-166.
- [8] Voevoda A.A., Zhmud V.A., Goncharenko A.M., Gololobov V.I., Liapidevskij A.V. The use of modelling for the speed precision phase meter metrological attestation under the condition of the absence of primary standard measuring devices. V sbornike: Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009 18th IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009. Palma de Mallorca, 2009. S. 160-164.
- [9] Zhmud V., Liapidevskij A. Real time digital super-high accuracy vibrations measurements: methods, devices and mathematical modeling for the metrology. V sbornike: Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control, AsiaMIC 2010. Ser. "Proceedings of the 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control, AsiaMIC 2010" Phuket, 2010. S. 343-347.
- [10] Goncharenko A.M., Vasil'ev V.A., Zhmud' V.A. Fazometr s geterodinnym preobrazovaniem chastoty. Patent na izobrenenie RUS 2225012 19.04.2002
- [11] Goncharenko A.M., Bugrov S.V., Zhmud' V.A. Monitoring fazovyh prirashhenij preryvistogo signala. Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Fizika. 2007. T. 2. № 1. S. 61-64.
- [12] Zhmud' V.A., Tereshkin D.O., Ljapidevskij A.V., Zaharov A.V., Gololobov V.I. Povysenie bystrodejstvija cifrovogo precizionnogo fazometra. Sbornik nauchnyh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2011. № 4 (66). S. 23-34.
- [13] Goncharenko A.M., Zhmud' V.A. Precizionnyj vysokochastotnyj fazometr dlja izmerenij nanovibracij. Sbornik nauchnyh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2009. № 1 (55). S. 92-98.
- [14] Goncharenko A.M., Zhmud' V.A., Lisovoj R.A., Ljapidevskij A.V. Razrabotka radiochastotnogo izmeritelja peremeshhenij. Sbornik nauchnyh trudov

- Novosibirskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2011. № 3. S. 83-88.
- [15] Zhmud V.A., Goncharenko A.M. Modern problems of high-precision measurements of the phase differences. V sbornike: Trudy XIII Mezhdunarodnoj nauchno-tehničeskoj konferencii aktual'nye problemy jelektronnogo priboro-rostroenija. Proceedings: in 12 volumes. 2016. S. 314-318.
- [16] Goncharenko A.M., Bugrov S.V., Voevoda A.A., Zhmud' V.A. Metrologicheskie ispytaniya cifrovogo precizionnogo fazometra. Sbornik nauchnyh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2009. № 2 (56). S. 109-114.
- [17] Zhmud' V.A. Faktory, ogranicivajushhie bistrodejstvie cifrovogo fazometra s geterodinnym preobrazovaniem chastoty. Avtomatika i programnaja inženerija. 2014. № 3 (9). S. 89-94.
- [18] Zhmud' V.A., Voevoda A.A., Semibalamut V.M., Goncharenko A.M., Bugrov S.V. Fazometr s geterodinnym preobrazovaniem chastoty. Patent RF 2470312. Zajavka ot 2010-09-28. Opublikovano 20.12.2012. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2470312>
- [19] Zhmud V.A., Tereshkin D.O., Prokhorenko E.V., Liapidevskij A.V. Precision fault-tolerant phase measurements for radio frequency and laser measurers of the super small displacements. V sbornike: Proceedings RFBR and DST Sponsored "The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics" 2011. S. 117-124.
- [20] Zhmud' V.A., Goncharenko A.M. Sovremennye problemy vysokotochnogo izmerenija raznostej faz. V sbornike: Aktual'nye problemy jelektronnogo priboro-rostroenija trudy XII mezhdunarodnoj konferencii: APJeP-2014. 2014. S. 221-225.
- [21] Zhmud V.A., Prokhorenko E.V., Liapidevskij A.V. The problem of precision fault-tolerance phase measurements and its decision. V sbornike: Proceedings RFBR and DST Sponsored "The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics" 2011. S. 34-38.
- [22] V.A. Orlov, M.D. Parushkin, D.O. Tereshkin, Yu.N. Fomin, V.A. Zhmud. The usability of the laser methods in monitoring of Earth seismic dynamics // Proceedings of DST-RFBR-Sponsored Second Indo-Russian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics. NSTU, Novosibirsk, Russia. 9th – 12th September 2011. Novosibirsk, NGTU. pp. 176–183.
- [23] Orlov V.A., Tereshkin D.O., Fomin Yu.N., Zhmud V.A. The essence of the laser methods and optic setup structures for the monitoring of earth seismic dynamics. V sbornike: Proceedings RFBR and DST Sponsored "The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics" 2011. S. 76-82.
- [24] Zhmud' V.A., Tereshkin D., Ljapidevskij A.V., Zaharov A.V. Radiochastotnyj metod izmerenija sverhmalyh peremeshhenij i vibracij. Avtomatika i programnaja inženerija. 2012. № 1 (1). S. 17-34.
- [25] Zhmud' V.A., Tereshkin D.O., Ljapidevskij A.V., Zaharov A.V. Modifikacija radiochastotnogo izmeritelja malyh peremeshhenij i vibracij. Sbornik nauchnyh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2012. № 2 (68). S. 43-56.
- [26] Zhmud' V.A., Gololobov V.I., Ljapidevskij A.V. Izmeritel' linejnyh peremeshhenij. Patent na poleznuju model' RUS 87252 28.05.2009
- [27] Zhmud' V.A., Tereshkin D.O., Ljapidevskij A.V., Zaharov A.V. Perspektivy razvitija vysoko-točnoj metrologii peremeshhenij i vibracij: opyt vzaimodejstvija s vuzami. Vestnik akademii voennyh nauk. 2012. № 3 (40). S. 103-108.
- [28] Zhmud V., Tereshkin D. Modification of software for the control of laser measurer of super small deformations. V sbornike: 8th International Forum on Strategic Technology 2013, IFOST 2013 - Proceedings 2013. S. 260-264.
- [29] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, Yu.N. Fomin. Optoelectronic intellectual systems for monitoring of Earth seismic dynamics: results and developing directions. 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016. Conference proceedings. Book 1. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. Volume III. P. 567–574. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2016B13. URL: www.sgem.org.
- [30] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, D.O. Tereshkin. Software structure for the laser sensor of the Earth crust Lunar-Solar tide deformations. 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016. Conference proceedings. Book 1. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. Volume III. P. 615–622. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2016B13. URL: www.sgem.org.



Вадим Аркадьевич Жмудь – заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук.
E-mail: oao_nips@bk.ru



Владим Михайлович Семибаламут – директор Сибирского филиала Геофизической Службы СО РАН, кандидат физико-математических наук, автор более 100 научных статей и более 10 патентов. Область интересов включает автоматизацию научных экспериментов, лазерную физику, геофизику, программное обеспечение, оптимизацию, системы сбора и обработки данных.
E-mail: wladim28@yandex.ru.



Любомир Ванков Димитров – проректор Технического университета Софии (София, Болгария), доктор наук, профессор, автор более 200 научных статей. Область исследований: мехатроника, автоматика, микроэлектронные модули и системы и их применение (MEMS).
E-mail: lubomir.dimitrov@tu-sofia.bg