

А. В. Варавин¹, Г. П. Ермак¹, А. С. Васильев¹, А. В. Фатеев¹, Н. В. Варавин², Ф. Жачек², Я. Заяц²

¹Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: ermak@ire.kharkov.ua

²Институт физики плазмы Чешской академии наук

1782/3, ул. За Словаккоу, Прага 8, 18200, Чешская республика

E-mail: zacek@ipp.cas.cz

ТРЕХКАНАЛЬНЫЕ ФАЗОМЕТРЫ НА ОСНОВЕ АМПЛИФАЗОМЕТРОВ AD8302 И ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ МАТРИЦ ДЛЯ ГЕТЕРОДИННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

В работе приведены результаты разработки и исследования двух типов фазометров для двухволнового гетеродинного «однозначного» интерферометра, предназначенного для измерения плотности плазмы в токамаке *COMPASS*. Актуальность разработки таких устройств вызвана необходимостью создания фазометров с возможностью измерения быстрых изменений фазы каждой зондирующей волны и разности их фаз. Плазма зондируется двумя микроволновыми сигналами с различной длиной волны, распространяющимися вдоль идентичных путей навстречу друг другу. Каждый исследуемый сигнал приобретает некоторый сдвиг фазы φ_1 и φ_2 , а «однозначный» интерферометр определяет разницу ($\varphi_1 - \varphi_2$). Измерение фазы осуществляется с помощью трехканальных фазометров: фазометра, основанного на парах амплифазометров AD8302, и фазометра, выполненного на программируемых логических матрицах. Предложены схемные решения и алгоритмы обработки сигналов, позволяющие проводить измерения фазы в пределах $0 \dots 360^\circ$ в реальном масштабе времени. Ил. 14. Библиогр.: 6 назв.

Ключевые слова: фазометр, интерферометр, миллиметровая волна, токамак, амплифазометр AD8302, программируемая логическая матрица.

Микроволновая интерферометрия является одним из наиболее часто используемых методов диагностики плотности плазмы в установках термоядерного синтеза. Для оценки линейной интегральной электронной плотности измеряется сдвиг фазы исследуемой (зондирующей) волны, проходящей через плазму. Величина этого сдвига является функцией электронной плотности и размера плазмы. В большинстве современных интерферометров в качестве индикаторов фазы используются фазометры с аналоговыми и цифровыми фазовыми детекторами разных типов.

Как показано в [1], к современному фазометру как измерительному прибору предъявляются повышенные требования. В отношении системы индикации они сводятся к следующим:

- 1) система индикации не должна вносить заметных погрешностей (не больше 3...5 %);
- 2) система должна обеспечивать необходимое быстродействие;
- 3) фазометр должен обеспечивать линейный участок фазовой характеристики протяженностью 2π ;
- 4) фазометр должен выдавать информацию в виде, удобном для последующего запоминания и цифровой обработки.

Наряду с повышением точности измерения фазы необходимо обеспечить восстановление профиля плотности плазмы по ее поперечному сечению в случае временного срыва сигнала из-за нестабильности плазмы. Эти данные должны быть чрезвычайно надежны для обеспечения безотказной работы системы защитной блокировки токамака.

В работе приведены результаты разработки и исследования характеристик двух типов фазометров для двухчастотного гетеродинного интерферометра, используемого в токамаке *COMPASS* [2]. Особенностью данной схемы интерферометра является возможность измерения как быстрых изменений фазы каждой зондирующей волны в диапазоне $2\pi N$ (при $N \gg 1$), так и разности их фаз, величина которой не превышает значение 2π .

При разработке новых фазометров для интерферометра стояла задача создания системы измерения фазы, работающей в режиме реального времени и включающей в себя систему принятия решения о нахождении величины плотности плазмы в заранее заданных интервалах и управления инжектором нейтральных пучков, применяемым для дополнительного нагрева плазмы. Фазометр должен измерять быстрые изменения фазы зондирующих волн для получения информации о тонких процессах, происходящих в плазме. С этой целью в состав фазометра включена также система сбора и передачи информации для записи результатов измерений на жесткий диск компьютера, что позволяет в режиме разделенного времени проводить исследования процессов, происходивших в плазме.

Для измерения фазы сигналов зондирующей волны были разработаны и исследованы два типа фазометров: фазометр на основе амплифазометров AD8302, описание которого приведено в разд. 2, и фазометр, выполненный на программируемых логических матрицах (ПЛМ), описание которого приведено в разд. 3.

1. Структурная схема и принцип работы «однозначного» гетеродинного интерферометра. На рис. 1 приведена упрощенная структурная схема гетеродинного интерферометра, действующего на токамаке *COMPASS* [2]. Зондирующие сигналы на частотах $f_1 = 131$ ГГц и $f_2 = 133$ ГГц генерируются генераторами на лавинно-пролетных диодах. Каждый генератор используется как источник зондирующих сигналов и как гетеродин для первого преобразования частоты. Опорный сигнал 2 ГГц создается путем смешивания сигналов генераторов, подаваемых через направленные ответвители и развязывающие вентили на отдельный смеситель. Прием сигналов осуществляется гетеродинными приемниками с двойным преобразованием частоты (на рисунке не показаны), начинающимся с первой промежуточной частоты (ПЧ) ($F_{ПЧ1} = 2$ ГГц).

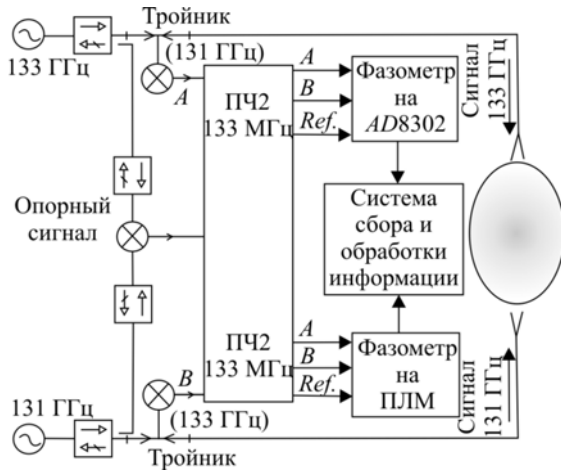


Рис. 1. Структурная схема интерферометра с двумя типами фазометров

Сигналы приемных каналов *A* и *B* и опорный сигнал после второго преобразования частоты ($F_{ПЧ2} = 133$ МГц) поступают на фазометр, выполненный на ПЛМ, и на фазометр, выполненный на интегральных амплифазометрах AD8302. С выходов обоих фазометров сигналы поступают в систему сбора и обработки информации токамака. Результаты обработки сигналов и сравнение результатов измерений приведены в разд. 4.

На рис. 2 схематично показаны сигналы на выходах фазовых детекторов каналов *A* и *B*, соответствующих быстрым изменениям фазы (φ_1 и φ_2), и принцип формирования сигнала $\Delta\varphi = (\varphi_1 - \varphi_2)$ на выходе разностного «однозначного» канала интерферометра. Сигналы в быстрых каналах *A* и *B* дают информацию о сдвигах фаз обеих зондирующих волн относительно частоты опорного сигнала. Они изменяются с периодом повторения 360° и называются «фринджи». В токамаке

COMPASS число таких фринджей за время существования плазмы достигает нескольких десятков.

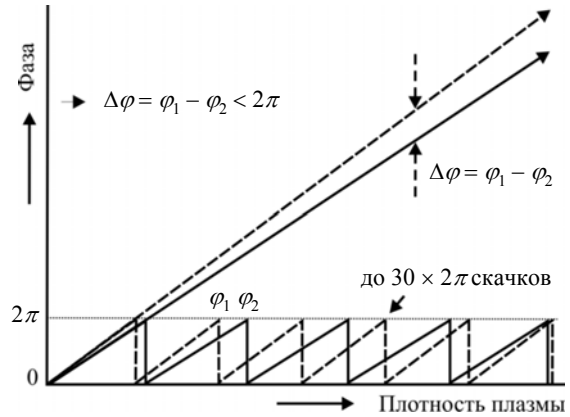


Рис. 2. Сигналы на выходах фазовых детекторов каналов *A* и *B* и «однозначного» канала интерферометра

Как следует из рис. 2, при измерении фазы в каждом из быстрых каналов *A* и *B* интерферометра возникают скачки амплитуды выходных сигналов с периодом 360° . Точное значение фазового набега в этих каналах получается только в результате суммирования всех фринджей за время существования плазмы. Однако в случае возникновения временного срыва сигнала из-за нестабильности плазмы непрерывность измерения фазы в быстрых каналах нарушается (поэтому эти каналы называются «неоднозначными»).

При измерении разности фаз зондирующих волн (при соответствующем выборе частот f_1 и f_2) величина фазового сдвига ($\varphi_1 - \varphi_2$) укладывается в длительность одного фринджа и не превышает 360° . Этот канал измерения называется «однозначным», так как он дает абсолютные значения фазы (т. е. плотности плазмы) в каждый момент времени приема зондирующих волн.

«Однозначный» канал используется в токамаке *COMPASS* для измерения плотности плазмы в реальном масштабе времени, а также для управления инжектором нейтральных пучков (*NBI*), применяемым для дополнительного нагрева плазмы. Неправильный или несвоевременный контроль плотности плазмы может привести к разрушению конструкции токамака. Эти обстоятельства предъявляют повышенные требования к точности и скорости измерения фазы.

2. Трехканальный фазометр на основе интегральных амплифазометров AD8302.

2.1. Описание схемы трехканального фазометра. Для того чтобы учитывать информацию о тонкой структуре процессов, происходящих в плазме, и одновременно получать информацию о плотности плазмы в реальном масштабе времени, была разработана трехканальная система измерения фазы с цифровой обработкой сигналов.

На рис. 3 приведена структурная схема трехканального фазометра на основе интегральных амплифазометров AD8302 [3], измеряющего фазу на частоте 133 МГц.

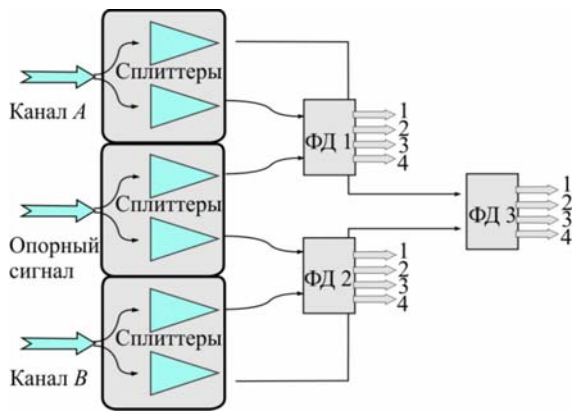


Рис. 3. Структурная схема трехканального фазометра на основе интегральных амплифазометров AD8302: выходы 1, 3 – сигналы фазы; выходы 2, 4 – сигналы амплитуды

Система состоит из трех сплиттер-изоляторов и трех фазовых детекторов. Сигналы с выходов преобразователей частоты и блока опорных частот поступают на сплиттеры и после разветвления на входы фазовых детекторов (ФД) 1–3. Детекторы ФД 1 и ФД 2 измеряют быстрые изменения фазы сигналов φ_1 и φ_2 в пределах $0 \dots 360^\circ$, а детектор ФД 3 измеряет $(\varphi_1 - \varphi_2)$.

Сплиттеры-изоляторы построены по схеме резистивного сплиттера на сосредоточенных элементах и служат для разветвления сигналов и снижения взаимного влияния каналов.

Фазовые детекторы 1–3 выполнены на основе пар амплифазометров AD8302, каждый из которых представляет собой измеритель амплитуды и фазы сигналов с полосой частот до 2,4 ГГц. В результате проектирования была получена система, которая имеет три входа и 12 выходов аналоговых сигналов: выходы 1, 3 – сигналы фазы, выходы 2, 4 – сигналы амплитуды. Структурная схема одного из фазовых детекторов [4] представлена на рис. 4.



Рис. 4. Структурная схема фазового детектора на основе двух амплифазометров AD8302

В его состав входят два амплифазометра AD8302 (АФМ 1 и АФМ 2), линия задержки (ЛЗ),

микроконтроллер со встроенным аналого-цифровой преобразователем (АЦП), энергонезависимая микросхема памяти (EEPROM) для хранения настроек и интерфейс связи (RS-232) с персональным компьютером.

Аналоговые сигналы с выходов 1–4 поступают в микроконтроллер для оцифровки и преобразования из 180-градусного вида к 360-градусному.

Выбор такой схемы фазового детектора обусловлен видом кривой фазовой чувствительности AD8302, приведенной на рис. 5. По оси X отложена разность фаз в опорном и измерительном каналах, по оси Y – амплитуда на выходе фазового канала амплифазометра. Из рисунка видно, что у AD8302 существует неоднозначность определения фазы в диапазоне $0 \dots 180^\circ$ и $0 \dots -180^\circ$. Для устранения этой проблемы были разработаны схема и метод преобразования фазы из 180-градусного вида к 360-градусному [5], описанные в разд. 2.2. Введение в схему второго амплифазометра и линии задержки позволило сместить фазовую характеристику на 90° и проводить измерения в диапазоне $0 \dots 360^\circ$.

Восстановленная информация о фазе и амплитуде сигнала в каждом из каналов передается на компьютер по интерфейсу Ethernet, а сигнал разностного «однозначного» канала после цифровой обработки поступает в систему сбора и обработки данных токамака, где данные сохраняются в файле для последующего анализа.

2.2. Метод преобразования фазы из 180-градусного вида к 360-градусному в фазовом детекторе на основе AD8302. Как было отмечено в разд. 2.1, при создании фазовых детекторов для измерения фазы в диапазоне $0 \dots 360^\circ$ были разработаны схема и метод преобразования фазы из 180-градусного вида в 360-градусный.

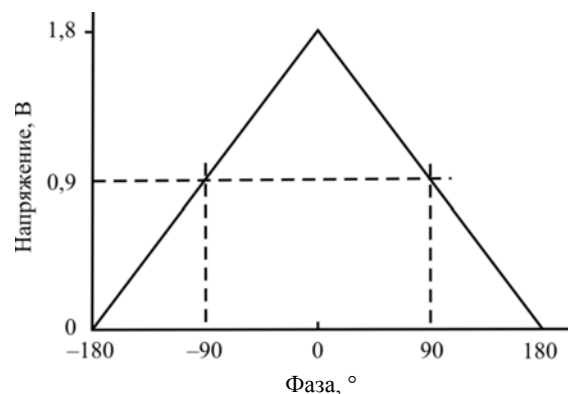


Рис. 5. Идеализированная кривая фазовой чувствительности амплифазометра AD8302

Рассмотрим подробнее алгоритм восстановления фазы по сигналам, получаемым с фазовых детекторов. На рис. 5 представлен график

фазовой характеристики AD8302 при перестройке $-180...180^\circ$. По оси X отложена разность фаз в опорном и измерительном каналах, по оси Y – амплитуда на выходе фазового канала амплифазометра. Из рисунка видно, что характеристика фазового детектора зеркальна относительно нулевой точки. В результате этого возникает неоднозначность определения фазы в диапазонах $0...180^\circ$ и $0...-180^\circ$). Такой эффект приводит к неоднозначности определения фазы в диапазоне $0...360^\circ$.

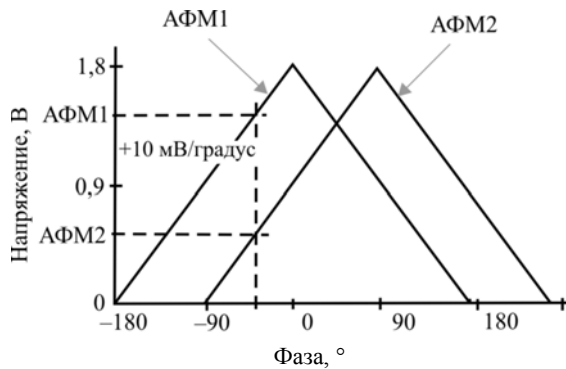


Рис. 6. Кривые фазовой чувствительности двух фазовых детекторов на AD8302

Для устранения этого эффекта в предложенной схеме применяется дополнительный АФМ2, сдвинутый на 90° относительно опорного (рис. 6). Однако из приведенного графика видно, что после суммирования сигналов обоих амплифазометров одному значению фазы соответствуют два значения амплитуды. Для однозначного измерения фазы в диапазоне $0...360^\circ$ с помощью двух амплифазометров AD8302 был разработан и применен суммарно-разностный алгоритм принятия решения. Принцип действия предложенного алгоритма основан на анализе поведения суммарной и разностной характеристик сигналов АФМ1 и АФМ2, приведенных на рис. 7, и корректировке результатов измерений в микропроцессоре фазового детектора с помощью специально разработанной программы. Графики, приведенные на рис. 7, получены в результате компьютерного моделирования. Из рисунка видно, что графики этих зависимостей имеют горизонтальные, нарастающие и спадающие участки. Каждый из этих участков требует своего алгоритма преобразования для получения линейной характеристики в диапазоне $0...360^\circ$.

Рассмотрим подробнее приведенные характеристики. По оси X отложены значения разности фаз в градусах, а по оси Y – значения откликов фазовых детекторов в вольтах. Характеристики АФМ1 и АФМ2 – кривые 1, 2, суммарная и разностная характеристики – кривые 3, 4.

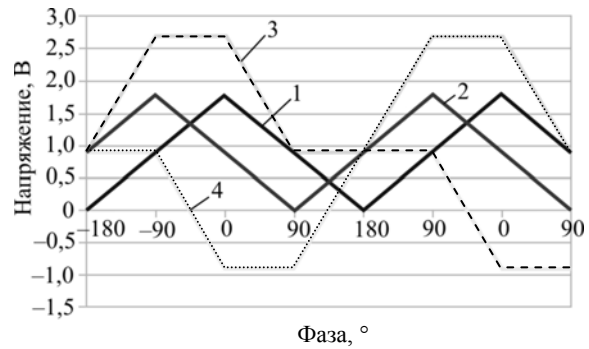


Рис. 7. Фазовые характеристики двух АФМ AD8302 с суммарным и разностным каналами: характеристики АФМ1 и АФМ2 (кривые 1, 2), суммарная и разностная характеристики (кривые 3, 4)

На рис. 7 видны несколько характерных участков.

Участок $-180...-90^\circ$. В данной области сигналы обоих фазовых детекторов АФМ1 и АФМ2 синхронно возрастают (графики 1 и 2), поэтому значение их разности постоянно, а сумма растет. На этом участке нет необходимости производить корректировку результирующей характеристики.

Участок $-90...0^\circ$. В данной области график 1 уже прошел точку перегиба и изменил свою характеристику на обратную. Суммарная характеристика 3 постоянно и находится на максимальном уровне, а разностная характеристика 4 равномерно спадает. На этом участке необходимо произвести инверсию знака результирующей характеристики на противоположный.

Участок $0...90^\circ$. В этой области графики 1 и 2 прошли точки перегибов и имеют спадающую форму фазовой характеристики. Разностная характеристика находится в минимуме, а суммарная характеристика равномерно спадает. Алгоритм инверсии знака должен быть применен к обеим зависимостям.

Участок $90...180^\circ$. В данной области график 1 прошел нижнюю точку излома характеристики и не требует коррекции, а график 2 продолжает приближаться к нижней точке перегиба и требует применения коррекции знака. Суммарная характеристика находится на минимальном уровне, а разностная характеристика нарастает.

По результатам анализа этих характеристик разработан алгоритм идентификации областей и сформулирован набор преобразований, с помощью которых по конкретному значению суммы и разности принимается решение об области, в которой находятся сигналы фазового детектора, и проводится соответствующая коррекция результирующей характеристики.

Совместный анализ двух характеристик позволил реализовать однозначное измерение фазы в диапазоне $0...360^\circ$ с помощью двух AD8302.

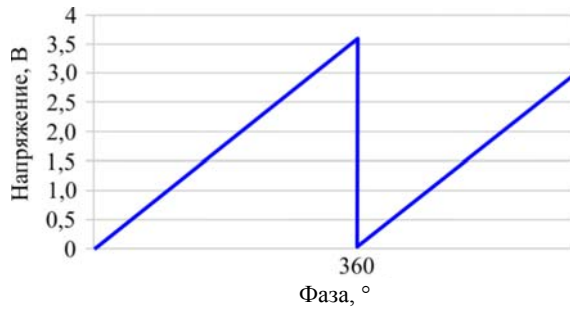


Рис. 8. Результирующая характеристика фазового детектора после применения алгоритма коррекции

На рис. 8 приведена результирующая характеристика фазового детектора в диапазоне $0...700^\circ$ после применения алгоритма коррекции. По оси X отложены значения разности фаз в градусах, а по оси Y – значения отклика фазового детектора в вольтах. Как видно из графика, фазовая характеристика изменяется по линейному закону в диапазоне $0...360^\circ$ градусов. Такое поведение свидетельствует о правильной реализации алгоритма коррекции фазовой характеристики детектора.

2.3. Алгоритм линейаризации фазовой характеристики фазового детектора на основе AD8302. Экспериментально измеренная характеристика фазовых детекторов на основе AD8302, в отличие от идеализированной кривой, приведенной на рис. 5, имеет участки с нелинейной зависимостью. Эта нелинейность различна в различных рабочих областях и наиболее сильно проявляется вблизи точек перегиба фазовой характеристики. В связи с этим для улучшения ее линейности были разработаны метод и алгоритм линейаризации фазовой характеристики.

На рис. 9 приведены характеристика фазового детектора AD8302 в диапазоне $-180...180^\circ$ и график зависимости фазовой ошибки от разности фаз сигналов на входе фазового детектора. На нижней оси отложены значения фазы в градусах. На левой оси отложены значения напряжения на выходе фазового детектора, а на правой оси погрешность в градусах при соответствующем уровне рассогласования.

Из рисунка видно, что максимум погрешности приходится на диапазон $\pm 20^\circ$ и $\pm 160...180^\circ$. В остальных участках погрешность измерения составляет менее $0,1^\circ$.

Если выбрать фазовое запаздывание между измерительными каналами таким, чтобы фаза на АФМ2 запаздывала на 90° , то на максимум точности АФМ1 приходится минимум точности АФМ2. Используя попеременно АФМ1 и АФМ2 (один как опорный, а другой как измерительный), в зависимости от фазового рассогласования, возможно достичь точности $0,1^\circ$ по фазе и $0,1$ дБ по амплитуде во всем диапазоне работы фазового детектора.

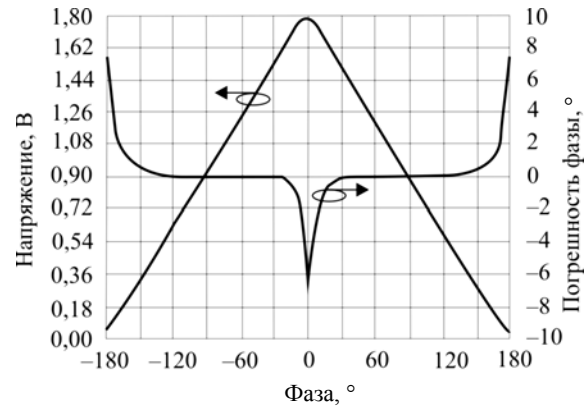


Рис. 9. Зависимости фазовой чувствительности и фазовой ошибки амплифазометра AD8302 от разности фаз сигналов

Данная методика была применена при реализации алгоритма калибровки на основе весовых функций. Были сформированы две функции, у которых минимумы соответствуют точкам перегибов каждой из фазовых характеристик, а протяженные максимумы – наиболее линейным участкам. При этом сумма функций всегда была равна 1. Восстановленные фазовые характеристики после компенсации начального фазового сдвига подвергались весовому суммированию, причем в качестве весов использовались сформированные функции.

После создания метода устранения неоднозначности и формирования требований к использованию результатов, полученных с пары фазовых детекторов, были проведены измерения формы сигналов на их выходе с использованием тестовых сигналов. На вход пары фазовых детекторов подавались сигналы двух очень близких частот; в результате на одном из входов формировался сигнал, имеющий постоянно набегающую фазу относительно опорного сигнала. При таком методе тестирования период повторения фазовой характеристики во временной области равен обратной величине от разностной частоты пары тестовых сигналов.

На рис. 10 приведены фазовые характеристики, построенные по результатам измерений двух АФМ AD8302 с суммарным и разностным каналами при подаче на их входы двух близких частот. Кривые 1, 2 обозначают характеристики прямого и сдвинутого каналов, а кривые 3, 4 – суммарную и разностную характеристики.

По оси X отложены значения разности фаз в отчетах, а по оси Y – значения отклика фазового детектора в относительных величинах.

На графике видны искажения формы сигналов вблизи точек перегибов фазовой характеристики и искажения горизонтальных участков графиков суммы и разности. Искажения горизонтальных участков также свидетельствуют о наличии нелинейности, особенно сильно проявляющейся вблизи точек перегиба.

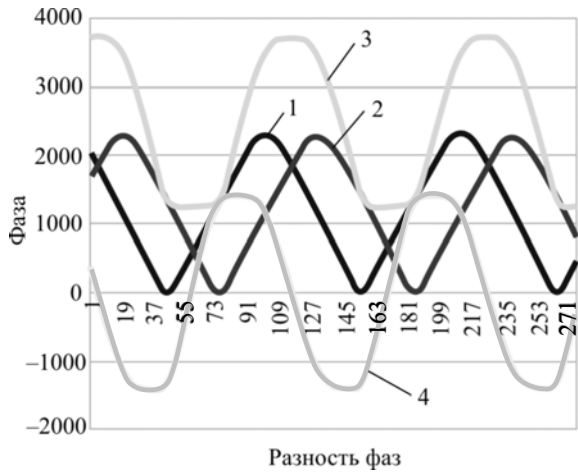


Рис. 10. Фазовые характеристики двух АФМ AD8302 с суммарным и разностным каналами, измеренные при подаче на их входы двух близких частот

Очевидно, что алгоритм, основанный на поиске конкретного значения суммы или разности, в такой ситуации работать не будет. В цифровой алгоритм поиска состояния системы был введен дистанционно настраиваемый доверительный интервал для максимума/минимума, суммы или разности.

Применение настраиваемого интервала позволило с необходимой точностью определить состояние фазового детектора для реализации алгоритма восстановления фазовой характеристики. В результате такой калибровки нелинейность фазовой характеристики удалось снизить до значения $\leq 1^\circ$ в диапазоне $0 \dots 360^\circ$ и получить характеристику, аналогичную приведенной на рис. 8.

Программа отображения позволяет в режиме реального времени просматривать поведение фазовых каналов, сохранять данные на диск, а также устанавливать параметры системы принятия решения.

Весь набор значений амплитуд и фаз выходных сигналов в цифровом виде передается по каналу Ethernet на персональный компьютер, где данные сохраняются в файле для последующего анализа.

3. Трехканальный фазометр на основе программируемых логических матриц. Результаты экспериментальных измерений плотности плазмы с использованием трехканальных фазометров на основе AD8302 продемонстрировали хорошие эксплуатационные характеристики и возможность применения таких фазометров в интерферометрах. Однако изменения в системе нагрева плазмы в токамаке COMPASS сформулировали новые требования к интерферометру, в том числе и к характеристикам фазометра. В связи с трудностью реализации этих требований на аналоговых фазовых детекторах на основе AD8302 был проведен поиск решения этих задач на более современной элементной базе. Одним из таких решений является построение фазовых детекторов на логических элементах – программируемых логических матрицах (ПЛМ). В результате трехканальный фазометр был построен на шести фазовых детекторах, размещенных внутри ПЛМ XC2C128 фирмы Xilinx. На рис. 11 представлена структурная схема трехканального фазометра на основе ПЛМ для работы в составе интерферометра 2-мм диапазона [5, 6].

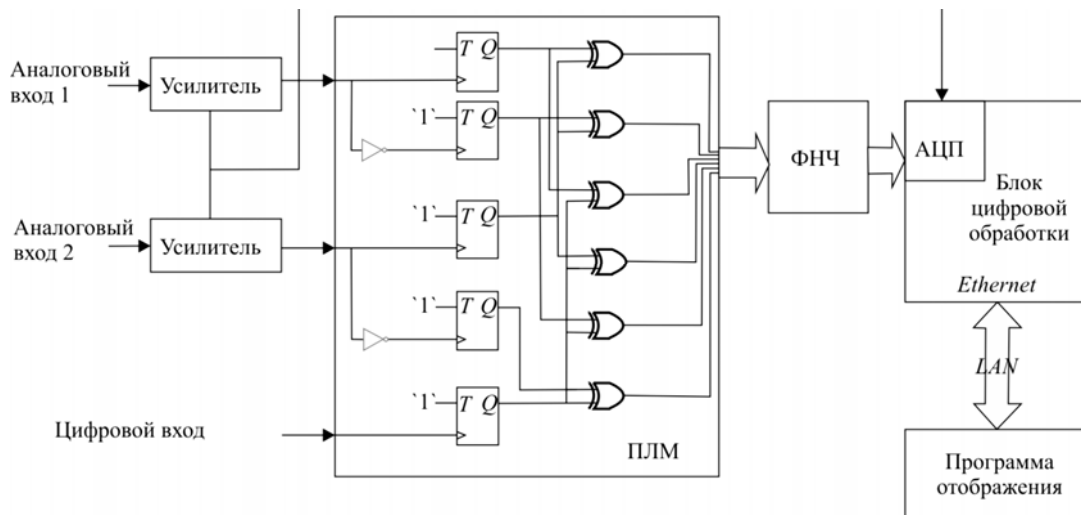


Рис. 11. Структурная схема трехканального фазометра на основе ПЛМ

В состав фазометра включены входные логарифмические усилители-ограничители AD8309 для усиления сигналов и преобразования их в

дискретную форму. Сигнал на выходе усилителя-ограничителя представляет собой меандр с фазой, повторяющей фазу входного сигнала в широком

диапазоне входных амплитуд. Далее расположен многоканальный цифровой фазовый детектор, собранный на ПЛМ. Структурно фазовый детектор представляет собой три пары 360-градусных фазовых детекторов, работающих в параллельном включении. На один из детекторов внутри каждой пары сигнал подается со сдвижкой в 180° . При последующей цифровой обработке такое включение позволяет проводить линейризацию фазовой характеристики фазометра и устранять ее нелинейности, возникающие вблизи точек 0 и 360° .

Фазовые детекторы выбранного типа при подаче им на вход прямоугольных сигналов с некоторым сдвигом фаз формируют на своем выходе сигнал с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), в котором скважность сигнала пропорциональна разности фаз в измеряемых каналах. В виду сложности реализации схемы прямого измерения скважности на частоте 133 МГц с приемлемой точностью была использована схема, в которой ШИМ-сигнал подается на фильтр нижних частот и преобразуется в аналоговый сигнал, амплитуда которого пропорциональна скважности сигнала. Полоса фильтра нижних частот определяет предельное быстродействие системы (в данном случае она выбрана равной 10 кГц).

Выбор частоты среза фильтра определяется исходя из следующих соображений. Чем выше частота среза фильтра, тем большее количество паразитных импульсных составляющих сигнала ШИМ попадает в выходной аналоговый сигнал. При понижении частоты среза фильтра происходит улучшение соотношения сигнал/шум измеряемого сигнала. С другой стороны, полоса фильтра есть обратная величина к постоянной времени реакции системы на возмущение. Следовательно, чем выше частота среза, тем более скоростная реакция может быть получена. Исходя из баланса этих величин делается выбор полосы среза выходного фильтра.

Сигнал с выхода фильтра подается на АЦП микроконтроллера *LM3S9B95*, где происходит преобразование напряжения, пропорционального фазовому сдвигу в цифровую форму. Данные о фазовых сдвигах подвергаются суммарно-разностному анализу и линейризации. Основа алгоритма суммарно-разностного анализа была описана в разд. 2.2. Необходимость использования суммарно-разностного алгоритма обусловлена наличием фазовых ошибок в диапазоне $0...30^\circ$ и $320...360^\circ$. В результате на основе анализа пар сигналов формируется значение фазы с последующим приведением фазовой кривой к виду монотонно нарастающей функции.

Это значение выдается в цифро-аналоговый преобразователь для работы системы сбора данных токамака. Весь набор фаз в цифровом

виде передается по каналу *Ethernet* на персональный компьютер, где данные сохраняются в файле для последующего анализа. На основании заранее заложенного алгоритма анализа сигнала разностного канала проводится оценка плотности плазмы и принимается решение о включении или отключении инжекторов нейтрального потока.

Все процессы (оцифровка, пересчет фазы, линейризация и принятие решения с выдачей соответствующих управляющих сигналов) происходят в режиме реального масштаба времени.

Основным отличием нового фазометра является применение детекторов с периодом повторения фазовой характеристики, равным 360° , в результате чего для получения непрерывной фазовой характеристики (в отличие от фазового детектора на основе *AD8302*) отпала необходимость процесса восстановления фазовой характеристики. Применение 360-градусного фазового детектора позволило для алгоритма линейризации применить фазосдвигатель на 180° . Фазовый сдвиг на 180° в цифровой технике – это инверсия. Этот процесс не зависит от частоты сигнала и, следовательно, в отличие от фазосдвигателей на коаксиальных ЛЗ, не накладывает дополнительных ограничений на частотный диапазон фазового детектора по входному сигналу.

4. Экспериментальное исследование и калибровка фазовой характеристики трехканального фазометра на основе ПЛМ. Трехканальный фазометр на основе ПЛМ был установлен в схему интерферометра (см. рис. 1), где на его входы после второго преобразования частоты ($F_{ПЧ2} = 133$ МГц) поступали сигналы приемных каналов *A* и *B* и опорного канала. Это позволило проводить одновременное тестирование и сравнение характеристик фазометров на основе ПЛМ и на базе *AD8302*.

С целью тестирования работы фазометров был разработан стенд для экспериментального исследования и калибровки фазовой характеристики фазометра.

На рис. 12 приведено фото измерительного стенда, состоящего из интерферометра (1), подвижного металлического уголкового отражателя (2) и устройства перемещения (3), установленного на массивной направляющей.

В процессе эксперимента сигналы интерферометра на частотах 133 и 131 ГГц излучались в направлении уголкового отражателя, который перемещался по направляющей. Перемещения отражателя позволили смоделировать взаимный фазовый сдвиг между каналами 133 и 131 ГГц.

При проведении эксперимента уголкового отражателя был расположен так, чтобы отражать сигнал обоих каналов интерферометра.

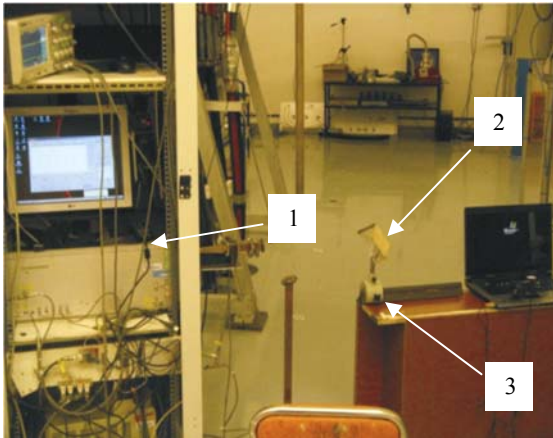


Рис. 12. Стенд для калировки трехканального фазометра на основе ПЛМ

Применение уголкового отражателя стало необходимым, так как изменение фазы только в

одном из каналов не позволяло получить достаточный фазовый набег между каналами. Для калировки фазового детектора необходимо было получить взаимный фазовый сдвиг между двумя каналами интерферометра больше чем 360° . Для получения требуемой разности фаз отражатель перемещался по направлению от интерферометра и обратно вдоль направляющей на расстояние 150 мм, что соответствовало взаимному фазовому набегу между каналами интерферометра до 720° .

На рис. 13 представлены осциллограммы сигналов, измеренные на выходах трехканального фазометра на основе ПЛМ при перемещении уголкового отражателя. Сигналы на выходах трехканального фазометра на AD8302 имеют аналогичный вид. По горизонтальной оси отложены отсчеты временной реализации, по вертикальной оси отклик фазовых детекторов в относительных величинах.

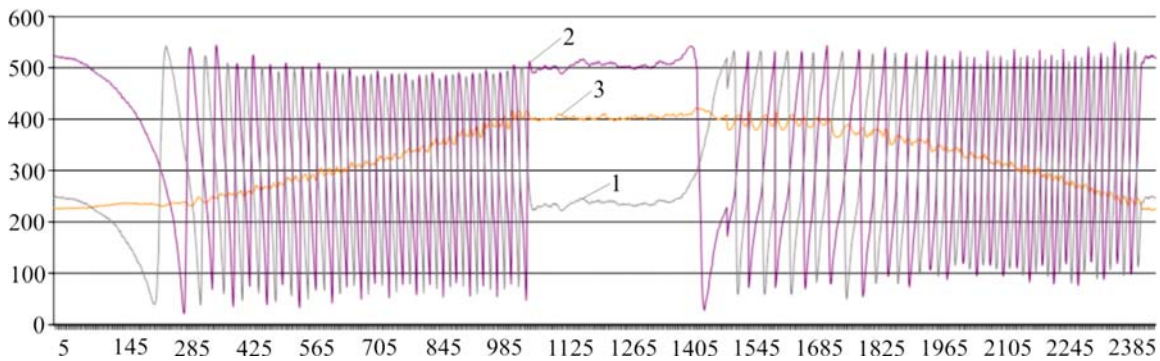


Рис. 13. Осциллограммы сигналов, измеренные на выходах трехканального фазометра на основе ПЛМ при перемещении уголкового отражателя: 1 – канал A; 2 – канал B; 3 – «однозначный» канал

Сигналы 1 и 2 измерены на выходах быстрых фазовых каналов A и B, а на графике 3 показано поведение разностного однозначного фазового канала. На осциллограммах 1 и 2 видны скачки фазы в каналах A и B, возникающие при прохождении значения фазы через 360° . Сигнал разностного канала ведет себя стабильно, без скачков при значениях набег фазы более чем 30 оборотов фазы в быстрых каналах.

При выбранном соотношении частот двух генераторов разностный канал имеет фазовую чувствительность в 32 раза меньшую, чем прямые каналы, что соответствует периоду повторения фазовой характеристики $11\,520^\circ$. Период повторения фазовой характеристики этого взаимного канала равен периоду повторения фазы несущей частоты, умноженному на отношение частот зондирующего сигнала к разности частот генераторов СВЧ.

При тестировании трехканального фазометра на основе ПЛМ в составе интерферометра

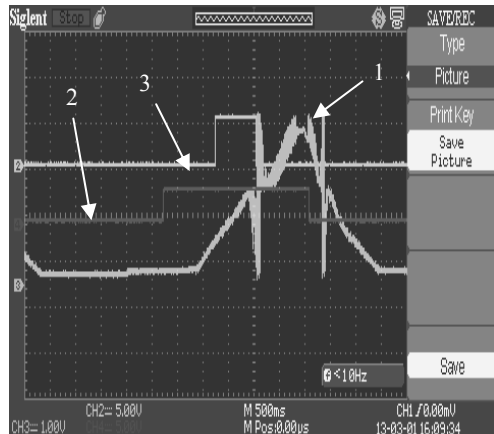
был выявлен ряд ошибок в определении плотности плазмы. Эти неточности были связаны с ошибками в работе суммарно-разностного алгоритма обработки сигналов фазовых детекторов. С целью корректировки алгоритма работы фазовых детекторов были проведены тестовые измерения сигналов на выходе «однозначного» канала, результаты которых были использованы для калировки фазовой характеристики фазометра.

На рис. 14, а приведены осциллограммы сигнала, измеренного на выходе «однозначного» канала интерферометра до калировки алгоритма (кривая 1), а также импульс включения плазмы (кривая 2) и импульс включения источника дополнительного нагрева плазмы (кривая 3). Как видно из рис. 14, а, фазовые ошибки возникали в пределах $\pm 20^\circ$ в областях $+180^\circ$ и -180° . Эти ошибки были связаны с некорректным выбором коэффициентов при применении суммарно-разностного алгоритма корректировки фазовых ошибок детектора. Благодаря использованию уголкового

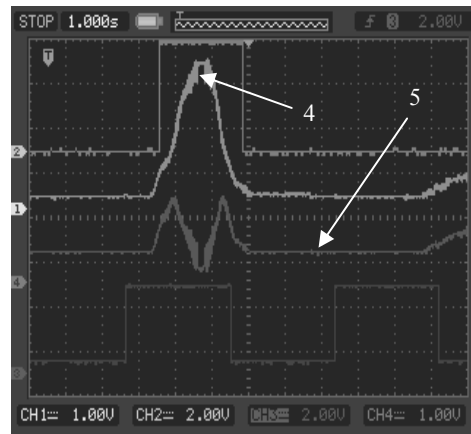
отражателя стало возможно определить периодичность появления этих ошибок и скорректировать выбор коэффициентов для суммарно-разностного анализа фазовых кривых.

На рис. 14, б представлен сигнал «однозначного» канала после коррекции алгоритма вычислений (кривая 4). Как видно из графика сигнала

ла «однозначного» канала, внесенные исправления повысили линейность фазовой характеристики фазометра в диапазоне $0...360^\circ$. Кривая 5 иллюстрирует сигнал, измеренный на выходе «однозначного» канала фазометра на AD8302 в режиме без преобразования фазы из 180-градусного вида к 360-градусному.



а)



б)

Рис. 14. Осциллограммы сигналов, измеренных на выходе «однозначного» канала интерферометра до (а) и после калибровки фазовой характеристики фазометра (б)

В эксперименте этот канал использовался для сравнения результатов применения алгоритма корректировки фазовых ошибок фазометра на основе ПЛИМ.

В результате тестирования и калибровки фазометра в составе интерферометра были выявлены и скорректированы ошибки в фазовых измерениях детекторов и определена периодичность появления этих ошибок. Также были исправлены ошибки во внутренней системе сбора данных интерферометра.

Выводы. Таким образом, в работе приведены результаты разработки и исследования двух типов трехканальных фазометров для двухчастотного «однозначного» гетеродинного интерферометра: фазометра, основанного на парах амплифазометров AD8302, и фазометра, выполненного на ПЛИМ.

Предложены схемные решения и метод преобразования фазы из 180-градусного вида к 360-градусному в фазометре, основанном на амплифазометрах AD8302, позволившие реализовать измерения фазы в пределах $0...360^\circ$ в реальном масштабе времени.

Разработан метод линеаризации фазовой характеристики фазометров и алгоритм калибровки на основе весовых функций, позволившие снизить нелинейность фазовой характеристики до значения $\leq 1^\circ$.

Проведены экспериментальное исследование и калибровка фазовой характеристики

трехканального фазометра на основе ПЛИМ. Полученные результаты дают возможность проводить точные фазовые измерения в диапазоне $0...360^\circ$.

Испытания фазометров в составе интерферометра продемонстрировали возможность измерения плотности плазмы без неоднозначностей определения фазового сдвига при прохождении волн интерферометра через плазму.

Описанные фазометры являются частью системы, работающей в режиме реального времени, с функциями принятия решения о нахождении величины плотности плазмы в заранее заданных интервалах и выдачи сигнала на разогрев или охлаждение плазмы. В состав фазометров включена также система, записывающая множественные параметры на жесткий диск компьютера, что позволяет в режиме разделенного времени проводить исследования процессов, происходивших в плазме.

Библиографический список

1. Малых Н. И. Интерферометрия высокотемпературной плазмы в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах волн // Диагностика плазмы / Н. И. Малых, Е. П. Горбунов, Е. С. Ямпольский; под ред. М. И. Пергамента. – М.: Энергоиздат, 1980. – Вып.4. – С. 125–141.
2. Two-wavelength millimeter wave “unambiguous” heterodyne interferometer / G. P. Ermak, A. V. Varavin, A. S. Vasilev et al. // Proc. 8th Int. Kharkov Symp. on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW’13). – Kharkov, 2013. – P. 529–531.

3. AD8302, analog device, rev. A, 2002 [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8302.pdf. – Загл. с экрана.
4. The phase detectors based on AD8302 for millimeter wave heterodyne interferometer / G. P. Ermak, A. V. Varavin, A. S. Vasilev et al. // Proc. 22nd Int. Crimean Conference on Microwaves and Telecommunication Technology (CriMiCo'2012). – Sevastopol, 2012. – P. 827–828.
5. Modernization and calibration of intrferometer of tokamak "COMPASS" / M. Varavin, J. Zajac, F. Zacek et al. // Proc. 8th Int. Kharkov Symp. on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'13). – Kharkov, 2013. – P. 571–575.
6. New design of microwave interferometer for tokamak COMPASS / M. Varavin, J. Zajac, F. Zacek et al. // Telecommunications and Radio Engineering. – 2014. – 73, N 10. – P. 935–942.

Рукопись поступила 16.12.15.

A. V. Varavin, G. P. Ermak, A. S. Vasilev,
A. S. Fateev, N. Varavin, F. Zacek, J. Zajac

THREE-CHANNEL PHASE METERS BASED ON THE AD8302 AND FIELD PROGRAMMABLE GATE ARRAYS FOR HETERODYNE MILLIMETER WAVE INTERFEROMETER

The paper presents the results of research and development of two types of phase meters for heterodyne two-wave "unambiguous" interferometer designed to measure the plasma density in tokamak COMPASS. The aim of this work is the creation of a phase meter capable of measuring fast phase changes of each probing wave, and their phase difference. Plasma is probed by two microwave signals with different wavelengths propagating along identical paths to meet each other. Each analyzed signal acquires a certain phase shift φ_1 and φ_2 , and the "unambiguous" interferometer determines the difference ($\varphi_1 - \varphi_2$). The phase measure-

ment is carried out by using three-channel phase meters: a phase meter based on the pairs of the AD8302 and a phase meter based on field programmable gate arrays (FPGA). The proposed circuit decisions and algorithms of signal processing allow to measure phases in the range $0 \dots 360^\circ$ in real time.

Key words: phase meter, interferometer, millimeter wave, tokamak, AD8302, programmable gate array.

А. В. Варавін, Г. П. Єрмак, О. С. Васильєв,
О. В. Фатєєв, Н. В. Варавін, Ф. Жачек, Я. Заяц

ТРИКАНАЛЬНІ ФАЗОМЕТРИ НА ОСНОВІ АМПЛІФАЗОМЕТРІВ AD8302 І ПРОГРАМОВАНИХ ЛОГІЧНИХ МАТРИЦЬ ДЛЯ ГЕТЕРОДИННОГО ІНТЕРФЕРОМЕТРА МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

У роботі наведено результати розробки і дослідження двох типів фазометрів для двохвильового гетеродинного «однозначного» інтерферометра, що призначений для вимірювання густини плазми в установці токамак COMPASS. Актуальність розробки таких пристроїв викликана необхідністю створення фазометрів з можливістю вимірювання швидких змін фази кожної зондуєчої хвилі і різниці їх фаз. Плазма зондується двома мікрохвильовими сигналами з різною довжиною хвилі, що розповсюджуються вздовж ідентичних шляхів назустріч один одному. Кожен досліджуваний сигнал набуває різний зсув фази φ_1 і φ_2 , а «однозначний» інтерферометр визначає різницю ($\varphi_1 - \varphi_2$). Вимірювання фази здійснюється з допомогою триканальних фазометрів: фазометра, заснованого на парах ампліфазометрів AD8302, і фазометра, виконаного на програмованих логічних матрицях. Запропоновані схемні розв'язання й алгоритми обробки сигналів дозволяють проводити вимірювання фази в межах $0 \dots 360^\circ$ в реальному масштабі часу.

Ключові слова: фазометр, інтерферометр, міліметрова хвиля, токамак, ампліфазометр AD8302, програмована логічна матриця.