



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(51) МПК

G01K 11/00 (2006.01)

G01K 13/02 (2006.01)

G01K 15/00 (2006.01)

G01R 29/08 (2006.01)

G01R 29/26 (2006.01)

G01R 35/00 (2006.01)

G01J 5/00 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

G01K 11/006 (2019.05); G01K 2013/024 (2019.05); G01K 15/005 (2019.05); G01R 29/0807 (2019.05); G01R 29/26 (2019.05); G01R 35/005 (2019.05); G01J 2005/0048 (2019.05)

(21)(22) Заявка: 2018144404, 14.12.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
14.12.2018

Дата регистрации:
28.08.2019

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 14.12.2018

(45) Опубликовано: 28.08.2019 Бюл. № 25

Адрес для переписки:

607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира,
37, ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", зам. директора
Департамента инновационно-проектной
деятельности и корпоративного управления-
начальнику УИСНТИ В.Е. Миронову

(72) Автор(ы):

Иконников Владимир Николаевич (RU),
Кананов Владимир Анатольевич (RU),
Корнев Николай Сергеевич (RU),
Минеев Кирилл Владимирович (RU),
Назаров Андрей Викторович (RU),
Орехов Юрий Иванович (RU),
Седов Александр Анатольевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Российская Федерация, от имени которой
выступает Государственная корпорация по
атомной энергии "Росатом" (RU),
Федеральное государственное унитарное
предприятие "Российский федеральный
ядерный центр - Всероссийский
научно-исследовательский институт
экспериментальной физики" (ФГУП
"РФЯЦ-ВНИИЭФ") (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: Ракуть И.В., Пелюшенко С.А. и др.
Исследование неоднородностей протяженных
сред методом пассивно-активной радиометрии
в мм диапазоне длин волн. Изв. вузов.
Радиофизика, т. 48, номер 10-11, 2005, С. 890-
898. Бережной В.А., Кужель В.И., Остапчук
А.Ю. Многоканальная измерительная система
для калибровки высокотемпературных
генераторов шума. (см. прод.)

(54) Способ дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса, развивающегося в радиопрозрачном объекте, устройство для его осуществления, способы калибровки устройства и генератора шума в составе этого устройства

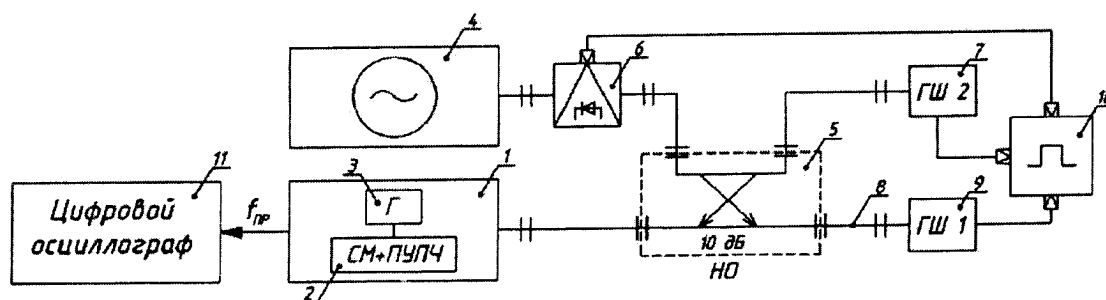
(57) Реферат:

Изобретение относится к технике радиофизических измерений и может быть использовано для измерения в миллиметровом участке спектра собственного теплового излучения разнообразных быстропротекающих газодинамических процессов, развивающихся в

радиопрозрачных объектах. Заявлен способ дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса, развивающегося в радиопрозрачном объекте, устройство для его осуществления, способы калибровки устройства и генератора шума в

составе этого устройства. В способе, включающем синхронное измерение средней мощности теплового электромагнитного излучения исследуемого объекта и электромагнитного излучения генератора подсветки, отраженного от поверхности объекта, по полученным результатам этих измерений с использованием определенных заранее калибровочных констант вычисляют значение термодинамической температуры. Радиопрозрачный объект подготавливают путем нанесения на передний торец просветляющего диэлектрического слоя, а на задний торец - отражающей поверхности. В устройстве, состоящем из микроволнового радиоприемного устройства супергетеродинного типа, генератор сигнала подсветки выполнен с возможностью генерирования узкополосного сигнала. Ко

второму плечу вторичной линии направленного ответвителя подключен широкополосный генератор шума с известным, приведенным к антенному входу, значением шумовой температуры, шумовой сигнал которого поступает на вход радиоприемного устройства, а к управляющим входам электрически управляемого аттенюатора и генератора шума подключены выходы генератора, синхронно управляющего параметрами их сигналов. Технический результат - обеспечение возможности дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающих процессов, развивающихся в радиопрозрачных объектах с предельно возможным временным разрешением. 4 н.п. ф-лы, 4 ил.



ФИГ. 1

(56) (продолжение):

Технология и конструирование в электронной аппаратуре, номер 3, 2003, С. 27-28. RU 2439594 C1, 10.01.2012. US 7121719 B2, 17.10.2006. RU 2485462 C2, 20.06.2013. DE 2803480 A, 02.08.1979. SU 1626210 A1, 07.02.1991. CN 101285862 A, 15.10.2008.



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.

G01K 11/00 (2006.01)

G01K 13/02 (2006.01)

G01K 15/00 (2006.01)

G01R 29/08 (2006.01)

G01R 29/26 (2006.01)

G01R 35/00 (2006.01)

G01J 5/00 (2006.01)

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(52) CPC

G01K 11/006 (2019.05); G01K 2013/024 (2019.05); G01K 15/005 (2019.05); G01R 29/0807 (2019.05); G01R 29/26 (2019.05); G01R 35/005 (2019.05); G01J 2005/0048 (2019.05)

(21)(22) Application: 2018144404, 14.12.2018

(24) Effective date for property rights:
14.12.2018

Registration date:
28.08.2019

Priority:

(22) Date of filing: 14.12.2018

(45) Date of publication: 28.08.2019 Bull. № 25

Mail address:

607188, Nizhegorodskaya obl., g. Sarov, pr. Mira,
37, FGUP "RFYATS-VNIEF", zam. direktora
Departamenta innovatsionno-proektnoj
deyatelnosti i korporativnogo upravleniya-
nachalniku UISNTI V.E. Mironovu

(72) Inventor(s):

Ikonnikov Vladimir Nikolaevich (RU),
Kanakov Vladimir Anatolevich (RU),
Kornev Nikolaj Sergeevich (RU),
Mineev Kirill Vladimirovich (RU),
Nazarov Andrej Viktorovich (RU),
Orekhov Yuriy Ivanovich (RU),
Sedov Aleksandr Anatolevich (RU)

(73) Proprietor(s):

Rossiyskaya Federatsiya, ot imeni kotoroj
vystupaet Gosudarstvennaya korporatsiya po
atomnoj energii "Rosatom" (RU),
Federalnoe gosudarstvennoe unitarnoe
predpriyatie "Rossijskij federalnyj yadernyj
tsentr - Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij
institut eksperimental'noj fiziki" (FGUP
"RFYATS-VNIEF") (RU)

(54) METHOD FOR REMOTE DETERMINATION OF THERMODYNAMIC TEMPERATURE OF FAST-FLOWING PROCESS DEVELOPING IN RADIOTRANSSPARENT OBJECT, DEVICE FOR ITS IMPLEMENTATION, METHODS OF CALIBRATING DEVICE AND NOISE GENERATOR AS PART OF THIS DEVICE

(57) Abstract:

FIELD: physics.

SUBSTANCE: invention relates to the technique of radiophysical measurements and can be used to measure in the millimeter section of the spectrum of intrinsic thermal radiation of various high-speed gas-dynamic processes developing in radio-transparent objects. Disclosed is a method for remote determination of thermodynamic temperature of a fast-flowing process developing in a radio-transparent object, a device for its implementation, methods of calibrating a device and a noise generator in this device. In method involving synchronous measurement of average power of thermal electromagnetic radiation of analyzed object and electromagnetic radiation of illumination generator reflected from surface of object, thermodynamic temperature value is calculated from obtained results

of said measurements using predetermined calibration constants. Radio transparent substance is prepared by applying an antireflection dielectric layer on the front end face, and a reflecting surface on the rear end face. In a device consisting of a microwave radio receiver of a superheterodyne type, the backlight signal generator is configured to generate a narrowband signal. To the second arm of the secondary line of the directional coupler, a broadband noise generator is connected with a noise temperature value, which is known to be connected to the antenna input, noise signal of which is transmitted to input of radio receiving device, and outputs of generator synchronously controlling parameters of their signals are connected to control inputs of electrically controlled attenuator and noise generator.

RU 2 6 9 8 5 2 3 C 1

RU 2698523 C1



Изобретение относится к технике радиофизических измерений, в частности, к способам и устройствам измерения в миллиметровом (мм) участке спектра собственного теплового излучения разнообразных быстропротекающих газодинамических процессов, развивающихся в радиопрозрачных объектах, в частности, измерения температуры движущихся фронтов горения топлива или детонационных фронтов во взрывчатом веществе; к радиометрическим исследованиям импульсного микроволнового излучения, генерируемого различными физическими источниками.

Дистанционная непрерывная оценка тепловых характеристик быстропротекающих процессов возможна с помощью КВЧ приемников (радиометров), измеряющих мощность излучения объекта, принятого приемной антенной радиометра, в заданной полосе частот, что эквивалентно яркостной температуре $T_{\text{я}}$ при соответствующих калибровках эталонными генераторами шума.

Для определения термодинамической температуры $T_{\text{Т}}$ объекта наряду с яркостной температурой необходимо знание коэффициента поглощения объекта или коэффициента отражения R от поверхности объекта.

Для быстропротекающих процессов, компактно локализованных в пространстве и времени, что характерно для широкого класса газодинамических процессов, инициируемых в радиопрозрачных объектах, определение $T_{\text{я}}$ и R возможно в активно-пассивном режиме радиометра, при этом, способ дистанционного определения термодинамической температуры объекта должен включать одновременное измерение микроволновым радиометром средней мощности теплового шумового излучения объекта, в котором развивается исследуемый процесс, и средней мощности отраженного от поверхности объекта сигнала генератора сигнала подсветки в рабочей полосе частот радиометра и по полученным результатам этих измерений с использованием определенных заранее калибровочных констант вычисление термодинамической температуры.

Однако в отличие от сравнительно медленных процессов, в которых указанный известный способ допускает неодновременное измерение $T_{\text{я}}$ и R , сравнительно большое время накопления сигналов и не критичен ко времени между калибровкой прибора и самим измерением, и реализуемых в известных аналогах (Канакоев В.А., Кисляков А.Г. Измерение температуры тела контактным радиометром со встроенными эталонами / Изв. вузов; Радиофизика, №2, 1999, С. 168-175; Красильников А.А. Компенсационный спектрорадиометр 3 мм диапазона длин волн / Изв. вузов. Радиофизика, №6, 1995, С. 608-614), при исследовании быстропротекающих процессов особую значимость приобретает знание временных и пространственных распределений температуры в объектах исследования. Это требует повышения чувствительности, быстродействия и расширения динамического диапазона радиометрических приемников, а также адекватной калибровки средств измерения с учетом быстропротекающего характера процессов.

Поэтому способ дистанционного определения $T_{\text{Т}}$ должен включать также высокоскоростную регистрацию принимаемого сигнала, разделение сигнала на временные участки, соответствующие интервалам временного разрешения измерений, разделение шумового сигнала теплового излучения объекта и сигнала подсветки в пределах каждого временного интервала и вычисление $T_{\text{я}}$ и R с учетом калибровки радиометра по эталону шумовой температуры и эталонной отражающей поверхности с коэффициентом отражения близким к единице.

Значительная часть погрешности измерений яркостной температуры

газодинамического объекта определяется изменением параметров радиометра за время, прошедшее между калибровкой прибора и самим экспериментом. Исключение этой части погрешности возможно лишь при реализации схемы калибровки активно-пассивного радиометра, когда калибровочные константы определяются непосредственно перед проведением газодинамического эксперимента при исключении необходимости коммутации элементов схемы измерений и временной задержке между актом калибровки и измерением порядка единиц миллисекунд.

Рассматриваемые быстропротекающие процессы характеризуются временем протекания ($10^{-6} \dots 10^{-2}$) с, поэтому постоянная времени τ радиометра должна быть не более 1 мкс. При таких τ для обеспечения точности измерения T_d с точностью (50...100) К полоса частот радиометра должна быть не менее 1 ГГц.

В обзоре (Горелик А.Г., Семенова Т.А. и др. Радиометрическое исследование импульсного микроволнового излучения / Инженерная физика, №1, 2002, С. 2-10) показано, что радиометр миллиметрового диапазона длин волн с высокой чувствительностью, динамическим диапазоном и точностью измерений может быть реализован по схеме радиоприемного устройства супергетеродинного типа. Для исследования быстропротекающих процессов должен применяться радиометр компенсационного типа.

В том же обзоре приведен пример такого супергетеродинного радиометра 8 мм диапазона для регистрации импульсного микроволнового излучения с длительностями от 1 мкс до 0,01 с с временем интегрирования 1 мкс, обеспечивающего интервал измеряемых яркостных температур ($300 \dots 10^6$) К. Рассмотренные в данном обзоре способы измерений, устройство и способы калибровки являются аналогами предлагаемого изобретения.

Определение излучательной способности объекта по измерению коэффициента отражения, необходимое для пересчета яркостной температуры в термодинамическую и требующее активного зондирования объекта, не предусмотрено в рассматриваемом радиометре и не может быть реализовано без кардинального изменения схемы устройства.

Известен аналог предлагаемого устройства - микроволновый одноканальный радиоинтерферометр с волноведущим зондирующим трактом (Патент RU 2569581 C2. Орехов Ю.И., Марков А.В., Корнев Н.С. и др. Микроволновый одноканальный радиоинтерферометр с волноведущим зондирующим трактом), содержащий приемопередающее устройство (ППУ), выполненное по супергетеродинной схеме с разделенными микроволновыми выходами передатчика и приемника с направленным ответвителем в зондирующем тракте, обеспечивающим зондирование объекта узкополосным сигналом передатчика и прием отраженного сигнала широкополосным приемником ППУ.

Такая схема устройства имеет ряд характерных признаков, необходимых для реализации активно-пассивной радиометрии. ППУ выполнено по супергетеродинной схеме с широкополосным приемником, с узкополосным сигналом передатчика, который может выполнять роль генератора сигнала подсветки, и связано с волноводным приемным трактом через направленный ответвитель. Однако в рассматриваемом устройстве при включении передатчика приемное устройство не может выполнить функции радиометра, т.к. будет заблокировано мощным отраженным от поверхности исследуемого объекта сигналом на частоте передатчика.

При выключенном передатчике рассматриваемое ППУ, по сути, представляет схему

компенсационного радиометра, которая сможет функционировать в пассивном режиме.

Рассматриваемый микроволновый радиоинтерферометр предназначен для измерения перемещений объектов при быстропротекающих процессах, имеет на входе приемника широкополосный преобразователь частоты с полосой пропускания не менее 2 ГГц, благодаря чему при работе в пассивном режиме может быть обеспечена постоянная времени не более 1 мкс, а регистрация сигнала возможна как после аналоговых квадратичных детекторов, так и на выходе промежуточной частоты ~1 ГГц, что может обеспечивать высокоскоростную регистрацию сигналов.

Известен активно-пассивный радиометр миллиметрового диапазона волн для исследования характеристик обратного рассеяния неоднородных сред (Ракуть И.В., Пелюшенко С.А. и др. Исследование неоднородностей протяженных сред методом пассивно-активной радиометрии в мм диапазоне длин волн / Изв. вузов. Радиофизика, т. 48, №10-11, 2005, С. 890-898), в котором для зондирования объекта и приема отраженного сигнала через антенну радиометра в тракт радиометра между антенной и приемником через направленный ответвитель подключен генератор подсветки в виде широкополосного генератора шума. В тракт генератора сигнала подсветки включен π -модулятор для модуляции сигнала подсветки. В этом случае в активно-пассивном режиме мощность принятого от объекта сигнала пропорциональна коэффициенту обратного рассеяния среды и эквивалентной температуре шумового сигнала подсветки. Для определения коэффициента отражения зондирующего сигнала используется металлический диск.

Рассмотренный способ активно-пассивной радиометрии, устройство, реализующее этот способ и способы калибровки устройства приняты за прототип.

Введение в тракт радиометра через направленный ответвитель сигнала генератора сигнала подсветки обеспечивает активно-пассивный режим работы радиометра, может обеспечивать одновременное измерение средней мощности шумового излучения объекта, в котором развивается исследуемый процесс и средней мощности отраженного от объекта сигнала генератора сигнала подсветки, полоса частот которого соответствует рабочей полосе радиометра.

Введенный в тракт генератора сигнала подсветки π -модулятор в режиме переменного аттенуатора может обеспечивать регулировку уровня мощности сигнала подсветки и калибровку активного канала по эталонному отражателю.

Однако рассматриваемый радиометр в целом не может быть использован для определения термодинамической температуры при быстропротекающих газодинамических процессах по следующим причинам:

- в радиометре использован модуляционный принцип работы и применен приемник прямого усиления с достаточно узкой полосой частот и соответственно с постоянной времени, неприемлемой для быстропротекающих процессов;
- невозможно разделение двух непрерывных спектров одновременно принятых радиометром отраженного шумового сигнала генератора сигнала подсветки и собственного шумового сигнала излучения объекта.

Использование в рассматриваемом устройстве узкополосного сигнала генератора сигнала подсветки позволит провести спектральное разделение суммарного сигнала, необходимое для определения T_j и R исследуемого объекта.

Известен способ калибровки высокотемпературных генераторов шума миллиметрового диапазона длин волн (Бережной В.А., Кужель В.И., Остапчук А.Ю. Многоканальная измерительная система для калибровки высокотемпературных генераторов шума / Технология и конструирование в электронной аппаратуре, №3,

2003, С. 27-28), в котором измеряемая радиометром величина шумовой температуры генератора шума сравнивается с мерой эталонной шумовой температуры. Радиометр измеряет три уровня шумовой температуры, два из которых соответствуют двум уровням меры эталонной шумовой температуры, а третий уровень соответствует шумовой температуре измеряемого генератора шума. Переключение между трактами, содержащими измеряемый генератор шума и меру эталонной шумовой температуры в устройстве, реализующем данный способ, происходит с помощью двухпозиционного СВЧ-переключателя. В качестве меры эталонной шумовой температуры используется криогенный тепловой генератор шума.

Рассмотренный способ калибровки генераторов шума принят за прототип.

Однако рассматриваемый способ калибровки генератора шума не может быть использован, т.к. двухпозиционный СВЧ-переключатель не предполагает одновременную работу двух входных трактов на один выход, тем самым исключает возможность калибровки устройства, реализующего измерение термодинамической температуры быстропротекающих процессов, на фоне сигнала подсветки.

Использование вместо двухпозиционного переключателя направленного ответвителя совместно с электрически переключаемыми генераторами шума способно обеспечить калибровку устройства, реализующего измерение термодинамической температуры быстропротекающих процессов, и калибровку генератора шума в составе этого устройства.

Рассмотренные аналоги и прототипы не могут обеспечить измерения термодинамической температуры быстропротекающих процессов, однако обладают рядом признаков, совокупность которых необходима, но недостаточна для обеспечения способа измерений и устройства для его реализации в активно-пассивном режиме и адекватных способов его калибровки, учитывающих особенности быстропротекающих процессов.

Техническим результатом предложенного изобретения является возможность дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающих процессов, допускающая наряду с определением яркостной температуры возможность одновременного и однозначного определения излучательной способности, в первую очередь, в радиопрозрачных объектах, в которых инициируется исследуемый газодинамический процесс, с предельно возможным временным разрешением, необходимым динамическим диапазоном и повышением точности измерений при реализации способа калибровки устройства, когда калибровочные константы определяются непосредственно перед газодинамическим экспериментом с минимальным временем задержки при исключении необходимости коммутации элементов схемы измерений.

Технический результат достигается тем, что в способе дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса, развивающегося в радиопрозрачном объекте, включающем измерение с помощью микроволнового радиометра супергетеродинного типа средней мощности теплового электромагнитного микроволнового шумового излучения исследуемого объекта, в котором развивается исследуемый процесс, измерение с помощью того же радиометра и генератора сигнала подсветки, полоса частот которого соответствует рабочей полосе частот радиометра, средней мощности электромагнитного микроволнового излучения подсветки, отраженного от поверхности объекта, и по полученным результатам этих измерений с использованием определенных заранее калибровочных констант вычисляют значение термодинамической температуры, подготавливают радиопрозрачный объект путем

нанесения на передний торец четвертьволнового просветляющего диэлектрического слоя, а на задний торец - эталонной отражающей поверхности. Измерения средней мощности теплового излучения исследуемого объекта и средней мощности отраженного от исследуемого объекта излучения подсветки проводят синхронно, для чего в качестве

5 радиометра используют широкополосное приемное устройство с высокоскоростной цифровой регистрацией принимаемого сигнала на промежуточной частоте. Мощность сигнала подсветки устанавливают на уровне, обеспечивающем отсутствие нелинейных искажений в приемном устройстве, регистрируют в цифровом виде сигнал

10 промежуточной частоты приемного устройства, соответствующий сумме теплового излучения исследуемого объекта и отраженного от поверхности объекта сигнала подсветки, затем, при отложенной цифровой обработке зарегистрированного сигнала, разделяют сигнал на идущие друг за другом последовательности, соответствующие интервалам временного разрешения измерений, вычисляют спектры мощности каждого из полученных участков и разделяют между собой по форме спектральных

15 характеристик узкополосный сигнал подсветки и шумовой сигнал с непрерывной формой спектра мощности, соответствующий тепловому излучению объекта, проводят фильтрацию сигналов, приравнивая нулю значения мощности связанных с внутрисистемными помехами спектральных компонент высокого уровня, которые нельзя отнести к спектру сигнала подсветки, затем, суммируя отдельно мощности

20 спектральных компонент, образующих дискретный спектр сигнала подсветки, и спектральных компонент, образующих непрерывный спектр шумового сигнала, вычисляют мощность принятого сигнала подсветки и мощность принятого шумового сигнала, расчет яркостной температуры исследуемого быстропротекающего процесса производят для каждого интервала временного разрешения по результатам вычислений

25 мощности принятого шумового сигнала с учетом зависимости калибровочных констант радиоприемного устройства от зарегистрированного уровня мощности принятого сигнала подсветки, расчет отражательной способности исследуемого объекта производят для каждого интервала временного разрешения по результатам вычислений мощности принятого сигнала подсветки с учетом калибровочного значения мощности принятого

30 сигнала подсветки при отражении от эталонной отражающей поверхности, расчет термодинамической температуры исследуемого быстропротекающего процесса, развивающегося в радиопрозрачном объекте, производится для каждого интервала временного разрешения по результатам расчетов яркостной температуры и отражательной способности исследуемого объекта.

35 Технический результат достигается тем, что в устройстве осуществления способа дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса, развивающегося в радиопрозрачном объекте, состоящем из микроволнового радиоприемного устройства супергетеродинного типа, подключенного через первичный канал направленного ответвителя к измерительной антенне, которая направлена на

40 ближнюю внешнюю границу радиопрозрачного исследуемого объекта и генератора сигнала подсветки, подключенного через электрически управляемый аттенюатор к первому плечу вторичной линии направленного ответвителя таким образом, чтобы ответвленный сигнал подсветки поступал на измерительную антенну, генератор сигнала подсветки выполнен с возможностью генерирования узкополосного сигнала, а ко

45 второму плечу вторичной линии направленного ответвителя подключен широкополосный генератор шума с известным, приведенным к антенному входу, значением шумовой температуры, шумовой сигнал которого поступает на вход радиоприемного устройства, а к управляющим входам электрически управляемого

аттенюатора и генератора шума подключены выходы генератора, синхронно управляющего параметрами их сигналов.

Технический результат достигается тем, что способ калибровки генератора шума, входящего в состав устройства для осуществления способа дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса, для достижения высокой точности измерения эквивалентной шумовой температуры, приведенной к измерительному входу тракта радиоприемного устройства, состоит из следующей последовательности действий: к плечу первичной линии направленного ответвителя подключают эталонный генератор шума с известным значением шумовой температуры на его выходе, вводят максимальное ослабление электрически управляемого аттенюатора в составе устройства, поочередно включают и выключают оба генератора шума, регистрируют выходные сигналы радиоприемного устройства, при отложенной цифровой обработке составляют линейное соотношение между значениями шумовых температур, соответствующих включенному состоянию только генератора шума, входящего в состав устройства, включенному состоянию только эталонного генератора шума, выключенному состоянию обоих генераторов шума, и значениями соответствующих выходных сигналов радиоприемного устройства, вычисляют шумовую температуру генератора шума в составе устройства, приведенную к антенному входу устройства.

Технический результат достигается тем, что способ калибровки устройства для осуществления способа дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса для повышения точности измерения термодинамической температуры за счет учета зависимости калибровочных констант от уровня мощности принятого сигнала подсветки и минимизации времени между калибровкой устройства и измерением состоит из следующей последовательности действий: вводят ослабление электрически управляемого аттенюатора в составе устройства, достаточное для обеспечения отсутствия нелинейных искажений в радиоприемном устройстве, фиксируют выходные сигналы радиоприемного устройства, затем вводят максимальное ослабление электрически управляемого аттенюатора для подавления сигнала подсветки, периодически включают и выключают генератор шума в составе устройства, фиксируют выходные сигналы радиоприемного устройства при включенном и выключенном генераторе шума, указанную процедуру проводят еще при нескольких промежуточных значениях ослабления электрически управляемого аттенюатора, при отложенной цифровой обработке вычисляют мощность зарегистрированного отраженного сигнала подсветки от эталонной отражающей поверхности, размещенной на дальней от измерительной антенны внешней границе радиопрозрачного исследуемого объекта, и принимают полученное значение соответствующим отражательной способности исследуемого объекта, равной единице, вычисляют мощность зарегистрированных сигналов радиоприемного устройства при включенном и выключенном генераторе шума и максимальном ослаблении сигнала подсветки, устанавливают линейную связь между известными значениями приведенной к антенному входу шумовой температуры генератора шума во включенном и выключенном состояниях, полученных при калибровке генератора шума, входящего в состав устройства для осуществления способа дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса, коэффициенты этой линейной связи принимают за калибровочные константы устройства для осуществления способа дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса в отсутствие сигнала подсветки и указанную процедуру проводят еще при нескольких промежуточных значениях

ослабления электрически управляемого аттенюатора, вычисляют мощность принятого сигнала подсветки и мощность принятого шумового сигнала, вычисляют калибровочные константы устройства для осуществления способа дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса для каждого зарегистрированного значения мощности сигнала подсветки, составляют дискретные зависимости значений калибровочных констант от уровня мощности принятого сигнала подсветки и аппроксимируют эти зависимости непрерывными функциями, указанную процедуру управления параметрами электрически управляемого аттенюатора и генератора шума в составе устройства повторяют периодически до начала измерения температуры исследуемого объекта, непосредственно перед началом измерения температуры исследуемого объекта выключают генератор шума и устанавливают ослабление электрически управляемого аттенюатора, минимально достаточное для обеспечения отсутствия нелинейных искажений в радиоприемном устройстве, и для обработки результатов измерений термодинамической температуры исследуемого объекта используют результаты калибровки, полученные на последнем полном периоде калибровки устройства.

Способ дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса, развивающегося в радиопрозрачном объекте, устройство для его осуществления и способы калибровки этого устройства поясняются следующими чертежами.

Фигура 1 - схема устройства для осуществления способа калибровки генератора шума, входящего в состав устройства дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса;

Фигура 2 - схема устройства для осуществления способа дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса и его калибровки непосредственно перед измерением термодинамической температуры объекта;

Фигура 3 - амплитуда сигнала генератора узкополосного сигнала подсветки при калибровке и измерении;

Фигура 4 - экспериментальная зависимость от времени яркостной температуры, модуля коэффициента отражения и термодинамической температуры фронта быстропротекающего процесса.

На фиг. 1 и фиг. 2 цифрами обозначены:

1 - микроволновое радиоприемное устройство супергетеродинного типа;

2 - смеситель с широкополосным предварительным усилителем промежуточной частоты;

3 - гетеродин;

4 - генератор узкополосного сигнала подсветки;

5 - направленный ответвитель;

6 - электрически управляемый аттенюатор;

7 - широкополосный генератор шума;

8 - волноводный приемный тракт;

9 - эталонный широкополосный генератор шума;

10 - генератор;

11 - цифровой осциллограф;

12 - измерительная антенна;

13 - радиопрозрачный объект;

14 - фольга;

15 - взрывное устройство.

На фиг. 1 представлена схема предлагаемого устройства. Устройство состоит из микроволнового радиоприемного устройства супергетеродинного типа 1, содержащего на входе смеситель 2 с широкополосным предварительным усилителем и гетеродин 3. В состав устройства входит генератор узкополосного сигнала подсветки 4, полоса частот которого соответствует рабочей полосе частот радиоприемного устройства 1.

Генератор узкополосного сигнала подсветки 4 подключен к первому плечу вторичной линии направленного ответвителя 5 через электрически управляемый аттенюатор 6.

Ко второму плечу вторичной линии направленного ответвителя 5 подключен широкополосный генератор шума 7, шумовой сигнал которого поступает на вход радиоприемного устройства 1. Вход радиоприемного устройства 1 подключен через первичный канал направленного ответвителя 5 к волноводному приемному тракту 8, к которому, при реализации способа калибровки генератора шума 7, присоединяется эталонный широкополосный генератор шума 9 с известным значением шумовой температуры на его выходе. К управляющим входам аттенюатора 6 и генераторов шума 7 и 9 подключены выходы генератора 10, синхронно управляющие параметрами их сигналов.

Высокоскоростная цифровая регистрация сигналов промежуточной частоты на выходе радиоприемного устройства 1 осуществляется цифровым осциллографом 11.

Способ калибровки генератора шума, входящего в состав устройства для реализации дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса реализуется следующим образом. Сигнал генератора сигнала подсветки 4 максимально ослабляют электрически управляемым аттенюатором 6, на вход радиоприемного устройства 1 с рабочей полосой частот не менее 1 ГГц и временем разрешения выходного сигнала не более 1 микросекунды подаются сигналы миллисекундной длительности генератора шума 9 (ГШ 1) с известной шумовой температурой и генератора шума 7 (ГШ 2), на выходе радиоприемного устройства 1 получается периодическая последовательность сигналов при выключенных ГШ (U_0), включенном только ГШ 1 (U_1), включенном только ГШ 2 (U_2), полученные сигналы регистрируются на цифровом осциллографе 11 с полосой пропускания равной 2,5 ГГц и частотой дискретизации равной 5 ГГц, и далее при отложенной цифровой обработке вычисляются спектры мощности зарегистрированных микросекундных последовательностей, выполняются линейная фильтрация всех спектральных компонент вне входной полосы частот приемника, нелинейная фильтрация самых мощных спектральных компонент, вычисляются средние значения мощностей сигналов оставшихся спектральных компонент при выключенных ГШ 1 и ГШ 2, включенном ГШ 1, включенном ГШ 2. Полученные Γ значения мощностей соответствуют яркостным температурам эталонов T_0 , T_1 и температуре ГШ 2, приведенной к антенному входу устройства, которая вычисляется по формуле:

$$T_{2\text{приведенная}} = k\overline{P}_2 - b, \text{ где } k = \frac{T_1 - T_0}{\overline{P}_2 - \overline{P}_0}, \quad b = k\overline{P}_1 - T_1,$$

где $\overline{P}_1$, $\overline{P}_0$, $\overline{P}_2$ - значения средней мощности сигнала при включенном ГШ 1, выключенных ГШ, включенном ГШ 2 соответственно, T_1 - паспортное значение средней шумовой температуры ГШ 1, T_0 - температура окружающей среды.

На фиг. 2 представлена схема устройства для осуществления способа дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса в

радиопрозрачном объекте и его калибровки перед измерением.

Способ калибровки устройства для осуществления способа дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса осуществляется следующим образом. В отличие от схемы калибровки генератора шума, входящего в состав устройства фиг. 1, в схеме фиг. 2 генератор шума 9 (ГШ 1) отсоединяется от выхода волноводного приемного тракта 8 и на его место устанавливается измерительная антенна 12, направленная на радиопрозрачный объект 13. Торцы радиопрозрачного объекта 13 со стороны, противоположной волноводному приемному тракту, должны быть плоскими, металлизированы фольгой 14, используемой в качестве отражающей поверхности, и располагаться перпендикулярно оси измерительной антенны 12.

Калибровка устройства согласно схеме фиг. 2 поясняется графиком амплитуды сигнала генератора сигнала подсветки 4, изображенным на фиг. 3, и производится следующим образом.

На управляющий вход электрически управляемого аттенюатора 6 подается ступенчато изменяющееся напряжение с периодом 1 мс и длительностью каждой ступеньки 0,2 мс в указанном периоде, обеспечивающее ряд вносимых аттенюатором 6 ослаблений отраженного от радиопрозрачного объекта 13 с фольгой 14 сигнала подсветки с амплитудой U_a на выходе радиоприемного устройства 1 от максимального, соответствующего $U_a = 0$, до $U_a \text{ max}$, соответствующего допустимому уровню нелинейных искажений радиоприемного устройства 1, при этом генератором 10 синхронно с управлением электрически управляемым аттенюатором 6 производится управление генератором шума 7 (ГШ 2), обеспечивающее включение ГШ 2 в течение первого периода и выключение ГШ 2 в течение второго периода изменяющегося тока электрически управляемого аттенюатора 6, далее выполняется калибровка по двум последним периодам управляющего тока электрически управляемого аттенюатора 6, обеспечивающего получение пяти пар калибровочных сигналов на выходе радиоприемного устройства 1 при включенном и выключенном ГШ 2 для различных ослаблений электрически управляемого аттенюатора 6, полученные сигналы регистрируются на цифровом осциллографе 11, при отложенной цифровой обработке вычисляются значения амплитуды сигнала подсветки, производится линейная и нелинейная обработка сигнала по приведенному выше алгоритму, вычисляются средние значения мощностей спектральных компонент $\overline{P_{on j}}$ и $\overline{P_{off j}}$ для каждого j-го уровня ослабления сигнала при включенном и выключенном ГШ 2, далее по значениям T_0 и $T_{2\text{приведенная}}$, полученным при калибровке генератора шума 7, входящего в состав устройства, и вычисленным $\overline{P_{on j}}$ и $\overline{P_{off j}}$ по формулам:

$$k = \frac{T_{2\text{приведенная}} - T_0}{\overline{P_{on}} - \overline{P_{off}}}, \quad b = \frac{\overline{P_{off}} T_{2\text{приведенная}} - \overline{P_{on}} T_0}{\overline{P_{on}} - \overline{P_{off}}}$$

рассчитываются калибровочные константы как функции амплитуды сигнала подсветки $k(U_{a i})$ и $b(U_{a i})$ и вычисляются аппроксимирующие полиномы третьего порядка $k(U_a)$ и $b(U_a)$.

Устройство, осуществляющее способ дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса, работает следующим образом. Непосредственно перед началом измерений генератор шума 7 (ГШ 2)

переводится в выключенное состояние, а электрически управляемый аттенуатор 6 устанавливается в состояние с ослаблением, обеспечивающим требуемый динамический диапазон измерений U_a в интервале $0 < U_a < U_{a \max}$.

Быстропротекающий детонационный процесс в радиопрозрачном объекте 13 инициируется взрывным устройством 15, полученные сигналы регистрируются на цифровом осциллографе 11.

На временном интервале, занятом измерительной информацией, при отложенной цифровой обработке измеряют амплитуду сигнала подсветки U_{ai} , с помощью аппроксимирующих полиномов $k(U_a)$ и $b(U_a)$ вычисляют калибровочные константы $k(U_{ai})$ и $b(U_{ai})$, квадрат модуля коэффициента отражения от фронта исследуемого процесса по формуле:

$$|R_i|^2 = \left| \frac{U_{ai}}{U_{a \max}} \right|^2,$$

где i - номер микросекундного интервала отсчета, при этом принимают значение модуля коэффициента отражения $|R| = 1$, соответствующее амплитуде сигнала подсветки $U_{a \max}$ от эталонной отражающей поверхности, выполненной из фольги 14, металлизующей торец радиопрозрачного объекта 13.

При сравнимых коэффициентах отражения от ближней к измерительной антенне 12 границы исследуемого радиопрозрачного объекта 13 и от фольги 14 на противоположной границе объекта на ближней границе радиопрозрачного объекта 13 наносится четвертьволновый просветляющий слой диэлектрика.

Сигналы в каждом микросекундном интервале подвергаются описанной выше обработке и вычислению средних значений мощностей оставшихся спектральных компонент $\overline{P_{xi}}$, значения яркостной (T_{xi}) и термодинамической (T_i) температур фронта быстропротекающего процесса в исследуемом объекте вычисляются по формулам:

$$T_{xi} = 2(k(U_{ai})\overline{P_{xi}} - b(U_{ai})), \quad T_i = \frac{T_{xi}}{1 - |R_i|^2}.$$

На фиг. 4 в качестве примера показаны экспериментально измеренные зависимости яркостной температуры T_y , модуля коэффициента отражения $|R|$ фронта детонации, распространяющегося в радиопрозрачном объекте 13, от времени протекания детонационного процесса и рассчитанные значения термодинамической температуры T_T . Значения яркостной и термодинамической температуры отложены по левой вертикальной оси в Кельвинах, значения модуля коэффициента отражения - по правой вертикальной оси.

До момента времени $t = 98$ мкс от начала измерений регистрируется тепловой шум окружающей среды, отраженный от фольги 14 на дальнем торце исследуемого радиопрозрачного объекта 13, находящегося при той же температуре окружающей среды. Начиная с момента времени $t = 98$ мкс, когда скользящее окно усреднения соприкасается с участком сигнала, соответствующим началу детонации в радиопрозрачном объекте 13, наблюдается рост яркостной температуры и затем - стационарный участок. При этом радиометр фиксирует стабильную яркостную температуру фронта детонации при его распространении в объеме радиопрозрачного взрывчатого вещества, что соответствует режиму распространения стационарной детонации. Средняя яркостная температура детонационного фронта $T_y = (2156 \pm 354)$

К. С момента времени $t = 104$ мкс начинается резкий рост яркостной температуры, обусловленный выходом детонации на поверхность радиопрозрачного объекта 13 и ударным разогревом прилегающего к ней воздуха. При этом происходит разрушение измерительной антенны 12.

До момента времени $t = 98$ мкс от начала измерений регистрируется постоянное значение модуля коэффициента отражения, соответствующее отражению от неподвижной фольги 14, закрепленной на дальнем торце радиопрозрачного объекта 13. Это значение модуля коэффициента отражения принимается за единицу. На интервале времени от 98 до 104 мкс фиксируется постоянное значение модуля коэффициента отражения от фронта детонации, равное $(0,367 \pm 0,007)$ (по полю), что также соответствует режиму распространения стационарной детонации. В момент времени $t = 104$ мкс начинается разрушение измерительной антенны 12. С этого момента результаты измерения модуля коэффициента отражения теряют смысл и в дальнейшем не используются.

Термодинамическая температура T_T объекта исследования до начала исследуемого процесса равна температуре окружающей среды, а с момента начала процесса на 98 микросекунде определяется через яркостную температуру T_j и модуль коэффициента отражения по мощности $|R|^2$ соотношением:

$$T_T = \frac{T_j}{1 - |R|^2}.$$

С учетом измеренных значений яркостной температуры и модуля коэффициента отражения среднее значение термодинамической температуры детонационного фронта $T_T = (2490 \pm 409)$ К. Так как вклад теплового излучения окружающей среды, отраженного от фронта детонации, в общий результат измерения температуры составляет не более 40 К или 10% погрешности измерения, им можно пренебречь. С момента времени 104 мкс, после разрушения измерительной антенны 12, оценка термодинамической температуры фронта детонации перестает иметь смысл и на графике не отображается.

(57) Формула изобретения

1. Способ дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса, развивающегося в радиопрозрачном объекте, включающий следующую последовательность действий: измеряют с помощью микроволнового радиометра супергетеродинного типа среднюю мощность теплового электромагнитного микроволнового шумового излучения исследуемого объекта, в котором развивается исследуемый процесс, измеряют с помощью того же радиометра и генератора сигнала подсветки, полоса частот которого соответствует рабочей полосе частот радиометра, среднюю мощность электромагнитного микроволнового излучения подсветки, отраженного от поверхности объекта, и по полученным результатам этих измерений с использованием определенных заранее калибровочных констант вычисляют значение термодинамической температуры, отличающийся тем, что способ включает подготовку радиопрозрачного объекта путем нанесения на передний торец четвертьволнового просветляющего диэлектрического слоя, а на задний торец - эталонной отражающей поверхности, измерение средней мощности теплового излучения исследуемого объекта и средней мощности отраженного от исследуемого объекта излучения подсветки проводят синхронно, для чего в качестве радиометра используют

широкополосное приемное устройство с высокоскоростной цифровой регистрацией принимаемого сигнала на промежуточной частоте, мощность сигнала подсветки устанавливаются на уровне, обеспечивающем отсутствие нелинейных искажений в приемном устройстве, регистрируют в цифровом виде сигнал промежуточной частоты приемного устройства, соответствующий сумме теплового излучения исследуемого объекта и отраженного от поверхности объекта сигнала подсветки, затем, при отложенной цифровой обработке зарегистрированного сигнала, разделяют сигнал на идущие друг за другом последовательно, соответствующие интервалам временного разрешения измерений, вычисляют спектры мощности каждого из полученных участков и разделяют между собой по форме спектральных характеристик узкополосный сигнал подсветки и шумовой сигнал с непрерывной формой спектра мощности, соответствующий тепловому излучению объекта, проводят фильтрацию сигналов, приравнивая нулю значения мощности связанных с внутрисистемными помехами спектральных компонент высокого уровня, которые нельзя отнести к спектру сигнала подсветки, затем, суммируя отдельно мощности спектральных компонент, образующих дискретный спектр сигнала подсветки, и спектральных компонент, образующих непрерывный спектр шумового сигнала, вычисляют мощность принятого сигнала подсветки и мощность принятого шумового сигнала, расчет яркостной температуры исследуемого быстропротекающего процесса производят для каждого интервала временного разрешения по результатам вычислений мощности принятого шумового сигнала с учетом зависимости калибровочных констант радиоприемного устройства от зарегистрированного уровня мощности принятого сигнала подсветки, расчет отражательной способности исследуемого объекта производят для каждого интервала временного разрешения по результатам вычислений мощности принятого сигнала подсветки с учетом калибровочного значения мощности принятого сигнала подсветки при отражении от эталонной отражающей поверхности, расчет термодинамической температуры исследуемого быстропротекающего процесса, развивающегося в радиопрозрачном объекте, производится для каждого интервала временного разрешения по результатам расчетов яркостной температуры и отражательной способности исследуемого объекта.

2. Устройство для осуществления способа дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса, развивающегося в радиопрозрачном объекте, состоящее из микроволнового радиоприемного устройства супергетеродинного типа, подключенного через первичный канал направленного ответвителя к измерительной антенне, которая направлена на ближнюю внешнюю границу радиопрозрачного исследуемого объекта и генератора сигнала подсветки, подключенного через электрически управляемый аттенюатор к первому плечу вторичной линии направленного ответвителя таким образом, чтобы ответвленный сигнал подсветки поступал на измерительную антенну, отличающееся тем, что генератор сигнала подсветки выполнен с возможностью генерирования узкополосного сигнала, а ко второму плечу вторичной линии направленного ответвителя подключен широкополосный генератор шума с известным, приведенным к антенному входу, значением шумовой температуры, шумовой сигнал которого поступает на вход радиоприемного устройства, а к управляющим входам электрически управляемого аттенюатора и генератора шума подключены выходы генератора, синхронно управляющего параметрами их сигналов.

3. Способ калибровки генератора шума, входящего в состав устройства для осуществления способа дистанционного определения термодинамической температуры

быстропротекающего процесса, состоящий из следующей последовательности действий: к плечу первичной линии направленного ответвителя подключают эталонный генератор шума с известным значением шумовой температуры на его выходе, вводят максимальное ослабление электрически управляемого аттенюатора в составе устройства, поочередно

5 включают и выключают оба генератора шума, регистрируют выходные сигналы радиоприемного устройства, при отложенной цифровой обработке составляют линейное соотношение между значениями шумовых температур, соответствующих включенному состоянию только генератора шума, входящего в состав устройства, включенному

10 состоянию только эталонного генератора шума, выключенному состоянию обоих генераторов шума, и значениями соответствующих выходных сигналов радиоприемного устройства, вычисляют шумовую температуру генератора шума в составе устройства, приведенную к антенному входу устройства.

4. Способ калибровки устройства для осуществления способа дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса,

15 состоящий в следующей последовательности действий: вводят ослабление электрически управляемого аттенюатора в составе устройства, достаточное для обеспечения отсутствия нелинейных искажений в радиоприемном устройстве, фиксируют выходные сигналы радиоприемного устройства, затем вводят максимальное ослабление электрически управляемого аттенюатора для подавления сигнала подсветки,

20 периодически включают и выключают генератор шума в составе устройства, фиксируют выходные сигналы радиоприемного устройства при включенном и выключенном генераторе шума, указанную процедуру проводят еще при нескольких промежуточных значениях ослабления электрически управляемого аттенюатора, при отложенной цифровой обработке вычисляют мощность зарегистрированного отраженного сигнала

25 подсветки от эталонной отражающей поверхности, размещенной на дальней от измерительной антенны внешней границе радиопрозрачного исследуемого объекта, и принимают полученное значение соответствующим отражательной способности исследуемого объекта, равной единице, вычисляют мощность зарегистрированных

30 сигналов радиоприемного устройства при включенном и выключенном генераторе шума и максимальном ослаблении сигнала подсветки, устанавливают линейную связь между известными значениями приведенной к антенному входу шумовой температуры генератора шума во включенном и выключенном состояниях, полученных при

35 калибровке генератора шума, входящего в состав устройства для осуществления способа дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса, коэффициенты этой линейной связи принимают за калибровочные константы устройства для осуществления способа дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса в отсутствие сигнала подсветки и

40 указанную процедуру проводят еще при нескольких промежуточных значениях ослабления электрически управляемого аттенюатора, вычисляют мощность принятого сигнала подсветки и мощность принятого шумового сигнала, вычисляют калибровочные константы устройства для осуществления способа дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса для каждого

45 зарегистрированного значения мощности сигнала подсветки, составляют дискретные зависимости значений калибровочных констант от уровня мощности принятого сигнала подсветки и аппроксимируют эти зависимости непрерывными функциями, указанную процедуру управления параметрами электрически управляемого аттенюатора и генератора шума в составе устройства повторяют периодически до начала измерения температуры исследуемого объекта, непосредственно перед началом измерения

температуры исследуемого объекта выключают генератор шума и устанавливают ослабление электрически управляемого аттенюатора, минимально достаточное для обеспечения отсутствия нелинейных искажений в радиоприемном устройстве, и для обработки результатов измерений термодинамической температуры исследуемого

5 объекта используют результаты калибровки, полученные на последнем полном периоде калибровки устройства.

10

15

20

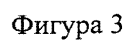
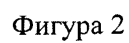
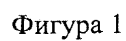
25

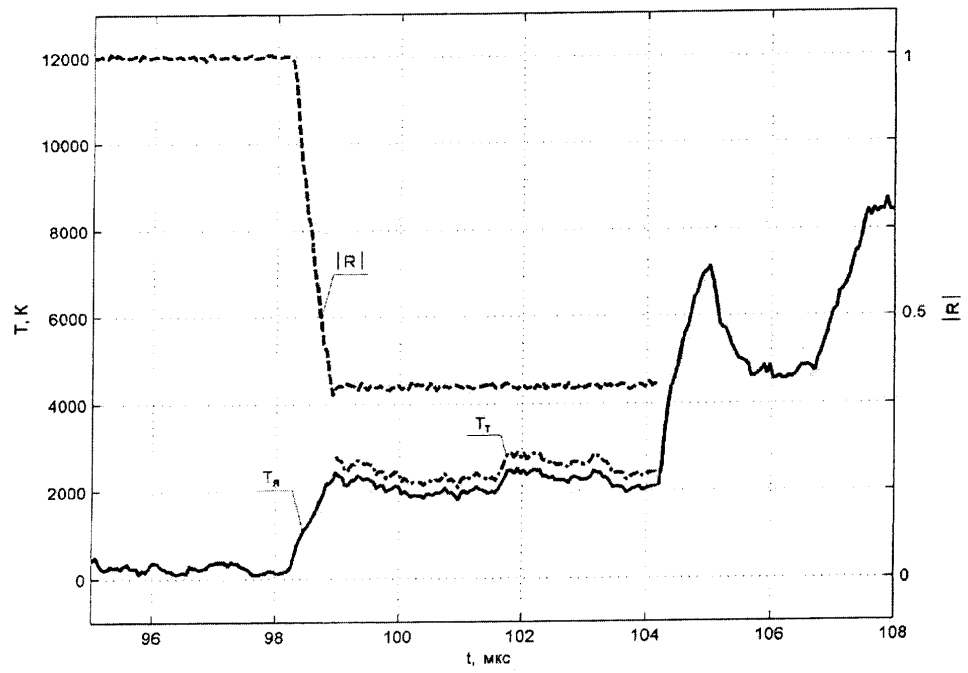
30

35

40

45





Фигура 4