

Исследование влияния резистивной компоненты измерительной цепи на погрешность измерения ионного тока в камере сгорания ДВС

А.Ю. Будко¹, М.Ю. Медведев¹, Р.Ю. Будко¹

П.В. Ивашин², А.Я. Твердохлебов²

Д.Н. Герасимов³

В.В. Рахманов⁴

¹*Южный федеральный университет, Таганрог–Ростов-на-Дону*

²*Тольяттинский государственный университет*

³*Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики*

⁴*Институт теплофизики СО РАН*

Аннотация: Для проведения фундаментальных исследований процесса ионизации пламени необходимо получение истинного значения ионного тока на измерительный зонд с учетом погрешностей измерительных цепей. Для исследования ионизационных процессов в камере сгорания получили широкое распространение датчики ионного тока с наличием резистивных компонент в измерительной цепи, например в виде токоограничительных элементов в схемах подключения к высоковольтному выводу катушки зажигания или измерительного шунта. В данной статье рассмотрены вопросы учета инструментальных погрешностей, вносимых такими измерительными системами, а также предложена формула перехода от полученных экспериментально значений сигнала к истинному значению ионного тока. Приведены результаты расчета восстановленного значения ионного тока для экспериментально полученного сигнала. Показана возможность внесения инструментальной погрешности до 40% по амплитуде на пиках сигнала. Показано, что при построении ВАХ ионизационного зонда необходимо учитывать инструментальную погрешность, вносимую резистивными компонентами измерительной цепи.

Ключевые слова: ионный ток, электропроводность пламени, измерительная схема, инструментальная погрешность измерений, резистивный делитель напряжения, ДВС.

Введение

Измерение ионного тока происходит посредством подачи высокого напряжения на измерительный зонд. Электродвижущая сила (ЭДС) приводит в движение заряженные частицы в районе электродов зонда, и в цепи начинает протекать ионный ток. В качестве измерительного напряжения могут применяться как постоянное, так и переменное напряжения [1 – 6]. Наиболее распространены схемы с использованием постоянного напряжения

с приложением к измерительному зонду положительного или отрицательного полюса источника питания [7 – 10]. При этом в литературе встречается описание схем с использованием измерительного напряжения потенциалом от 100 до 600В. Механизм образования ионного тока поясняется рис. 1.

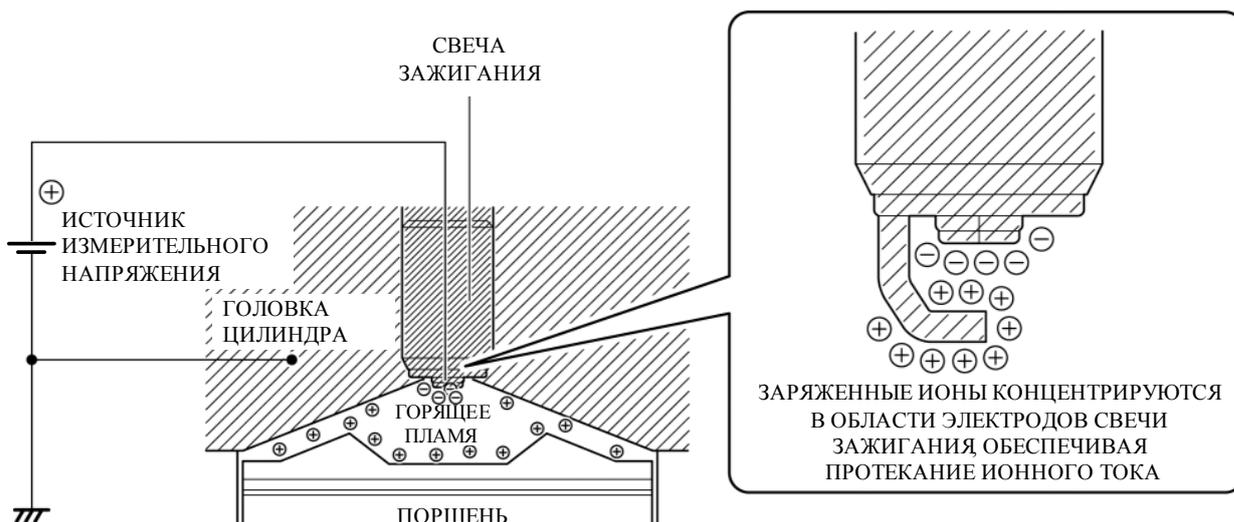


Рис. 1. – Процесс формирования ионного тока

Как видно из рис. 1, в идеализированной измерительной схеме отсутствуют элементы, которые могут вносить погрешность в измерения. В этом случае величина ионного тока будет зависеть только от величины приложенного к электродам измерительного напряжения и концентрации свободных носителей заряда в зондируемой зоне. Большое значение ЭДС приводит в движение больше ионов, что соответствует большему значению тока в измерительной цепи. И наоборот, уменьшение измерительного напряжения приведет к уменьшению ионного тока.

Таким образом, для проведения измерений ионного тока с высокой точностью необходимо поддерживать измерительное напряжение на постоянном уровне на протяжении всей процедуры измерения. Таким требованиям отвечают стабилизированные высоковольтные источники питания с низким внутренним сопротивлением, например используемые для питания фотоэлектронных умножителей (ФЭУ)[11].

Анализ измерительной схемы с резистивным шунтом

На практике измерение малых токов при высоком напряжении и защита измерительных цепей приводят к необходимости использования дополнительных элементов в измерительной цепи. Наиболее распространенным решением является измерение протекающего в цепи тока с использованием резистивного измерительного шунта, на котором оценивается падение напряжения [1 – 6, 7,8]. Пример такой схемы приведен на рис. 2.

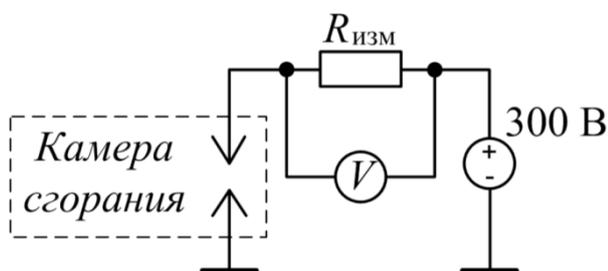


Рис. 2. – Пример схемы измерения ионного тока с использованием измерительного резистивного шунта, где V – вольтметр для измерения падения напряжения на измерительном шунте $R_{изм}$

Проанализируем представленную на рис. 2 схему. Для этого составим эквивалентную схему замещения. Измерительная схема представляет собой делитель напряжения. Сигнал ионного тока $U_{сигнала}$ практически всегда поступает на вход повторителя на операционном усилителе, входное сопротивление которого значительно выше $R_{шунта}$, поэтому основной ток протекает через шунт, а влиянием входного сопротивления повторителя на измерительную схему можно пренебречь. Поскольку концентрация свободных носителей заряда (ионов и электронов) в пламени определяет сопротивление промежутка между электродами измерительного зонда, представим промежуток зонда нелинейным сопротивлением, как это показано на рис. 3.

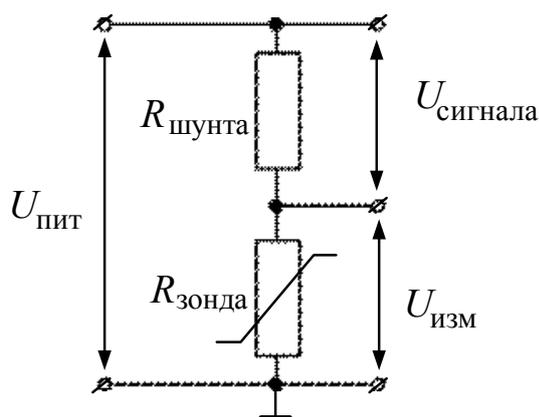


Рис. 3. – Эквивалентная схема замещения измерительной цепи: $U_{\text{пит}}$ – напряжение источника питания, $U_{\text{сигнала}}$ – амплитуда сигнала (падение напряжения на измерительном шунте), $U_{\text{изм}}$ – измерительный потенциал на зонде, $R_{\text{шунта}}$ – сопротивление измерительного шунта, $R_{\text{зонда}}$ – сопротивление межэлектродного промежутка зонда

Поскольку сопротивления измерительного шунта и промежутка между электродами зонда соединены последовательно, то в соответствии с первым законом Кирхгофа через них будет течь одинаковый ток. Значение сопротивления измерительного шунта $R_{\text{изм}}$ постоянно, т.е. $R_{\text{изм}} = \text{const}$. В таком случае, при постоянстве измерительного напряжения ток в измерительной цепи будет зависеть от межэлектродного сопротивления измерительного зонда $R_{\text{зонда}}$ в соответствии с выражением (1):

$$I = U_{\text{пит}} / (R_{\text{шунта}} + R_{\text{зонда}}) \quad (1)$$

На данном явлении основано действие измерительной схемы с резистивным измерительным шунтом. При этом амплитуда сигнала ионного тока (СИТ) в соответствии с законом Ома будет равна падению напряжения на измерительном шунте, и связана с протекающим в измерительной цепи током выражением (2):

$$U_{\text{сигнала}} = I \cdot R_{\text{шунта}} \quad (2)$$

Недостаток данной измерительной цепи обусловлен тем, что изменение протекающего в цепи тока приводит к изменению измерительного

напряжения на зонде вследствие падения напряжения на измерительном шунте в соответствии с выражением (3):

$$U_{\text{ИЗМ}} = U_{\text{ПИТ}} - U_{\text{СИГНАЛА}} \quad (3)$$

Изменение измерительного напряжения непосредственно в процессе измерения приводит к внесению существенных инструментальных погрешностей. Для оценки величины вносимых погрешностей произведем расчет напряжений и токов в измерительной схеме, приведенной на рис. 3 в соответствии с выражениями (1)-(3). При этом зададим усредненные параметры элементов и величин измерительной цепи, полученных на основе анализа зарубежных и отечественных публикаций по данной тематике: $U_{\text{ПИТ}} = 380\text{В}$, $R_{\text{ШУНТА}} = 75\text{кОм}$, $I_{\text{МАХ}} = 2\text{ мА}$, где $I_{\text{МАХ}}$ – максимальная сила ионного тока, полученная в натуральных экспериментах с применением измерительных цепей подобного типа [1 – 6, 7, 8]. Диапазон изменения сопротивления межэлектродного промежутка зонда $R_{\text{ЗОНДА}}$ выберем из следующих соображений: минимальное сопротивление будет иметь место в области, соответствующей максимальному току в измерительной цепи $I_{\text{МАХ}} = 2\text{ мА}$, максимальное $R_{\text{ЗОНДА}}$ будет иметь место при отсутствии в зоне электродов зонда горящего пламени, т.е. приблизительно равно сопротивлению воздуха в межэлектродном промежутке. По закону Ома для минимального значения сопротивления зонда, с учетом того, что полное сопротивление цепи равно $R_{\text{ШУНТА}} + R_{\text{ЗОНДА}}$, имеем (4):

$$R_{\text{ЗОНДАМИН}} = U_{\text{ПИТ}} / I_{\text{МАХ}} - R_{\text{ШУНТА}} = 380\text{В} / 0,002\text{А} - 75000\text{Ом} = 115000\text{Ом} \quad (4)$$

Максимальное сопротивление $R_{\text{ЗОНДАМАХ}}$ при величине измерительного промежутка $l = 1\text{мм}$, площади измерительного промежутка $S = 0,8\text{мм}^2$ и удельном сопротивлении воздуха $10^{16}\text{Ом}\cdot\text{м}$ будет равно, (5):

$$R_{\text{ЗОНДАМАХ}} = \rho \cdot l / S = 10^{16}\text{Ом}\cdot\text{м} \cdot 0,001\text{м} / 8 \cdot 10^{-9}\text{м}^2 = 1,25 \cdot 10^{19}\text{Ом} \quad (5)$$

При рассчитанном $R_{\text{ЗОНДАМАХ}}$ ток в цепи составит порядка $3 \cdot 10^{-17}\text{А}$. Поскольку используемые на практике измерительные схемы обладают

нижним пределом измерения в единицы мкА, ограничимся диапазоном $R_{\text{зонда}} \in [10^4:1000:10^6]$ Ом, как диапазоном, представляющим наибольший практический интерес при измерении ионного тока в камере сгорания ДВС.

Анализ влияния резистивной компоненты измерительной цепи на результат измерения ионного тока

Исследуем зависимости тока в цепи I и измерительного напряжения $U_{\text{изм}}$ от сопротивления межэлектродного промежутка зонда. Для этого построим графики $I=f(R_{\text{зонда}})$ и $U_{\text{изм}}=f(R_{\text{зонда}})$ по формулам (1) и (3) при: $R_{\text{зонда}} \in [10^4:1000:10^6]$ Ом, $U_{\text{пит}}=380\text{В}$, $R_{\text{шунта}}=75\text{кОм}$. Полученные зависимости приведены на рис. 4.

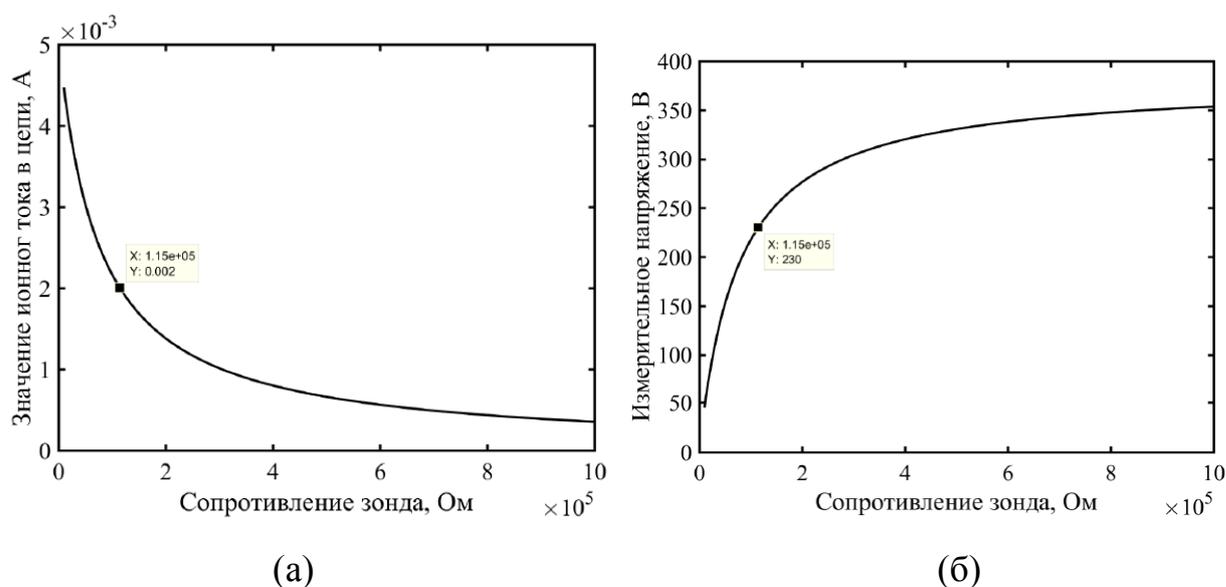


Рис. 4. – Зависимости тока в цепи (а) и измерительного напряжения (б) от сопротивления межэлектродного промежутка зонда для схемы с резистивной компонентой в измерительной цепи

На рис. 4 маркером отмечена точка $I=2\text{мА}$, при сопротивлении пламени $1.25 \cdot 10^{19}$ Ом. Анализ зависимостей (а) и (б) рис. 4 показывает, что в диапазоне работы измерительной схемы точка 2мА лежит на нелинейном участке характеристик. При падении сопротивления межэлектродного промежутка и соответствующем росте значения ионного тока падает измерительное

напряжение. Это приводит к уменьшению измеренного (в виде падения напряжения на измерительном шунте) значения ионного тока по отношению к начальному периоду измерений (когда сопротивление зонда высоко), поскольку, как озвучивалось выше, для измерения истинной величины ионного тока измерительное напряжение должно быть постоянным. Изменение ионного тока в камере сгорания ДВС происходит достаточно динамично (от 0 до 2мА в течение 2мс), поэтому озвученные ранее обстоятельства приводят к значительным погрешностям даже в пределах измерения сигнала единичного цикла сгорания.

Зависимость рассчитанного значения измерительного напряжения $U_{\text{ИЗМ}}$ от протекающего в цепи тока I приведена на рис.5.

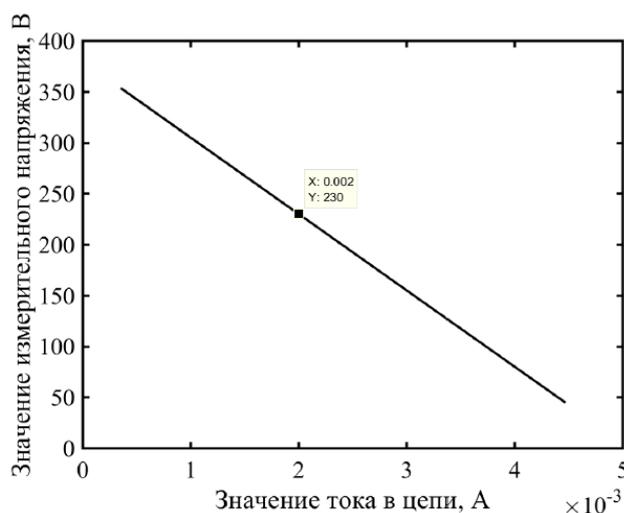


Рис.5. – Зависимость измерительного напряжения $U_{\text{ИЗМ}}$ от протекающего в цепи тока I ; маркером отмечена точка $I=2\text{мА}$

Более наглядно вносимая шунтом в значение измеренного ионного тока погрешность может быть представлена сравнением расчетных значений тока в цепи с шунтом сопротивлением $R_{\text{ШУНТА}}=75\text{кОм}$ и без него, как это показано на рис. 6.

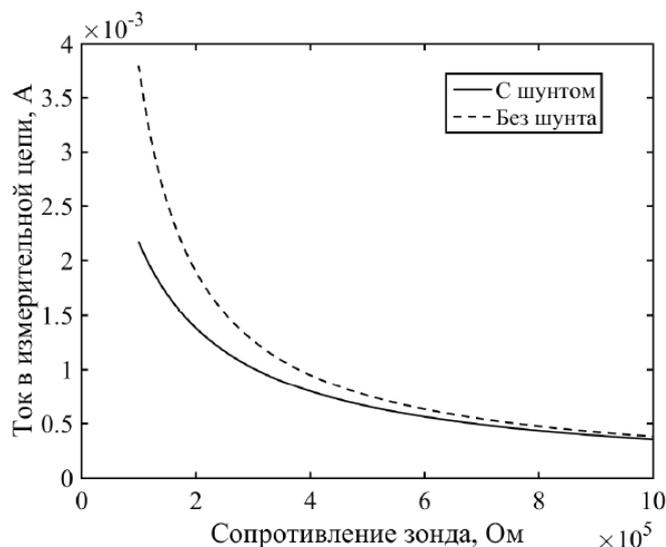


Рис. 6. – расчетные значения тока в измерительной цепи с шунтом и без шунта

Анализ зависимостей на рис. 5 – 6 показывает, что при пиковом токе 2мА измерительное напряжение $U_{\text{ИЗМ}}$ составит 230В при напряжении в начале измерений (максимальном сопротивлении зонда без пламени) равном напряжению питания $U_{\text{ПИТ}}=380\text{В}$. Таким образом измерительное напряжение в течении одного цикла сгорания изменяется **на 40%**. В целом это свойство измерительной цепи приводит к значительным параметрическим искажениям сигнала. При этом наибольшие искажения должны наблюдаться на пиках сигнала, когда сила тока на зонд максимальна.

Вывод выражения для перехода к истинным значениям ионного тока

Выведем выражение для перехода от величины ионного тока I , измеренной по падению напряжения на резистивном шунте (рис. 2 – 3), к расчетной величине $I_{\text{ИСТ}}$, измеренной без шунта по схеме, приведенной на рис. 1. Для этого рассмотрим систему уравнений (6), составленной в соответствии с первым законом Кирхгофа и законом Ома:

$$\begin{aligned} & \left\{ \begin{array}{l} I_{\text{ИСТ}} = \frac{U_{\text{ПИТ}}}{R_{\text{ЗОНДА}}}, \\ I = \frac{U_{\text{ПИТ}}}{R_{\text{ЗОНДА}} + R_{\text{ШУНТА}}}; \end{array} \right. \leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} I_{\text{ИСТ}} = \frac{U_{\text{ПИТ}}}{R_{\text{ЗОНДА}}}, \\ R_{\text{ЗОНДА}} + R_{\text{ШУНТА}} = \frac{U_{\text{ПИТ}}}{I}; \end{array} \right. \leftrightarrow \\ & \leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} I_{\text{ИСТ}} = \frac{U_{\text{ПИТ}}}{R_{\text{ЗОНДА}}}, \\ R_{\text{ЗОНДА}} = \frac{U_{\text{ПИТ}}}{I} - R_{\text{ШУНТА}}; \end{array} \right. \leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} I_{\text{ИСТ}} = \frac{U_{\text{ПИТ}}}{\frac{U_{\text{ПИТ}}}{I} - R_{\text{ШУНТА}}}, \\ R_{\text{ЗОНДА}} = \frac{U_{\text{ПИТ}}}{I} - R_{\text{ШУНТА}}; \end{array} \right. \leftrightarrow \\ & \leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} I_{\text{ИСТ}} = \frac{U_{\text{ПИТ}} \cdot I}{U_{\text{ПИТ}} - I \cdot R_{\text{ШУНТА}}}, \\ R_{\text{ЗОНДА}} = \frac{U_{\text{ПИТ}}}{I} - R_{\text{ШУНТА}}. \end{array} \right. \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, выражение для перехода к истинной величине ионного тока $I_{\text{ИСТ}}$ имеет вид (7):

$$I_{\text{ИСТ}} = \frac{U_{\text{ПИТ}} \cdot I}{U_{\text{ПИТ}} - I \cdot R_{\text{ШУНТА}}} \quad (7)$$

При использовании в качестве входной переменной сигнала падения напряжения $U_{\text{СИГНАЛА}}$ на измерительном шунте, с учетом того что $I = U_{\text{СИГНАЛА}} / R_{\text{ШУНТА}}$ выражение (7) следует привести к виду (8):

$$I_{\text{ИСТ}} = \frac{U_{\text{ПИТ}} \cdot U_{\text{СИГНАЛА}} \cdot R_{\text{ШУНТА}}}{U_{\text{ПИТ}} - U_{\text{СИГНАЛА}}} \quad (8)$$

Пример экспериментально полученного и восстановленного по выражениям (7) – (8) сигналов ионного тока приведен на рис.7.

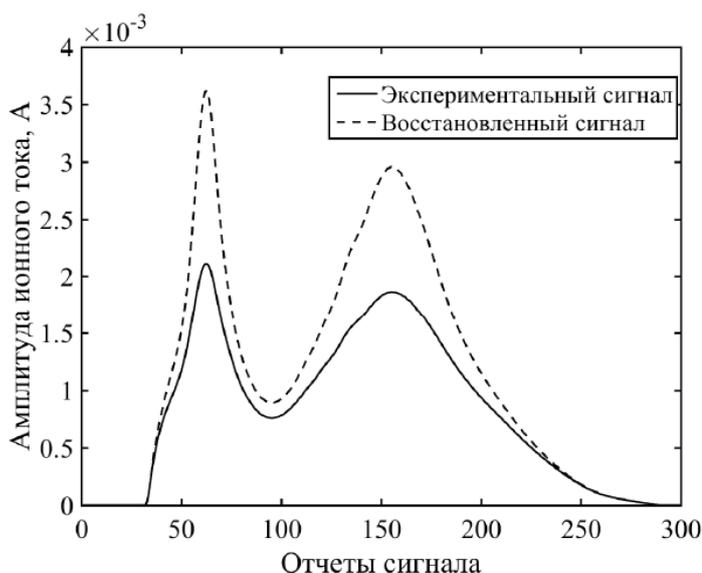


Рис.7. – Пример экспериментального и восстановленного сигналов ионного тока

Анализ рис. 7 показывает, что наибольшие искажения происходят на пиках сигнала, когда ток в измерительной цепи максимален, что соответствует описанной выше теории. При этом вследствие того, что в измерительной цепи присутствует резистивный элемент, сопротивление которого сопоставимо с сопротивлением пламени, инструментальная погрешность измерений значений ионного тока на пиках достигает 40%.

Заключение

В статье показано, что применяемые в измерительной цепи датчиков ионного тока резисторы вносят существенные погрешности измерения даже при условии наличия высокостабильного источника питания с малым внутренним сопротивлением. Вносимая погрешность является следствием падения напряжения на защитных токоограничительных резисторах и измерительных шунтах. Погрешность зависит от величины измеряемого ионного тока и может достигать 40% амплитудного значения сигнала. Таким образом, при построении ВАХ ионизационного зонда необходимо учитывать

инструментальную погрешность, вносимую резистивными компонентами измерительной цепи.

Для учета инструментальной погрешности измерительной цепи предложена формула перехода к истинным значениям ионного тока. Приведен пример экспериментально полученного сигнала ионного тока и его восстановленного значения по предложенной формуле. Анализ графиков ионных токов, полученного экспериментально и восстановленного по предложенной формуле указывает на верность изложенных в статье положений.

Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке:

1. Грант РФФИ, проект № 16-38-00025 «Новые методы анализа ионных токов как инструмент исследования и оптимизации работы ДВС», внутренний номер ЮФУ № 301*213.01-12/2016-12, (теоретические изыскания);

2. Грант ЮФУ №213.01-07-2014/01ПЧВГ «Теория и методы энергосберегающего управления распределенными системами генерации, транспортировки и потребления электроэнергии» (практические исследования).

Литература

1. Lars Eriksson, Lars Nielsen. Closed Loop Cycle Ignition Control by Ion Current Interpretation// Linkoping University Mikael Glavenius, Mecel AB. SAE 970854, 1997 – 10 p.
2. Eric N. Balles, Edward A. VanDyne, and Alexandra M. Wahl. In-Cylinder Air/Fuel Ratio Approximation Using Spark Gap Ionization Sensing// Kenneth Rattou and Ming-Chia Lai Wayne State University, Adrenaline Research Inc. SAE 980166, 1998 – 8 p.



3. Developing of New Ion Current System for Combustion Process Control/ Morito Asano, Tecumo Cuma, Mitsunobi Caiitany, Manabu Takeutchy // Daihatsu Motor Co. SAE 980162, 1998 – 8 p.
 4. Ion Current Sensing for Spark Ignition Engines/ J.Forster, A.Gunther, M. Ketterer, K.Wald// Robert Bosch Gmb H. SAE 1999-01-0204, 1999 – 13 p.
 5. The Application of Ionic Current Detection System for the Combustion Condition Control/ Yutaka Ohashi, Mitsuru Koiwa, Koichi Okamura, и Atsushi Ueda// Mitsubishi Electric Corp. SAE1999-01-0550, 1999 – 9 p.
 6. Spark Advance Control Using the Ion Current and Neural Soft Sensors/ Hellring Magnus, Thomas Munther, Thorsteinn Rognvaldsson, Nicholas Wickstrom// Halmstad University Christian Carlsson, Magnus Larsson, &Jan Nytomt Mecel AB. SAE 1999-01-1162, 1999 – 8 p.
 7. Шайкин А.П., Ивашин П.В. Характеристики распространения пламени и концентрация несгоревших углеводородов при добавке водорода в топливно-воздушную смесь энергетических установок с искровым зажиганием. - Самара: Самарский научный центр РАН, 2013-01-01. - 165 с.
 8. Пшихопов В.Х., Будко А.Ю. Оптимизация режимов работы двигателей подвижных объектов. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2014.- 149 с.
 9. А.Л. Береснев, А.Ю. Будко. Повышение эффективности теплоэнергетических установок методом контроля сгорания топлива по сигналу ионного тока // Инженерный вестник Дона, 2013, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1973.
 10. Будко А.Ю., Мациборко В.В., Береснев А.Л., Мациборко М.А. Исследование устройств регистрации ионного тока в камере сгорания // Инженерный вестник Дона, 2014, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2611/.
-

11. Бакакин Г.В., Рахманов В.В., В.Г. Главный, В.Г. Меледин, И.В. Наумов. Управляемый высоковольтный стабилизированный источник питания фотоэлектронного умножителя // Приборы и техника эксперимента. - 2006. - №5. - С. 90-92.

References

1. Lars Eriksson, Lars Nielsen. Closed Loop Cycle Ignition Control by Ion Current Interpretation. Linkoping University Mikael Glavenius, Mecel AB. SAE 970854, 1997. 10 p.
2. Eric N. Balles, Edward A. VanDyne, and Alexandra M. Wahl. In-Cylinder Air/Fuel Ratio Approximation Using Spark Gap Ionization Sensing. Kenneth Rattou and Ming-Chia Lai Wayne State University, Adrenaline Research Inc. SAE 980166, 1998. 8 p.
3. Developing of New Ion Current System for Combustion Process Control. Morito Asano, Tecumo Cuma, Mitsunobi Caiitany, Manabu Takeutchy. Daihatsu Motor Co. SAE 980162, 1998. 8 p.
4. Ion Current Sensing for Spark Ignition Engines. J.Forster, A.Gunther, M. Ketterer, K.Wald. Robert Bosch GmbH. SAE 1999-01-0204, 1999. 13 p.
5. The Application of Ionic Current Detection System for the Combustion Condition Control. Yutaka Ohashi, Mitsuru Koiwa, Koichi Okamura, и Atsushi Ueda. Mitsubishi Electric Corp. SAE1999-01-0550, 1999. 9 p.
6. Spark Advance Control Using the Ion Current and Neural Soft Sensors. Hellring Magnus, Thomas Munther, Thorsteinn Rognvaldsson, Nicholas Wickstrom. Halmstad University Christian Carlsson, Magnus Larsson, & Jan Nytomt Mecel AB. SAE 1999-01-1162, 1999. 8 p.
7. Shajkin A.P., Ivashin P.V. Harakteristiki rasprostraneniya plameni i koncentraciya nesgorevshih uglevodorodov pri dobavke vodoroda v toplivno-vozdushnuju smes' jenergeticheskikh ustanovok s iskrovym zazhiganiem [Characteristics of the flame and the concentration of unburnt hydrocarbons in



- the hydrogen additive in the fuel-air mixture of energy systems with spark ignition]. Samara: Samarskij nauchnyj centr RAN, 2013-01-01. 165 p.
8. Pshihopov V.H., Budko A.Yu. Optimizacija rezhimov raboty dvigatelej podvizhnyh obektov [Optimization of operating modes of mobile objects engines]. Rostov-na-Donu: Izd-vo JuFU, 2014. 149 p.
9. A.L. Beresnev, A.Yu. Budko. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1973.
10. Budko A.Yu., Maciborko V.V., Beresnev A.L., Maciborko M.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2611/.
11. Bakakin G.V., Rahmanov B.V., V.G. Glavnij, V.G. Meledin, I.V. Naumov. Pribory i tehnika jeksperimenta. 2006. №5. 90-92 pp.