

А. И. Нефедьев, В. Г. Гусев, Д. И. Нефедьев, В. Г. Шаронова

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ИСКРОВОГО РАЗРЯДА В ДВИГАТЕЛЕ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

A. I. Nefed'ev, V. G. Gusev, D. I. Nefed'ev, V. G. Sharonova

SPARK DISCHARGE PARAMETERS CONTROL IN THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Для повышения надежности системы зажигания газового или бензинового двигателя необходимо обеспечить контроль сгорания воздушно-топливной смеси в цилиндрах ДВС. Статья посвящена проблеме контроля искрового разряда в двигателе внутреннего сгорания. Рассмотрен метод контроля наличия искрового разряда во вторичной цепи катушки зажигания по напряжению на ее первичной обмотке. Предложена система контроля, позволяющая диагностировать аварийные режимы работы системы зажигания, рассмотрены принципы ее построения. **Материалы и методы.** В двигателях внутреннего сгорания для снижения расхода топлива используется высокая степень сжатия, при этом давление в цилиндрах двигателя увеличивается, что ведет к значительному увеличению напряжения разряда в зазоре свечи зажигания. При отказе свечи зажигания воздушно-топливная смесь сгорает не в цилиндре, а в каталитическом нейтрализаторе, выводя его из строя. Авторы пришли к выводу, что для повышения надежности работы системы зажигания необходимо отслеживать процесс искрообразования в цилиндрах и информировать водителя об отказе свечи зажигания. **Результаты.** Для решения этой задачи была разработана система контроля, позволяющая диагностировать аварийные режимы работы системы зажигания, рассмотрены принципы ее построения. Показана схема устройства контроля параметров искрового разряда в ДВС и приведены временные диаграммы работы. **Выводы.** Таким образом, в разработанном устройстве для контроля параметров искрового разряда, путем измерения напряжения на конденсаторе и длительности времени его зарядки блоком управления, возможно определить состояние свечи зажигания и обнаружить пропуски зажигания. При возникновении аномального режима работы системы зажигания или при неисправности свечи зажигания блок управления отключает подачу воздушно-топливной смеси в цилиндры двигателя и предупреждает водителя об отказе системы зажигания.

A b s t r a c t. Background. To improve the reliability of the ignition system of a gas or gasoline engine, it is necessary to control the combustion of the air-fuel mixture in the internal combustion engine cylinders. The article is devoted to the problem of spark discharge control in an internal combustion engine. The article discusses a method for monitoring the presence of a spark discharge in the secondary circuit of the ignition coil by voltage on its primary winding. The main attention is paid to the properties of the flame and the peculiarities of the operation of photoelectric sensors. A control system is proposed that allows diagnosing emergency modes of operation of the ignition system, the principles of its construction are considered. **Materials and methods.** In internal combustion engines, a high compression ratio is used to reduce fuel consumption, while the pressure in the engine cylinders increases, which leads to a

significant increase in the spark plug discharge voltage. If the spark plug fails, the air-fuel mixture burns not in the cylinder, but in the catalytic converter, causing it to fail. The authors suggested that in order to improve the reliability of the ignition system, it is necessary to monitor the sparking process in the cylinders, and inform the driver about the spark plug failure.

Results. To solve this problem, a monitoring system was developed that allows diagnosing emergency operating modes of the ignition system, and the principles of its construction were considered. A diagram of a device for monitoring the parameters of a spark discharge in an internal combustion engine is shown and time diagrams of operation are given. **Conclusions.** Thus, by measuring the voltage across the capacitor and the length of its charging time, it is possible to determine the condition of the spark plug and detect misfires. If an abnormal operation of the ignition system occurs, or if the spark plug is faulty, the control unit turns off the supply of the air-fuel mixture to the engine cylinders and warns the driver about the failure of the ignition system.

К л ю ч е в ы е с л о в а: топливная смесь, катушка зажигания, искровой разряд.

К e y w o r d s: fuel mixture, ignition coil, spark discharge.

В последние годы в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) для снижения расхода топлива используется высокая степень сжатия, и технология прямого впрыска бензина в цилиндр все чаще применяется для улучшения топливной экономичности ДВС. При увеличении степени сжатия давление в цилиндрах двигателя также увеличивается, что ведет к значительному увеличению напряжения искрового разряда в зазоре свечи зажигания. Поскольку повышение степени сжатия увеличивает отдаваемую эффективную мощность двигателя, желательно иметь степень сжатия как можно более высокой. Верхний предел давления в цилиндре всегда ограничен моментом возникновения детонации. Степень сжатия влияет на большое количество факторов: мощность, экономичность, приемистость, детонационная стойкость, расход топлива и состав отработавших газов.

Кроме того, при непосредственном впрыске бензина в цилиндр могут образовываться зоны с различной плотностью воздушно-топливной смеси. При таких условиях для воспламенения воздушно-топливной смеси требуется большая энергия искрового разряда. Примером может служить четырехцилиндровый двигатель Dynamic Force фирмы Toyota [1], в котором коэффициент компрессии составляет 13:1.

При неисправности системы зажигания из-за выхода из строя свечи зажигания из-за пробоя изолятора или пробоя высоковольтного транзистора в коммутаторе, или при невозможности пробоя искрового промежутка при высоком давлении в цилиндре из-за увеличенного зазора в свече зажигания возникают пропуски воспламенения воздушно-топливной смеси [2–4]. В этом случае воздушно-топливная смесь не сгорает и при такте выпуска попадает в выпускную систему. Не сгоревшее топливо смывает масляную пленку со стенок цилиндра, что ведет к повышенному износу цилиндра и поршня. Воздушно-топливная смесь проходит через каталитический нейтрализатор, полностью в нем не сгорает и выбрасывается в окружающую среду [5–8]. При этом температура каталитического нейтрализатора повышается до 1400 °С. Такая ситуация является опасной и может привести к оплавлению или разрушению каталитического нейтрализатора и загрязнению окружающей среды.

В настоящее время разработаны микропроцессорные системы диагностирования параметров систем зажигания [9,10]. Для решения обозначенных проблем было разработано устройство для контроля параметров искрового разряда, способное обнаруживать отклонения в напряжении разряда и пропуски разряда в зазорах свечей зажигания. Наличие или отсутствие искрового разряда определяется путем измерения напряжения разряда свечи зажигания в первичной цепи катушки зажигания. Но при таком подходе возникают проблемы, связанные с тем, что разрядное напряжение зажигания в разных условиях становится высоким, аномально низким или имеется пропуск разряда свечи зажигания.

Схема устройства для контроля параметров искрового разряда в ДВС приведена на рис. 1.

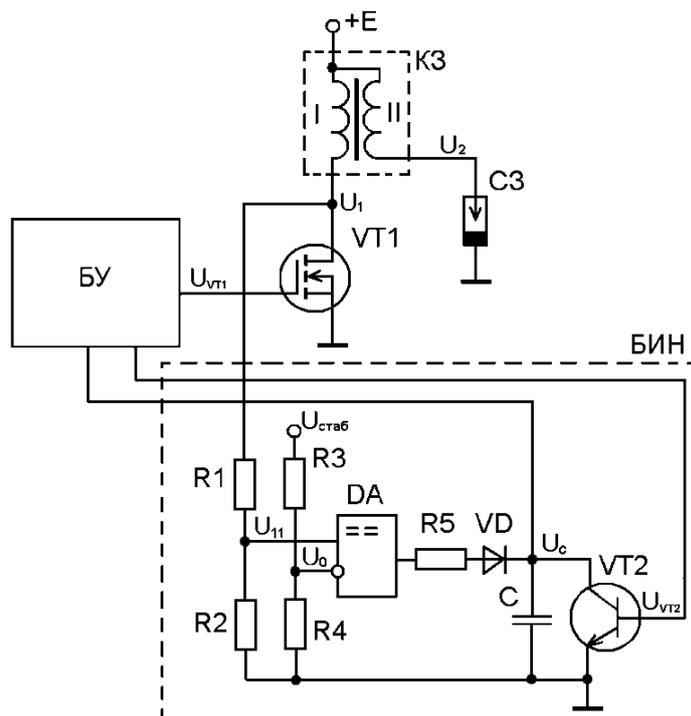


Рис. 1. Устройство для контроля параметров искрового разряда

Устройство для контроля параметров искрового разряда в ДВС содержит блок управления БУ, высоковольтный ключ $VT1$, катушку зажигания $K3$ с первичной обмоткой I и вторичной обмоткой II, свечу зажигания $C3$ и блок измерения напряжения БИН. В качестве блока управления может быть использован электронный блок управления двигателем (ЭБУ).

Высоковольтный ключ $VT1$ переключается по сигналу блока управления, коммутируя ток в первичной обмотке I катушки зажигания $K3$.

Блок измерения напряжения БИН предназначен для определения напряжения первичной обмотки катушки зажигания и содержит компаратор DA , резисторы делителей напряжения $R1 - R4$, резистор $R5$, диод VD , конденсатор C и транзисторный ключ $VT2$. Компаратор DA сравнивает напряжение U_1 первичной обмотки 4 (напряжение U_{11} с выхода делителя напряжения, образованного резисторами $R1$ и $R2$) и опорное напряжение U_0 с выхода делителя напряжения, образованного резисторами $R3$ и $R4$.

Когда напряжение U_{11} с делителя напряжения, подключенного к первичной обмотке катушки зажигания, выше опорного напряжения U_0 , на выходе компаратора DA устанавливается высокий уровень напряжения. При этом конденсатор C заряжается от источника питания через резистор $R5$. Диод VD служит для предотвращения разрядки конденсатора C . Если напряжение U_{11} меньше опорного напряжения U_0 , на выходе компаратора DA устанавливается нулевой уровень напряжения. Следовательно, напряжение зарядки U_c конденсатора C увеличивается пропорционально длительности времени, в течение которого напряжение U_{11} выше опорного напряжения U_0 . Длительность времени зарядки конденсатора C контролируется блоком управления БУ. Кроме того, блок управления разряжает конденсатор C с помощью транзисторного ключа $VT2$ перед включением высоковольтного ключа $VT1$ для подготовки к следующему такту измерения.

На рис. 2 представлены временные диаграммы работы устройства при нормальном режиме работы системы зажигания.

Блок управления БУ в момент времени t_1 выключает транзисторный ключ $VT2$, и в этот момент времени напряжение U_c на конденсаторе C равно нулю. В момент времени t_1 блок управления включает высоковольтный ключ $VT1$, и ток начинает протекать через первичную обмотку катушки зажигания $K3$.

В момент времени t_2 высоковольтный ключ $VT1$ выключается, и ток, протекающий через первичную обмотку катушки зажигания, прерывается. При этом магнитный поток в катушке зажигания очень быстро изменяется, что вызывает изменение напряжения первичной и вторичной обмоток катушки зажигания. В частности, напряжение U_2 вторичной обмотки катушки зажигания начинает постепенно увеличиваться.

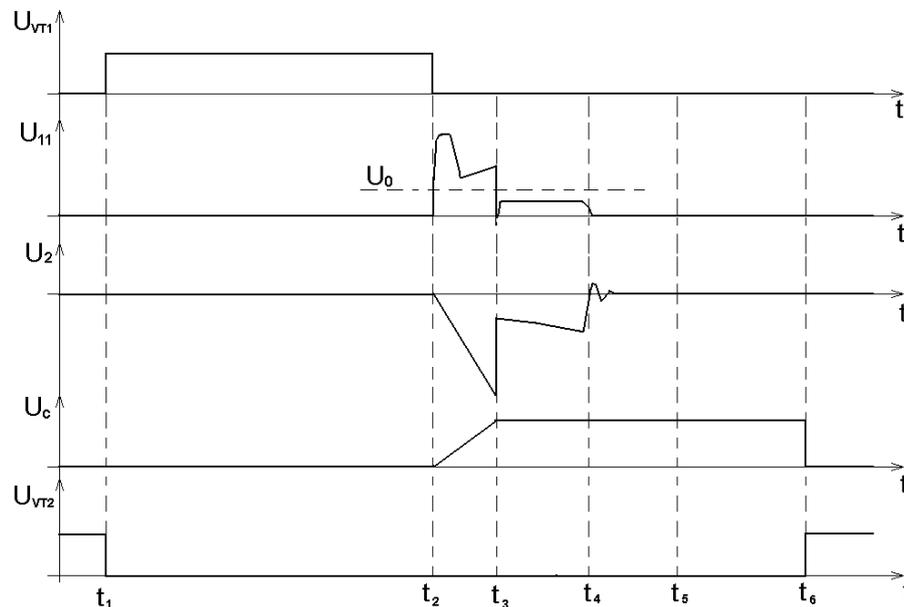


Рис. 2. Временные диаграммы работы устройства при нормальном режиме работы системы зажигания

Напряжение первичной обмотки U_1 и, соответственно, напряжение U_{11} с выхода делителя напряжения $R1R2$ имеет высокую скорость нарастания в момент времени t_2 , а затем постепенно увеличивается. Высокое пиковое напряжение первичной обмотки возникает благодаря наличию индуктивности рассеяния первичной обмотки катушки зажигания из-за неидеальной связи между ее первичной и вторичной обмотками. Затем изменение напряжения в первичной обмотке и вторичной обмотке определяется соотношением $|\Delta U_1| = |\Delta U_2|/n$, где n – коэффициент трансформации катушки зажигания.

Блок измерения напряжения БИН сравнивает напряжение на первичной обмотке U_1 , уменьшенное с помощью делителя напряжения на резисторах $R1$ и $R2$ до уровня U_{11} , с опорным напряжением U_0 . Когда напряжение U_{11} превышает опорное напряжение U_0 , на выходе компаратора DA устанавливается напряжение, равное напряжению питания, и конденсатор C начинает заряжаться через резистор $R5$ и диод VD .

В момент времени t_3 , когда напряжение U_2 , генерируемое во вторичной обмотке катушки зажигания, превышает напряжение пробоя свечи зажигания, возникает искровой разряд. Напряжение вторичной обмотки U_2 и напряжение первичной обмотки U_1 существенно уменьшаются, при этом напряжение U_{11} в период времени $t_3 - t_4$ становится меньше, чем опорное напряжение U_0 . При этом на выходе компаратора DA напряжение становится равным нулю, и зарядка конденсатора C останавливается.

Значение опорного напряжения U_0 выбирается таким, чтобы оно было ниже, чем напряжение U_{11} в период времени $t_2 - t_3$, и выше, чем U_{11} в период времени $t_3 - t_4$. В момент времени t_4 искровой разряд в зазоре свечи зажигания заканчивается, и напряжения первичной и вторичной обмотках катушки зажигания $K3$ становятся равными нулю.

В момент времени t_5 , по истечении заданного периода времени с момента времени t_2 , блок управления считывает напряжение U_C конденсатора C .

В момент времени t_6 происходит включение транзисторного ключа $VT2$, и он разряжает конденсатор C , подготавливая его к следующему циклу работы.

В случае, когда напряжение на свече зажигания увеличивается из-за увеличения давления в камере сгорания или из-за увеличения зазора между электродами свечи зажигания, это

приводит к увеличению напряжения U_2 вторичной обмотки катушки зажигания и, соответственно, к увеличению напряжения U_1 первичной обмотки. При этом увеличивается длительность периода времени $t_2 - t_3$, в течение которого происходит зарядка конденсатора C , при этом конденсатор заряжается до большего значения напряжения, что детектируется блоком управления БУ.

На рис. 3 представлены временные диаграммы работы устройства для контроля параметров искрового разряда при неисправной свече системы зажигания. Диаграммы напряжений, приведенные на рис. 3, отличаются от диаграмм рис. 2 в основном в период времени $t_3 - t_4$. В случае, когда пробой диэлектрика происходит не в искровом зазоре свечи зажигания, что случается при пробое изолятора свечи зажигания или загрязнении ее межэлектродного промежутка, происходит внезапное падение напряжения в первичной и вторичных обмотках катушки зажигания. Напряжения в первичной и вторичных обмотках катушки зажигания имеют форму плавных волн, как показано на рис. 3.

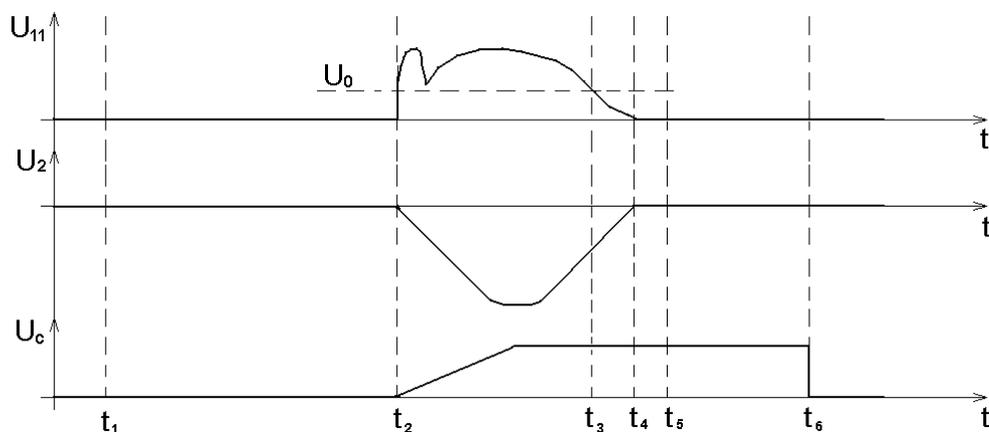


Рис. 3. Временные диаграммы работы устройства при неисправной свече системы зажигания

Период времени $t_2 - t_3$ становится существенно больше, в течение которого напряжение U_{11} , приложенное к входу компаратора, выше напряжения U_0 источника опорного напряжения. В результате конденсатор C непрерывно заряжается, и его напряжение достигает уровня напряжения питания за указанный период времени.

На рис. 4 представлен график, показывающий соотношение между длительностью времени заряда конденсатора C , его напряжением U_C .

По напряжению заряда конденсатора C можно диагностировать как состояние свечи зажигания, так и наличие или отсутствие искрового разряда. При напряжении конденсатора $U_C < U_{c1}$ имеется утечка тока мимо искрового зазора свечи зажигания, при этом искровой разряд слабый или отсутствует.

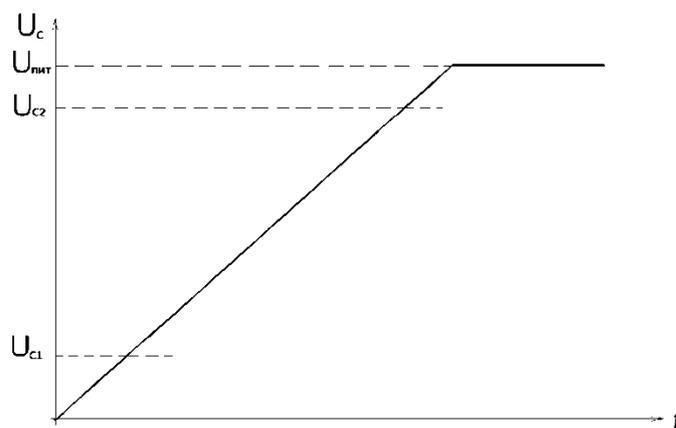


Рис. 4. График напряжения на конденсаторе C

При условии $U_{C1} \leq U_C < U_{C2}$ свеча работает в нормальном режиме. При условии $U_C \geq U_{C2}$ напряжение на свече зажигания аномально высокое, что говорит об износе свечи (увеличенный искровой зазор или разрушение одного из электродов).

Таким образом, путем измерения напряжения на конденсаторе C и длительности периода времени t_2-t_3 возможно определить состояние свечи зажигания и обнаружить пропуски зажигания. При возникновении аномального режима работы системы зажигания или при неисправности свечи зажигания блок управления отключает подачу воздушно-топливной смеси в цилиндры двигателя и предупреждает водителя об отказе системы зажигания.

Библиографический список

1. Фирма Toyota представила передовые агрегаты. – URL: <https://www.drive.ru/news/toyota/584682faec05c44015000051.html> (дата обращения: 22.10.2020).
2. Nefed'ev, A. I. Development of Microprocessor-Based Car Engine Control System / A. I. Nefed'ev, G. I. Sharonov // *Procedia Engineering* : 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016) / ed. by A. A. Radionov. – Elsevier publishing, 2016. – Vol. 150. – P. 1341–1344.
3. Нефедьев, А. И. Формирователь импульсов для электронной системы зажигания автомобиля / А. И. Нефедьев // *Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт*. – 2019. – № 2 (27). – С. 54–57.
4. Шаронов, Г. И. Конденсаторно-тиристорный модуль зажигания для ДВС со встроенными средствами исследования токовременных параметров первичной цепи / Г. И. Шаронов, А. И. Нефедьев // *Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств: Эксплуатация и развитие автомобильного транспорта : материалы X Междунар. заочн. науч.-техн. конф. (г. Пенза, 15 мая 2015 г.)* / под общ. ред. Э. Р. Домке. – Пенза : Пенз. гос. ун-т архитектуры и строительства, 2015. – С. 388–396.
5. Шаронов, Г. И. Микропроцессорная система управления силовым агрегатом автомобиля / Г. И. Шаронов, А. И. Нефедьев // *Электроника и электрооборудование транспорта*. – 2016. – № 3. – С. 2–4.
6. Нефедьев, А. И. Многоканальные конденсаторные модули зажигания для микропроцессорных систем управления газовым двигателем внутреннего сгорания / А. И. Нефедьев, Г. И. Шаронов, С. В. Тимохин // *Транспортные системы Сибири : материалы II Всерос. науч.-техн. конф. (25–26 ноября, г. Красноярск)*. – Красноярск : КГТУ, 2004. – С. 166–168.
7. Лянденбургский, В. В. Бортовая система диагностирования микропроцессорной системы управления зажигания / В. В. Лянденбургский, М. В. Шилин // *Успехи современной науки*. – 2017. – Т. 4, № 4. – С. 28–31.
8. Францев, С. М. Микропроцессорная система исследования распределения значений пробивных напряжений системы зажигания ДВС / С. М. Францев, А. Ю. Кавторев // *Инженерный вестник Дона*. – 2018. – № 2 (49). – С. 55.
9. Пат. 9726140 США, МПК F02P 17/12, F02P 11/06. Internal Combustion Engine Control Apparatus / Higoshi Okuda ; опубл. 08.08.2017.
10. Францев, С. М. Исследование длительности и энергии искрового разряда транзисторной системы зажигания на нагрузочном режиме работы двигателя / С. М. Францев, А. Ю. Кавторев // *Инженерный вестник Дона*. – 2015. – № 1, ч. 2. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2842

References

1. *Firma Toyota predstavila peredovye agregaty* [Toyota has introduced advanced units]. Available at: <https://www.drive.ru/news/toyota/584682faec05c44015000051.html> (accessed Oct. 22, 2020). [In Russian]
2. Nefed'ev A. I., Sharonov G. I. *Procedia Engineering: 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016)*. Elsevier publishing, 2016, vol. 150, pp. 1341–1344.
3. Nefed'ev A. I. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport* [Energy and resource conservation: industry and transport]. 2019, no. 2 (27), pp. 54–57. [In Russian]
4. Sharonov G. I., Nefed'ev A. I. *Problemy kachestva i ekspluatatsii avtotransportnykh sredstv: Ekspluatatsiya i razvitie avtomobil'nogo transporta : materialy X Mezhdunar. zaochn. nauch.-tekhn. konf. (g. Penza, 15 maya 2015 g.)* [Problems of quality and operation of motor vehicles: Operation and development of motor transport: materials X international. part-time scientific and technical conf. (Penza, may 15, 2015)]. Penza: Penz. gos. un-t arkhitektury i stroitel'stva, 2015, pp. 388–396. [In Russian]
5. Sharonov G. I., Nefed'ev A. I. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Transport electronics and electrical equipment]. 2016, no. 3, pp. 2–4. [In Russian]

6. Nefed'ev A. I., Sharonov G. I., Timokhin S. V. *Transportnye sistemy Sibiri: materialy II Vseros. nauch.-tekhn. konf. (25–26 noyabrya, g. Krasnoyarsk)* [Transport systems of Siberia: materials of the II all-Russian scientific-tech. conf. (November 25–26, Krasnoyarsk)]. Krasnoyarsk: KGTU, 2004, pp. 166–168. [In Russian]
7. Lyandenburskiy V. V., Shilin M. V. *Uspekhi sovremennoy nauki* [Advances in modern science]. 2017, vol. 4, no. 4, pp. 28–31. [In Russian]
8. Frantsev S. M., Kavtorev A. Yu. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2018, no. 2 (49), p. 55. [In Russian]
9. Pat. 9726140 SShA, МПК F02P 17/12, F02P 11/06. *Internal Combustion Engine Control Apparatus*. Hiroshi Okuda; publ. 08.08.2017.
10. Frantsev S. M., Kavtorev A. Yu. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2015, no. 1, pt. 2. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2842 [In Russian]

Нефедьев Алексей Иванович

доктор технических наук, профессор,
кафедра электротехники,
Волгоградский государственный технический
университет
(Россия, г. Волгоград, проспект Ленина, 28)
E-mail: nefediev@rambler.ru

Nefediev Alexey Ivanovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of electrical engineering,
Volgograd State Technical University
(28 Lenin avenue, Volgograd, Russia)

Гусев Владимир Георгиевич

аспирант,
Волгоградский государственный технический
университет
(Россия, г. Волгоград, пр. Ленина, 28)
E-mail: gusev.vl.g@mail.ru

Gusev Vladimir Georgievich

postgraduate student,
Volgograd State Technical University
(28 Lenin avenue, Volgograd, Russia)

Нефедьев Дмитрий Иванович

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной техники
и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ndi200106@yandex.ru

Nefediev Dmitry Ivanovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information and measuring
technique and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Шаронова Вероника Геннадьевна

старший преподаватель,
кафедра основ архитектурного проектирования,
Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
(Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28)
E-mail: virineya73@mail.ru

Sharonova Veronika Gennadyevna

senior lecturer,
sub-department of basics of architectural design,
Penza State University of Architecture
and Construction
(28 Germana Titova street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Нефедьев, А. И. Контроль параметров искрового разряда в двигателе внутреннего сгорания / А. И. Нефедьев, В. Г. Гусев, Д. И. Нефедьев, В. Г. Шаронова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 4 (34). – С. 51–57. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-4-6.