

Ф. А. Гизатуллин, Р. М. Салихов, А. В. Лобанов,
В. А. Чигвинцев, Т. М. Ищейкина, Р. В. Галиев

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗРЯДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЕМКОСТНЫХ СИСТЕМАХ ЗАЖИГАНИЯ АПЕРИОДИЧЕСКОГО И КОЛЕБАТЕЛЬНОГО РАЗРЯДОВ СО СТРЕЛЯЮЩИМИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ СВЕЧАМИ

Приводятся результаты экспериментальных исследований разрядных процессов в макетах низковольтной и высоковольтной емкостных систем зажигания аperiodического и колебательного разряда со стреляющими полупроводниковыми свечами. *Емкостные системы зажигания; аperiodический разряд; колебательный разряд; стреляющие полупроводниковые свечи; разрядные процессы; метод измерения энергии разрядов*

Полупроводниковые свечи для емкостных систем зажигания газотурбинных двигателей в зависимости от конструктивных исполнений рабочих торцов делятся на три типа: открытые, полузакрытые и стреляющие. Стреляющие свечи имеют разрядную камеру, центральный электрод и полупроводниковый элемент заглублены относительно рабочего торца свечи. При этом образующийся искровой разряд локализуется внутри разрядной камеры. Такая конструкция облегчает условия образования разряда, так как защищает искровой промежуток свечи от воздействия потоков воздуха и топливовоздушной смеси в камере сгорания двигателя и обеспечивает значительный выброс плазмы разряда за рабочий торец свечи, что повышает ее воспламеняющую способность, причем величина плазменного выброса зависит от энергии и длительности разрядов.

Энергетическая эффективность емкостных систем зажигания с открытыми и полузакрытыми полупроводниковыми свечами исследована достаточно подробно.

Основные известные закономерности разрядных процессов в емкостных системах зажигания с открытыми и полузакрытыми полупроводниковыми свечами сводятся к следующим [1–3]:

1. При увеличении емкости накопительного конденсатора пробивное напряжение полупроводниковой свечи при прочих равных условиях уменьшается.

2. Увеличение индуктивности разрядной цепи приводит к возрастанию энергии искровых разрядов. Этот эффект объясняется увеличени-

ем активного сопротивления искрового разряда при снижении разрядного тока с ростом индуктивности, что вытекает из вида вольт-амперной характеристики разряда. При изменении активного сопротивления искры и постоянстве сопротивлений линейных участков цепи происходит перераспределение энергии, выделяющейся в отдельных элементах разрядной цепи таким образом, что энергия разрядов увеличивается.

3. С увеличением до определенного предела междуэлектродного зазора полупроводниковой свечи возрастают энергетическая эффективность и воспламеняющая способность систем зажигания.

4. С ростом емкости конденсатора коэффициент использования энергии конденсатора уменьшается. Характер изменения коэффициента использования энергии конденсатора в функции емкости конденсатора в конечном счете вытекает из вида вольт-амперной характеристики разряда. Увеличение емкости, а следовательно, и начальной энергии конденсатора приводит к увеличению разрядного тока. В соответствии с вольт-амперной характеристикой разряда активное сопротивление разряда при этом снижается.

5. При увеличении длины кабеля, соединяющего агрегат зажигания со свечой, происходит возрастание активного сопротивления и индуктивности разрядной цепи. При этом изменение индуктивности повышает энерговыделение в свече, влияние активного сопротивления является противоположным. В результате влияние возрастающего активного сопротивления кабеля является преобладающим и коэффициент использования энергии накопительного конденсатора снижается.

6. Увеличение индуктивности разрядной цепи приводит к возрастанию длительности подготовительной стадии разрядов.

7. При увеличении начального напряжения на конденсаторе и емкости конденсатора возрастает ток в течение подготовительной стадии разряда, вследствие этого длительность подготовительной стадии разряда сокращается.

8. Влияние параметров разрядной цепи на воспламеняющую способность полупроводниковой свечи зависит от способа стабилизации пламени в пусковых воспламенителях и камерах сгорания. В частности, в условиях воспламенителей с электроискровым способом стабилизации пламени увеличение индуктивности разрядной цепи приводит к возрастанию воспламеняющей способности; влияние индуктивности при аэродинамическом способе стабилизации пламени является противоположным.

Приведенные выше наиболее устойчивые закономерности для различных показателей эффективности систем зажигания не могут быть объяснены лишь электрическими процессами в разрядных контурах. Существенную роль играют тепловые явления в полупроводниковых элементах свечей зажигания, значительное влияние на параметры оказывают газодинами-

ческие явления в пусковых воспламенителях и камерах сгорания.

Энергетическая эффективность систем зажигания со стреляющими свечами исследована не в полной мере, в научно-технической литературе отсутствуют сведения о выборе оптимальных параметров разрядных цепей, обеспечивающих максимальную энергетическую эффективность.

В статье представлены результаты экспериментальных исследований разрядных процессов в макетах низковольтной и высоковольтной емкостных систем зажигания аperiodического и колебательного разряда со стреляющими полупроводниковыми свечами.

Электрическая принципиальная схема макета низковольтной емкостной системы зажигания аperiodического разряда с возможностью переключения на колебательный режим представлена на рис. 1, принципиальная схема макета высоковольтной емкостной системы зажигания аperiodического разряда – на рис. 2. Высоковольтность схемы достигается путем включения импульсного трансформатора TV3.

Основные параметры схем: $C_1 = 0,5$ мкФ; $C_2 = 1$ мкФ; $C_3 = 1,5$ мкФ; $C_4 = 2$ мкФ; FV – разрядник РК-162 с пробивным напряжением $U_0 = 2,8$ кВ; $L = 5,4; 14,6; 53; 87; 127; 160$ мкГн.

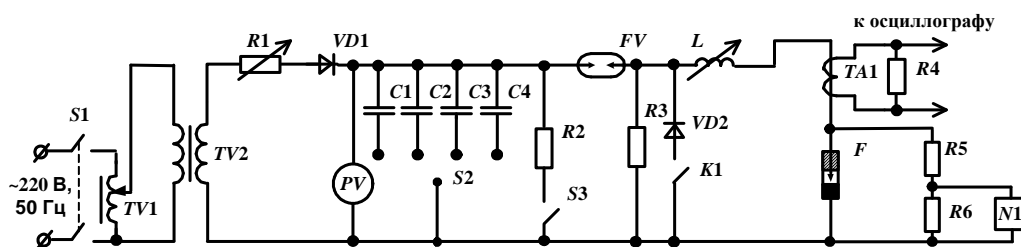


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема лабораторного макета низковольтной системы зажигания аperiodического и колебательного разрядов

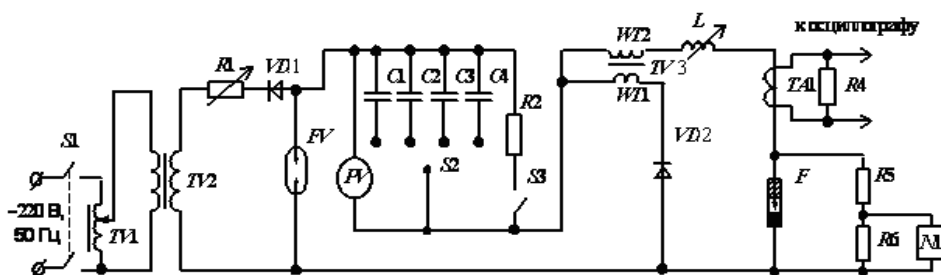


Рис. 2. Принципиальная схема лабораторного макета высоковольтной системы зажигания аperiodического разряда

Катушки индуктивности изготовлены из провода МГТФ 0,5 мм, длиной в 2; 4; 8; 12; 16; 20 м соответственно. Тороидальные сердечники катушек изготовлены из диаманитного материала – меди, что обеспечивает максимально возможную индуктивность при заданной длине провода. Как известно, данное обстоятельство позволяет увеличить долю энергии накопительного конденсатора, выделяющейся в свече [1].

Программа исследований заключалась в выявлении зависимости энергии разрядов W в серийной стреляющей полупроводниковой свече и коэффициента использования энергии накопительного конденсатора W' от емкости накопительного конденсатора и индуктивности катушек, включаемых в разрядную цепь, а также сравнение энергетической эффективности низковольтных разрядных цепей апериодического и колебательного разряда и эффективности низковольтной и высоковольтной систем зажигания апериодического разряда. Коэффициент использования энергии накопительного конденсатора W' определяется по соотношению:

$$W', \% = \frac{2W}{CU_0^2} \cdot 100 \%$$

Измерение энергии искровых разрядов в стреляющих полупроводниковых свечах имеет свои особенности, связанные с заглубленным расположением центрального электрода в разрядной камере свечи. Как известно, для осциллографической регистрации энергии искровых разрядов необходимо подключать измерительные провода делителя напряжения к электродам свечи в месте образования искровых разрядов, что невозможно осуществить в стреляющих свечах, не нарушая динамики развития разрядов в разрядной камере свечи. Такая проблема не возникает только при измерении энергии искровых разрядов в полузакрытых полупроводниковых свечах. Для измерения энергии разрядов в стреляющих свечах разработана методика, существо которой заключается в следующем.

Используется осциллографический метод измерений энергии по осциллограммам разрядного тока и падения напряжения в свече с последующим перемножением сигналов и графическим интегрированием кривой мгновенной мощности при подключении одного из измерительных проводов делителя напряжения к боковому электроду стреляющей свечи по рабочему торцу разрядной камеры, а второго измерительного провода – к центральному электроду свечи в зоне высоковольтного разъема. При таком подключении делителя измеряется падение на-

пряжения не только в искровом разряде, но и в центральном электроде от высоковольтного ввода до разрядной камеры.

Это означает, что по осциллограммам разрядного тока и падения напряжения будет определяться не энергия искрового разряда, а суммарная энергия, выделяющаяся в искровом разряде и центральном электроде.

Определение энергии искрового разряда в этом случае осуществляется по следующему алгоритму. По осциллограмме тока расчетным путем по известной методике определяется полное активное сопротивление разрядной цепи.

Измерительным прибором фиксируется активное сопротивление центрального электрода стреляющей свечи.

Вычисляется отношение активного сопротивления центрального электрода к полному активному сопротивлению разрядной цепи:

$$K = \frac{R_{ц.э.}}{R_1}$$

Определяется энергия, выделившаяся в сопротивлении центрального электрода:

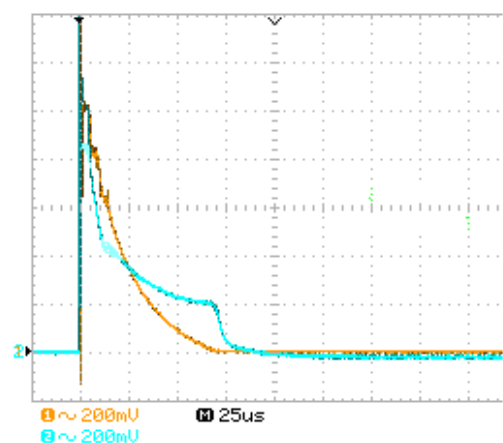
$$W_{ц.э.} = k \times W_0 = \frac{R_{ц.э.}}{R_1} \times \frac{CU_0^2}{2}$$

Определяется энергия искрового разряда как разность между энергией W_1 , определяемой расчетным путем по осциллограммам разрядного тока и падения напряжения в свече и энергией, выделившейся в центральном электроде $W_{ц.э.}$:

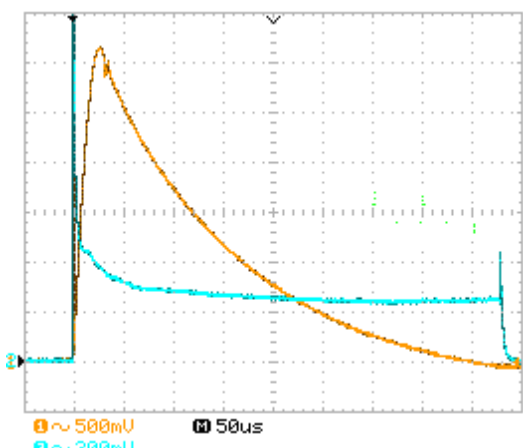
$$W = W_1 - W_{ц.э.}$$

В ходе экспериментальных исследований осциллограммы разрядного тока через свечу фиксировались с помощью измерительного трансформатора тока с параметрами: $W_{ТА1} = 100$; $R_4 = 1$ Ом. Осциллограммы падения напряжения в свече регистрировались с использованием омического делителя напряжения с параметрами: $R_{вх} = 1$ МОм; $R_{вых} = 10$ кОм.

Полученные характерные осциллограммы разрядных токов и падений напряжения в серийной стреляющей полупроводниковой свече для низковольтного макета системы зажигания апериодического разряда при изменении емкости накопительного конденсатора и индуктивности разрядной цепи показаны на рис. 3. Соответствующие осциллограммы для колебательного разряда представлены на рис. 4 (колебательный разряд в схеме на рис. 1 создается путем размыкания ключа в цепи высоковольтного диода VD_2).



$L = 5,4 \text{ мкГн}; C = 1,0 \text{ мкФ}$



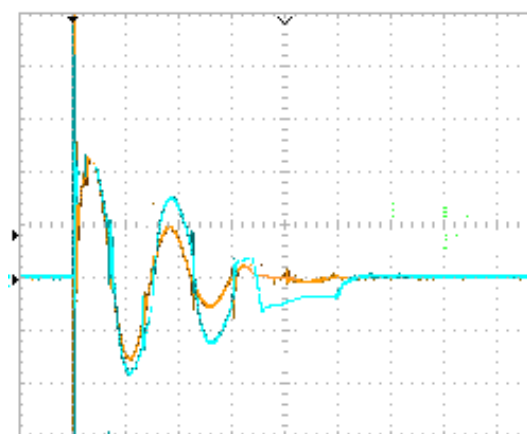
$L = 160 \text{ мкГн}; C = 2,0 \text{ мкФ}$

Рис. 3. Характерные осциллограммы разрядных токов и падений напряжения в серийной стреляющей полупроводниковой свече для низковольтного макета системы зажигания аperiодического разряда

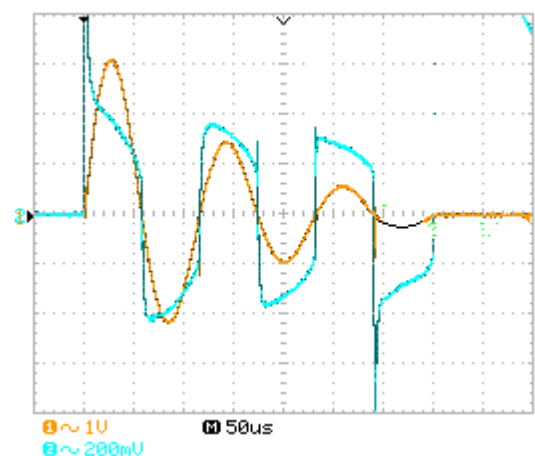
Характерные осциллограммы токов и падений напряжения в свече макета высоковольтной системы зажигания аperiодического разряда показаны на рис. 5. На рис. 6–8 приведены построенные зависимости $W = f(L, C)$, $W = f(L, C)$ для низковольтных макетов систем зажигания аperiодического и колебательного разряда и для макета высоковольтной системы зажигания аperiодического разряда соответственно.

На основании анализа полученных результатов сделаны следующие основные выводы.

С увеличением индуктивностей катушек в пределах от 5,4 до 160 мкГн, энергия, выделяющаяся в стреляющей свече и коэффициент использования энергии накопительного конденсатора в целом уменьшаются как при аperiодическом, так и при колебательном разрядах при всех значениях емкости накопительных конденсаторов.



$L = 5,4 \text{ мкГн}; C = 1,0 \text{ мкФ}$



$L = 160 \text{ мкГн}; C = 2,0 \text{ мкФ}$

Рис. 4. Характерные осциллограммы разрядных токов и падений напряжения в серийной стреляющей полупроводниковой свече для низковольтного макета системы зажигания колебательного разряда

Данный результат противоречит результатам исследований влияния индуктивностей катушек на энерговыделение в полузакрытых полупроводниковых свечах. Объяснение этому эффекту заключается в механизме развития разряда в стреляющих свечах, в которых растяжение канала разряда и выброс плазмы разряда за рабочий торец свечи происходит под действием кумулятивного эффекта. При увеличении индуктивности катушек происходит возрастание длительности разрядов и соответствующее уменьшение мощности разрядов; при этом в месте образования разрядов вблизи поверхности полупроводника в рабочей камере свечи снижается интенсивность ударной волны, ответственной за растяжение канала разряда и величину падения напряжения в разряде. Таким образом, при увеличении индуктивности падает

мощность разрядов, уменьшается выброс плазмы разряда, соответственно, снижаются падение напряжения в разряде и энергия разрядов.

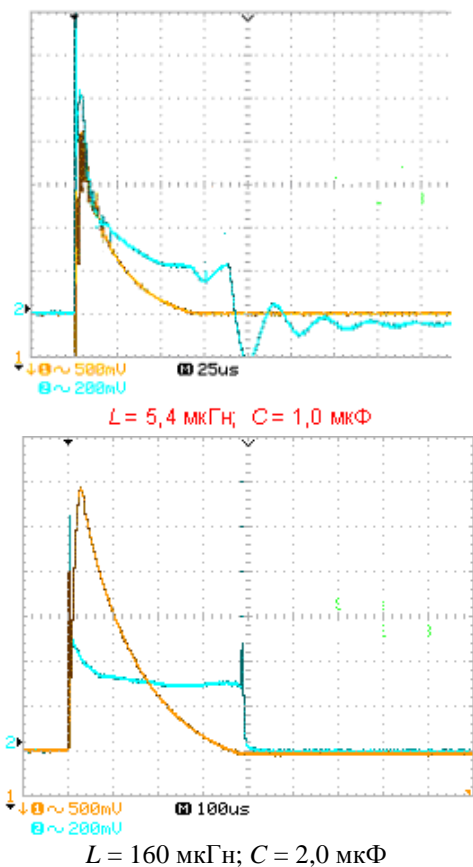


Рис. 5. Характерные осциллограммы разрядных токов и падений напряжения в серийной стреляющей полупроводниковой свече для высоковольтного макета системы зажигания аperiodического разряда

В ходе экспериментальных исследований установлено, что минимальное значение индуктивности катушек, обеспечивающее максимальное энерговыделение в свече при сохранении положительных свойств аperiodического разряда составляет 5,4 мкГн. При дальнейшем уменьшении индуктивности энергия разрядов незначительно увеличивается, но разряд в свече становится пульсирующим; на аperiodическую составляющую тока накладывается существенная колебательная составляющая. При этом через разрядник и накопительный конденсатор протекает ток в течение всей длительности разряда, что приводит к исключению ряда положительных свойств, присущих аperiodическому разряду.

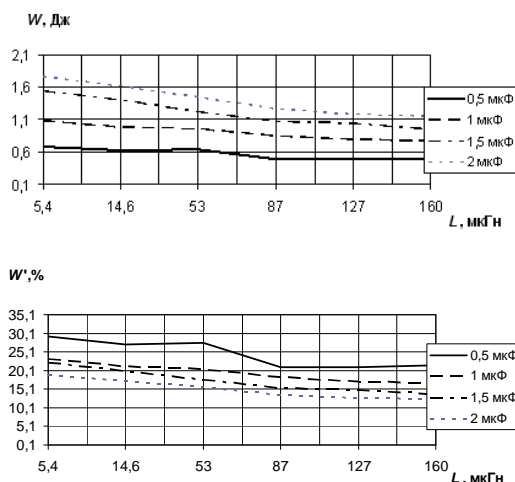


Рис. 6. Расчетные зависимости $W = f(L, C), W', \% = f(L, C)$ для низковольтного макета системы зажигания аperiodического разряда

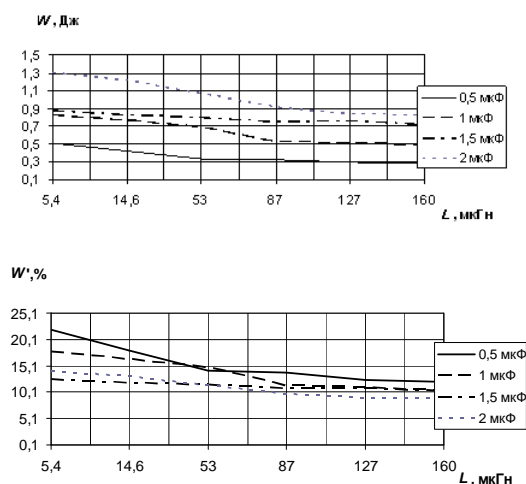


Рис. 7. Расчетные зависимости $W = f(L, C), W', \% = f(L, C)$ для низковольтного макета системы зажигания колебательного разряда

1. Подтверждено, что для получения максимального отношения индуктивностей катушек к их активному сопротивлению, обеспечивающего наибольшую энергию разрядов, целесообразно использовать сердечники для катушек индуктивности из диамагнитного материала – меди.

2. Коэффициент использования энергии накопительного конденсатора при изменении емкости накопительных конденсаторов и индуктивности разрядной цепи меняется в пределах от 6 до 29 %, причем с увеличением емкости конденсатора коэффициент использования энергии уменьшается.

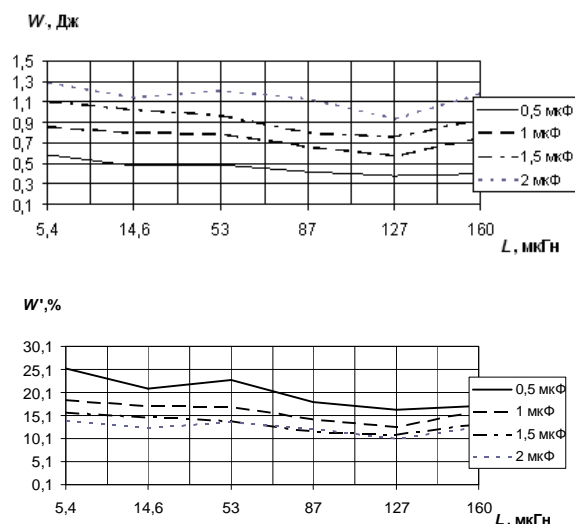


Рис. 8. Расчетные зависимости $W = f(L, C)$, $W', \% = f(L, C)$ для высоковольтного макета системы зажигания аperiodического разряда

3. Установлено, что в стреляющей свече по сравнению с полузакрытой свечой при прочих равных условиях выделяется существенно большая энергия за счет описанного выше кумулятивного эффекта.

4. При аperiodическом разряде энергия, выделяющаяся в стреляющей свече, превышает энергию колебательного разряда, причем это превышение снижается при увеличении емкости накопительного конденсатора.

5. С точки зрения энергетической эффективности высоковольтная система зажигания аperiodического разряда является менее предпочтительной по сравнению с низковольтной системой зажигания.

Необходимо отметить, что разрядная цепь емкостной системы зажигания с индуктивностью, обеспечивающей максимальное энерговыделение в свече, не гарантирует максимальной воспламеняющей способности системы зажигания. Как известно, оптимальная длительность искровых разрядов, определяемая индуктивностью, зависит от организации рабочих процессов в камерах сгорания и пусковых воспламенителях газотурбинных двигателей, от скорости потока топливоздушной смеси в зоне рабочего торца полупроводниковой свечи. При малой скорости потока смеси целесообразна высокая мощность разрядов, т. е. малое значение индуктивности разрядной цепи, при высокой скорости потока топливоздушной смеси предпочтительна большая длительность раз-

рядов, т. е. меньшая мощность при том же уровне энергии разрядов [2, 4].

Таким образом, закономерности разрядных процессов в стреляющих полупроводниковых свечах отличаются от закономерностей процессов в открытых и полузакрытых полупроводниковых свечах. Влияние индуктивности разрядной цепи на энергетическую эффективность стреляющих свечей является отрицательным по сравнению с другими типами полупроводниковых свечей, что связано с механизмом развития разряда в разрядной камере стреляющей свечи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гизатуллин Ф. А. Емкостные системы зажигания. Уфа: УГАТУ, 2002. 249 с.
2. Гизатуллин Ф. А. К теории искрового воспламенения топливоздушных смесей в газотурбинных двигателях // *Авиационная промышленность*. 2000. № 1. С. 56–60.
3. Гизатуллин Ф. А., Валиуллина З. Г. О прогнозируемых возможностях имитационной и схемотехнической моделей применительно к емкостным системам зажигания ГТД // *Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвуз. науч. сб.* Уфа: УГАТУ, 2006. С. 168–173.
4. Гизатуллин Ф. А. Методология определения параметров систем зажигания для ГТД с различными условиями воспламенения смеси // *Вестник УГАТУ*. 2005, Т.6, №2. С. 67–72.

ОБ АВТОРАХ

Гизатуллин Фарит Абдулганеевич, проф. каф. электромеханики. Дипл. инженер-электромех. (УАИ, 1972). Д-р техн. наук по тепл. двигателям летательн. аппаратов, элементам и устройствам вычисл. техн. и систем управления (УГАТУ, 1994). Иссл. в обл. электрооборудования летательн. аппаратов, систем зажигания ГТД.

Салихов Ренат Мунирович, ст. преп. той же каф. Дипл. инженер (УГАТУ, 1997). Канд. техн. наук по электротехн. комплексам и системам (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. систем зажигания ГТД.

Лобанов Андрей Владимирович, доц. той же каф. Дипл. инженер (УГАТУ, 2004.). Канд. техн. наук по электротехн. комплексам и системам (УГАТУ, 2009г.). Иссл. в обл. систем зажигания ГТД.

Чигвинцев Вадим Алексеевич, техн. дир. – первый заместитель генерального директора ОАО «УАПО».

Ищейкина Татьяна Михайловна, асп. той же каф. Дипл. инженер (УГАТУ, 2011.). Иссл. в обл. систем зажигания ГТД.

Галиев Руслан Витальевич, студент, лаборант кафедры электромеханики. Иссл. в обл. систем зажигания ГТД.