

Еще раз о Лямбда-зонде



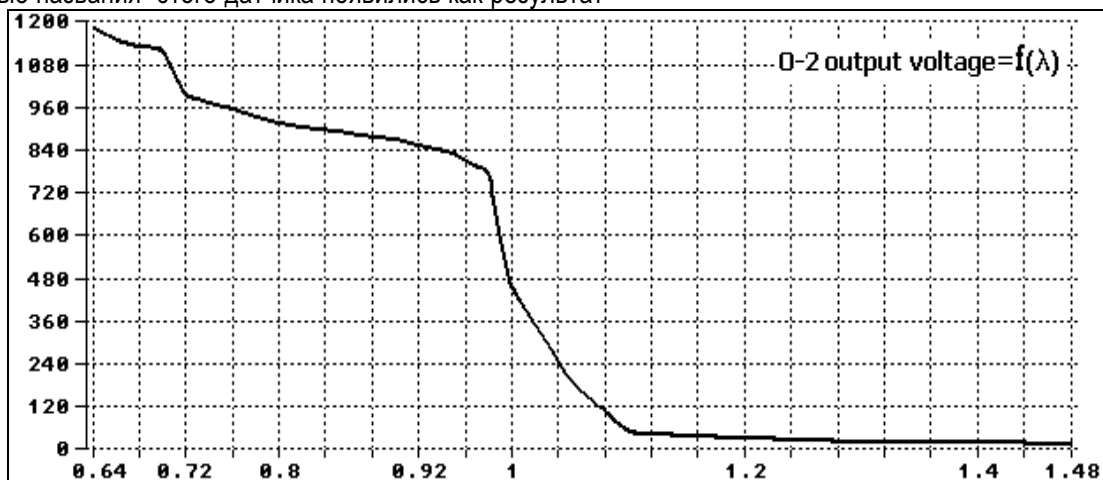
В.П.Лещенко(al)

Хочу выразить свою признательность W. Kucher (KVP), Victor A. Zavarzin (Amigo_24), Alex Sherbakov (mkll, <http://www.jnc.farpost.com/>), Kraynov Sergey (Ochkarik), А. Кочкину (<http://todes.org.by/~ktchkn/>), Dale W. Hodge, Web-мастеру www.dnd-automotive.com за помощь в написании этой статьи. Написание этой статьи было бы не возможно без помощи Evgeny Gusarov (IcarS, <http://future.quarta.ru/icars/>). Хочу особо отметить вклад Alexey V. Uphimcev, (Alexey из Ангарска) и Andrey Stepanov, чьи консультации, анализ, уточнения и т.п. просто неоценимы и которых можно считать полноправными соавторами.

Датчик содержания кислорода в выхлопных газах (EGO, Лямбда-зонд, O_2 sensor, Oxygen Sensor) является ключевым датчиком в системе обратной связи управления подачей топлива в инжекторной системе автомобиля. Лямбда-зонд (ЛЗ) является одним из немногих датчиков автомобиля, которые сами генерируют (вырабатывают) напряжение. Исторически сложилось называть отношение количества воздуха к количеству топлива, которое поступает в цилиндры двигателя внутреннего сгорания, коэффициентом Лямбда. При стехиометрическом составе топливно-воздушной смеси (14.7:1) коэффициент $\lambda=1$. Так возник термин Лямбда-зонд. Остальные названия этого датчика появились как результат

использования дословного перевода, звучания термина на русском языке и т.п.

Обращаю Ваше внимание на то, что механизм возникновения э.д.с. в чувствительном циркониевом элементе ЛЗ представляет собой сумму достаточно сложных для описания электрохимических реакций на границе Pt | ZrO_2 . Надеюсь, что этой теме будет посвящена статья уважаемого Andrey Stepanov'a. Только отмечу, что платиново-циркониевый элемент находится в одном ряду с другими гальваническими элементами, вырабатывающими напряжение при разности освещенности, давления, температуры и т.п.



Выходная характеристика циркониевого Лямбда-зонда.

ECU использует выходное напряжение ЛЗ для того, чтобы оптимизировать топливно-воздушную смесь при различных режимах работы двигателя. Когда ЛЗ прогрет, по крайней мере, выше $300^{\circ}C$ между электродами Pt | ZrO_2 возникает разность потенциалов, величина которой изменяется согласно разности давления (содержания) кислорода в выхлопных газах двигателя и в наружном воздухе. Чем больше концентрация кислорода в выхлопных газах, тем меньше выходное напряжение ЛЗ. Диапазон выходного напряжения ЛЗ составляет 0.1-1.2в. Максимальное возможное выходное напряжение зависит от типа ЛЗ. При стехиометрическом составе топливно-воздушной смеси (14.7:1), его выходное напряжение составляет примерно 0.4-0.5 вольт.

При исправной инжекторной системе выходное напряжение ЛЗ постоянно реагирует на изменения в составе топливно-воздушной смеси. Система находится в режиме замкнутой обратной связи, при котором происходит т.н. Лямбда-регулирование количеством топлива подаваемого в цилиндры. Например, если ECU определяет топливную смесь как бедную (низкое выходное напряжение ЛЗ), то он увеличивает время открывания форсунок и проверяет реакцию (т.е. вновь «считывает» напряжение ЛЗ). В зависимости от результата продолжает уменьшать количество топлива или, если произошло перерегулирование, увеличивает время открывания форсунок. Следует отметить, что описанный алгоритм характерен для зондов на основе диоксида циркония,

Еще раз о Лямбда-зонде...

выходное напряжение которых прямо пропорционально разности содержания кислорода. Для зондов на основе титана характерно «скачкообразное» изменение выходного напряжения. Электронщики сказали бы, что титановый ЛЗ работает в «ключевом режиме». У большинства ЛЗ время перехода из индикации состояния богатой смеси в состояние соответствующее бедной составляет примерно 80-120 миллисекунд, и 100...150 миллисекунд при переключении в обратном направлении. Обычно этот параметр, т.е. время переключения, определяют термином «постоянная времени». Например, на графиках (Рис.1) время переключения ЛЗ (участок **b**) составляет 50 мс.

Снижение быстродействия является первым этапом ухудшения выходных параметров ЛЗ. Это вызывает запаздывание в цепи обратной связи при поддержании правильного состава топливной смеси и резко снижает эффективность управления. При этом ухудшаются характеристики управляемости автомобиля (потеря мощности, повышенный расход или повышенное содержание вредных веществ в выхлопных газах).

С 1994 автомобили, оборудованные системой самодиагностики OBD II (On Board Diagnostics II) обнаруживают повышенную инерционность ЛЗ и информируют об этом водителя включением индикаторной лампы неисправности («Check Engine»). Обычные системы самодиагностики этот недостаток ЛЗ не идентифицируют.

Неисправность ЛЗ возможная, но далеко не единственная из возможных причин большого расхода и неустойчивого ХХ автомобиля!

Достоверность соответствия выходного напряжения ЛЗ составу топливной смеси могут снижать «подсос» воздуха во впускной коллектор, потеря герметичности выхлопной системы и даже загрязненная или неисправная свеча зажигания. Пропуск воспламенения в цилиндре вызывает попадание несгоревшего из-за отсутствия искры кислорода в выхлопную систему и провоцирует «ложное» (в данном случае, пониженное) выходное напряжение ЛЗ. Т.е. возникает ситуация, при которой его выходное напряжение не соответствует истинному количеству топлива попавшего в цилиндр.

Для уменьшения времени прогрева датчика, т.е. сокращения времени вхождения в рабочий режим и устранения охлаждения датчика при ХХ двигателя в некоторых датчиках используется нагревательный элемент. Признаком таких ЛЗ является большее количество контактов и несколько иная конструкция. Подогреваемые ЛЗ достигают рабочей температуры (500°C и более) за десятки секунд! Сокращение времени вхождения в рабочий режим «closed loop» позволяет уменьшить расход топлива, сократить количество выбросов вредных веществ в атмосферу, продлить срок службы катализатора.



Downstream Oxygen Sensor (Photo courtes Alexander M. Kochkin)

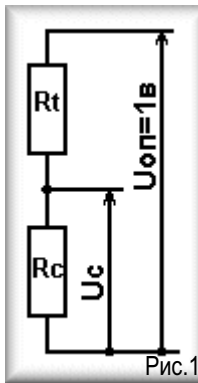


Применение датчиков с подогревом позволяет их устанавливать на большем расстоянии от выпускного коллектора и после катализатора (как это имеет место в

инжекторных системах оборудованных диагностической системой OBDII).

Вполне допустима установка вместо обычного ЛЗ датчика с подогревом (практика замен описана на <http://www.alflash.narod.ru/Teorie.htm>). Обратная замена недопустима из-за значимой вероятности того, что вновь установленный зонд не всегда будет работать в необходимом температурном режиме.

В некоторых автомобилях нашли применение ЛЗ, в которых используется вместо циркониевого элемента - **ТИТАНОВЫЙ**. Принцип действия титанового ЛЗ



полностью отличается от принципа работы циркониевого датчика и заключается в изменении его проводимости при приложении напряжения в зависимости от содержания кислорода в газовой среде. Титановый ЛЗ не вырабатывает напряжение, а изменяет свое сопротивление в зависимости от изменений состава топливной смеси. Т.е. имеет отличную от нуля и положительную

первую производную сопротивления по температуре, dR/dK , где K - концентрация кислорода. Вместо постепенного изменения (как происходит изменение выходного напряжения циркониевого), этот датчик изменяет своё сопротивление скачкообразно от малого (менее 1 кОм) при богатой смеси, к большому (более 20 кОм) при обедненной смеси. Наличие гистерезиса, т.е. разности порогов срабатывания при переходе от богатой к бедной смеси и наоборот, не установлено. Из-за ограниченного распространения и относительной новизны датчиков этого типа, информации о них немного.

Титановые зонды широко использовались в некоторых моделях Nissan: Stanza 4WD (1986 г.в. и позже), Maxima и Sentra models (1987 и ранее), Mitsubishi (GT 3000) и других. Chrysler также использует их на Jeep Cherokee, Wrangler.

Из ECU на титановый зонд поступает опорное напряжение (примерно 1 в) от эталонного источника тока с высоким выходным сопротивлением. Изменение состава топливно-воздушной смеси вызывает скачкообразное изменение сопротивления титанового датчика и, как следствие, скачкообразное изменение протекающего через него тока. Соответственно этому, изменяется падение напряжения на включенном последовательно с датчиком сопротивлении R_c . Т.е. титановый ЛЗ работает в «ключевом» режиме переключения, а у циркониевого выходное напряжение изменяется плавно. При богатой смеси сопротивление титанового ЛЗ мало и падение напряжения на эталонном сопротивлении (R_c) находится на высоком уровне (0.9 вольта) т.к. увеличивается протекающий ток. При бедной смеси его сопротивление увеличивается, как следствие, уменьшаются протекающий ток и выходное напряжение датчика (0.1 вольта). Т.о. несмотря на различие происходящих в

Еще раз о Лямбда-зонде...

датчиках физических процессах, их выходные характеристики во многом похожи... Инжекторная система Jeer оборудована титановым ЛЗ, на который подается эталонное напряжение 5 в. Его выходное напряжение примерно 5 вольт и 1 вольт соответственно. Датчик Jeer можно проверить омметром, отсоединив его (при выключенном двигателе) и измеряя его сопротивление (5...7 ом). Бесконечное сопротивление указывает на неисправность ЛЗ.

По сравнению с циркониевыми ЛЗ, титановые имеют некоторые преимущества.

- отсутствие необходимости контакта с атмосферой
- значительно меньшее время прогрева, т.е. меньшее тепловое сопротивление (приблизительно 15 секунд)
- возможность использования при более низких температурах выхлопа и, как следствие, расположение на большем расстоянии от двигателя, а так же использование на двигателях с турбокомпрессором

Есть у них и недостатки. Циркониевые датчики за счет плавности своей выходной характеристики, позволяют улучшить точность поддержания оптимального состава смеси. В настоящее время, титановые датчики, даже в фирме Nissan впервые их применившей, постепенно вытесняются циркониевыми.

«Моторесурс» ЛЗ – составляет примерно от 50 до 80 тыс. км. Преждевременную «кончину» датчика провоцируют:

- продукты сгорания насыщенных углеводородов моторного масла (при низкой кондиции маслосъемных колец или колпачков)
- применение этилированного бензина, а также бензинов с железом - и марганец - содержащими октаноповышающими добавками, появившимися в последнее время (известных среди автомобилистов как «красная смерть» свечей)
- попадание продуктов кремнийорганических (силиконовых) герметиков
- составные части охлаждающей жидкости, попавшие в выхлопной тракт

В результате этих воздействий постепенно возрастает постоянная времени датчика. В конечном счете, это приводит к отсутствию реакции датчика на состав топливно-воздушной смеси, т.е. к полной его не работоспособности. Выходное напряжение ЛЗ перестает изменяться, отсутствует или в нем появляется отрицательная составляющая. Система самодиагностики идентифицирует эту неисправность и инжекторная система переходит в режим «open mode», при котором ECU не учитывает показания датчика при формировании рабочей смеси. Об этом состоянии информирует не потухший, после заведения двигателя, транспарант на приборном щитке «Check Engine». При этом возникают проблемы при ХХ, повышенный расход, недостаточная динамика разгона и т.п.

Если выходное напряжение ЛЗ постоянно больше 0.5 в, то это может являться признаком обогащенной смеси. Обычно это возникает при неисправностях датчика разрежения во впускном коллекторе (MAP) или датчика потока воздуха (MAF), потерей герметичности форсунок (смотрите описание такой неисправности и графики выходного напряжения ЛЗ на <http://www.alflash.narod.ru/1si.htm>), повышенным давлением в топливной системе или неисправностью самого

ЛЗ. Например, графики выходного напряжения неисправного и нового ЛЗ инжекторной системы двигателя FE (<http://www.alflash.narod.ru/fe.htm>). «Введенный в заблуждение» ECU в попытке компенсации якобы «богатой» смеси, реагирует на эту ситуацию уменьшением времени открывания форсунок.

Если выходное напряжение ЛЗ постоянно меньше 0.45 в, то это признак обедненной смеси. Это может быть вызвано неисправностями датчика разрежения во впускном коллекторе (MAP) или датчика потока воздуха (MAF), негерметичностью вакуумной системы («подсос» воздуха во впускной коллектор), пониженным давлением в топливной системе, недостатками системы искрообразования, неисправностью самого датчика. ECU в попытке компенсации якобы «бедной» смеси, реагирует на эту ситуацию увеличением времени открывания форсунок. Это приводит к повышенному расходу топлива, увеличению содержания CO, может спровоцировать преждевременный выход их строя каталитического нейтрализатора.

При анализе выходного напряжения ЛЗ следует учитывать, что видимое состояние датчика может быть вызвано не только его неисправностью, но и другими причинами. Проверьте состояние датчика температуры для ECU, давление в топливной системе, герметичность вакуумной и топливной систем, исправность системы зажигания и форсунки холодного пуска и т.п.

При проведении диагностики используйте стрелочный вольтметр, а ещё лучше, осциллограф. Выходное напряжение датчика при исправной инжекторной системе и при ХХ должно постоянно изменяться от высокого к низкому уровню и обратно. Эти флуктуации напряжения является признаком того, что ECU находится в режиме «closed loop» и постоянно отслеживает и регулирует (feedback) состав топливно-воздушной смеси. Например, смотрите графики выходного напряжения исправных ЛЗ в материалах <http://www.alflash.narod.ru/learn.htm> <http://www.alflash.narod.ru/mmc.htm> <http://www.alflash.narod.ru/Vf1/Vf1Toyota.htm>.

Обратите внимание на то, что при резком открывании дроссельной заслонки происходит некоторое обогащение топливной смеси (участок 2 на рис.1). При сбросе газа и на принудительном ХХ - значительное обеднение её состава. Обращаю внимание на то, что выходное напряжение ЛЗ изменяется с некоторой задержкой, что вызвано удаленностью от выпускных клапанов и обычной инерционностью.

В среднем выходное напряжение должно колебаться в диапазоне от 400 до 500 милливольт:

- минимальное напряжение, примерно, 0.2 в и меньше;
- максимальное напряжение, примерно, 0.7 в и больше.

НИКОГДА не проверяйте сопротивление циркониевого датчика омметром при заведенном двигателе.

НИКОГДА не соединяйте сигнальный провод датчика с минусом, «землей», «общим» и т.п.

Еще раз о Лямбда-зонде...

Практически каждый владелец автомобиля знает о необходимости периодической замены свечей зажигания. Но, увы, не многие понимают необходимость замены ЛЗ после:

- 50 000...80 000 км пробега
- применения нашего, не всегда неэтилированного, бензина
- попадания масла в выхлопную систему из-за несвоевременно замененных маслосъемных колпачков
- прогорания прокладки и последующего попадания в выхлопную систему тосола
- применения в очень «фирменном» сервисе тамошними мастерами силиконового герметика при ремонте прокладки сочленения выхлопной системы

И только значительно возросший расход, проблемы с ХХ или динамикой заставляют начинать поиск причин их возникновения.

Анализ возможных причин выхода из строя датчика на основе его внешнего вида выходит за рамки данной статьи.

Проведение диагностики ЛЗ начните со считывания кодов ошибки и других проверок, например, Vf1-диагностика для Toyota и аналогичные для Mazda и Mitsubishi. Если соответствующие коды неисправности датчика не считаны, то это ещё не свидетельство его исправности. Некоторые системы самодиагностики определяют только «крайние» ситуации (обрыв или замыкание сигнального провода), но определение снижения быстродействия датчика для них не доступно. Наличие кода является необходимым, но не достаточным условием замены датчика. Обрыв провода или его замыкание, нарушенная герметичность вакуумной системы и др. могут спровоцировать появление кода соответствующего неисправному датчику. Проверьте диапазон выходного напряжения датчика, время переключения из состояния «богатая смесь» (rich mixture) в состояние «бедная смесь» (lean mixture) при разных режимах

работы двигателя.

Рассмотрим участки «А» и «В» (Рис. 1). И тот и другой соответствуют переходу в состояние обогащенной смеси. Но, участок «А» соответствует режиму лямбда-регулирования составом топливной смеси и характеризует постоянную времени *инжекторной системы* в режиме «Closed Mode» (ECU Manegment time constant., $a=800$ мс). Длительность этого участка не может быть критерием оценки постоянной времени (быстродействия) ЛЗ, потому что она определяется скоростью увеличения подачи топлива ECU. Т.е. тем, на сколько длительность открывания форсунки в следующем рабочем такте будет больше чем в настоящий момент.

Участок «В» – суть реакция ЛЗ на резкое возобновление подачи топлива (момент времени «С»). Только в этом режиме длительность переключения зонда может служить критерием оценки его быстродействия, т.к. в этой ситуации происходит резкое увеличение количества топлива, и время переключения зонда зависит только от его динамических свойств. Постоянная времени данного датчика, O_2 -time constant., $b=300$ мс.

Проанализируйте реакцию выходного напряжения на подачу во впускной коллектор дополнительного воздуха (при кратковременном снятии вакуумного шланга с подходящего штуцера впускного коллектора). При этом выходное напряжение датчика должно уменьшиться.

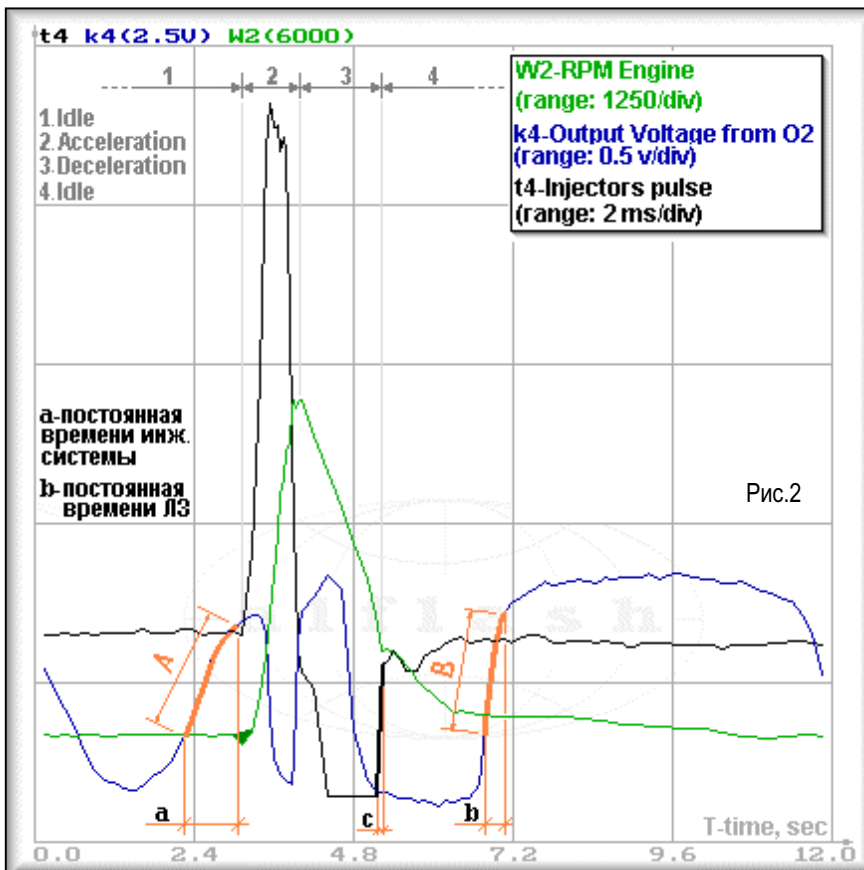
Сняв и заглушив вакуумный шланг со штуцера регулятора давления в топливной системе, Вы сможете увеличить давление в ней и, как следствие, увеличить

количество топлива поступающего в цилиндры. Исправный датчик не может этого не заметить и его выходное напряжение должно увеличиться.

На карбюраторных двигателях искусственно обогатить топливную смесь можно принудительным прикрыванием воздушной заслонки. При этом выходное напряжение исправного ЛЗ должно заметно увеличиться.

ALLDATA описывает похожую процедуру «Testing The Oxygen Sensor Using Propane», но это тема другой заметки.

...Свойства тетрагонального (β) порошка и керамики из ZrO_2 чувствительны к воздействию различных активных сред. В результате таких воздействий высокотемпературная β -фаза может претерпевать превращение в моноклинную α -фазу, что приводит к значительному изменению свойств исходного материала, вплоть до потери свойств ионной проводимости. Наличие в бензинах таких веществ как свинец,



Еще раз о Лямбда-зонде...

сера, кремний, марганец, железо, мышьяк и др. даже в небольших количествах провоцирует фазовые изменения в зоне **Pt | ZrO₂**. Особую «страсть» к платине испытывает свинец, который создает с платиной **твердые растворы**, тем самым, изменяя потенциал электрода на границе фаз цирконий-платина. Отложения продуктов окисления ненасыщенных углеводородов моторного масла снижают кислородную проводимость циркониевой керамики, **легированной оксидом иттрия** и снижают чувствительность датчика. Регенерация ЛЗ правильно подобранными химическими реагентами, по появляющимся в последнее время сообщениям возможна, однако рецептура и технология регенерации является собственностью её авторов и мне неизвестна. При этом очевидно (и авторами не отрицается), что восстановлению не подлежат зонды с большим сроком эксплуатации (более 100-160 т. км), зонды с разрушенным наружным чувствительным слоем, т.е. при необратимых изменениях чувствительного элемента.

Кроме этого, «отравление» ЛЗ (платиновых электродов) соединениями свинца не устраняется тем же способом, что и при загрязнении ЛЗ (его твердого электролита на основе ZrO₂ легированного оксидом иттрия) продуктами сгорания насыщенных углеводородов моторного масла. Силиконовое «отравление» по «своей химии» совершенно отличается от сути процесса «старения» зонда.

По сообщениям авторов, срок работоспособности восстановленных зондов составляет 0.5-1.5 года. Наиболее актуальны попытки восстановления зондов инжекторных систем с OBDII-диагностикой, при которой используется 3-4 ЛЗ. Это целесообразно как с экономической точки зрения, так и из-за нежелания системы «входить» в «closed loop», при малейшем отклонении от заданных экологических параметров (уже после однократной заправке этилированным бензином). Не стоит исключать возможность восстановления и дефицитных титановых зондов.

На <http://todes.org.by/~ktchkn/lambda.htm> описана невозможность восстановления циркониевого ЛЗ при отслаивании наружного «главного» слоя, принимающего «на себя» действие контактных ядов в процессе эксплуатации.

В случаях с циркониевыми зондами, на мой взгляд, более правильный путь – это установка ЛЗ BOSCH. Как более доступных чем «родные» (я не гарантирую стоимость «фирменных» Sensors Lean Mixture Part No. 89463-... для 4A-FE learn burn, AT190, 02'92-11'94 менее 240 \$ и Oxygen Sensor Part No. 89465-... для обычного 4A-FE менее 70).

Поэтому напрашивается следующий алгоритм «ремонта»:

- Достоверная и однозначная диагностика;
 - *Попытка восстановления «родного» ЛЗ;
 - *Попытка установки ЛЗ от ВА3-BOSCH;
 - *Попытка установки оригинального ЛЗ;
 - *Отсутствие вмешательства вообще.
- *Обязательность выполнения субъективна.

«Проверка» состояния ЛЗ с помощью **пропановой** газовой горелки.

1- или 2-х проводные циркониевые ЛЗ (т.е. не подогреваемые) могут проверяться при нагреве в факеле **пропановой** горелки с одновременным контролем выходного напряжения. Подключите «+» вольтметра с высокоомным входным сопротивлением к сигнальному выходу, а «-» к корпусу. Обеспечьте надежный контакт. Нагрейте рабочую (перфорированную) часть датчика до вишнево-красного цвета. Датчик можно считать исправным, если при этом его выходное напряжение составит не менее 0.5-0.6 в и будет резко изменяться при перемещении из зоны пламени и обратно. Малое выходное напряжение, отрицательная составляющая или отсутствие изменений при перемещении зонда, могут служить поводом для замены».

Попытки замены ЛЗ на имитатор выходного напряжения и т.п. «примочки» считаю **неконструктивным амампством** (смотрите <http://www.alflash.narod.ru/Vf1/Vf1Toyota.htm>).

При замене датчика с резьбовым соединением обязательно очищайте место установки с помощью метчиков. Не используйте герметики. Используйте графитовую смазку (обычно нанесена на резьбовую часть нового ЛЗ).

Ниже приведено англоязычное описание аналогичной проверки.

Testing O2 sensors on the workbench.

Use a high impedance DC voltmeter as above. Clamp the sensor in a vice, or use a pliers or vice-grip to hold it. Clamp your negative voltmeter lead to the case, and the positive to the output wire. Use a propane torch set to high and the inner blue flame tip to heat the fluted or perforated area of the sensor. You should see a DC voltage of at least 0.6 within 20 seconds. If not, most likely cause is open circuit internally or leads fouling. If OK so far, remove from flame. You should see a drop to under 0.1 volt within 4 seconds. If not likely silicone fouled. If still OK, heat for two full minutes and watch for drops in voltage. Sometimes, the internal connections will open up under heat. This is the same a loose wire and is a failure. If the sensor is OK at this point, and will switch from high to low quickly as you move the flame, the sensor is good. Bear in mind that good or bad is relative, with port fuel injection needing faster information than carbureted systems. ANY O2 sensor that will generate 0.9 volts or more when heated, show 0.1 volts or less within one second of flame removal, AND pass the two minute heat test is good regardless of age. When replacing a sensor, don't miss the opportunity to use the test above on the replacement. This will calibrate your evaluation skills and save you money in the future. There is almost always *no* benefit in replacing an oxygen sensor that will pass the test in the first line of this paragraph.

NASA использует **диоксид циркония** даже на Марсе (http://infoart.kazan.su/misc/spacenews/99/03/29_496.htm)

Использованы материалы:

- В. И. Алексеенко, Г. К. Волкова. Адсорбционный механизм фазового превращения стабилизированного диоксида циркония. Журнал технической физики, 2000, Т. 70, вып. 9.
 - А. Б. Ярославцев, А. В. Степанов // Журнал неорганической химии, 1994, Т. 39, N5, с. 827-829
 - <http://todes.org.by/~ktchkn/lambda.htm>
 - <http://www.dnd-automotive.com/tune-emiss.htm>
 - <http://www.forparts.com/o-21.htm>
 - <http://www.forparts.com/o-2.htm>
 - <http://www.engr.ucdavis.edu/~avsmith/o2sensor.html> «Testing O2 sensors on the workbench», by **Rick Kirchof**, Austin, Texas
 - «Understanding Oxygen Sensors», by **Dave Cappert**
-

© 2000 **al tech page** (<http://www.alflash.narod.ru>)

При перепечатке - согласование с автором обязательно.

Деятелей карсофта - **прошу не беспокоить!**

mailto: al@om.od.ua