Довольно много споров происходит по поводу всевозможных устройств подогрева (подкала) свечи калильного двигателя во время полета модели самолета, или во время движения авто- или судомодели. Давайте рассмотрим, какими плюсами и минусами могут обладать подобные устройства, и проанализируем, насколько они необходимы.

Для нормальной работы калильного двигателя необходимо, чтобы свеча была раскалена до вполне определенной температуры, которая может существенно изменяться в зависимости от типа двигателя, его рабочего объема, режима работы, состава горючей смеси, температуры окружающего воздуха, и т.д. и т.п. Кроме того, сами свечи, как известно, имеют вполне определенные температурные свойства (которые определяют так называемое "калильное число" свечи), и подразделяются на "горячие", "холодные" и "промежуточные".

Калильное число прежде всего характеризует количество тепловой энергии, которая может быть запасена разогретой спиралью свечи (катализационные свойства свечей здесь рассматривать не будем). Очевидно, что для гарантированного воспламенения горючей смеси (ГС) в камере сгорания ДВС требуется какая-то энергия, которая как раз и запасается спиралью свечи. Для запуска холодного двигателя эта энергия "вкачивается" в спираль от внешнего источника питания (аккумулятора или батареи), в процессе работы спираль подогревается тепловой энергией сгорающей ГС. Учитывая температурную инерцию свечи процесс ее разогрева и остывания имеет какие-то временнЫе параметры - свеча не может раскалиться мгновенно, разогрев происходит в течение вполне определенного времени, и также постепенно свеча остывает после прекращения ее подогрева раскаленными газами (после окончания такта "рабочий ход"), или после отключения внешнего источника электропитания. Разумеется, что через какое-то время после этого температура спирали уменьшается настолько, что уже не может поджечь свежую порцию ГС в камере сгорания. Калильное число и определяет, в конечном итоге, время остывания свечи. "Горячая" свеча остается разогретой до рабочей температуры дольше, чем "холодная".  Разделим весь температурный диапазон работы свечи на три условных участка.

Первый (участок нерабочей температуры) - свеча разогрета недостаточно для воспламенения ГС в камере сгорания. Двигатель не работает.

Второй (участок неоптимальной, критической работы) - свеча имеет температуру, при которой ГС уже может воспламениться, но не гарантировано, или еще не так интенсивно, чтобы двигатель работал стабильно.

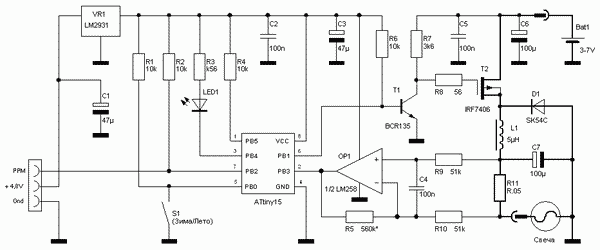
Третий (участок оптимальной работы) - свеча заведомо имеет температуру, позволяющую гарантированно воспламенить ГС в камере сгорания. Этот участок может переходить в режим "перекала" свечи, что отрицательно сказывается не только на ее долговечности, но и на режим работы двигателя на больших оборотах - двигатель начнет перегреваться. По температуре границы этих участков отличаются довольно незначительно - всего на несколько десятков градусов. Следовательно, крайне желательно обеспечить такой температурный режим спирали, который на любых оборотах двигателя будет находиться в оптимальной зоне. Очевидно, что при больших оборотах двигателя подогрев свечи за счет теплоты сгорающей ГС будет происходить интенсивнее (чаще по времени), так что температура свечи не будет снижаться ниже критической к моменту, когда потребуется воспламенить ГС на следующем обороте коленвала. На низких же оборотах увеличивается время, в течение которого свеча остывает, в результате чего стабильность воспламенения ГС резко ухудшается. Именно поэтому при запуске двигателя и его регулировках требуется постоянно подавать на свечу ток накала. Казалось бы, что проблему можно решить, установив на двигатель более горячую свечу, но это не так. Горячая свеча изменит угол опережения калильного зажигания в сторону увеличения, что приведет на больших оборотах к перегреву двигателя, и не позволит вывести его на режим максимальной мощности.  Холодная свеча, в свою очередь, потребует чтобы обороты двигателя не снижались ниже тех, при которых она будет остывать до критической температуры. Отсюда напрашивается следующий вывод: свечу, оптимизированную для работы на больших и средних оборотах, требуется дополнительно подогревать при уменьшении оборотов. Единственный способ это сделать - иметь на борту модели специальный источник энергии, от которого свеча и будет получать дополнительный подогрев на оборотах от самых малых, до средних.

Самым простым "драйвером подкала" свечи может служить обычная батарейка, типа той, которые применяют при запуске двигателя. Существенный недостаток такого решения - его постоянная работа. Во первых, при потребляемом токе ~3 А срок службы такой батарейки довольно не велик, всего 30-40 минут, а это всего 3-4 полета модели. Во вторых, свеча, получаемая подогрев сразу из двух источников - от батареи и от разогретых продуктов сгорания ГС - будет перекаливаться, что снизит ее ресурс, и как я писал выше, не позволит оптимально настроить режимы двигателя. Следовательно, разумнее обеспечить плавное (или ступенчатое) ограничение потребляемого свечей тока в зависимости от оборотов двигателя.  В качестве управляющего может использоваться сигнал, поступающий на рулевую машинку, регулирующую открытие дроссельной заслонки карбюратора двигателя. При этом можно даже обойтись без дополнительного канала управления. Правда, с одним "но" - заводить, прогревать и регулировать двигатель придется только на самых малых оборотах, когда на свечу будет подаваться максимальное напряжение. Не очень удобно. Точнее - совсем не удобно. Конечно можно предусмотреть какую-либо коммутацию, обеспечивающую при заводке двигателя подачу на свечу максимального напряжения. Главное - перед взлетом не забыть переключиться в "крейсерский" режим. Догнать взлетевшую модель для переключения тумблера будет проблематично.  Более разумно использовать для управления драйвером подкала отдельного канала, в который микшировать сигнал канала газа. В этом случае применение трехпозиционного переключателя обеспечит три режима работы драйвера:

1. режим запуска: максимальное напряжение на свече, независимо от положения ручки управления дросселем;
2. полетный режим: напряжение на свече зависит от положения дроссельной заслонки, и изменяется от максимума на малых оборотах, до отключения подогрева при оборотах выше средних;
3. режим "подогрев свечи отключен".

Учитывая, что потребность в подобном устройстве возрастает с увеличением кубатуры двигателя (в больших двигателях свеча при продувке остывает более интенсивно), будем исходить из того, что применяемая аппаратура имеет достаточное количество каналов, и позволяет микшировать каналы между собой.  Будем считать так же, что режим холостого хода ДВС соответствует максимальной длительности канального импульса (~2 мс), а отключение подогрева должно происходить при среднем положении ручки управления дроссельной заслонкой двигателя, при длительности канального импульса равной 1,5 мс. Разумеется, можно сделать устройство, обеспечивающее плавное изменение тока накала свечи (или напряжения на ней), но как показывает опыт, вполне достаточно организовать ступенчатую регулировку тока накала, с шагом в 250-400 мА. Тогда потребуется всего 3-5 "ступеней" регулировки тока, допустим, так: 3,5-3,2-2,9-2,6-2,3-0 А ("0" соответствует отключению подогрева свечи). Величины ступенек регулировки не так принципиальны, гораздо важнее обеспечить стабильность тока при изменении напряжения питающей батареи. Батарею целесообразно использовать четырехбаночную NiCd, или двухбаночную LiPo, а регулировку тока осуществлять с помощью ШИМ-регулятора. Для обеспечения стабильного накального тока имеет смысл ввести обратную связь, сигнал которой будет определять скважность импульсов ШИМ-регулятора. ШИМ-регулятор обеспечит достаточно высокий КПД устройства (до 90-95%), при этом не стоит опасаться больших помех от этого регулятора - применение CL-фильтра на его выходе снизит помехи до минимума, ведь средний ток свечи не велик, и соизмерим с током, потребляемым мощными цифровыми серво-машинками, которые все чаще применяются на больших моделях.   
  
Проще всего реализовать подобное устройство на микроконтроллере ATtiny15. Эта микросхема не требует внешнего кварцевого резонатора, имеет скоростной ШИМ выход, и встроенный АЦП, который потребуется для организации обратной связи по напряжению. Применение микроконтроллера не только позволит индицировать режим работы устройства с помощью светодиода (-ов), но и даст возможность при необходимости обеспечить два-три различных варианта программной настройки драйвера под разные температуры окружающей среды. Кроме того, будет крайне желательна индикация исправности самой свечи. Вот теперь можно считать, что мы определили основные требования к устройству, и выбрали на чем будем его строить.

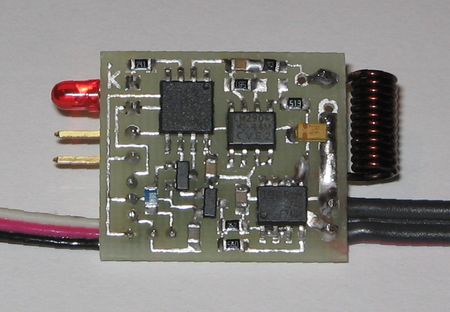
Большинство калильных свечей, применяемых на модельных двигателях, не зависимо от того, какая это свеча - горячая или холодная, рассчитаны на подогрев напряжением 1,2-1,5 В, и потребляют в нормальных условиях ток порядка 3 А. Это значит, что электрическое сопротивление спирали любой свечи равно примерно 0,4-0,5 Ома.  Мощность, потребляемая свечей, может достигать 5-6 Вт, при максимальном накальном токе ~4 А. При этом спираль свечи еще может передать в окружающее пространство все джоулево тепло, которое на ней выделяется. Превышение потребляемого тока величины 4 А обычно приводит к перегоранию спирали свечи, и выход ее из строя.  Исходя из этих параметров будем рассчитывать ШИМ-преобразователь. В принципе, для такой инерционной нагрузки, как калильная свеча, достаточно просто изменять скважность импульсного тока, коммутируя его с любой частотой выше 50-100 Гц (по такому принципу построены преобразователи практически во всех PowerPanel-ях). В этом случае напряжение источника питания может быть достаточно велико - до 20-30 вольт, главное, чтобы средний ток спирали не превысил указанное выше значение. Но в целях повышения КПД будет целесообразно применить схему так называемого "прямоходового" понижающего преобразователя, в которую наряду с ключевым элементом (на схеме - транзистор Т2) входит две реактивности: индуктивность (L1) и емкость (С7), и быстродействующий диод Шоттки (D1 - на схеме изображен как обычный диод), выполняющих роль автоматического коммутатора обратного тока. В то время, когда коммутирующий ключ Т2 преобразователя открыт, и на спираль свечи подается напряжение источника питания, индуктивность L1 накапливает в себе некоторое количество энергии. После закрытия коммутирующего ключа эта запасенная в индуктивности энергия подается через диод D1 в нагрузку (свечу). При частотах ШИМ-коммутации в несколько десятков килогерц величины индуктивности и емкости (а следовательно, и их габариты) оказываются не велики. Простейший расчет показывает, что для оптимальной работы преобразователя на частоте 100 кГц и максимальном токе в нагрузке 4 А вполне достаточно индуктивности величиной всего 5 мкГ и емкости около 100 мкф. Эти величины обеспечат пульсацию тока в нагрузке не более 0,02 вольта при токе 4 А.  Схема драйвера подкала свечи, построенная по описанному выше принципу приведена на рисунке.



Один из вариантов схемы "подкала" свечи с управлением микроконтроллером

Управляет работой устройства микроконтроллер ATtiny15, на вход которого (вывод 7) подается стандартный импульсный РРМ-сигнал с одного из каналов приемника. Контроллер измеряет канальный импульс, и в зависимости от его длительности осуществляет регулировку тока свечи. Измерение тока осуществляется ЦАП-ом микроконтроллера путем дифференциального контроля напряжения на токовом шунте (на схеме - R11) с использованием операционного усилителя ОР1. Такое решение, при некотором усложнении схемы, позволило ввести в ШИМ-преобразователь обратную связь, в результате чего ток свечи поддерживается постоянным независимо от напряжения силового питания драйвера, которое может быть в пределах от 3-х до 10-и вольт. Изменение тока свечи в зависимости от оборотов двигателя (точнее - от положения дроссельной заслонки карбюратора, или от длительности канального импульса) осуществляется контроллером - на самых малых оборотах (длительность импульса >1,9 мс) на свечу подается максимальный ток ~3,5 А, затем, с уменьшением длительности импульса ток свечи снижается тремя ступенями (~ 3,2 - 2,9 - 2,6 А), и при длительности импульса менее 1,45 мс (средние обороты), питание подогрева свечи отключается. Такой принцип управления подогревом свечи позволяет примерно в 5-7 раз увеличить время работы источника питания, без увеличения его емкости.  Одновременно с регулировкой тока свечи контроллер индицирует текущий режим работы: при отключенном питании свечи светодиод не светится, при токе 2,6 А светодиод однократно мигает с частотой примерно 1,2 с, при увеличении тока количество вспышек светодиода увеличивается последовательно до 2-х, 3-х, и 4-х с той же частотой, а при максимальном токе светодиод светится постоянно. При перегорании свечи светодиод выключен не зависимо от положения ручки управления дросселем. При коротком замыкании в цепи свечи преобразователь отключает подачу напряжения. При отсутствии или пропадании PPM-сигнала светодиод или светится постоянно, или отключается (это зависит от того, в какой момент индикации произошло пропадание сигнала).  В качестве сервисной опции устройство содержит выключатель S1 (обычный джампер от вычислительной техники), с помощью которого можно "сдвинуть" рабочие токи примерно на 10% в сторону увеличения или уменьшения. Думаю, подобная опция будет не лишней при изменении погодных условий (я назвал этот переключатель "Зима-Лето").  Питается устройство от двух источников - напряжение питания 4,8 вольта на контроллер и операционный усилитель подается по стандартному трехжильному кабелю от приемника. Схема содержит Low Dropout стабилизатор на микросхеме LM2931 (или аналогичный), с выходным напряжением 3,3 вольта.  Силовые цепи на схеме изображены толстыми линиями. Собственно преобразователь напряжения для подогрева свечи питается от отдельной батареи или аккумулятора, напряжение которого может быть любым в диапазоне от 3-х до 10 вольт. Оптимальным вариантом, как мне кажется, будет четырехбаночный NiCd или двухбаночный LiPo аккумулятор. В этом случае для их зарядки можно будет использовать стандартное зарядное устройство. Емкости аккумулятора вполне достаточно порядка 1,0-2,0 А/час. Такая батарейка гарантировано проработает без подзарядки не менее трех-четырех часов.  В схеме применены стандартные комплектующие. Большинство из них имеют SMD-конструктив, и только дроссель и электролитические конденсаторы обычные, предназначенные для "дырочного" монтажа. Токовый шунт (R11) состоит из нескольких обычных SMD-резисторов, включенных параллельно. При типоразмере резисторов 0805 их должно быть не менее 5-7 штук, в этом случае мощность рассеиваемая каждым резистором не превысит допустимую. Общее сопротивление шунта - 0,05 Ом. Если применить резисторы номиналом 0,5 Ом, то их следует включить 10 штук параллельно, это не займет много места на печатной плате.  Подбором резистора R5 (560 кОм) можно в значительной степени изменить пороговые значения тока свечи. При необходимости можно даже заменить этот резистор на последовательную цепочку, состоящую из постоянного резистора 300 кОм и подстроечного резистора 510 кОм.  Транзистор Т1, так называемый "цифровой", у него есть два внутренних резистора в базовой цепи, служит для согласования уровней между выходом микроконтроллера и затворной цепью MOSFET-ключа на Т2.

Дроссель можно намотать на ферритовом кольце марки НМ2000 типоразмера К15х9х5 (или близкого размера). Учитывая, что величина индуктивности не критична, будет достаточно всего двух-трех витков провода сечением не менее 0,6 мм2. Лучше всего намотать индуктивность в несколько параллельных проводников меньшего сечения (трех-четырех проводников диаметром 0,5-0,6 мм будет вполне достаточно), равномерно распределив их по всей окружности кольца. Можно поступить еще проще - намотать 10-12 витков провода диаметром ~0,9 мм на кусочке круглого ферритового стержня диаметром 5-10 мм и длиной ~15 мм. Такой дроссель будет работать даже лучше - магнитный материал стержня не будет перенасыщаться, чего нельзя исключить в случае применения кольцевого сердечника. Но самым оптимальным вариантом будет использование готового дросселя от любой материнской платы компьютера - на любой современной плате их бывает установлено не менее 3-5 штук.  Провод питания свечи желательно использовать экранированный, в термостойкой силиконовой изоляции, сечение его должно быть не менее 1 мм². Провод обязательно должен быть очень "мягкий" (гибкий). Экранирующую "плетенку" следует соединить непосредственно с головкой двигателя (сделать лепесток под один из винтов, крепящих головку), а не прикручивать ее в крепежной лапке картера.



Вариант драйвера подкала в "большом" формате (20х24 мм). С обратной стороны платы только стабилизатор напряжения в корпусе ТО92.

Настройка и управление устройством осуществляется с передатчика. Для его полноценной работы потребуется отдельный канал управления, который следует оснастить трехпозиционным переключателем (возможно - сдвоенным, это будет зависеть от конкретного типа аппаратуры управления). В одном их крайних положений тумблера ("Питание свечи выключено") следует установить минимальную длительность канального импульса (1 мс). В другом крайнем положении ("Полный накал свечи") длительность импульса устанавливается равной 2 мс (максимальная длительность). В среднем положении ("Полетный режим") должен включаться микшер, подмешивающий сигнал из канала управления газом двигателя. Подбором коэффициентов микширования и "растяжки" сигнала канала газа можно настроить "под себя" различные варианты работы устройства. Впрочем, любой моделист, имеющий компьютерную аппаратуру радиоуправления разберется с этим самостоятельно.