

Ситовский О. Ф., Деркач В. Л.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРЕДПУСКОВОГО ПОДОГРЕВА ДЛЯ ПОДЗАРЯЖАЕМЫХ ГИБРИДНЫХ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Введение. Условия эксплуатации колесных транспортных средств (КТС) с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) очень разнообразны. Одним из факторов, влияющих на параметры работы двигателя, является его тепловой режим. Для уменьшения негативного влияния низких температур на эти параметры применяют предпусковые подогреватели.

Аналогичная проблема есть и в подзаряжаемых гибридных электромобилях (ПГЭМ). С понижением температуры воздуха в осенне-зимний период снижается и эффективность работы ПГЭМ. Для повышения эффективности работы гибридной силовой установки может быть предложен предпусковой подогрев ДВС.

Основные автопроизводители активно наращивают производство и продажу ПГЭМ.

Мировые продажи автомобилей на электротяге увеличились в 2016 году на 37% [1]. На ближайшие годы количество ПГЭМ в линейке продаваемых автомобилей может достигать 30%. Такие КТС все чаще встречаются на дорогах и общество уже готово к активному использованию ПГЭМ.

Анализ предыдущих исследований. Исследование предпускового подогрева ДВС проводится практически с начала создания КТС. За долгие годы эксплуатации КТС нашли свое применение многие предпусковые подогреватели [2].

По типу мобильности они разделяются на автономные и стационарные. По виду энергии – на электрические и топливные. По типу рабочего тела – на жидкостные и воздушные. Наибольшее распространение получили следующие подогреватели: жидкостные, автономные электрические.

Получают распространение тепловые аккумуляторы, которые могут накапливать энергию и сохранять ее длительное время [3]. Они сохраняют энергию как за счет собственной теплоемкости теплоносителя, так и за счет фазового перехода из жидкого в твердое агрегатное состояние [4]. Но повышенная стоимость теплоаккумулирующего материала, дополнительные затраты на изготовление и установку тепловых аккумуляторов сдерживают распространение их применения.

ПГЭМ также имеет ДВС, некоторые условия эксплуатации которого подобны КТС с традиционными двигателями. В большинстве случаев при эксплуатации гибридов при пониженных температурах воздуха также возникают трудности с пуском холодного двигателя, отмечается повышенный расход топлива и повышенное количество вредных веществ в отработанных газах.

Результаты испытаний показывают, что наибольшее количество

вредных веществ образуется, когда двигатель еще не прогрет и нейтрализатор не начал работать [5]. Снижение температуры двигателя в момент пуска до $-10 \dots -15^\circ \text{C}$ во много раз увеличивает выброс CO , CH (рис. 1) [6].

Таким образом, работа непрогретого двигателя на повышенных оборотах холостого хода с обогащением смеси после его пуска приводит к нерациональному расходу топлива, а также вследствие неэффективной работы непрогретого каталитического нейтрализатора наблюдается повышенная концентрация вредных веществ.

Особенности конструкции ПГЭМ и их эксплуатации вносят коррективы в метод холодного пуска. Так, возможность подзарядки ТБ от бытовой сети дает и дополнительный источник энергии для нагрева ДВС в гибридной силовой установке. Кроме того, одним из положительных факторов применения предпускового подогрева ПГЭМ является то, что за счет дополнительного внешнего источника электрической энергии можно кроме нагрева ДВС также нагреть салон автомобиля, используя систему кондиционирования. Это позволит сохранить значительную часть заряда ТБ и использовать ее для тягового режима.

Целью научного исследования является улучшение экономических и экологических показателей ПГЭМ за счет предпускового подогрева.

Для решения этой проблемы предлагается параллельно с включением зарядного устройства включать электрический подогреватель охлаждающей жидкости ДВС. С активным развитием КТС с электрическим приводом интенсивно развивается инфраструктура с расширенной сетью специализированных зарядных станций и простых пунктов зарядки на стоянках автомобильного транспорта. С ростом продаж ПГЭМ распространяются зарядные устройства для зарядки от бытовой сети 220/380 В. Современные мобильные устройства позволяют с помощью специальных программ дистанционно контролировать тепловое состояние двигателя и при необходимости управлять работой предпускового подогревателя.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что один холодный пуск ДВС с применением предпускового подогревателя дает экономию только по топливу в среднем 0,1 л. При этом продолжительность работы предпускового подогревателя составляет около 20 мин и расходуется 0,7 кВт·ч электрической энергии. В основном разница стоимости этих энергоносителей будет формировать экономический эффект [7]. Для расчета параметров процесса нагрева ДВС во время работы предпускового подогревателя рассмотрим отдельные его составляющие в дифференциальной форме.

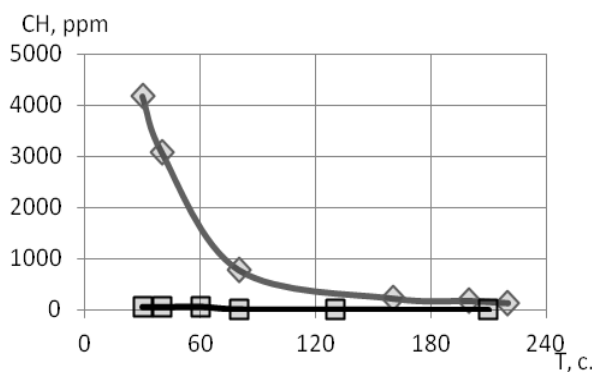
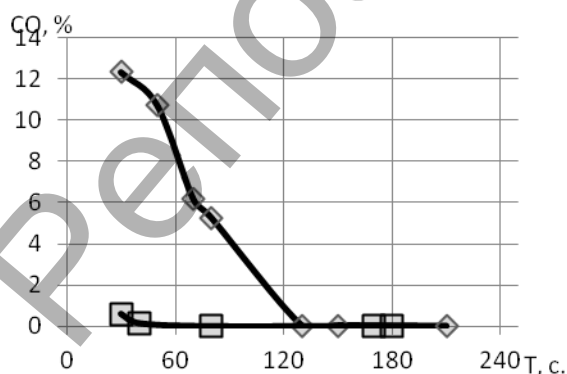


Рисунок 1 – Автоматизированная система управления дорожного движения

Ситовский Олег Филиппович, к.т.н., доц. кафедры автомобилей и транспортных технологий Луцкого национального технического университета, e-mail: sitovsky@ukr.net.

Деркач Виктор Леонидович, аспирант кафедры автомобилей и транспортных технологий Луцкого национального технического университета, e-mail: derkach2you@gmail.com.

Украина, 43018, г. Луцк, ул. Львовская 75.

Теплота, которая расходуется на нагрев ДВС, равна:

$$dQ_{\text{дв}} = c_{\text{дв}} \cdot m_{\text{дв}} \cdot dT, \quad (1)$$

где $c_{\text{дв}}$ – удельная теплоемкость ДВС, Дж/(кг К); $m_{\text{дв}}$ – масса ДВС, кг; T – температура.

Теплота, которая излучается ДВС в окружающую среду:

$$dQ_{\text{конв}} = \alpha_1 \cdot k_1 \cdot (T - T_{\text{возд.}}) \cdot F_{\text{дв}} \cdot dt, \quad (2)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от ДВС в окружающую среду, $Bm \cdot / (M^2 \cdot K)$; k_1 – коэффициент, учитывающий влияние скорости ветра на потерю тепловой энергии; T – текущая температура ДВС, К; $T_{\text{возд.}}$ – температура воздуха, К; $F_{\text{дв}}$ – суммарная площадь поверхности ДВС, м².

Теплота, которая излучается радиатором системы охлаждения:

$$dQ_{\text{рад}} = \alpha_2 \cdot k_2 \cdot (T_{\text{рад}}(T) - T_{\text{возд.}}) \cdot F_{\text{рад}} \cdot dt, \quad (3)$$

где α_2 – коэффициент теплоотдачи от радиатора в окружающую среду, $Bm \cdot / (M^2 \cdot K)$; k_2 – коэффициент, учитывающий влияние скорости ветра на потерю тепловой энергии; $T_{\text{рад}}(T)$ – текущая температура радиатора, К; $F_{\text{рад}}$ – суммарная площадь поверхности радиатора, м².

Теплота, которая отдается отопителем салона КТС:

$$dQ_{\text{отоп}} = \alpha_3 \cdot k_3 \cdot (T_{\text{отоп}}(T) - T_{\text{сал.}}) \cdot F_{\text{отоп}} \cdot dt, \quad (4)$$

где α_3 – коэффициент теплоотдачи от радиатора отопителя в салон, $Bm \cdot / (M^2 \cdot K)$; k_3 – коэффициент, учитывающий влияние скорости потока воздуха через радиатор отопителя; $T_{\text{отоп}}(T)$ – температура радиатора отопителя, К; $T_{\text{сал.}}$ – температура воздуха салона КТС; $F_{\text{отоп}}$ – площадь активной поверхности радиатора отопителя, м.

Количество тепла, которое образуется в трубчатом нагревательном элементе (ТЭН), используемом для предпускового подогрева, и передаётся в антифриз равно:

$$dQ_{\text{эл}} = \eta_{\text{эл}} \cdot U \cdot I \cdot dt, \quad (5)$$

где U – напряжение на выводах, В; I – сила тока, А; $\eta_{\text{эл}}$ – КПД ТЭНа.

Уравнение теплового баланса теплообмена в переходном процессе в дифференциальном виде представляется:

$$dQ_{\text{эл}} = dQ_{\text{дв}} + dQ_{\text{конв}} + H_1(T - T_{\text{рад}}) \cdot dQ_{\text{рад}} + H_2(T - T_{\text{вкл. отоп}}) \cdot dQ_{\text{отоп}}, \quad (6)$$

где $H(T - T_0)$ – единичная ступенчатая функция Хевисайда.

Для радиатора $H_1(T - T_{\text{рад}}) = \begin{cases} 1, T > T_{01} \\ 0, T < T_{01} \end{cases}$.

Для радиатора отопителя $H_2(T - T_{\text{отоп}}) = \begin{cases} 1, T > T_{02} \\ 0, T < T_{02} \end{cases}$.

Полный нагрев при использовании предпускового подогрева состоит из 3 частей (рисунок 2).

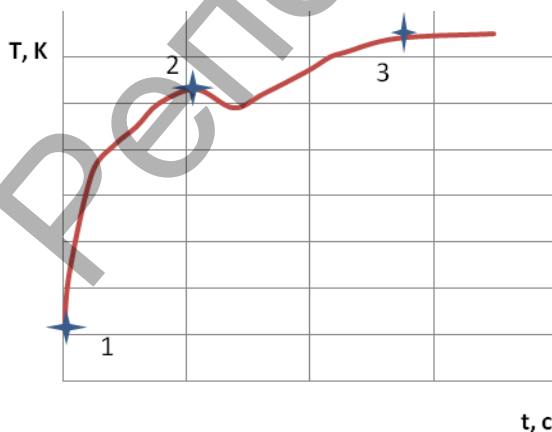


Рисунок 2 – Схема прогрева ДВС при работе предпускового подогревателя на ПГЭМ

Участок 1–2 показывает предпусковой подогрев ДВС. В большинстве случаев после длительной стоянки (точка 1) температура охлаждающей жидкости равна температуре окружающего воздуха $T_{\text{возд.}}$. Участок 2–3 показывает включение и работу отопителя салона КТС. После прогрева охлаждающей жидкости в точке 3 открывается термостат и вся теплота через радиатор передается в окружающую среду. Для улучшения пусковых, экономических и экологических показателей КТС рассматривается участок 1–2, который в наибольшей степени влияет на эти показатели, и при этом расходуется минимальное количество электрической энергии.

Поэтому после подстановки соответствующих значений уравнение теплового баланса (6) на участке 1–2 примет вид:

$$\eta_{\text{эл}} \cdot U \cdot I \cdot dt = c_{\text{дв}} \cdot m_{\text{дв}} \cdot dT + \alpha_1 \cdot k_1 \cdot (T - T_{\text{возд.}}) \cdot F_{\text{дв}} \cdot dt. \quad (6)$$

Приведем уравнение (6) к канонической форме, перенеся члены уравнения и разделив на $c_{\text{дв}} \cdot m_{\text{дв}} \cdot dt$:

$$\frac{dT}{dt} = - \frac{\alpha_1 \cdot k_1 \cdot F_{\text{дв}}}{c_{\text{дв}} \cdot m_{\text{дв}}} \cdot T + \frac{\alpha_1 \cdot k_1 \cdot F_{\text{дв}} \cdot T_{\text{возд.}} + \eta_{\text{эл}} \cdot U \cdot I}{c_{\text{дв}} \cdot m_{\text{дв}}}. \quad (7)$$

Введем коэффициенты $B = \frac{\alpha_1 \cdot k_1 \cdot F_{\text{дв}} \cdot T_{\text{возд.}} + \eta_{\text{эл}} \cdot U \cdot I}{c_{\text{дв}} \cdot m_{\text{дв}}}$;

$$A = \frac{\alpha_1 \cdot k_1 \cdot F_{\text{дв}}}{c_{\text{дв}} \cdot m_{\text{дв}}}$$

Уравнение (7) примет вид

$$\frac{dT}{dt} = -A \cdot T + B. \quad (8)$$

Преобразуем уравнение (8) и проинтегрируем

$$\frac{1}{A} \cdot \int \frac{d(A \cdot T - B)}{A \cdot T - B} = - \int dt.$$

В итоге получим

$$\frac{1}{A} \cdot \ln(A \cdot T - B) = -t + C.$$

Свободный член C можно определить, предположив что в начальный момент прогрева $T(t=0) = T_{\text{возд.}}$. Поэтому

$$\frac{1}{A} \cdot \ln(A \cdot T_{\text{возд.}} - B) = C.$$

Отсюда

$$C = \frac{1}{A} \cdot \ln(A \cdot T_{\text{возд.}} - B).$$

Решение будет выглядеть:

$$T(t) = T_{\text{возд.}} e^{-At} + \frac{B}{A} (1 - e^{-At}).$$

Максимальная температура, которую можно достичь, используя предпусковой подогрев, исходя из соответствия подведенного от ТЭНа тепла и того, что отдается окружающей среде вследствие конвекции, равна:

$$T_{\text{max}} = \lim_{t \rightarrow \infty} T(t) = \frac{B}{A}.$$

Как видно, процесс предпускового подогрева выражается экспоненциальной зависимостью. Исследуя данные функции на экстремумы, можно определить максимальную скорость прогрева и минимальное количество израсходованной энергии. Для эффективной и надежной работы предпускового подогревателя на ПГЭМ предлагается следующая блок-схема (рис. 3).

Блок-схема позволяет использовать особенности работы предпускового подогревателя на ПГЭМ с возможностью подогрева, как от внешнего источника электрической энергии, так и от внутренней тяговой батареи. При этом контролируется степень разряда тяговой батареи. Таким образом, при необходимости можно использовать предпусковой подогреватель от внутреннего источника электрической энергии без особенного ущерба для хода ПГЭМ на электрическом ходу.

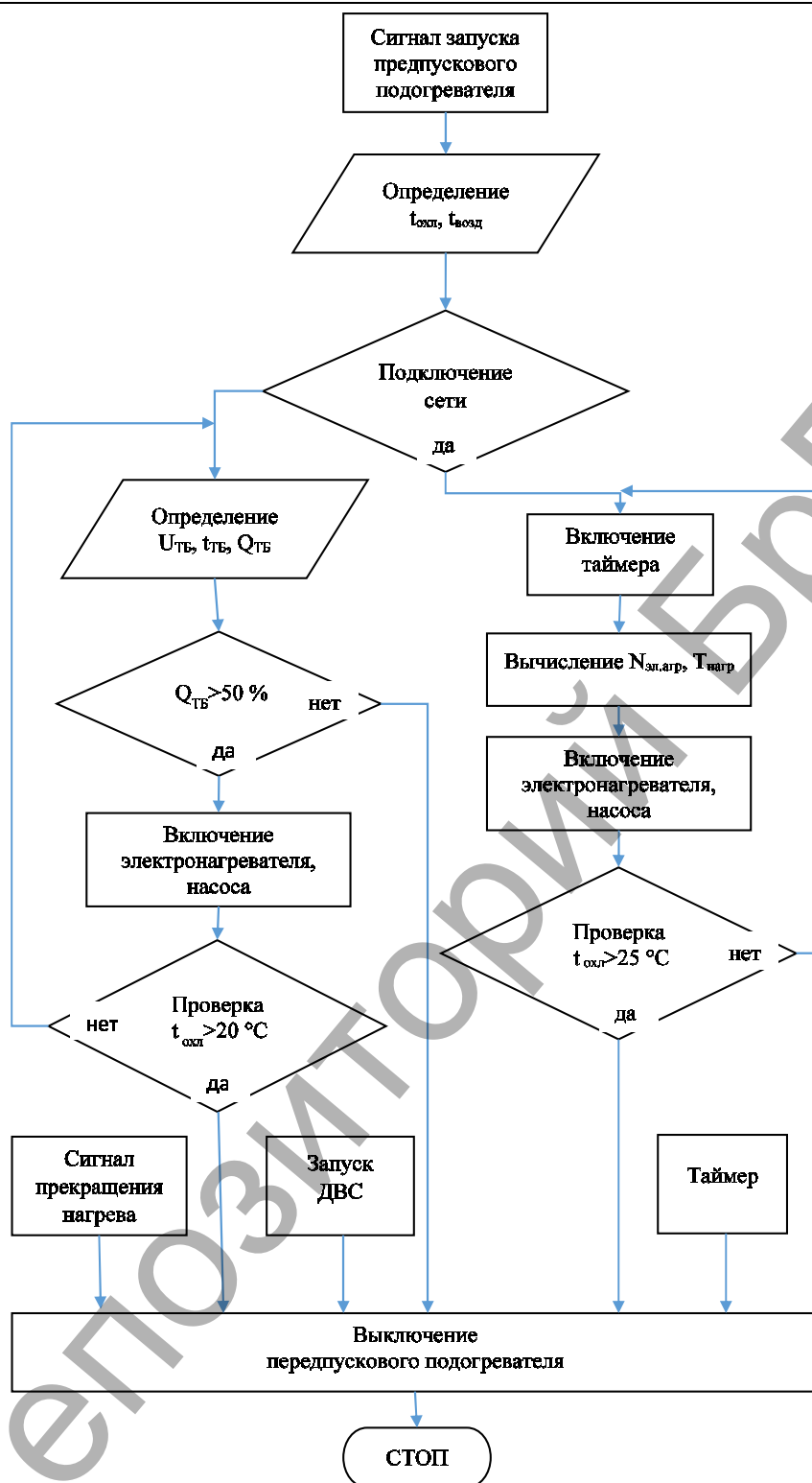


Рисунок 3 – Блок-схема работы предпускового подогревателя на ПГЭМ

Заключение. 1. С увеличением продаж ПГЭМ развивается соответствующая инфраструктура, и это упрощает организацию предпускового подогрева. 2. Применение предпускового подогрева для ПГЭМ позволит существенно снизить содержание CO, CH в отработавших газах, до 0,1 л уменьшить количество потребляемого топлива в первые минуты работы ДВС, что актуально не только для северных регионов, но и для регионов с умеренным климатом. 3. В результате теоретических исследований установлены зависимости изменения температуры ДВС во время прогрева. 4. Применение за-

рядных устройств от бытовой электрической сети существенно упрощает вопрос применения предпускового подогрева на ПГЭМ. 5. Применение мобильных устройств позволяет дистанционно контролировать и управлять работой предпускового подогревателя.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. В Україні зареєстровано більше 2500 електромобілів та гібридів. Цифри за 2016 рік. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://electrocars.ua/more-then-2500-electric-cars-in-ukraine>. – Дата доступа: 24.09.2018.

2. Гусаков, С. В. Улучшение экологических показателей автомобильного двигателя с искровым зажиганием в период прогрева после холодного пуска / С. В. Гусаков, А. З. Шарипов, А. А. Меньших // РУДН – 2011. – № 3. – С. 60–67.
3. Теплові акумулятори фазового переходу для транспортних засобів: параметри робочих процесів / В. Д. Александров, Ю. Ф. Гутаревич, І. В. Грицук [та ін]. – Донецьк: Вид-во «Ноулідж» (Донецьке відділення), 2014. – 230 с.
4. Трифонов, Д. М. Використання теплового акумулятора фазового переходу для забезпечення пуску холодного двигуна та його прогрівання за рахунок поліпшення сумішоутворення / Д. М. Трифонов, В. С. Вербовський, І. В. Грицук. – Збірник наукових праць. – Серія : галузеве машинобудування, будівництво. – Вип. 3(45). – 2015. – ПолтНТУ.
5. Шарипов, А. Улучшение экологических показателей автомобильного двигателя с искровым зажиганием в период прогрева после холодного пуска: дис. канд. техн. наук: 05.04.02. – М., 2012.
6. Сітовський, О. П. Визначення впливу передпускового підігріву на характеристику роботи двигуна з підвищеними обертами холодного ходу / О. П. Сітовський, В. Л. Деркач // Наукові нотатки. – 2014. – Вип. 44. – С. 282–285. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2014_44_47. – Дата доступу: 24.09.2018.
7. Ria Pereira. Plug-in Hybrid Vehicle (PHEV) Component PreHeater. / Nick Munyan, Ria Pereira, Mikhail Sokolov. – Western Michigan University ScholarWorks at WMU. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://scholarworks.wmich.edu/honors_theses. – Дата доступу: 29.09.2018.

Матеріал посту́пип в редакцію 25.01.2019

SITOVSKY O. F., DERKACH V. L. Technology of the preheating for plug-in hybrid electric vehicle

The publication describes how to use preheating at PHEV. At lower temperature values even for temperate regions, an increase the amount of CO, CH in the exhaust gases.

The use of preheating for PHEV reduces the content of harmful substances in the exhaust gases, reduces the amount of fuel consumed in the first minutes run of the engine.

The design features of the PHEV make it relatively easy to made preheating. As a result of theoretical research, the dependences of changes in the temperature of the internal combustion engine during preheating. The block diagram of the preheater operation algorithm takes into account the possibilities of autonomous operation from the traction battery.