

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПОДОГРЕВА МОТОРНОГО МАСЛА В ДВИГАТЕЛЕ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ САМОРЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНЫМ УСТРОЙСТВОМ

В.Ф. Калинин¹, А.М. Шувалов², С.В. Кочергин²

*Кафедра "Электрооборудование и автоматизация", ТГТУ (1);
лаборатория "Альтернативные источники энергии", ВИИТuН (2)*

Ключевые слова и фразы: тепловая подготовка двигателя; саморегулируемое устройство электроподогрева; самостабилизирующиеся нагревательные элементы; позисторы; положительный температурный коэффициент сопротивления; точка переключения.

Аннотация: Изложен принцип работы позисторов в устройстве электроподогрева моторного масла, приведена конструктивная схема саморегулируемого электронагревательного устройства моторного масла для двигателей внутреннего сгорания. Разработана математическая модель процесса подогрева, проведен сравнительный анализ теоретической и экспериментальной кривой динамики разогрева моторного масла в двигателе КАМАЗ.

Обозначения

B, B_1, B_2 – постоянные коэффициенты;
 C_1, C_2, C_3, C_4 – удельная теплоемкость позисторов, корпуса устройства, моторного масла, поддона картера соответственно, Дж/(кг·К);
 $F_1, F_2, F_3, F_{3cp}, F_{4cp}$ – суммарная площадь позисторов, корпуса устройства, поверхности теплоотдачи моторного масла к поддону картера, поверхности теплоотдачи моторного масла во внутрикартерный воздух, поверхности поддона картера соответственно, м².
 M_1, M_2, M_3, M_4 – масса позисторов, моторного масла, корпуса устройства, поддона картера, кг;
 n – количество параллельно соединенных позисторов;
 P_{yc1}, P_{yc2} – мощность электронагревательного устройства на участке (1-2) и (2-3) соответственно, Вт;
 $P_{yc}(t_1)$ – общая мощность электронагревательного устройства на всей области изменения температуры позистора, Вт;
 $R_{п1}, R_{п2}$ – сопротивление позистора на участке (1-2) и (2-3) соответственно, Ом;
 $t_1, t_2, t_3, t_4, t_{cp}$ – температура позисторов, корпуса устройства, моторного масла, поддона картера, окружающей среды соответственно, К;

$t_{п1}, t_{п2}$ – температура позистора на участке (1-2) и (2-3) соответственно, °С;
 $t_{п1}, t_{п2}$ – температура позистора на участке (1-2) и (2-3) соответственно, К;
 $Q_{ку}$ – количество теплоты, идущей на нагрев корпуса устройства, Дж;
 Q_m – количество теплоты, идущей на нагрев моторного масла, Дж;
 $Q_{общ}$ – общее количество теплоты, выделяемое позисторами, Дж;
 $Q_{поз}$ – количество теплоты, идущей на нагрев позисторов, Дж;
 $Q'_{м1}$ – теплопотери от моторного масла во внутрикартерный воздух, Дж;
 $Q'_{м2}$ – теплопотери от моторного масла к стенкам поддона картера, Дж;
 $Q'_{пк}$ – теплопотери от стенок поддона картера в окружающий воздух, Дж;
 U – напряжение питания устройства, В;
 α – температурный коэффициент сопротивления, %/°С;
 α_{12} – коэффициент теплоотдачи от позисторов к корпусу устройства, Вт/(м²·К);
 $\alpha_{13}, \alpha_{23}, \alpha_{34}, \alpha_{3cp}, \alpha_{4cp}$ – коэффициенты теплоотдачи от позисторов и пластины к моторному маслу, от моторного масла к поддону картера, от моторного масла во внутрикартерный воздух, от поддона картера в окружающую среду соответственно, Вт/(м²·К).

Большая часть Российской Федерации находится в зоне холодного климата, что отрицательно сказывается на эксплуатации автомобильной техники. Особенно тяжелым в холодное время года представляет собой запуск двигателя, в результате которого происходит его износ, увеличивается расход топлива и выбросы вредных газов в атмосферу.

При отсутствии теплой стоянки автомобили и тракторы оборудуют средствами, необходимыми для предпускового нагрева или поддержания требуемого теплового состояния во время стоянки [1, 2, 3]. Для этого применяют различные нагревательные устройства в виде стационарного оборудования, применяемого на стоянках машин, и индивидуальных нагревателей, вмонтированных в агрегаты машин или устанавливаемых на них во время тепловой подготовки [1].

Как показывает тенденция развития техники в этом направлении, за последнее время наибольшее распространение получили индивидуальные нагреватели, из которых наиболее важными для России являются устройства предпускового подогрева моторного масла. В настоящее время до 90 % используемых моторных масел (для дизельных двигателей) являются масла М10Г₂ и М10Г_{2к} [4]. При низких температурах окружающей среды (ниже – 25 °С) пуск двигателя на этих маслах без предварительного подогрева сопровождается задержкой поступления смазки к трущимся деталям из-за большой ее вязкости. Это может привести к повреждению вкладышей подшипников и шеек коленчатого вала, а также быстрому износу деталей цилиндропоршневой группы. Исследования показывают, что пуск двигателя в условиях низких температур (– 5 °С и ниже, в зависимости от класса вязкости используемого моторного масла) без предварительного его подогрева по износу эквивалентен 15 – 17 км пробега [5].

В настоящее время наиболее перспективными являются устройства, которые способны вписываться в энергобаланс автомобиля (энергоёмкие устройства, которые без снижения ресурса аккумуляторных батарей производят тепловую подготовку двигателя), а также отличаются простотой управления и эксплуатации.

Разработано устройство предпускового электроподогрева моторного масла (в поддоне картера ДВС) на саморегулируемых электронагревательных элементах (позисторах), которое получает питание от аккумуляторных батарей и выгодно отличается от других подобных устройств простотой поддержания температуры моторного масла в процессе его подогрева. В саморегулируемом нагревательном устройстве позисторы выполняют одновременно роль электронагревательных элементов и регуляторов температуры.

Устройство устанавливается в поддон картера ДВС близко к маслозаборнику. Оно выполнено в виде радиатора с вертикальными пластинами 1, на которых закреплены позисторы 2, напряжение к позисторам подводится через токоведущий провод 3, подключенный к плюсовой (+) клемме 4 аккумулятора. Минусовая (–) клемма подводится от корпуса поддона к пластине 5.

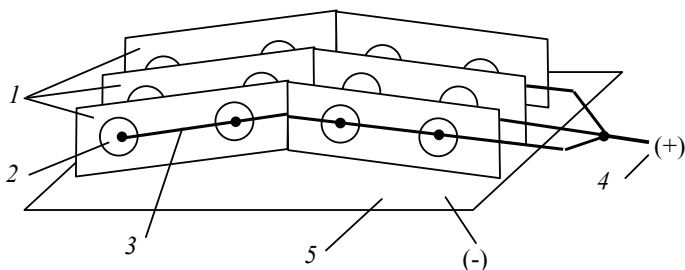


Рис. 1 Конструкция саморегулируемого устройства электроподогрева моторного масла для ДВС

Разработанное саморегулируемое устройство электроподогрева построено на самостабилизирующихся нагревательных элементах (позисторах), отличающихся от традиционных нагревателей тем, что выполнены на основе полупроводниковой керамики, обладающей положительным температурным коэффициентом сопротивления, то есть при подаче тока на нагревательные элементы они нагреваются до расчетной температуры (точка переключения (2) на рис. 2 и рис. 3), после которой резко растет сопротивление структуры позисторов. При этом мощность устройства падает до величины (точка (3) рис. 2), зависящей от следующих параметров: температуры, вязкости моторного масла, способа крепления позисторов к корпусу устройства, площади теплоотдающей поверхности устройства. Дальнейшее изменение мощности устройства зависит от температуры позисторов и моторного масла, то есть по мере разогрева мощность уменьшается пропорционально увеличению температуры моторного масла, что обеспечивает режим саморегулирования.

Так как мощность устройства изменяется также в функции температуры его нагревательных элементов (позисторов), то необходимо установить аналитическое выражение этой функции. Функция изменения сопротивления позистора марки РТС-Д от его температуры, построенная на основе экспериментальных данных, представлена на рис. 3.

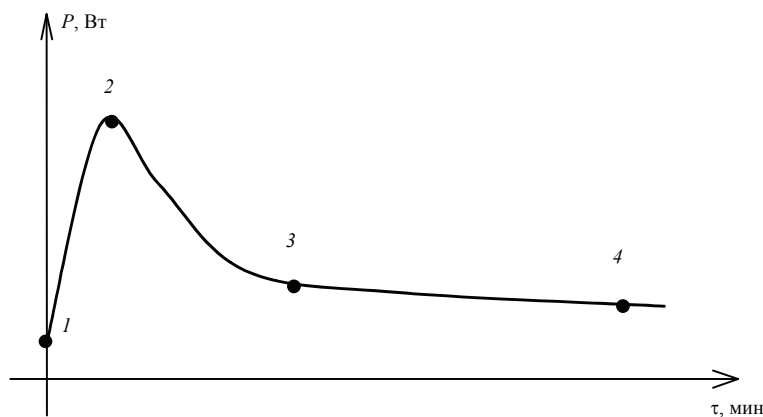


Рис. 2 Изменение мощности устройства во времени

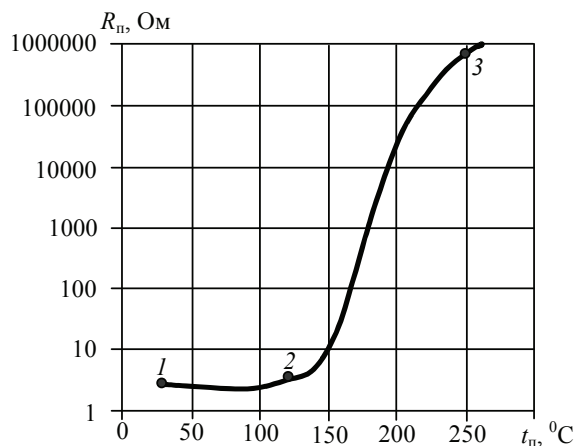


Рис. 3 Зависимость сопротивления позистора РТС-Д от его температуры

Аналитическое выражение функции $R_n=f(t_n)$ на участке (1-2) имеет вид [6]:

$$\lg R_{n1} = \frac{B_1}{t_{n1}} + B_2. \quad (1)$$

На участке (2-3) выражение для функции $R_n=f(t_n)$ имеет вид [6]:

$$\lg R_{n2} = \alpha t_{n2} + B. \quad (2)$$

Автором работы [5], который получил выше предложенные формулы (1) и (2), указывается, что приведенные выражения являются лишь приближенными и не могут быть использованы для точных практических расчетов сопротивления в широком интервале температур. Обычно точные сведения получают графическим построением на основе экспериментальных данных. Поэтому на основе экспериментальных данных, используя компьютерную программу Curve Expert 1.34, получены более точные выражения для применяемых нами позисторов РТС-Д.

На участке (1-2) сопротивление позистора будет меняться согласно выражению

$$R_{n1} = 1,851e^{68,88/t_{n1}}; \quad (3)$$

на участке (2-3)

$$R_{n2} = 4,566 \cdot 10^{-21} e^{0,152 t_{n2}}. \quad (4)$$

Тогда мощность электронагревательного устройства на участке (1-2) с учетом параллельного подключения позисторов будет равна

$$P_{yc2} = \frac{nU^2}{1,851e^{68,88/t_{n1}}}; \quad (5)$$

на участке (2-3)

$$P_{yc2} = \frac{nU^2}{4,566 \cdot 10^{-21} e^{0,152 t_{n2}}}. \quad (6)$$

Составим уравнение теплового баланса для процесса подогрева моторного масла

$$dQ_{общ} = dQ_{поз} + dQ_{кв} + dQ_{м} + dQ'_{м1} + dQ'_{м2} + dQ'_{пк}. \quad (7)$$

На основе уравнения теплового баланса (7) разработана математическая модель в виде дифференциальных уравнений, описывающих нестационарный процесс теплообмена при разогреве моторного масла в ДВС:

$$P_{yc}(t_1)d\tau = C_1M_1dt_1 + \alpha_{12}(t_1 - t_2)F_1d\tau + \alpha_{13}(t_1 - t_3)F_1d\tau; \quad (8)$$

$$\alpha_{12}(t_1 - t_2)F_1d\tau = C_2M_2dt_2 + \alpha_{23}(t_2 - t_3)F_2d\tau; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & (\alpha_{23}(t_2 - t_3)F_2 + \alpha_{13}(t_1 - t_3)F_1)d\tau = \\ & = C_3M_3dt_3 + \alpha_{34}(t_3 - t_4)F_3d\tau + \alpha_{3cp}(t_3 - t_{cp})F_{3cp}d\tau; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\alpha_{34}(t_3 - t_4)F_3d\tau = C_4M_4dt_4 + \alpha_{4cp}(t_4 - t_{cp})F_4d\tau. \quad (11)$$

Уравнения (8) – (11) приведем к канонической форме:

$$\frac{dt_1}{d\tau} = \frac{P_{yc}(t_1) - \alpha_{12}(t_1 - t_2)F_1 - \alpha_{13}(t_1 - t_3)F_1}{C_1M_1}; \quad (12)$$

$$\frac{dt_2}{d\tau} = \frac{\alpha_{12}(t_1 - t_2)F_1 - \alpha_{23}(t_2 - t_3)F_2}{C_2 M_2}; \quad (13)$$

$$\frac{dt_3}{d\tau} = \frac{(\alpha_{23}(t_2 - t_3)F_2 + \alpha_{13}(t_1 - t_3)F_1) - \alpha_{34}(t_3 - t_4)F_3 - \alpha_{3cp}(t_3 - t_{cp})F_{3cp}}{C_3 M_3}; \quad (14)$$

$$\frac{dt_4}{d\tau} = \frac{\alpha_{34}(t_3 - t_4)F_3 - \alpha_{4cp}(t_4 - t_{cp})F_4}{C_4 M_4}. \quad (15)$$

Таким образом, получена математическая модель процесса подогрева моторного масла в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка, аналитическое решение которой невозможно, однако численное интегрирование не вызывает принципиальных затруднений. Поэтому нами была разработана программа на языке C++, выполняющая такое интегрирование по методу Эйлера. На рис. 4 показаны кривые динамики разогрева моторного масла в поддоне картера двигателя КАМАЗ.

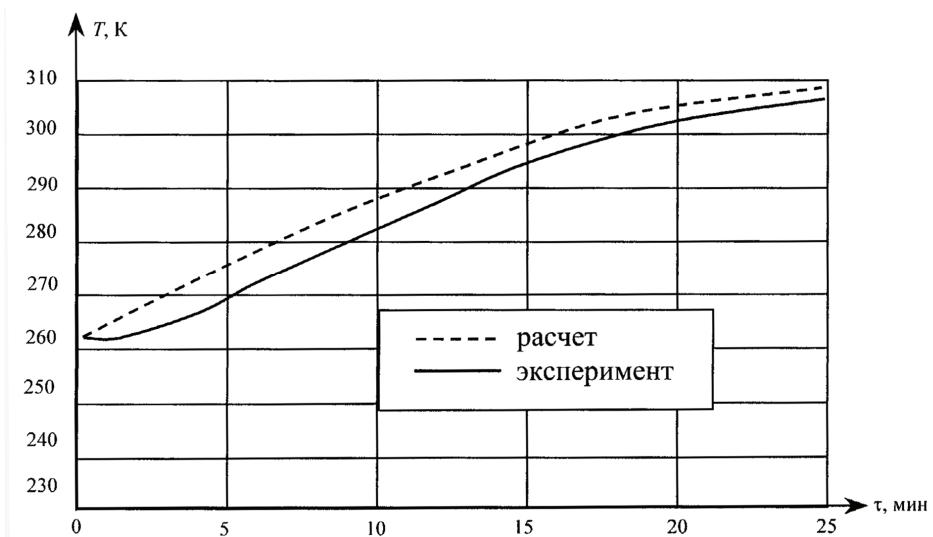


Рис. 4 Динамика изменения температуры моторного масла в поддоне картера двигателя КАМАЗ

Сопоставив результат расчета с опытными данными, полученными при подогреве моторного масла в поддоне картера двигателя КАМАЗ, можно сделать вывод, что предложенная математическая модель дает результаты, достаточно хорошо совпадающие с опытными, поэтому ее можно использовать при проектировании саморегулируемых электронагревательных устройств предпускового подогрева моторного масла в двигателях внутреннего сгорания.

Список литературы

1. Электронагревательные устройства автомобилей и тракторов / В.Е. Козлов, В.В. Козлов, Г.Р. Миндин, В.Н. Судаченко. – Л: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. – 127 с.
2. Цуцоев В.И. Зимняя эксплуатация тракторов. – М.: Высш. шк., 1983. – 120 с.

3. Суранов Г.И. Уменьшение износа автотракторных двигателей при пуске. – М.: Колос, 1982. – 143 с.
 4. Остриков В.В. Концепция повышения эффективности использования нефтепродуктов. – М: ВИМ, том 6, 2001. – 155с.
 5. Смазочные материалы: Антифрикционные противоизносные свойства. Методы испытаний. Справочник / Р.М. Матвеевский, В.Л. Лашхи, И.А. Буяновский и др. – М: Машиностроение, 1989. – 224 с.
 6. Мэклин Э.Д. Терморезисторы / Под общей ред. К.И. Мартюшова. – М: Радио и связь, 1983. – 208 с.
-

Mathematical Model of the Motor Oil Heating Process in Internal Combustion Engine by Means of Self-Regulating Electro-Heating Device

V.F. Kalinin, A.M. Shuvalov, S.V. Kochergin

*Department "Electrical Equipment and Automation", TSTU (1);
Lab "Alternative Sources of Energy", VIITiN (2)*

Key words and phrases: heat processing of engine; self-regulating electro-heating device; self-stabilized heating elements; posistor's; positive temperature resistance coefficient; switch point.

Abstract: The way posistor's work in the motor oil heating device is described, the constructive scheme of self-regulating electro-heating motor oil device for internal combustion engines is given, the mathematical model of heating process is developed, comparative analysis of theoretical and experimental curve of motor oil heating dynamics in the engine for KAMAZ is carried out.

Mathematisches Modell des Prozesses der Aufwärmung vom Motoröl im Verbrennungsmotor mit dem selbstregulierenden elektroerwärmenden Gerät

Zusammenfassung: Es ist der Arbeitsprinzip von Posistoren in der Einrichtung der Elektroerwärmung des Motoröls dargelegt. Es ist das Konstruktivschema des selbstregulierenden elektroerwärmenden Geräts des Motoröls für die Verbrennungsmotoren angeführt. Es ist das mathematische Modell des Aufwärmungsprozesses ausgearbeitet. Es ist die Vergleichungsanalyse der theoretischen und experimentellen Kurve der Dynamik des Erhitzens des Motoröls im KAMAZ-Motor durchgeführt.

Modèle mathématique du processus du chauffage de l'huile dans les moteurs à combustion interne à dispositif autorégulé du chauffage

Résumé: On a exposé le principe du fonctionnement des posistors dans le dispositif de chauffage électrique de l'huile, on a présenté le schéma constructif du dispositif autorégulé du chauffage de l'huile pour les moteurs à combustion interne, on a élaboré le modèle mathématique du processus du chauffage, on a effectué une analyse théorique et expérimentale de la courbe de la dynamique du chauffage de l'huile dans le moteur KAMAZ.
