

## Разработка регрессионной модели теплового состояния автотракторных генераторов в процессе эксплуатации

*М.И. Филатов, д.т.н., профессор, А.В. Пузаков, к.т.н., Я.Ю. Осаулко, магистрант, ФГБОУ ВО Оренбургский ГУ*

Практически все узлы и агрегаты автомобилей, тракторов и прочих транспортных средств в процессе работы нагреваются. В первую очередь это связано с тем, что в технике не существует и не может существовать устройств, которые преобразуют энергию из одного вида в другой и обладают стопроцентным коэффициентом полезного действия. Также повышению температуры узлов и агрегатов способствуют различные внешние факторы и условия эксплуатации транспортного средства [1–5].

Генератор переменного тока, применяемый в большинстве автомобилей, тракторов и прочих транспортных средств, также имеет свойство нагреваться в процессе работы. Это устройство, которое преобразует механическую энергию вращения коленчатого вала двигателя в электрическую,

питает всё электрооборудование, подключённое к бортовой электросети транспортного средства. Его тепловое состояние формируется большим количеством факторов [6]. На рисунке 1 представлена схема причинно-следственной связи между этими факторами условий эксплуатации, неисправностями, которые могут возникнуть под их влиянием, и проявлениями, выраженными в изменении теплового состояния генератора.

По схеме видно, что тепловое состояние изменяется под влиянием большого количества факторов. Также можно отметить то, что оценка теплового состояния генератора позволяет проводить анализ технического состояния узла [7].

**Материал и методы исследования.** Определение теплового состояния автомобильного генератора сводится к измерению температуры поверхности корпуса узла. Для определения температуры использовался полупроводниковый датчик ИТ2-К-01. Он

устанавливался на корпус генератора, а информирование о значении текущей температуры осуществлялось при помощи его индикатора, выведенного в салон автомобиля. Помимо температуры в ходе проведения эксперимента постоянно отслеживали значение частоты вращения коленчатого вала, скорость автомобиля и мощность потребителей тока. Для определения скорости автомобиля и частоты вращения КВ использовались штатные приборы автомобиля. Их значения через разъём DLC3 (OBD-II) с помощью адаптера ELM327-WiFi выводились на экран портативного компьютера (программное обеспечение: iOBD2). Определение мощности потребителей осуществляли путём измерения силы их тока. Для этого использовали токовые клещи Nantek CC-650. На рисунке 2 представлена электрическая схема проведения экспериментального исследования в производственных условиях.

Основная цель эксперимента заключалась в том, чтобы установить влияние на тепловое состояние автомобильного генератора различных факторов для построения математической модели. В качестве основных факторов, влияющих на тепловое состояние генератора, были выбраны: температура окружающей среды (её значения изменялись в диапазоне от минус 25°C до плюс 38°C); мощность потребителей (в диапазоне от 150 до 560 Вт); частота вращения коленчатого вала (в диапазоне от 1100 до 4500 мин<sup>-1</sup>, что эквивалентно изменению частоты вращения ротора генератора от 2750 до 11250 мин<sup>-1</sup>); скорость движения автомобиля (в диапазоне от 20 до 120 км/ч).

Эксперимент производили при различных сочетаниях значений параметров, которые были выбраны в качестве воздействующих факторов. Для каждого из таких сочетаний было получено значение установившейся температуры поверх-

ности генератора. Для электрооборудования и простых проводников электрического тока установившееся значение температуры наступает лишь через 20 мин. после возникновения нагрузки [8–10]. Соответственно, для того чтобы получить данные для различных сочетаний, необходимо, чтобы автомобиль длительное время находился на открытом воздухе и все его элементы остыли до температуры окружающей среды. А после запуска для получения значения температуры генератора необходимо поддерживать параметры на заданном уровне в течение 20 мин.

Последовательность проведения эксперимента:

1. Автомобиль выдерживается на открытом воздухе, для того чтобы температура генератора выравнялась с температурой окружающего воздуха. Во избежание прямого воздействия на автомобиль солнечного излучения, а также для ограничения воздействия ветра он хранился под навесом. Температура окружающего воздуха отслеживалась при помощи штатного датчика температуры, значения выводились на дисплей бортового компьютера.

2. При помощи разъёма DLC3 и адаптера ELM327-WiFi к системе управления двигателем подключали портативный компьютер, на который выводились данные о скорости автомобиля, частоте вращения коленчатого вала. Для регистрации данных велась видеосъёмка дисплея компьютера и индикатора температуры генератора.

3. Включалось бортовое электрооборудование автомобиля, при помощи токовых клещей определялось значение тока потребителей. Таким образом определялся параметр мощность потребителей тока.

4. После всех подготовительных операций автомобиль начинал движение. В течение 20 мин. автомобиль двигался с заданной скоростью и фиксированным значением частоты вращения

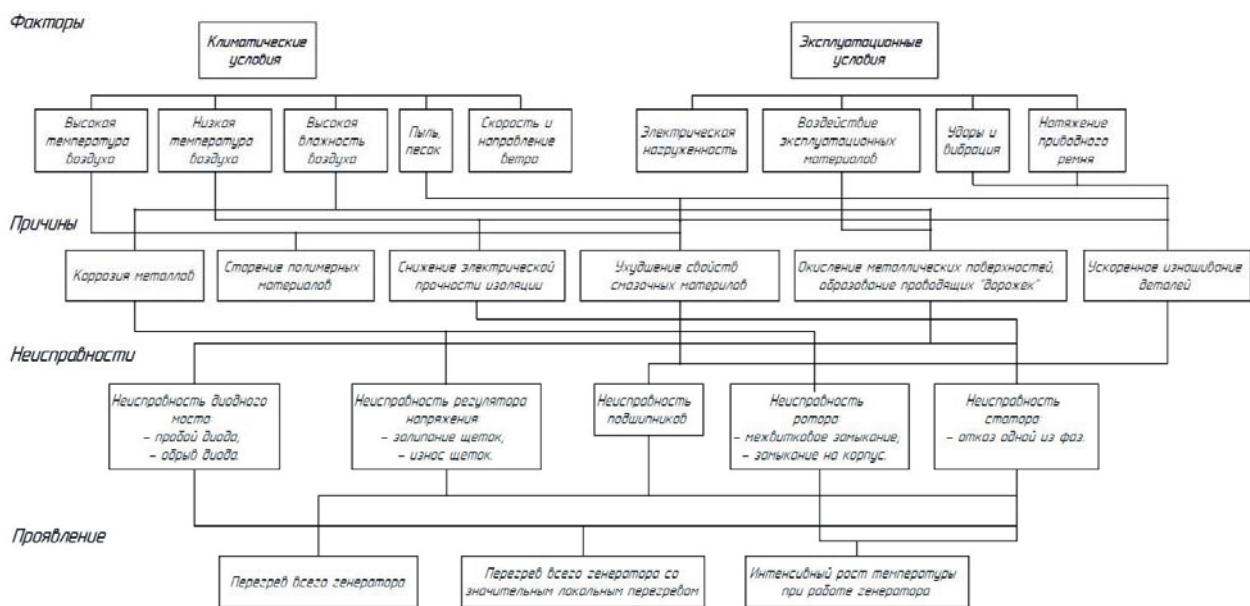


Рис. 1 – Причинно-следственная связь изменения теплового состояния генератора

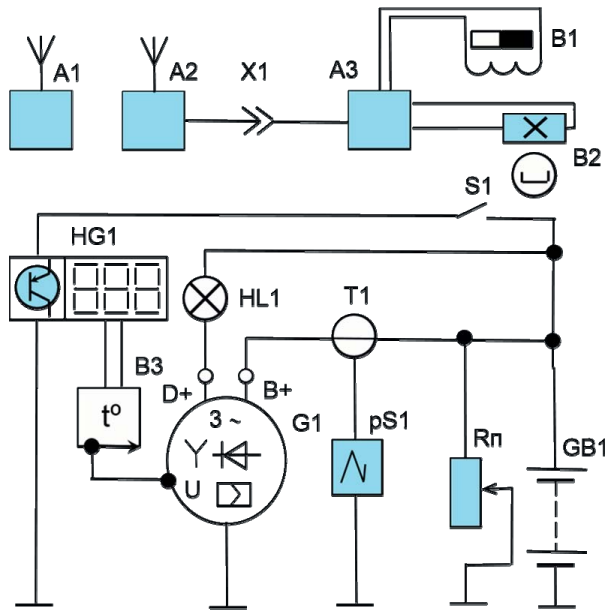


Рис. 2 – Схема проведения эксперимента:

A1 – планшетный компьютер; A2 – сканер ELM327 Wi-Fi; A3 – блок управления ДВС; B1 – датчик частоты вращения ДВС; B2 – датчик скорости автомобиля; B3 – датчик температуры генератора; G1 – испытываемый генератор; GB1 – аккумуляторная батарея; HG1 – индикатор температуры генератора; HL1 – контрольная лампа; pS1 – осциллограф; Rn – задействованные потребители; S1 – выключатель индикатора температуры; T1 – токоизмерительные клещи; X1 – диагностический разъем DLC3

коленчатого вала [11]. Для того чтобы обеспечить стабильность движения, исключалась необходимость остановок, движение осуществлялось по загородным, мало загруженным автодорогам.

**Результаты исследования.** При анализе результатов экспериментального исследования были получены и обработаны данные о влиянии выбранных факторов на тепловое состояние генератора, а также составлены диаграммы, отображающие зависимость изменения температуры. По полученным на графиках точкам были составлены математические модели.

На рисунке 3 представлен график изменения температуры генератора в зависимости от температуры окружающей среды.

По экспериментальным точкам была составлена регрессионная модель, которая имеет вид:

$$t_r = 63,05 + 1,8653 \cdot t_b - 0,019 \cdot t_b^2, \quad (1)$$

где  $t_b$  – температура окружающего воздуха, °С.

Для того чтобы установить влияние силы тока потребителей на температуру генератора, сначала, при помощи токовых клещей и амперметра, была определена сила тока каждого потребителя. В таблице 1 представлено значение силы тока при различном сочетании включённого электрооборудования. При проведении эксперимента включалось только стандартное оборудование автомобиля, поэтому максимальное значение тока не превышало 50 ампер.

На рисунке 4 представлен график зависимости температуры генератора от тока потребителей.

По экспериментальным точкам была составлена регрессионная модель, которая имеет вид:

$$t_r = 43,01 + 1,05 \cdot I_{потр}, \quad (2)$$

где  $I_{потр}$  – ток, потребляемый задействованными потребителями, А.

На рисунке 5 представлена зависимость изменения температуры генератора от скорости движения автомобиля.

На рисунке 6 представлен график изменения температуры генератора от частоты вращения ротора генератора.

По экспериментальным точкам была составлена регрессионная модель зависимости температуры

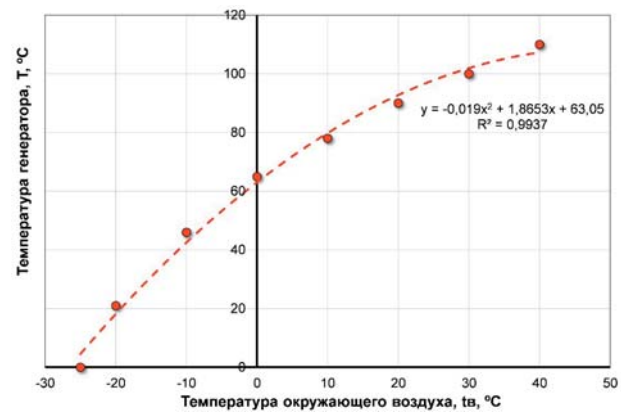


Рис. 3 – Зависимость температуры генератора от температуры окружающей среды

### 1. Значения силы тока для потребителей электроэнергии

Значение силы тока, А	Вентилятор системы охлаждения двигателя	Внешние световые приборы	Обогрев сидений и стекла	Задний противотуманный фонарь	Аварийная световая сигнализация	Печка	Приборы	Кондиционер
4	–	–	–	–	–	–	–	–
10	–	–	–	–	–	–	+	–
10	–	–	–	–	–	+	+	–
12	–	–	–	–	–	+	+	+
20	–	–	–	–	–	+	+	+
26	–	–	–	–	–	+	+	+
28	–	–	+	–	–	+	+	+
29	–	–	+	–	+	+	+	+
32	+	+	+	+	+	+	+	+

2. Основные статистические характеристики регрессионных зависимостей температуры генератора

Наименование характеристики	Значения для регрессионных зависимостей температуры генератора	
	от температуры окружающего воздуха	от тока потребителей
Коэффициент корреляции	0,9816	0,991
Дисперсионное отношение Фишера	114,57	159,78
Критерий Фишера $F_{0,95}$	5,32	6,61
Средняя ошибка аппроксимации, %	5,67	2,48

3. Основные статистические характеристики регрессионных зависимостей температуры генератора от скорости автомобиля

Наименование характеристики	Значения для регрессионных зависимостей			
	V=40	V=60	V=80	V=100
Коэффициент корреляции	-0,951	-0,988	-0,955	-0,955
Дисперсионное отношение Фишера	18,97	81,86	10,37	10,52
Критерий Фишера $F_{0,95}$	7,71	7,71	10,13	10,13
Средняя ошибка аппроксимации, %	2,89	3,22	3,85	4,76

4. Основные статистические характеристики регрессионных зависимостей температуры генератора от частоты вращения ДВС

Наименование характеристики	Значения для регрессионных зависимостей		
	n = 2000	n = 3000	n = 4000
Коэффициент корреляции	-0,986	-0,962	-0,967
Дисперсионное отношение Фишера	74,14	12,61	14,50
Критерий Фишера $F_{0,95}$	7,71	10,13	10,13
Средняя ошибка аппроксимации, %	5,22	5,45	4,45

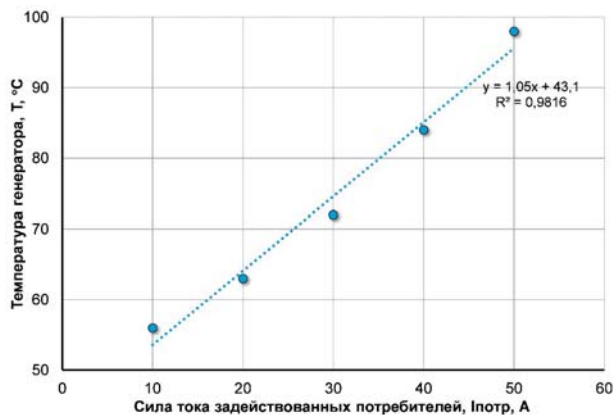


Рис. 4 – Зависимость температуры генератора от тока потребителей

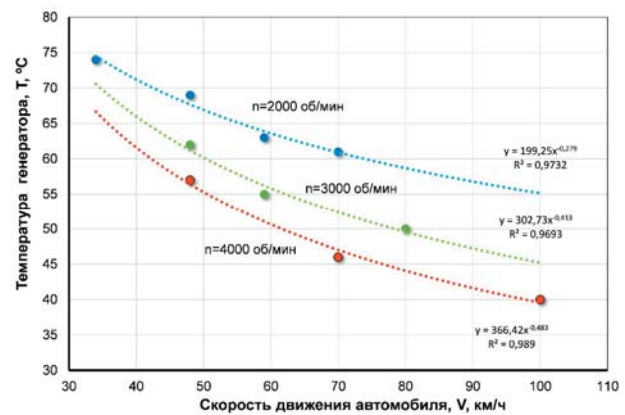


Рис. 5 – Зависимость температуры генератора от скорости движения автомобиля

генератора от скорости движения автомобиля и частоты вращения ротора генератора. Она имеет вид:

$$t_r = \xi \cdot v_a^{-\zeta}, \quad (3)$$

где  $v_a$  – скорость движения автомобиля, км/ч;  $\xi, \zeta$  – параметры чувствительности температуры к изменению скорости движения и частоты вращения ДВС (ротора генератора).

После получения математических моделей, отображающих влияние выбранных факторов на температуру поверхности генератора, были рассчитаны основные статистические характеристики этих моделей. В таблицах 2–4 представлены статистические характеристики для моделей, отображающих влияние температуры окружающего воздуха и тока потребителей на тепловое состояние генератора.

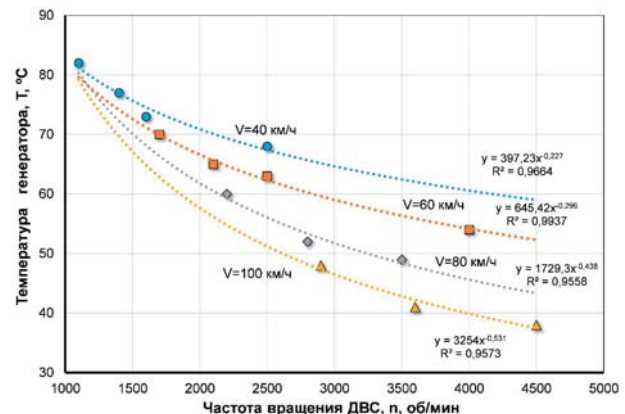


Рис. 6 – Зависимость температуры генератора от частоты вращения ДВС (ротора генератора)



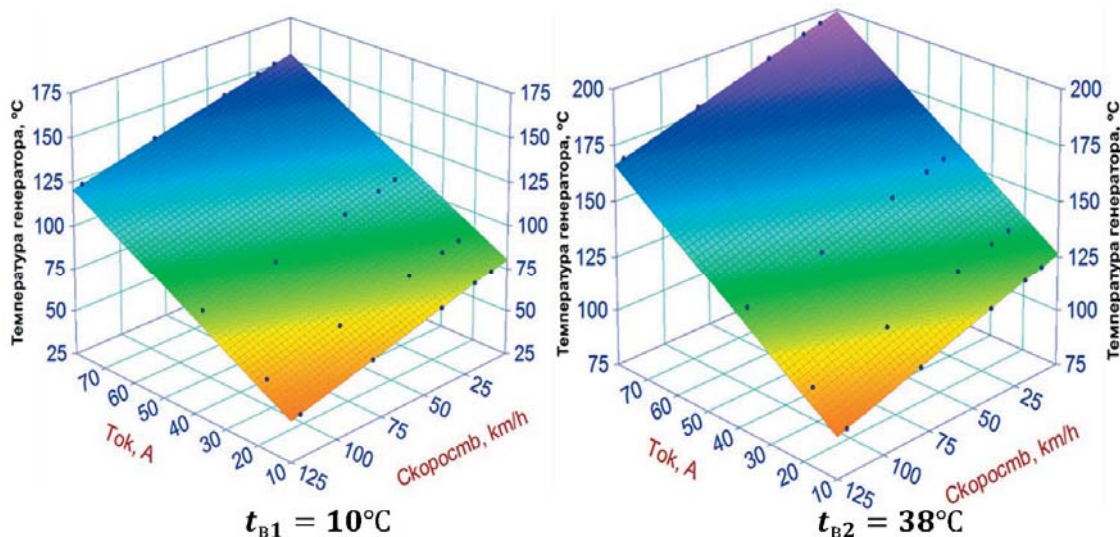


Рис. 7 – Зависимость температуры генератора от климатических и эксплуатационных факторов

Результатом проведённых экспериментальных и теоретических исследований стала разработка общей регрессионной модели, в которой отображается изменение температуры поверхности генератора в зависимости от температуры окружающего воздуха, тока потребителей электроэнергии и скорости движения автомобиля. Полученная многофакторная модель представлена в выражении:

$$t_r = 54,697 + 1,8653t_B - 0,019 \cdot t_B^2 + 1,0417 \cdot I_{\text{ПОТР}} - 0,2637 \cdot v_a. \quad (4)$$

Представим разработанную модель в виде трёхмерной поверхности отклика. На рисунке 7 изображены диаграммы, в которых отображена зависимость изменения температуры генератора от тока потребителей и скорости движения автомобиля при различных значениях температуры окружающей среды.

**Выводы.** 1. Установлена взаимосвязь между факторами влияния условий эксплуатации и изменением теплового состояния. Температура поверхности генератора может являться диагностическим параметром при оценке его технического состояния. Неисправности элементов узла проявляются в изменении его теплового состояния. Такими проявлениями являются общее повышение температуры узла, перегрев конкретных элементов генератора, изменение динамики нагрева.

2. В ходе проведения экспериментального исследования определено влияние на температуру генератора температуры окружающего воздуха, силы тока задействованных потребителей, частоты вращения ротора генератора и скорости движения автомобиля.

3. Результатами экспериментальных исследований стали регрессионные модели влияния частных факторов на тепловое состояние генератора. На основе частных моделей была составлена общая модель влияния всех исследуемых факторов на температуру генератора.

### Литература

1. Гольдберг О.Д., Хелемская С.Н. Надёжность электрических машин: учеб. для студ. высш. учеб. заведений / Под. ред. О.Д. Гольдберга. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 288 с.
2. Кох П.И. Климат и надёжность машин. М.: Машиностроение, 1981. 175 с.
3. Кричевский Ю.И. Влияние климата на надёжность машин и механизмов. Минск, «Наука и техника», 1968. 92 с.
4. Лабезников М.Г., Бакуревич Ю.Л. Эксплуатация автомобилей в условиях жаркого климата и пустынно-песчаной местности. М.: Изд-во «Транспорт», 1969. 116 с.
5. Эль-Сагир М Обеспечение безотказности систем электрооборудования автомобилей в условиях жаркого климата (на примере Иордании): дисс. ... канд. техн. наук. М., 2000. 154 с.
6. Пузаков А.В. Влияние условий эксплуатации на ресурс работы автомобильных генераторов // Перспективные направления развития автотранспортного комплекса: сб. стат. IX Всерос. науч.-производств. конф. / МНИЦ ПГСХА. Пенза: РИО ПГСХА, 2015. С. 69–72.
7. Пузаков А.В., Филатов М.И., Осаулко Я.Ю. Диагностирование неисправностей автомобильных генераторов на основе оценки теплового состояния // The way of science. 2017. № 7 (41). С. 19–23.
8. Техническая диагностика механического оборудования / В.А. Сидоров, В.М. Кравченко, В.Я. Седуш [и др.]. Донецк: Новый мир, 2003. 125 с.
9. Пузаков А.В., Филатов М.И., Ларионов Н.Н. Методика определения тепловой напряжённости автомобильного генератора // Научное обозрение. 2016. № 10. С. 118–130.
10. Пузаков А.В., Осаулко Я.Ю. Исследование теплового состояния автомобильного генератора в процессе эксплуатации // Проблемы функционирования систем транспорта: матер. междунар. науч.-практич. конф. студ., аспирант. и молодых учёных. Тюмень: ТИУ, 2016. С. 290–295.