

УДК 629.1.04

Андрей Владимирович Пузаков, кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации и ремонта автомобилей, ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»
e-mail: And-rew78@yandex.ru

Ярослав Юрьевич Осаулко, магистрант кафедры технической эксплуатации и ремонта автомобилей, ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»
e-mail: yaroslav.osaulko@mail.ru

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ТЕПЛОвого СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА

Актуальность исследуемой проблемы обусловлена интенсивным ростом количества электронных и электрических систем, устанавливаемых на автомобиль, а также постоянным ростом теплового режима работы генератора. *Цель* статьи заключается в разработке тепловой модели автомобильного генератора, применение которой возможно в производственных условиях. Ведущим подходом к исследованию данной проблемы является анализ теплового состояния автомобильного генератора, позволяющий установить степень вклада в общий температурный фон отдельных элементов узла, и ее изменение при возникновении неисправностей. К основным *результатам* исследования относится разработанная тепловая модель, которая включает в себя основные источники тепловой энергии, имеющиеся в автомобильном генераторе, тепловые сопротивления и тепловые потоки, а также аналитические выражения для определения ее параметров. Материалы статьи могут быть полезными для крупных автотранспортных предприятий, парков автомобилей специальных служб при проведении диагностирования технического состояния автомобильных генераторов.

Ключевые слова: тепловая модель, автомобильный генератор, тепловое состояние, тепловое сопротивление, источник тепла.

Автомобильный генератор – электрическая машина, которая преобразует механическую энергию вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в электрическую. На привод генератора затрачивается до 10% мощности ДВС. При преобразовании механической энергии в электрическую теряется около 80% энергии [15]. Коэффициент полезного действия (КПД) автомобильного генератора, как правило, не превышает 50%, соответственно большая часть энергии приходится на потери разного рода. Например, на преодоление аэродинамического сопротивления лопаток вентиляторов охлаждения. Существенны механические потери, которые возникают в подшипниках качения и при передаче энергии от коленчатого вала ДВС на шкив генератора посредством ремённой передачи. Наиболее серьёзными являются потери, связанные с перемагничиванием железа статора. На различные виды потерь энергии приходится [4, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14]:

- потери в статоре – 46%;
- потери в обмотке статора – 29м%;
- потери в выпрямителе – 19%;
- потери в обмотке ротора – 3%;
- механические потери – 3%.

Практически все эти потери связаны с преобразованием механической и электрической энергии в тепловую. Таким образом, можно сказать, что каждый элемент автомобильного генератора, который связан с преобразованием энергии, в процессе работы будет выделять тепло.

Тепловое состояние автомобильного генератора – совокупность параметров, характеризующих возникновение, преобразование, аккумулярование, распространение тепловой энергии в элементах генератора, а также тепловые потоки, устанавливающиеся между генератором и окружающей средой в процессе его работы.

Оценкой теплового состояния электрических машин занимаются отечественные [1, 2, 3] и зарубежные учёные, однако применительно к автомобильным генераторам исследования ведутся преимущественно за рубежом (таблица 1). Часть исследований посвящена оценке теплового состояния проектируемых машин (например, стартер-генератора), другие – построению тепловых моделей серийных генераторов. Однако вопросом диагностирования автомобильных генераторов на основе оценки теплового состояния уделено недостаточно внимания.

В работе французского исследователя Jérémie Lutun «Modélisation thermique des alternateurs automobiles» [7] автором исследуется тепловое состояние автомобильного генератора. В ходе исследования была разработана тепловая модель, на основе которой была построена схема замещения (рисунок 1).

На рисунке 1 заштрихованными прямоугольниками обозначены тепловые проводимости (сопротивления) различных элементов генератора, их связей, а также отмечены сопротивления, возникающие при передаче тепловой энергии от элементов

Таблица 1. Список исследований

Авторы, название публикации	Место, год
Sai Chun Tang, Thermal Modeling of Lundell Alternators [10]	USA, Massachusetts Institute of Technology, 2006
Marco Cossale, Multi-phase Starter-Generator for 48 V Mild-Hybrid Powertrains [9]	Italy, Politecnico di Torino, 2017
Dan Hagstedt, Comparison of different electrical machines for Belt Driven Alternator Starters [6]	Sweden, Lund University, 2013
Jérémie Lutun, Modélisation thermique des alternateurs automobiles [7]	Université Grenoble, 2012, Français
Chen Mu-Kuen, Thermal effect of stator winding to the vehicle alternator [5]	St. John's University, Taiwan, 2007
S. Brisset, M. Hecquet, P. Brochet, Thermal modelling of a car alternator with claw poles using 2D finite element software [12]	France, Ecole Centrale de Lille, 2001

генератора к окружающей среде. Закрашенные круги со стрелками внутри обозначают потери энергии на различных этапах её передачи. В модели учтены

механические, аэродинамические потери, а также потери на перемагничивание железа статора [11].

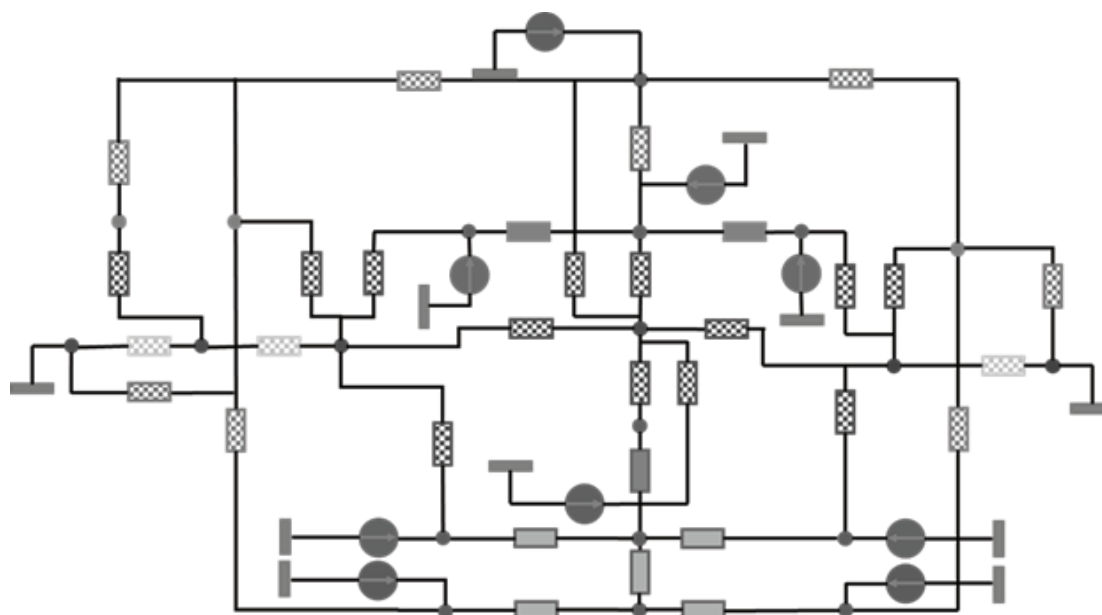


Рисунок 1. Тепловая модель автомобильного генератора согласно [7]

Недостаток данной модели состоит в сложности её практического применения, поскольку использование данной модели требует определения большого количества параметров.

В работе Sai Chun Tang «Thermal Modeling of Lundell Alternators» [10] произведён тепловой анализ генераторов переменного тока, используемых в автомобилях. Разработана аналитическая тепловая модель, на основе которой составлена схема замещения (рисунок 2), предложены процедуры для определения её параметров. Разработана методика определения температуры генератора переменного тока.

Так же, как и в работе Jérémie Lutun, схема содержит в себе источники тепловой энергии, тепло-

вые сопротивления. Данная модель подразумевает определение параметров тепловой модели посредством температуры отдельных элементов, значения которых определяются в ходе эксперимента.

Ввиду структурной сложности существующих моделей, а также практической сложности их применения нами были произведены исследования, направленные на разработку упрощённой тепловой модели, пригодной для практического использования.

Тепловая модель автомобильного генератора отображает взаимосвязь между его элементами, характеризующую направление и объём тепловых потоков, возникающих в процессе работы узла.

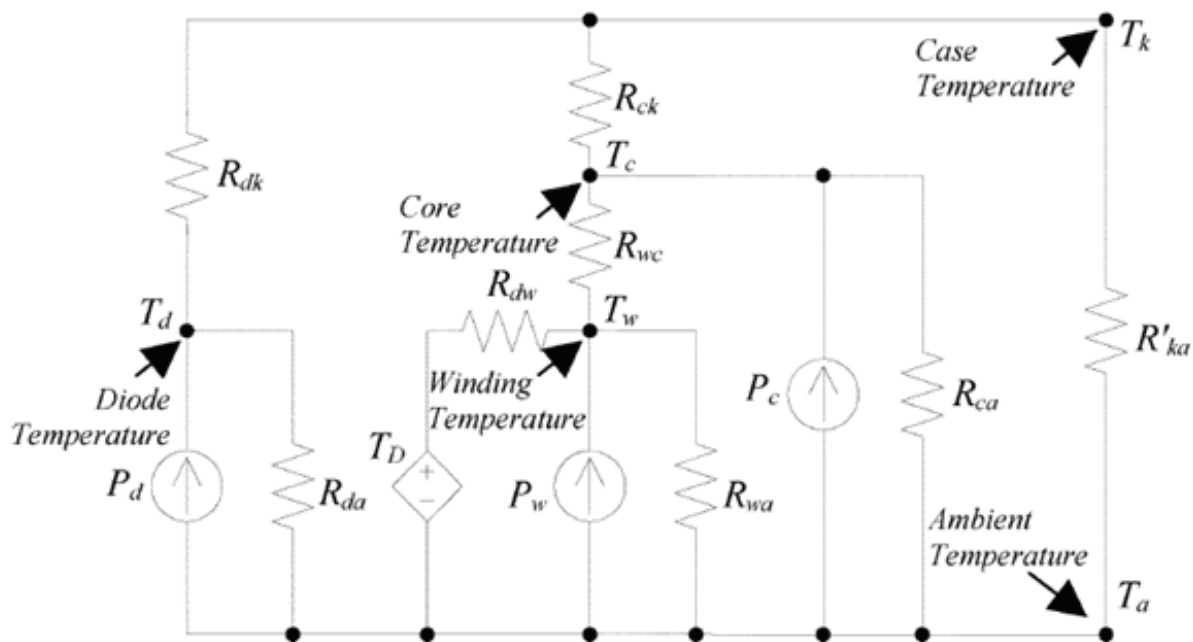


Рисунок 2. Тепловая модель автомобильного генератора согласно [10] (Примечание: P_d, P_w, P_c – источники тепловой энергии, $R_{da}, R_{dk}, R_{ck}, R_{wc}, R_{ca}, R_{wa}, R_{dw}, R_{ka}$ – тепловые сопротивления элементов генератора и их сопряжений, $T_d, T_D, T_c, T_w, T_a, T_k$ – точки в которых измеряется температура)

В ходе проведения исследований генератор был условно разделён на три основных элемента: выпрямитель, статор и обмотка статора, так как они являются наиболее значимыми источниками тепловой энергии. Остальными элементами на данном этапе было принято решения пренебречь ввиду незначительного их вклада в тепловое состояние генератора (подшипники качения), а также сложности проведения измерений (обмотка ротора).

Тепловая модель отображает тепловые потоки, имеющиеся в генераторе в процессе его работы (рисунок 3). Она состоит из следующих структурных элементов:

- источники выделения тепла (элементы генератора, в которых в процессе работы возникают потери и происходит выделение тепловой энергии);
- тепловые сопротивления (элементы генератора, которые находятся в плотной связи с ними,

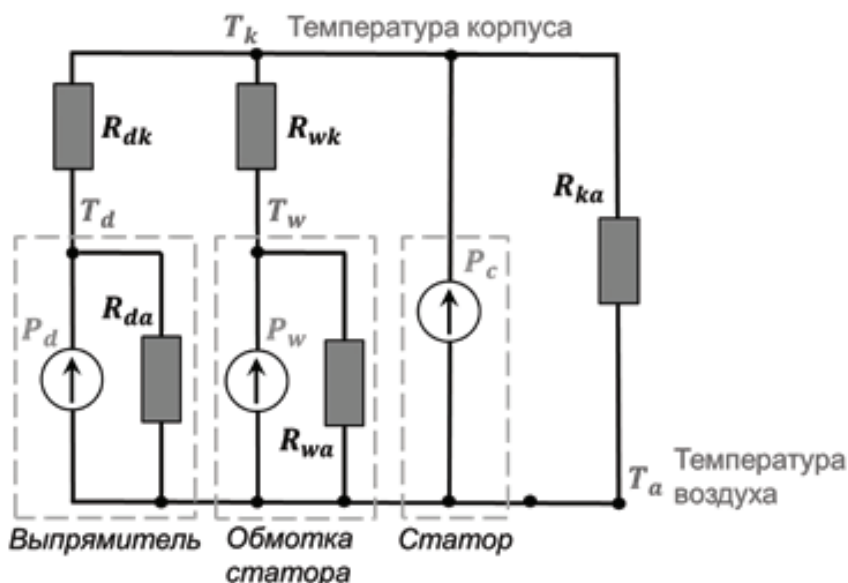


Рисунок 3. Тепловая модель автомобильного генератора (Примечание: P_d, P_w, P_c – источники тепловой энергии, $R_{da}, R_{dk}, R_{wa}, R_{wk}, R_{ka}$ – тепловые сопротивления элементов генератора и их сопряжений, T_d, T_w, T_k, T_a – точки в которых измеряется температура)

способствуют распространению и аккумулярованию тепловой энергии).

На данной модели выделены три элемента генератора: выпрямитель, обмотка статора и железо статора. P_d , P_w и P_c обозначают источники тепла в элементах генератора. Через выпрямитель и обмотку статора проходит ток, производимый в генераторе, в результате чего формируются их тепловыделения. В самом статоре выделение тепла возникает за счёт перемагничивания, которое происходит при вращении магнитного поля, создаваемого обмоткой ротора.

R_{da} , R_{wa} , R_{ka} , R_{wk} и R_{dk} – тепловые сопротивления элементов генератора, а также связей между ними. Эти сопротивления способствуют аккумулярованию тепловой энергии при возникновении её в различных элементах генератора.

T_d , T_w – температуры поверхностей элементов генератора. Это единственные параметры тепловой модели, которые можно зафиксировать при помощи датчиков в ходе проведения экспериментов. Опираясь на эти данные, можно рассчитать и остальные параметры тепловой модели.

Тепловыделения и тепловые сопротивления элементов генератора непостоянны. Они изменяются при изменении структурных параметров генератора, а, соответственно, измерение значений тепловой модели может способствовать установлению технического состояния узла [1, 2].

Для определения параметров тепловой модели используются формулы, которые позволяют получить значения тепловых потерь в различных элементах генератора автомобиля.

Формулы (1) и (2) позволяют определить потери в выпрямителе.

$$\left(\frac{1}{R_{da}} + \frac{1}{R_{dk}}\right) \cdot \Delta T_{da} - \frac{1}{R_{dk}} \cdot \Delta T_{ka} = P_d, \quad (1)$$

где R_{da} , R_{dk} – тепловые сопротивления элементов, Вт / °С; ΔT_{da} , ΔT_{ka} – превышения температуры элементов генераторов, °С.

$$P_d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_d(i) \cdot i_d(i), \quad (2)$$

где $V_d(i)$ – напряжение в i -ый промежуток времени, В;

$i_d(i)$ – сила тока в i -ый промежуток времени, А;

N – количество временных периодов.

Значения $V_d(i)$ и $i_d(i)$ – значения силы тока и напряжения в определённые временные промежутки. Эти значения соответствуют силе тока и напряжению диода, через который в этот промежуток времени проходит ток.

Формулы (3) и (4) позволяют определить потери в обмотке статора.

$$-\frac{1}{R_{wk}} \cdot \Delta T_{ka} + \frac{1}{R_{wa}} \cdot \Delta T_{wa} = P_w, \quad (3)$$

где R_{wk} , R_{wa} – тепловые сопротивления элементов, Вт / °С; ΔT_{da} , ΔT_{ka} , ΔT_{wa} – превышения температуры элементов генераторов, °С.

$$P_w = I_A^2 \cdot r_A + I_B^2 \cdot r_B + I_C^2 \cdot r_C, \quad (4)$$

где I_A , I_B , I_C – сила тока каждой фазы, А; r_A , r_B , r_C – сопротивление каждой фазы, Ом.

В формулу (4) подставляются значения фазных токов и сопротивлений, значения превышений температуры определяются экспериментально.

Формулы (5) и (6) позволяют определить потери в статоре.

$$-\frac{1}{R_{dk}} \cdot \Delta T_{da} + \left(\frac{1}{R_{dk}} + \frac{1}{R_{ka}} + \frac{1}{R_{wk}}\right) \cdot \Delta T_{ka} - \frac{1}{R_{wk}} \cdot \Delta T_{wa} = P_c, \quad (5)$$

$$P_c = p_{1/50} \cdot (f/50)^{1.3} \cdot B^2 \cdot m_{ст}, \quad (6)$$

где B – магнитная индукция, Тл;

$m_{ст}$ – масса статора, кг;

$p_{1/50}$ – удельные потери в статоре, Вт/кг;

f – частота тока, Гц.

Эти формулы экспериментальным путём позволяют установить тепловые потери, возникающие в процессе работы автомобильного генератора. Значения превышений температуры устанавливаются при помощи датчиков в ходе проведения экспериментов. Тепловые сопротивления определяются путём решения системы уравнений (1), (3), (5) для различных значений мощности генератора при неизменяемой частоте вращения ротора. Установление всех параметров тепловой модели позволяет количественно оценить тепловые потоки и их направления как в самом генераторе, так и при взаимодействии его с окружающей средой.

Разработанная тепловая модель отличается от существующих своей простотой. Её применение подразумевает определение небольшого количества параметров теплового состояния генератора, что делает её более применимой в реальных условиях. Использование разработанной тепловой модели генератора в дальнейшем позволит установить взаимосвязь между тепловым состоянием автомобильного генератора и его структурными параметрами. Это, в свою очередь, позволит производить определение технического состояния узла на основе параметров теплового состояния.

Выводы:

1. Существуют различные тепловые модели, разработанные для существующих автомобиль-

ных генераторов, а также для внедряемых новых узлов, например, для стартер-генератора. Однако все эти модели не предназначены для использования их в процессе диагностирования автомобильных генераторов.

2. Была разработана собственная тепловая модель автомобильного генератора, которая отличается от существующих простотой, доступностью её использования в производственных условиях.

Разработанная модель включает наиболее весомые источники тепловой энергии, определение её параметров имеет небольшую трудоёмкость.

3. Дальнейшая разработка тепловой модели и определение её параметров позволит систематизировать результаты экспериментов и разработать полноценную методику диагностирования автомобильного генератора на основе оценки его теплового состояния.

Литература

1. Пузаков, А.В. Диагностирование неисправностей автомобильных генераторов на основе оценки теплового состояния / А.В. Пузаков, Я.Ю. Осаулко // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2017. – Т. 5. – № 6 (32). – С. 225-229.
2. Пузаков, А.В. Исследование влияния эксплуатационных факторов на тепловое состояние автомобильного генератора / А.В. Пузаков, Я.Ю. Осаулко // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2018. – № 1 (52). – С. 16-23.
3. Филатов, М.И. Разработка регрессионной модели теплового состояния автотракторных генераторов в процессе эксплуатации / М.И. Филатов, А.В. Пузаков, Я.Ю. Осаулко // Известия Оренбургского аграрного университета. – 2018. – № 1 (69). – С. 102-106.
4. Bouarroudj, L. Contribution à l'étude de l'alternateur à griffes. Application au domaine automobile: Thèse de docteur / L. Bouarroudj. – Grenoble, 2005. – 146 p.
5. Chen, Mu-Kuen. Thermal effect of stator winding to the vehicle alternator / Mu-Kuen Chen // 2007 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). – Seoul, 2007. – pp. 1041-1045.
6. Hagstedt, D. Comparison of different electrical machines for Belt Driven Alternator Starters: Doctoral Dissertation / D. Hagstedt. – Lund, 2013. – 171 p.
7. Lutun, J. Modélisation thermique des alternateurs automobiles: These de docteur / J. Lutun. – Grenoble, 2012. – 168 p.
8. Maloberti, O. Thermal modelling of a claw-pole car alternator: Steady-state computation and identification of free convection coefficients / O. Maloberti, A. Gimeno, A. Ospina, G. Friedrich, K. El Kadri Benkara, L. Charbonnier // Electrical Machines (ICEM) 2012 XXth International Conference. – Marseille, 2012. – pp. 1888-1892.
9. Cossale, M. Multi-phase Starter-Generator for 48 V Mild-Hybrid Powertrains: PhD thesis / M. Cossale. – Torino, 2017. – 138 p.
10. Tang, S. C. Thermal modeling of Lundell alternators / S.C. Tang, T.A. Keim, D.J. Perreault // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2005. – Vol. 20. – pp. 25-36.
11. Brisset, S. Thermal modelling of a car alternator with claw poles using 2D finite element software / S. Brisset, M. Hecquet, P. Brochet // COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. – 2001. – Vol. 20. – Issue: 1. – pp. 205-215.
12. Gimeno, A. Contribution à l'étude d'alternateurs automobiles: caractérisation des pertes en vue d'un dimensionnement optimal: Thèse de docteur. / A. Gimeno. – Compiègne, 2011. – 173 p.
13. Meksi, O. Modélisation thermique de l'alternateur à griffes: étude de la convection naturelle dans l'entrefer / O. Meksi, A.O. Vargas // Symposium de Génie Électrique. – Cachan, 2014. – pp. 93-97.
14. Laurent, A. Modélisation et optimisation des alternateurs à griffes Application au domaine automobile: Thèse de docteur / A. Laurent. – Grenoble, 2012. – 185 p.
15. Bradfield, M. Improving Alternator Efficiency Measurably Reduces Fuel Costs / M. Bradfield. – DelcoRemy, 2008. – 32 p.