

УДК 622.684:629.353

**Монастырский Юрий Анатольевич**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой  
автомобильного транспорта,  
Криворожский национальный университет,  
Украина, г. Кривой Рог, ул. XXII партсъезда, 11  
e-mail: [monastirskiy08@rambler.ru](mailto:monastirskiy08@rambler.ru)

**Веснин Артем Вячеславович**

кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой  
подъемно-транспортных машин,  
Криворожский национальный университет  
e-mail: [artem\\_vesnina@mail.ua](mailto:artem_vesnina@mail.ua)

**Систук Владимир Александрович**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра автомобильного транспорта,  
Криворожский национальный университет  
e-mail: [vladimir.sistuk@yandex.ru](mailto:vladimir.sistuk@yandex.ru)

**Богачевский Антон Александрович**

ассистент,  
кафедра подъемно-транспортных машин,  
Криворожский национальный университет  
e-mail: [mr.bogachevsky@mail.ru](mailto:mr.bogachevsky@mail.ru)

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЛАКОВОГО ПОКРЫТИЯ ЯКОРНОЙ ОБМОТКИ ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА БЕЛАЗ-75131 МЕТОДОМ CAE-МОДЕЛИРОВАНИЯ

##### Аннотация:

Компьютерным 3-D моделированием установлены диапазон и частоты температурных показателей лакового покрытия участка якорной обмотки тягового двигателя ЭК-590 карьерного самосвала БелАЗ-75131 в конкретных эксплуатационных условиях.

**Ключевые слова:** карьерный самосвал, термический анализ, температурные колебания, эксплуатационные условия, тяговый электрический двигатель, якорная обмотка, CAE-моделирование

DOI: 10.18454/2313-1586.2016.02.077

**Monastyrskiy Yuriy A.**

Doctor of technical sciences, professor,  
the head of the automobile transport department,  
Krivorojsky National University,  
11 XXII Partsjezda, Krivoy Rog, Ukraine  
e-mail: [monastirskiy08@rambler.ru](mailto:monastirskiy08@rambler.ru)

**Vesnina Artem V.**

candidate of technical sciences, assistant professor,  
head of the Handling, Road and Reclamation  
Machinery and Equipment Department,  
Krivorojsky National University  
e-mail: [artem\\_vesnina@mail.ua](mailto:artem_vesnina@mail.ua)

**Sistuk Vladimir A.**

PhD, assistant professor of the automobile  
transport department,  
Krivorojsky National University  
e-mail: [vladimir.sistuk@yandex.ru](mailto:vladimir.sistuk@yandex.ru)

**Bogachevskiy Anton A.**

assistant of the Handling, Road and Reclamation  
Machinery and Equipment Department,  
Krivorojsky National University  
e-mail: [mr.bogachevsky@mail.ru](mailto:mr.bogachevsky@mail.ru)

#### THE LACQUER COATING TEMPERATURE INDICATORS DETERMINATION OF THE BELAZ-75131 OPEN PIT TRUCK DRIVE MOTOR ARMATURE WINDING BY CAE-SIMULATION METHOD

##### Abstract:

Both the range and frequency of temperature indicators of EK-590 drive electromotor armature winding area lacquer coating of BelAZ-75131 open pit truck in specific operating conditions are identified by computer 3D modeling.

**Key words:** open pit truck, thermal analysis, temperature oscillations, operating conditions, driver motor, armature winding, CAE-simulation

На основе анализа простоев карьерных самосвалов БелАЗ-75131, которые задействованы при транспортировке горной массы на железорудных карьерах Криворожского бассейна, установлено, что простои, связанные с выходом из строя электромеханической трансмиссии, составляют 16 % от общих потерь рабочего времени данных машин. При устранении неполадок электромеханической трансмиссии до 60 % времени приходится на ее электрическую составляющую [1]. Для уточнения причин отказов тяговых электрических машин был проведен дефектоскопический анализ их элементов [2]. Установлено, что значительное количество отказов вызвано разрушением лакового покрытия якорных обмоток тяговых электрических двигателей с локализацией на их лобовых частях [3].

Нами было сделано предположение, что разрушение лакового покрытия обусловлено особенностями эксплуатации самосвалов. На Криворожских карьерах автодороги характеризуются большим удельным весом участков с максимально допустимыми продольными уклонами, которые чередуются с горизонтальными участками, что вызывает изменения тяговых сил на ведущих колесах и, соответственно, токовых нагрузок в обмотках тяговых электродвигателей во время транспортирования. Кроме того, дополнительные изменения токовых нагрузок связаны и с состоянием дорожного покрытия, а именно с колебаниями суммарного сопротивления движению из-за неровностей дороги. Пульсирующие нагрузки приводят к перепадам температуры в элементах тяговых электродвигателей, что в итоге может вызывать чередующиеся знакопеременные деформации в лаковом покрытии обмотки, провоцируя возникновение трещин и снижая общий ресурс работы электрических машин.

Таким образом, исследование температурных показателей лакового покрытия якорных обмоток тяговых двигателей большегрузных самосвалов является актуальным для машин, работающих в условиях карьеров Криворожского региона.

Для достижения данной цели рационально применение современных программных продуктов, в основе которых лежит CAE-моделирование [4].

На рынке представлено достаточное количество программного обеспечения, которое позволяет проводить термический анализ твердотельных объектов, самым популярным из которых является программный комплекс SolidWorks компании Dessault Systemes [5].

Теплопередача в твердых телах моделируется в подпрограмме SolidWorks Flow Simulation с помощью уравнения теплопроводности [7 – 11]:

$$\frac{\partial \rho_n c \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right) + q_v,$$

где  $c$  – удельная теплоемкость,  $\theta$  – температура,  $\lambda$  – теплопроводность, м/с;  $\rho_n$  – плотность воздуха, (кг/м<sup>3</sup>),  $t$  – время,  $q_v$  – удельное (в единице объема) тепловыделение источника тепла, Вт/м<sup>3</sup>.

Частью рабочего процесса тягового двигателя является обдув якорной обмотки потоком охлаждающего воздуха. В данной подпрограмме движение и теплообмен воздушной среды моделируются с помощью уравнения Навье-Стокса, которое описывает в нестационарной постановке закон сохранения массы, импульса и энергии. Для моделирования турбулентных течений (они встречаются в инженерной практике наиболее часто) упомянутые уравнения Навье – Стокса осредняются по Рейнольдсу, т. е. используется осредненное по малому масштабу времени влияние турбулентности на параметры потока, а крупномасштабные временные изменения осредненных по малому масштабу времени составляющих газодинамических параметров потока (давления, скоростей, температуры) учитываются введением соответствующих производных по времени ( $\partial$ ). Дополнительно используются уравнения состояния компонентов воздушной среды и эмпирические зависимости вязкости и теплопроводности данных компонентов от температуры.

Система уравнений сохранения массы, импульса и энергии нестационарного пространственного течения имеет следующий вид в рамках подхода Эйлера в декартовой системе координат ( $x, i = 1, 2, 3$ ), вращающейся с угловой скоростью  $\Omega$  вокруг оси, которая проходит через ее начало:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_n u_k) &= 0; \\ \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho_n u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P_i}{\partial x_i} &= S_i; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial(\rho_n E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho_n E + P)u_k + q_k - \tau_{ik}u_i) = S_k u_k + q_v,$$

где  $u_i$  – скорость текучей среды (охлаждающего воздуха),  $P$  – давление воздуха, Па;  $E$  – полная энергия воздуха, Дж;  $q_i$  – диффузионный тепловой поток, Дж;  $S_i$  – действующие на массу воздуха внешние силы:  $S_{iporous}$  – действие сопротивления пористого тела,  $S_{igravitiv}$  – действие гравитации,  $S_{irotation}$  – действие вращения системы координат, то есть  $S_i = S_{iporous} + S_{igravitiv} + S_{irotation}$ ;  $E$  – полная энергия единичной массы текучей среды;  $q_v$  – тепло, выделяющееся тепловым источником в единичном объеме текучей среды;  $\tau_{ik}$  – тензор вязких сдвиговых напряжений, нижние индексы означают суммирование по трем координатным направлениям.

Для текучих сред тензор вязких сдвиговых напряжений определяется следующим образом:

$$\tau_{ij} = \mu \times \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \times \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho \times k \times \delta_{ij},$$

где  $\mu = \mu_j + \mu_i$ ,  $\mu_j$  – коэффициент динамической вязкости,  $\mu_i$  – коэффициент турбулентной вязкости,  $\delta_{ij}$  – дельта-функция Кронекера,  $k$  – кинетическая энергия турбулентности. Коэффициент турбулентной вязкости  $\mu_i$  определяется через величины кинетической энергии турбулентности  $k$  и диссипации этой энергии  $\varepsilon$ :

$$\mu_i = f_\mu \times \frac{C_\mu \times \rho \times k^2}{\varepsilon},$$

где  $f_\mu = [1 - \exp(-0,025 \times R_y)]^2 \times (1 + \frac{20,5}{R_T})$ ;  $R_y = \frac{\rho \times \sqrt{k} \times y}{\mu_i}$ ;  $R_T = \frac{\rho \times k^2}{\mu_i \times \varepsilon}$ ,  $y$  – расстояние от поверхности стенки,  $R_y$  и  $R_T$  – показатели критерия Рейнольдса,  $C_\mu = 0,09$ .

Кинетическая энергия турбулентности  $k$  и диссипации этой энергии  $\varepsilon$  определяются в результате решения следующих двух уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \times k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho \times u_k \times k) &= \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \left( \mu_i + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \times \frac{\partial k}{\partial x_k} \right) + S_k, \\ \frac{\partial \rho \times \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho \times u_k \times \varepsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \left( \mu_i + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \times \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right) + S_\varepsilon, \end{aligned}$$

где

$$S_k = \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \times \varepsilon + \mu_i \times P_B,$$

$$S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \times \frac{\varepsilon}{k} \times (f_1 \times \tau_{ij}^R \times \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_j \times C_B \times P_B) - C_{\varepsilon 2} \times f_2 \times \frac{\rho \times \varepsilon^2}{k},$$

$$\tau_{ij}^R = \mu_j \times \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \times \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \times \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho \times k \times \delta_{ij}; P_B = -\frac{g_i}{\sigma_B} \times \frac{1}{\rho} \times \frac{\partial \rho}{\partial x_i},$$

где  $g_i$  – составляющая гравитационного ускорения в координатном направлении  $x_i$ ,  $\sigma_B = 0,9$ ,  $C_B = 1$  при  $P_B > 0$  и  $C_B = 0$  при  $P_B \leq 0$ ,  $f_1 = 1 + (0,05/f_\mu)$ ,  $f_2 = 1 - \exp(-R_T^2)$ ,  $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ ,  $\sigma_k = 1$ .

Диффузионный тепловой поток моделируется с помощью уравнения:

$$q_k = - \left( \frac{\mu_1}{P_r} + \frac{\mu_1}{\sigma_c} \right) \times C_p \times \frac{\partial T}{\partial x_k}, \quad k=1,2,3,$$

где  $\sigma_c = 0,9$ ,  $P_r$  – число Прандтля,  $C_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении,  $T$  – температура текучей среды.

Переход ламинарного течения в турбулентное и турбулентного в ламинарное моделируется с помощью функций  $f_\mu$ , а в пограничных слоях течения около поверхностей твердого тела – с помощью модифицированных универсальных пристеночных функций  $y$  [6, 8 – 11].

Исходя из многолетних исследований, местом наибольшего нагрева при эксплуатации тягового электродвигателя является лобовой участок якорной обмотки, которая расположена со стороны щеточно-коллекторного узла [12,13,14]. Поэтому именно этот элемент был выбран для создания solid-модели участка якорной обмотки тягового двигателя ЭК-590 карьерного самосвала БелАЗ-75131. Сетка конечных элементов модели состоит из 3772 ячеек (рис. 1).

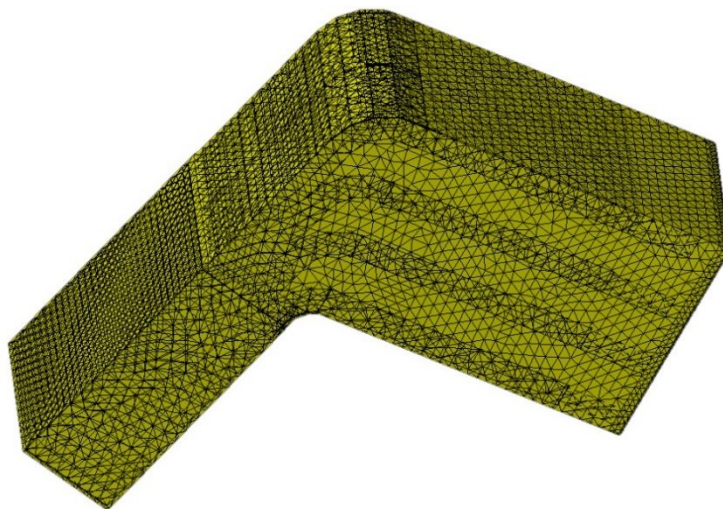


Рис. 1 – Визуализация сетки конечных элементов

Для определения максимальных значений тепловых показателей лакового покрытия якорной обмотки моделирование температурного состояния проводилось для условий трассы, выбор которой отвечал двум критериям:

- наибольшему проценту наклонных участков в общей длине транспортирования;
- наличию участков с предельно допустимыми продольными уклонами.

Этим критериям соответствует трасса Анновского карьера, которая включает сложный участок с уклоном в 150 промилле протяженностью 100 м (рис. 2).

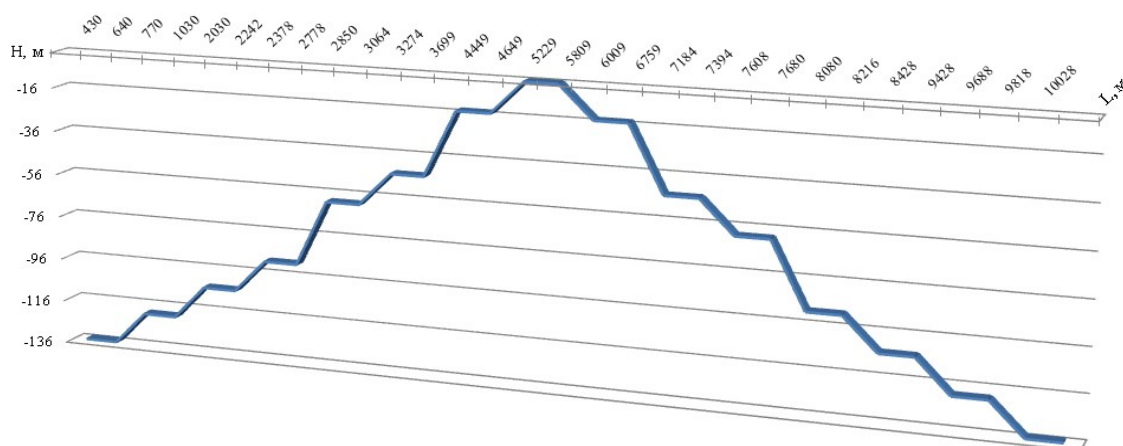


Рис. 2 – Представление маршрута в виде продольного профиля

Профиль трассы определяет изменения токовых нагрузок в обмотках тяговых двигателей во время движения карьерного самосвала. Действительные токи на каждом участке продольного профиля трассы определялись по тяговой характеристике электродвигателя согласно существующей методике [15]. Величина квадрата силы тока в каждый момент времени определяет текущие значения удельного тепловыделения в проводниках катушки якоря по известной зависимости [16, 17], что и послужило исходными данными для моделирования температурного состояния якорной обмотки.

Результаты расчета удельных тепловыделений для одного из проводников solid-модели в графическом виде представлены на рис. 3.

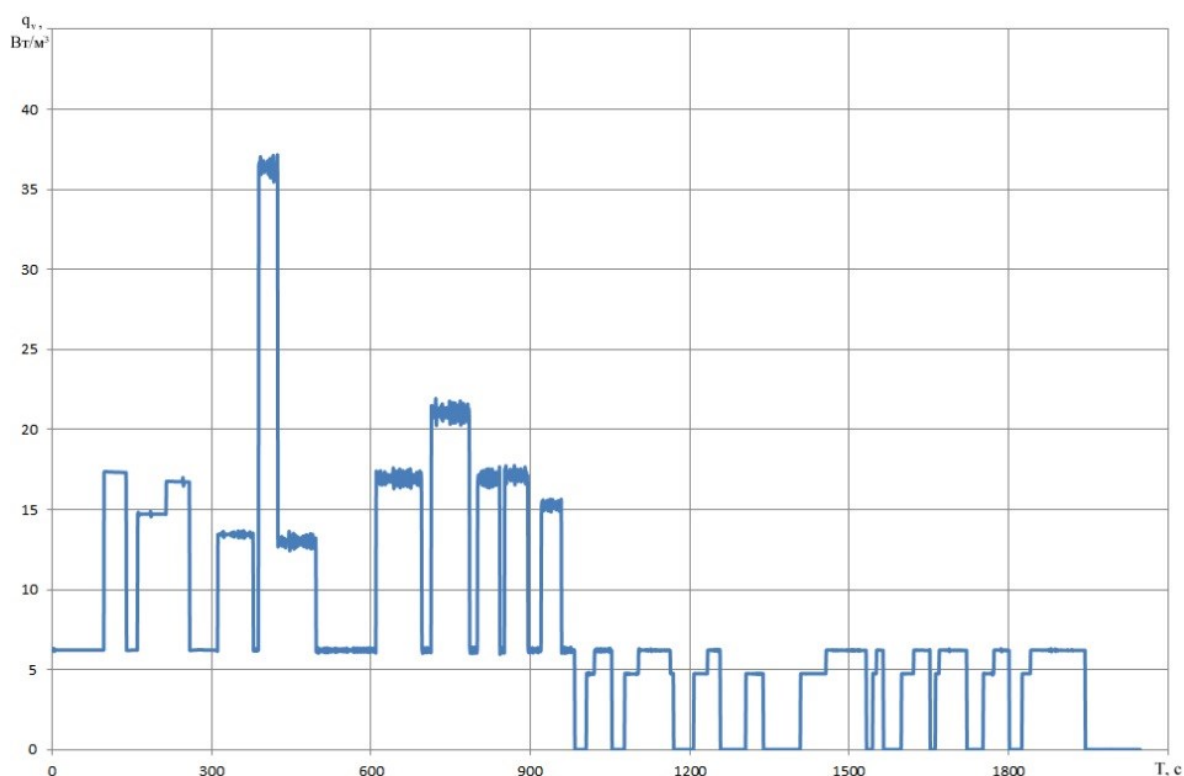


Рис. 3 – Удельное (в единице объема) тепловыделение источника тепла

Характер изменения удельных тепловыделений на трассе позволяет разделить цикл движения во времени условно на два этапа: подъем – когда наблюдается рост тепловыделений проводника; спуск – тепловыделения колеблются в меньшем диапазоне значений.

В результате моделирования температурного состояния участка якорной обмотки установлено, что во время ездки в лаковом покрытии возникают температурные пульсации за относительно короткие промежутки времени, что, как отмечалось ранее, по всей видимости, обусловлено колебаниями действительных токов в связи с изменениями суммарного дорожного сопротивления. Из приведенных эпюр термического состояния можно видеть, что максимальному нагреву подвержены лобовые части solid-модели (рис. 4), что подтверждается исследованиями других авторов [12, 13, 14]. Также получена зависимость температуры лакового покрытия от времени движения самосвала на трассе (рис. 5). Из нее видно, что пиковое значение температуры возникает в момент подъема самосвала под уклон в 150 промилле. В это же время наблюдаются и максимальные значения удельных тепловыделений. Несмотря на то что максимальная температура лака не превышает предельно допустимого значения для класса изоляции H (180°C), она приближается к 160°C, что является порогом срабатывания температурного датчика.

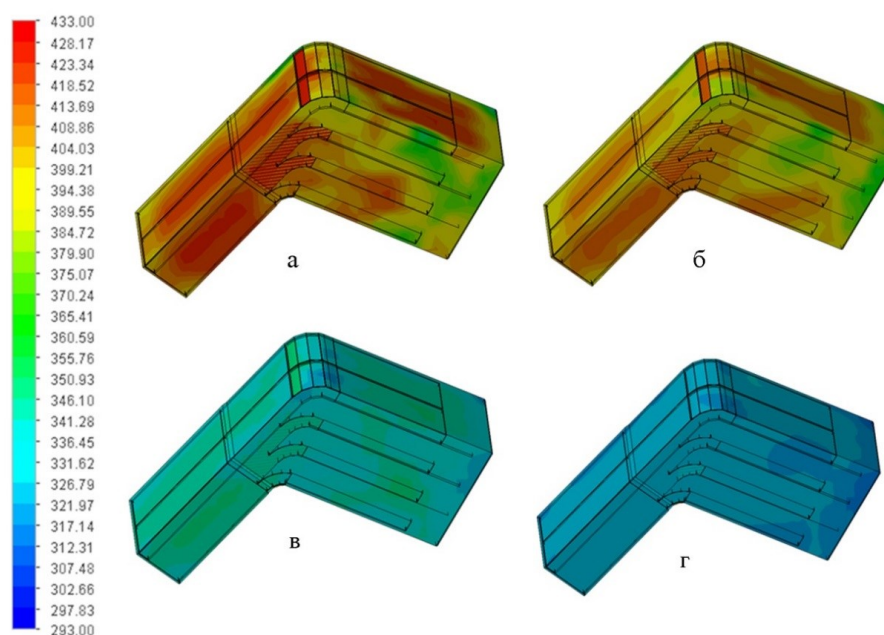


Рис. 4 – Термическое состояние лакового покрытия участка обмотки:  
 а) – при движении самосвала на подъем от забоя к перегрузочному пункту;  
 б) – во время разгрузки;  
 в) – при движении самосвала на спуск от перегрузочного пункта к забою;  
 г) – во время погрузки

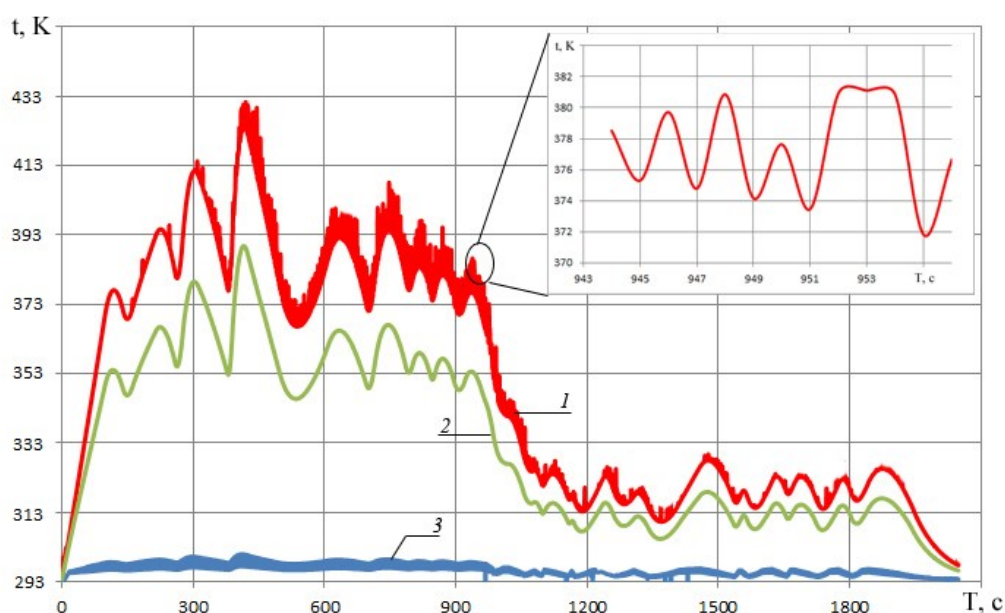


Рис. 5 – График температуры лакового покрытия участка обмотки:  
 1 – максимальная температура;  
 2 – средняя температура;  
 3 – минимальная температура

Таким образом, проведенный термический анализ solid-модели участка якорной обмотки в среде Solidworks Flow Simulation показал, что характер распределения температурных показателей может приводить к пластическим деформациям обмотки со значительными перемещениями в области ее лобовой поверхности, что в дальнейшем вызовет образование микротрещин лакового покрытия. Для определения мест концентрации и величин таких деформаций в дальнейшем будет проведен анализ напряженно-деформированного состояния объекта исследования.

## Литература

1. Сістук В.О. Вплив високо дисперсного пилу залізорудних кар'єрів на стан електричних машин тягового електроприводу самоскидів / В.О. Сістук, А.О. Богачевський // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. — Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2014. — Вип. 118. - С. 168 – 175.
2. Веснін А.В. Порівняльний аналіз залізорудного і вугільного пилу у контексті їх впливу на наробіток компонентів електромеханічної трансмісії кар'єрних самоскидів / А. В. Веснін, В. О. Сістук, А. О. Богачевський // Вісник Криворізького технічного університету. - Кривий Ріг: КНУ, 2014. — Вип. 38. — С. 112 – 119.
3. Vesnin A.V. The analysis of mining conditions influence to operating time of dump trucks traction drive components / A. V. Vesnin, V. O. Sistuk, A. O. Bogachevskiy // Metallurgical and Mining Industry. — 2015. - No. 3. — Dnipropetrovsk. — P. 268 – 271.
4. Vesnin A.V. The industrial dust properties as a wear factor of pit trucks electric machines elements / A.V. Vesnin, V.O. Sistuk, A.O. Bogachevskiy // Metallurgical and Mining Industry. — 2015. - No. 3. — Dnipropetrovsk. — P. 272 – 275.
5. Vesnin A.V. Computer modeling usage for heat mass exchange inside mine dump-truck traction generator and electrical motor research / A.V. Vesnin, V.O. Sistuk, A.O. Bogachevskiy // Metallurgical and Mining Industry. - 2015. - No. 3. — Dnipropetrovsk. — P. 276 – 278.
6. Vesnin A.V. Mathematical models analysis for the thermal state of mining trucks traction motors determining / A.V. Vesnin, V.O. Sistuk, A.O. Bogachevskiy // Metallurgical and Mining Industry. - 2015. - No. 3. — Dnipropetrovsk. — P. 279 – 282.
7. Solidworks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев. — СПб.: БХВ – Петербург, 2008. — 1040 с.: + DVD – (Мастер).
8. Kurowski Paul. Thermal Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2015 and Flow Simulation 2015 / Paul Kurowski. — SDC Publication, 2015. — P. 288.
9. Mattsson J. An Introduction to SolidWorks Flow Simulation 2010 / J. Mattson. — SDC Publication, 2010. — 297 p.
10. Dassault Systems. Новые возможности SolidWorks 2013 / Dassault Systèmes. — SolidWorks Corp, 2013. — 249 p.
11. Lombard M. Solidworks 2013 Bible. Lombard M. / John Wiley & Sons Inc., 2013. — 1299 p.
12. Исмаилов Ш.К. Электрическая прочность изоляции электрических машин локомотивов: монография / Ш.К. Исмаилов. — Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2003. — 272 с.
13. Котеленец Н.Ф. Испытания и надежность электрических машин / Н.Ф. Котеленец, Н.Л. Кузнецов. — М.: Высшая школа, 1988. — 232 с.
14. Анализ надежности изоляции обмоток электрических машин тягового подвижного состава с учетом особенностей климатических условий внешней среды / А.М. Худогонов, Д.А. Оленцевич, В.В. Сидоров, Е.М. Лыткина // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - 2009. - № 2. — С. 232 – 236.
15. Карьерный автотранспорт: состояние и перспективы / П.Л. Мариев, А.А. Кулешов, А.Н. Егоров, И.В. Зырянов. — СПб: Наука, 2004. — 429 с.
16. Сипайлов Г.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах / Г.А. Сипайлов, Д.И. Санников, В.А. Жадан. — М.: Высшая школа, 1989. — 239 с.
17. Филиппов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах / И.Ф. Филиппов. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 256 с.