

УДК 536.3

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.30.3.040](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.30.3.040)

## Математическое моделирование теплового процесса оболочек распределенных электротехнических комплексов

А.И. Борисова, В.Л. Бурковский

*Воронежский государственный технический университет,  
Воронеж, Российская Федерация*

**Резюме:** В настоящее время проблематикой является неопределенность физических процессов сложноструктурированных электротехнических комплексов, требующая совокупности тепловых экспериментов на имитационных моделях, с целью определения теплофизических параметров отдельных частей и элементов для анализа взаимного влияния температурных полей в распределенных электротехнических комплексах. В тоже время, учитывая влияние внешних и внутренних воздействующих факторов, подход к решению задач такого теплообмена ограничивается сложностью протекания электромагнитных процессов в элементах с разнофизическими свойствами, а также трудностями учета совокупностей конструктива сложной конфигурации, что приводит к необходимости новых более точных решений на принципах математического моделирования. При наличии достоверной тепловой математической модели появится возможность разработки рациональной конструкции с использованием приемов и структур с учетом эффективного распределения тепловых потоков. В связи с этим, в ходе математического моделирования были учтены все имеющиеся поверхности электротехнического комплекса при формировании методики тепловых режимов. Проведенный анализ тепловой характеристики позволит прогнозировать поведение таких распределенных электротехнических комплексов на стадиях проектирования, что тесно увязывает за собой конструктивные приемы, обеспечивающие стойкость к дестабилизирующим факторам.

**Ключевые слова:** тепловой процесс, теплопроводность, электротехнический комплекс, математическое моделирование.

**Для цитирования:** Борисова А.И., Бурковский В.Л. Математическое моделирование теплового процесса оболочек распределенных электротехнических комплексов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2020;8(3). Доступно по: [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/BorisovaBurkovsky\\_3\\_20\\_1.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/BorisovaBurkovsky_3_20_1.pdf) DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.040

## Mathematical modeling of the thermal process shells of distributed electrical systems

A.I. Borisova, V.L. Burkovsky

*Voronezh State Technical University,  
Voronezh, Russian Federation*

**Abstract:** Currently, the problem is the uncertainty of the physical processes of complex-structured electrical complexes, which requires a set of thermal experiments on simulation models, in order to determine the thermophysical parameters of individual parts and elements for analyzing the mutual influence of temperature fields in distributed electrical complexes. At the same time, taking into account the influence of external and internal influencing factors, the approach to solving the problems of such heat exchange is limited by the complexity of electromagnetic processes in elements with various physical properties, as well as the difficulties of taking into account the sets of structures of a complex configuration, which leads to the need for new more accurate solutions on the principles of mathematical modeling. In the presence of a reliable thermal mathematical model, it will be possible to develop a rational design using techniques and structures, taking into account the effective distribution of heat flows. In this regard, in the course of mathematical modeling, all available surfaces of the electrical

complex were taken into account when forming the thermal mode technique. The analysis of thermal characteristics will allow predicting the behavior of such distributed electrical complexes at the design stages, which closely links the design methods that ensure resistance to destabilizing factors.

**Keywords:** thermal process, thermal conductivity, electrical complex, mathematical modeling.

**For citation:** Borisova A.I., Burkovsky V.L. Mathematical modeling of the thermal process shells of distributed electrical systems. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2020;8(3). Available from: [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/BorisovaBurkovsky\\_3\\_20\\_1.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/BorisovaBurkovsky_3_20_1.pdf) DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.040 (In Russ).

## Введение

В настоящее время решение задач по тепловыделениям ограничивается сложностью протекания электромагнитных процессов в элементах с разнофизическими свойствами, а также трудностями учета совокупностей сборочных единиц сложной конфигурации при наличии взаимных затемнений элементов поверхностей, что приводит к необходимости новых подходов их решения на основе принципов математического моделирования. В этих условиях особенности теплового проблемного поля электротехнического комплекса, прежде всего, связаны с необходимостью сохранений теплового баланса активных частей электромеханики и электронной составляющей, ограничиваемые недостаточностями теплоизлучающих процессов в вакуум-климатических условиях эксплуатации при недопустимостях воздействия этих факторов на отдельную номенклатуру электронной компонентной базы. Исследования такого электротехнического комплекса характеризуется критическими трудностями высококачественного аналитического синтеза его тепловой напряженности.

Традиционный подход к разработке математической модели не может в полной мере обеспечить выполнение перечисленных требований. Пакеты программ для математического моделирования, как правило, являются узко специализированными по видам задач, методам их решения и типам используемых данных, развитие и адаптация к новым задачам, а также интеграция с другими программными средствами при создании функционально законченных приложений оказываются довольно проблематичными.

## Теплообмен оболочек электротехнического комплекса

Важным является правильность и адекватность отражения крепления электротехнического комплекса к термостабилизированной платформе. В этом случае процесс теплопередачи связан с контактным теплообменом и теплопроводностью оболочки электротехнического комплекса. Применение прямых ребер с различной конфигурацией сечения теплопроводящего профиля позволяет получить новое качество оболочек. Сочетание высокой прочности и жесткости оболочки при расположении прямых ребер в зависимости от расположения теплостока объекта (Рисунок 1).

Поэтому целесообразно рассмотреть теплообмен некоторого объекта электротехнического комплекса внутри теплопроводящей оболочки. Возможны различные случаи организации теплостока на гранях оболочки при условии задания удельной тепловой нагрузки внутри оболочки  $q$ , Вт/м<sup>3</sup>.

Результаты исследования, представленные на Рисунках 3-5, выполнены при условии, что внутри оболочки выделяется тепло мощностью 10 Вт, материал оболочки АМг6. Контакт оболочки с термостабилизированной плитой может быть выполнен по различным граням оболочки. Условно температура плиты принята равной нулю, а на других границах оболочки существует излучение в соответствии с законом Стефана – Больцмана. Очевидно, что температура внутри объекта будет уменьшаться в зависимости от толщины оболочки, которая может быть заменена эквивалентным

набором ребер. Возможны два варианта формирования поверхности оболочки при сохранении площади поперечного сечения (фактически при сохранении массы гладкой поверхности) и при уменьшении массы, но сохранении габаритных размеров. [ 1, 2]

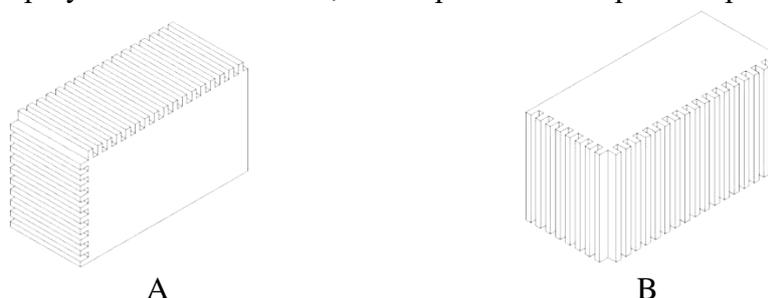


Рисунок 1 – Варианты расположения прямых ребер в зависимости от расположения теплотока объекта ( А – теплосток слева, В – теплосток снизу).

Figure 1 – Options for location of straight ribs depending on the location of the heat drain of the object (A - heat drain on the left, B - heat drain on the bottom).

Условия моделирования температурного поля оболочки из материала АМГ6 представлены на Рисунке 2. Изменение температурного поля во времени для объекта внутри оболочки толщиной 2 мм представлено на Рисунке 6.

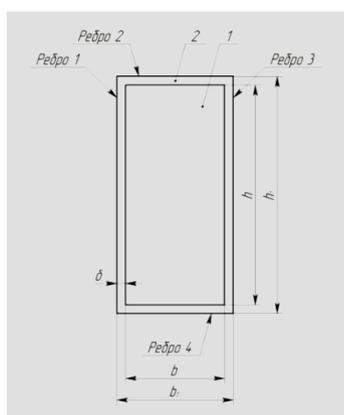


Рисунок 2 – Условия моделирования  
Figure 2 – Simulation conditions

Поз.1 – Объект с тепловыделением  
 $q = 34582 \text{ Вт/м}^3$

Физические свойства объекта:

$$\lambda = 0,34 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$$

$$C = 1500 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$$

$$\rho = 1900 \text{ кг/м}^3$$

Поз. 2 - Алюминиевый сплав АМГ6

Физические свойства материала:

$$\lambda = 122 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$$

$$C = 922 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$$

$$\rho = 2640 \text{ кг/м}^3$$

Граничные условия:

Условие радиации ( $\beta = 0,9; T_0 = 0 \text{ К}$ )

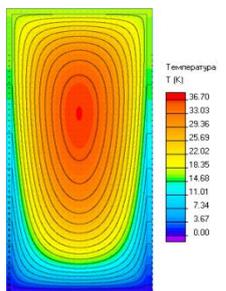


Рисунок 3 – Установившееся температурное поле (толщина оболочки  $\delta = 2 \text{ мм}$ ,  $q = 34581,7 \text{ Вт/м}^3$ )  
Figure 3 - Established temperature field (shell thickness  $\delta = 2 \text{ мм}$ ,  $q = 34581.7 \text{ Вт/м}^3$ )

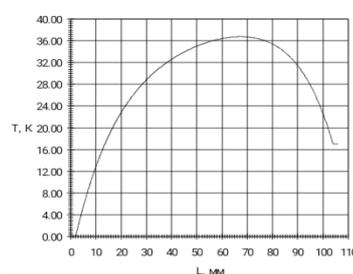


Рисунок 4 - Распределение температуры вдоль оси симметрии внутри оболочки (толщина оболочки  $\delta = 2 \text{ мм}$ ,  $q = 34581,7 \text{ Вт/м}^3$ )  
Figure 4 - Temperature distribution along the axis of symmetry inside the shell (shell thickness  $\delta = 2 \text{ мм}$ ,  $q = 34581.7 \text{ Вт/м}^3$ )

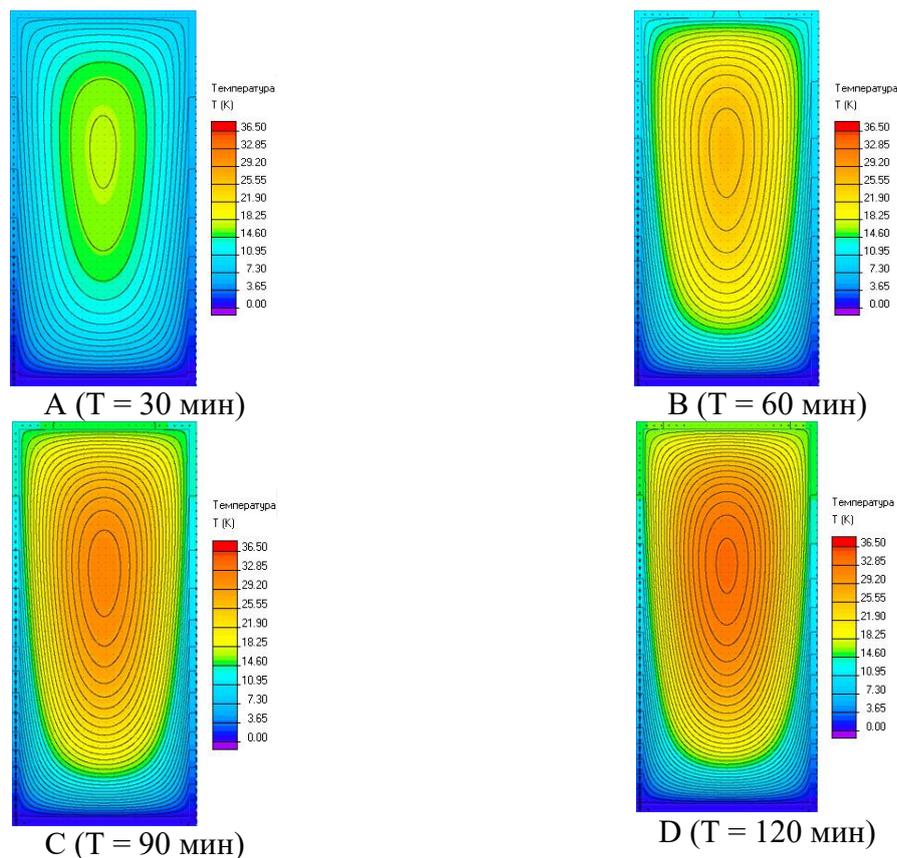


Рисунок 5 – Изменение температурного поля во времени (толщина оболочки  $T^M = 2$  мм,  $q = 34581,7$  Вт/м<sup>3</sup>)

Figure 5 – Change of temperature field over time (shell thickness  $T^M = 2$  mm,  $q = 34581.7$  W/m<sup>3</sup>)

Таблица 1 – Изменение максимального превышения температуры объекта внутри оболочки  
Table 1 – Change of maximum over temperature of the object inside the shell

$t, c$	0	1800	3600	5400	7200	9000	10800	12600	14400
$T, K$	0	16.4004	25.4812	30.3005	32.8196	34.1289	34.808	35.1601	35.3426

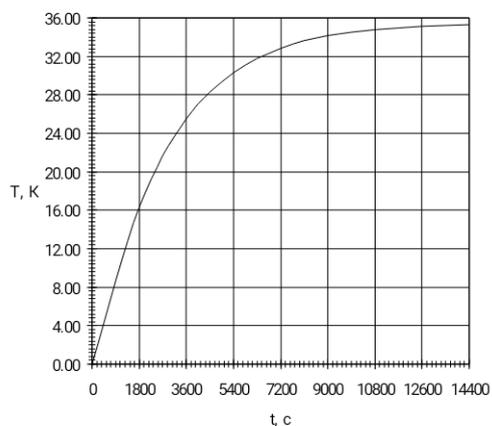


Рисунок 6 – Изменение максимального превышения температуры объекта внутри оболочки  
Figure 6 – Change of maximum excess temperature of the object inside the shell

### Анализ в подходах математического моделирования процесса теплообмена электротехнических комплексов

Для полноты исследования необходимо рассмотреть оболочки цилиндрической формы, которые применяются в конструкциях электрических машин. В отличие от выше рассмотренных оболочек электронного блока оболочка электрической машины должна иметь более высокую прочность. Поэтому материал оболочки легированная нержавеющая сталь (например 12Х18Н10Т). Теплопроводность материала имеет значение 15 Вт/(м·град). При работе электродвигателя в нормальных условиях теплообмен электродвигателя с окружающей средой осуществляется, в основном, через корпус машины в радиальном направлении. При этом тонкий корпус ( $\delta^M = 2$  мм) незначительно влияет на увеличение температуры машины. Ситуация существенно изменяется когда теплообмен электродвигателя осуществляется, в основном, в аксиальном направлении в условиях космического пространства. При этом толщина корпуса и теплопроводность материала играют важную роль, что необходимо учитывать при проектировании машин, работающих в подобных условиях. Исследование температурного поля при стационарной теплопередаче (Рисунок 7, 8) показывает, что увеличение толщины корпуса в 2 раза (с 1 до 2 мм) снижает превышение температуры почти в 2 раза (со 113 до 57 град. таблица). Однако наиболее целесообразно не увеличивать толщину корпуса, а применить продольные ребра, позволяющие улучшить теплопроводность без потери прочности оболочки. Очевидно, что практически всегда можно определить размер ребер эквивалентный площади поперечного сечения корпуса. [3,4,5]

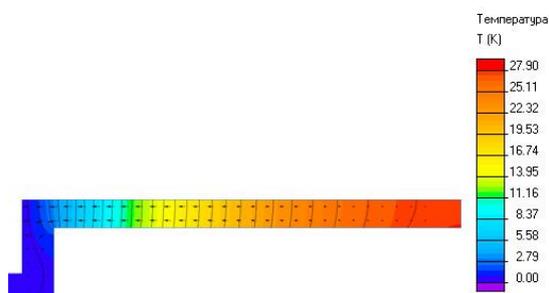


Рисунок 7– Картина распределения тепла в корпусе  
 Figure 7 – Structure of heat distribution in the housing

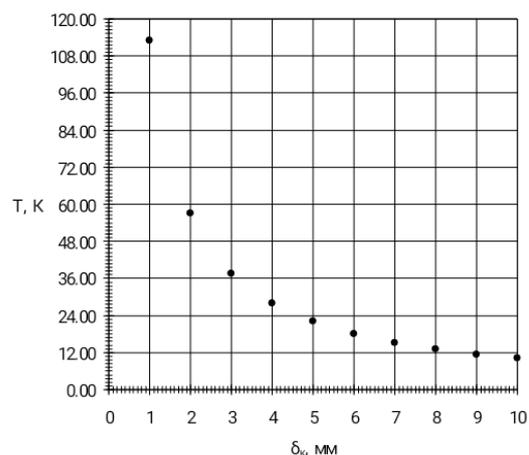


Рисунок 8 - Зависимость превышения температуры от толщины корпуса  $\delta_k$ , мм  
 Figure 8 - Dependence of temperature excess on thickness of housing  $\delta_k$ , mm

Таблица 2 – Зависимость превышения температуры T от толщины корпуса  $\delta$ , мм  
 Table 2 – Dependence of temperature exceeding T on thickness of housing  $\delta$ , mm

$\delta$ , мм	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T, K	113,01	57,00	37,70	27,90	22,00	18,10	15,20	13,10	11,50	10,20

Особенности практической реализации математических моделей связаны со значительной разницей размеров канатной области (мкм) и активных элементов электротехнического комплекса (мм).

Целесообразно для построения математической модели теплового контакта заменить реальный контакт, имеющий стохастическую природу контактных пятен, фиктивным контактом с регулярным, равномерным распределением круглых пятен касания, которые окружены эквивалентным зазором  $\delta_k^{TM}$  заполненным средой с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_3$ . При этом размеры фиктивного контакта определяются по реальной шероховатости контактирующих поверхностей. Для определения эквивалентной толщины контактного слоя можно воспользоваться формулой: [6, 7, 8]

$$\delta_k = (R_{z1} + R_{z2}) \cdot [1 - m(R_z)] \quad (1)$$

где  $R_{z1}$  и  $R_{z2}$  – параметры шероховатости сопрягаемых поверхностей, которые связаны с базисной длиной  $L_b$ , по которой они и определяются;  $m$  – коэффициент заполнения профиля микронеровностей (0,4...0,6). В результате реализуются модели представленные на Рисунках 9 и 10.

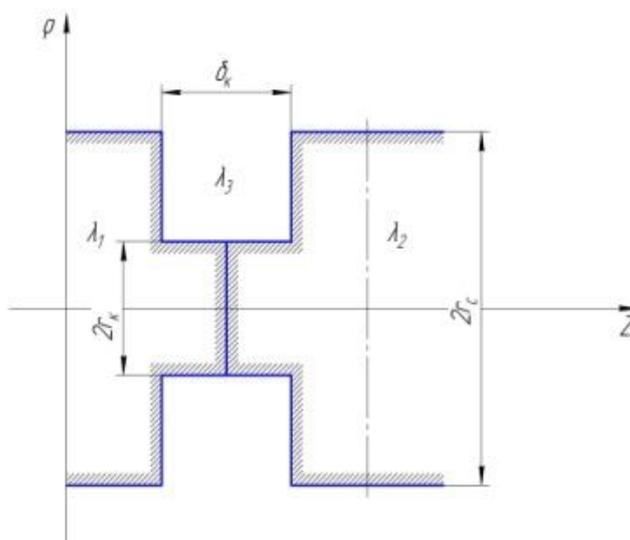


Рисунок 9 – Модель контакта на основе изолированных цилиндрических элементов.  
 Figure 9 – Contact model based on isolated cylindrical elements.

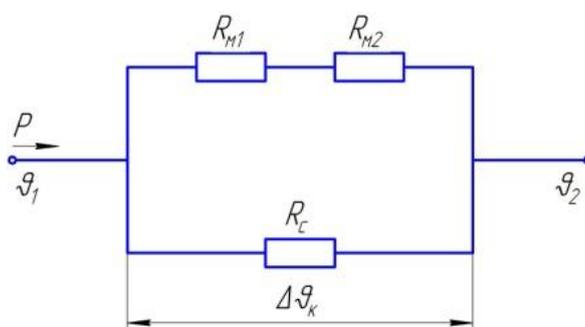


Рисунок 10 – Эквивалентная тепловая схема замещения контакта на основе изолированных цилиндрических элементов.  
 Figure 10 – Equivalent thermal circuit of contact replacement based on insulated cylindrical elements.

Первый вариант исследования температурного поля при нестационарной теплопередаче представлено на Рисунках 11 – 14. В первом варианте оболочка изготовлена из однородного материала (12X18H10T). Второй вариант исследования температурного поля при нестационарной теплопередаче представлен на Рисунках 16-19. Во втором варианте оболочка выполнена из двух частей. Первая часть (внутренняя) прочная оболочка машины (12X18H10T). Вторая часть (внешняя) оболочка с ребрами из материала АМгб.

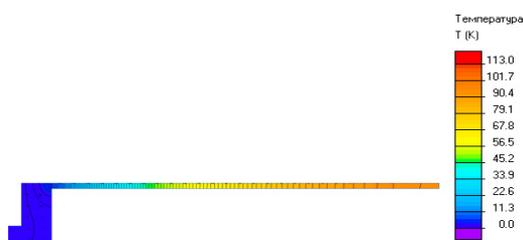


Рисунок 11 – Корпус (T = 30 мин)  
Figure 11 – Housing (T = 30 min)

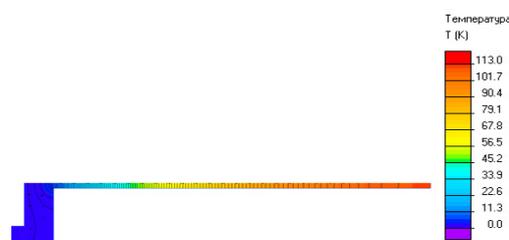


Рисунок 12 – Корпус (T = 60 мин)  
Figure 12 – Housing (T = 60 min)

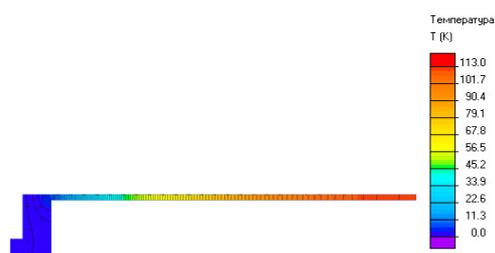


Рисунок 13 – Корпус (T = 90 мин)  
Figure 13 – Housing (T = 90 min)

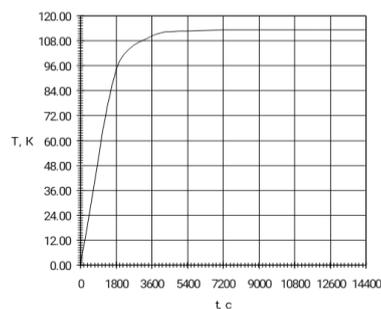


Рисунок 14 – Зависимость превышения температуры от времени  $\delta_k$ , мм  
Figure 14 – Dependence of exceeding the temperature on time  $\delta_k$ , мм

Таблица 3 – Интенсивность нагрева корпуса  
Table 3 – Shell heating rate

t, c	0	1800	3600	5400	7200	9000	10800	12600	14400
T, K	0	94.7239	110.276	112.754	113.146	113.209	113.219	113.220	113.220

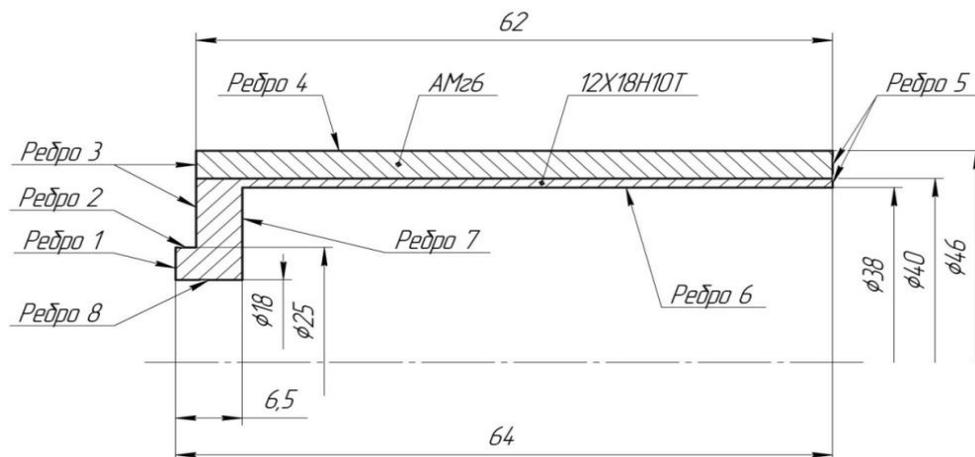


Рисунок 15 – Условия моделирования корпуса с двумя материалами (нестационарная теплопередача)

Figure 15–Simulation conditions of the case with two materials (transient heat transfer)

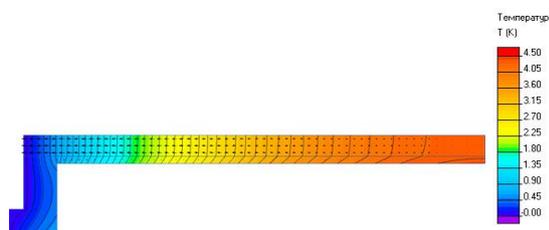


Рисунок 16 – Корпус толщиной  $\delta = 4$  мм (T = 30 мин)

Figure 16 – Housing with thickness  $\delta = 4$  mm (T = 30 min)

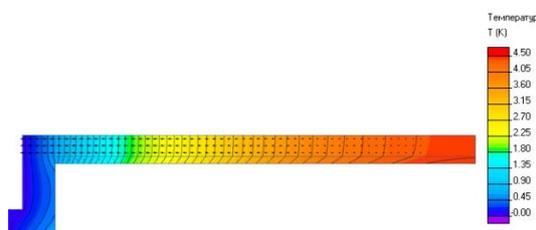


Рисунок 17 – Корпус толщиной  $\delta = 4$  мм (T = 60 мин)

Figure 17 – Housing with thickness  $\delta = 4$  mm (T = 60 min)

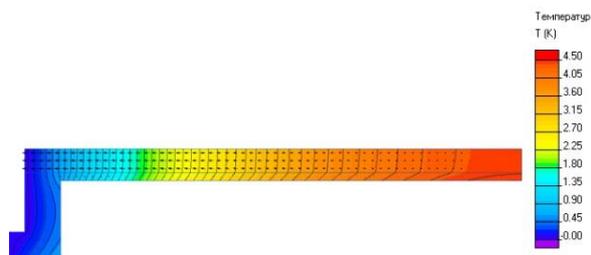


Рисунок 18 – Корпус толщиной  $\delta = 4$  мм (T = 90 мин)

Figure 18 - Housing with thickness  $\delta = 4$  mm (T = 90 min)

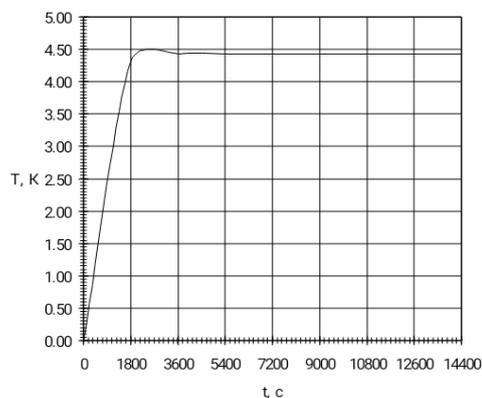


Рисунок 19 – Характеристика нагрева корпуса толщиной  $\delta = 4$  мм

Figure 19 – Heating characteristic of the housing with thickness  $\delta = 4$  mm

Таблица 4 – Интенсивность нагрева корпуса  
Table 4 – Shell heating rate

t, c	0	1800	3600	5400	7200	9000	10800	12600	14400
T, К	0	4,3243	4,42895	4,43142	4,43147	4,43147	4,43147	4,43147	4,43147

### Заключение

Исследование проблемы обеспечения эффективности аппаратного математического моделирования и анализа тепловых взаимодействий элементов электротехнических комплексов обусловлен необходимостью создания программного обеспечения для анализа тепловых процессов в рамках распределенных объектов сложноструктурированных электротехнических комплексов. [9, 10] В связи с этим методология анализа проблематики моделирования сложных тепловых полей в процессе их взаимодействия в рамках электротехнических комплексов требует качественно новых подходов. В результате предложена математическая модель анализа тепловых полей распределенных объектов электротехнических комплексов, отличающаяся возможностью учета изменения параметров окружающей среды.

При анализе такого электротехнического комплекса распределение тепловой мощности задается осредненным по поверхности, но с последующим учетом локальностей тепловыделения его составляющих в местах крепления.

В ходе математического моделирования производится графический вывод во времени величин внутренних тепловых потоков и развертке всей поверхности электротехнического комплекса с цветом отображения при формировании расчетных методов и оптимизации тепловых режимов по факторам совмещения сроков службы и устойчивости к внешним воздействиям.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Борисова А.И. Теплорациональные режимы ЭМТД в негерметизированных комплексах КА. Мир электромеханотроники.2016;5:90-92.
2. Борисова А.И. Анализ тепловой характеристики электромеханотронных вакуумных исполнительных механизмов. Мир Электромеханотроники. 2018;7:68-71.
3. Борисова А.И., Бурковский В.Л. Математическая модель процесса взаимного теплообмена в электромеханотронных механизмах. Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018;14(2):66.
4. Борисова А.И., Бурковский В.Л. Анализ плотности температурных режимов механотронной аппаратуры в негерметизированных электротехнических комплексах. Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016;6(12):87.
5. Борисова А.И., Бурковский В.Л. Анализ тепловых процессов в рамках электротехнических комплексов с использованием средств математического моделирования. Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018;6(14):46.
6. Борисова А.И., Бурковский В.Л., Писаревский Ю.В., Фурсов В.Б. Анализ взаимного теплообмена ребристой поверхности в электротехническом комплексе. Вестник Воронежского государственного технического университета.2019;3(15):63-68.
7. Цирельман Н.М. Конвективный теплоперенос: моделирование, идентификация, интенсификация. 2018:10-52.
8. Васильев Б.Ю. Электропривод. Энергетика электропривода. 2015:25-50.
9. Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Космическая электроника.2015;2(1):32-42.
10. Карнаухов Н.Ф. Электромеханические и мехатронные системы.2006:60-72.

## REFERENCES

1. Borisova A.I. Teploracionalnie regimi EMTD v negermetizirovannih kompleksah KA. Mir Electromehanotroniki. 2016;5:90-92.
2. Borisova A.I. Analiz teplovoi karakteristiki electromehanatronnih vacuumnih ispolnitelnih mehanizmov. Mir Electromehanotroniki. 2018;7:68-71.
3. Borisova A.I., Burkovskiy V.L. Mathematical model of the process of mutual heat exchange in electromechanotronic mechanisms. The Bulletin of the Voronezh state technical university. 2018;14(2):66.
4. Borisova A.I., Burkovskiy V.L. The Bulletin of the Voronezh state technical university. 2016;6(12):87.
5. Borisova A.I., Burkovskiy V.L. The analysis of thermal processes of electrotechnical complexes with elements of mathematical modeling. The Bulletin of the Voronezh state technical university. 2018;6(14):46.
6. Borisova A.I., Burkovskiy V.L., Pisarevskiy U.V., Fursov V.B. The analysis of mutual heat exchange of the ridge surface in the elektrotekhnikal complex The Bulletin of the Voronezh state technical university. 2019;3(15):63-68.
7. Cirel'man N.M. Konvektivnyj teplomassoperenos: modelirovanie, identifikaciya, intensivatsiya. 2018:10-52.
8. Vasil'ev B.YU. Elektroprivod. Energetika elektroprivoda. 2015.25-50.
9. Belous A.I., Soloduha V.A., Shvedov S.V. Kosmicheskaya elektronika. 2015;2(1):32-42.
10. Karnauhov N.F. Elektromekhanicheskie i mekhatronnye sistemy. 2006:60-72.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Борисова Алина Игоревна**, аспирант кафедры электропривода, автоматизации и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.  
e-mail: [alinka\\_borisova93@mail.ru](mailto:alinka_borisova93@mail.ru)

**Borisova Alina Igorevna**, graduate student of the Department of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.

**Бурковский Виктор Леонидович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электропривода, автоматизации и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.  
e-mail: [bvl@vorstu.ru](mailto:bvl@vorstu.ru)

**Burkovsky Viktor Leonidovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation