

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВАТЕЛЯ

Чибишкин Владимир Васильевич<sup>1</sup>, Гейфман Евгений Моисеевич<sup>1</sup>,  
Сурип Борис Павлович<sup>2</sup>,  
Муштайкин Евгений Викторович<sup>2</sup>, Гарцев Николай Александрович<sup>1</sup>

E-mail: [surin\\_bp@mail.ru](mailto:surin_bp@mail.ru), тел. +7 (927) 1732565

<sup>1</sup> ЗАО НПК «Электровыпрямитель», Российская Федерация, г. Саранск  
E-mail: [ovbp@mail.ru](mailto:ovbp@mail.ru), тел. +7 (834-2) 290630, 430001, Россия, Мордовия, г. Саранск,  
ул. Пролетарская, д. 126

<sup>2</sup> ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева»,  
Российская Федерация, г. Саранск, 430005, Россия, Мордовия, г. Саранск, ул. Богдана  
Хмельницкого, д. 39

**Аннотация.** Произведена оптимизация конструкции цилиндрического резистивного нагревателя по положению резов для выравнивания плотностей тока в плечах нагревателя, толщины для достижения равномерной плотности тока в рабочей зоне, и диаметров отверстий в вершинах резов для снижения максимальной плотности тока.

**Ключевые слова:** моделирование, нагреватель, резистивный, плотность тока, оптимизация, карбид кремния, SiC.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Резистивные печи широко используются в технике в течение большого времени. И до сих пор они не потеряли актуальности в тех областях, где не требуются большие скорости изменения температуры. Резистивные печи относительно дешевы, просты в конструкции и эксплуатации. Такую печь мы используем для отжига карбида кремния в вакууме, для чего нужны температуры выше 1500°C. Было принято решение изготовить нагреватель печи из графита марки R6510P30 с удельным сопротивлением 12,5 мОм•м, а для разработки его конструкции применить математическое моделирование в САПР TCAD. В этой статье описаны результаты, полученные при оптимизации

### II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В предыдущей статье [1] мы сообщали о начале работы над конструкцией высокотемпературного нагревателя с использованием математического моделирования распределения токов и температуры. В этой статье описываем процесс оптимизации конструкции углеродного нагревателя. Как отмечалось в нашем первом сообщении, для создания модели геометрии использовалась программа DEVISE, а для моделирования протекания тока – программа DESSIS. К сожалению, программа DESSIS не позволяет моделировать теплообмен путем излучения, так что пришлось ограничиться только оптимизацией по плотности тока в теле нагревателя. Для построения сетки узлов, которая необходима для численного решения уравнения Пуассона и уравнения непрерывности электронов использовалась программа MESH. Выяснилось, что у этой программы имеется ограничение на максимальный объем модели. Эта проблема была решена масштабированием модели. Все геометрические размеры нагревателя были уменьшены в 1000 раз, но при этом были пропорционально изменены все соответствующие физические параметры материала.

Дополнительно было обнаружено, что в программе DESSIS есть ошибка в знаке выделяющегося тепла при прохождении тока через проводник. По этой причине в качестве материала нагревателя использована модель полупроводника (кремний), для которой установ-

лена максимально возможная ширина запрещенной зоны 10 эВ, чтобы избежать эффектов, связанных с появлением собственной проводимости. Концентрация донорных примесей подобрана такой, чтобы получить заданное удельное сопротивление.

### III. МОДЕЛЬ НАГРЕВАТЕЛЯ

Были разработаны геометрические модели высокотемпературной печи, по которым искали оптимальный вариант с высокой однородностью плотности тока в рабочей зоне ( $<1\%$ ) и максимальной плотностью тока в любом элементе конструкции ниже допустимого уровня ( $J_{\max} < 150 \text{ А/см}^2$ ).

Исходная заготовка нагревателя – цилиндр из графита с удельным сопротивлением  $12,5 \text{ мОм}\cdot\text{м}$ . Высота цилиндра 300 мм. Внешний диаметр цилиндра 190 мм. Рассматривался еще вариант с внешним диаметром 220 мм, но он отвергнут из-за невозможности разместить достаточно толстый слой тепловой изоляции между нагревателем и стенками вакуумной камеры. Толщина стенок 20 мм, значение выбрано из соображений механической прочности конструкции.

Основные рассмотренные варианты показаны на рис. 1.

Нагреватель «висит» на углеродных контактах, к которым присоединяются охлаждаемые водой проводники. Контакты видны в верхней части изображений.

Вариант, показанный на рис.1.а, имеет наибольшее сопротивление, а также, потенциально самое равномерное протекание тока. Сопротивление равно 18,9 мОм. Этот вариант был отвергнут по соображениям прочности. В последующих моделях мы упростили вид контакта, поскольку от его формы не зависит распределение тока в самом нагревателе. Кроме того, при построении всех остальных моделей мы моделировали только четверть тела нагревателя. Это позволяет в 4 раза сократить число ячеек сетки узлов, необходимых для решения уравнения Пуассона и уравнения непрерывности для электронов. Кроме того, предусмотрели только два реза: один, ближе контакту, «сверху вниз», второй – «снизу вверх». Второй рез располагается посередине между контактами. Его угловое положение не меняется, меняется только длина. В работе подбирали положение первого реза, ближайшего к контакту исходя из равенства плотностей тока в плечах нагревателя. Как выяснилось, его положение зависит от формы стенок и диаметра нагревателя.

Очевидно, что два элемента, показанных на рис.1.б – рис.1.е, соединены последова-



Рис.1. Основные варианты конструкции нагревателя.

Показаны геометрические модели, созданные в программе DEVISE САПР TCAD и проанализированные в программе DESSIS

тельно, а две образовавшиеся пластинки – параллельно. Так что сопротивление элемента равно общему сопротивлению нагревателя.

В максимально механически прочном варианте с резом, не доходящим ни до одного из краев цилиндра (рис.1.б), не удалось добиться равномерности протекания тока по элементам нагревателя. На рис.2 показан результат моделирования для этого варианта, в котором область с равномерной плотностью тока в рабочей зоне нагревателя составляет 60 мм.

На рис.1.в изображена «базовая» система резов в варианте с постоянной толщиной стенок. Такая модель выбиралась для оптимизации положения реза в центральной части модели. Половина второго реза видна справа на рисунке. На рис.3 показана зависимость различия плотностей тока в плечах нагревателя, в относительных единицах, от углового положения реза для цилиндра диаметром 190 мм. Видно, что он должен находиться не посередине (45°), а под углом 47°51'. Если задать возможное отклонение от равенства токов 1%, то получим, что реальное положение реза может отличаться на  $\pm 25'$ .

Для цилиндра диаметром 220 мм оптимальное положение реза равно 47°35'. Различие больше допустимого отклонения.

На рис.4 показаны карты распределения плотности тока, рассчитанные в программе DESSIS, использованные для построения графика на рис.3. На рис.4.а распределение плотности тока в сечении нагревателя, а на рис.4.б – на боковой поверхности. Обратите внимание, что на обоих рисунках различные масштабы соответствия «цвет – значение».

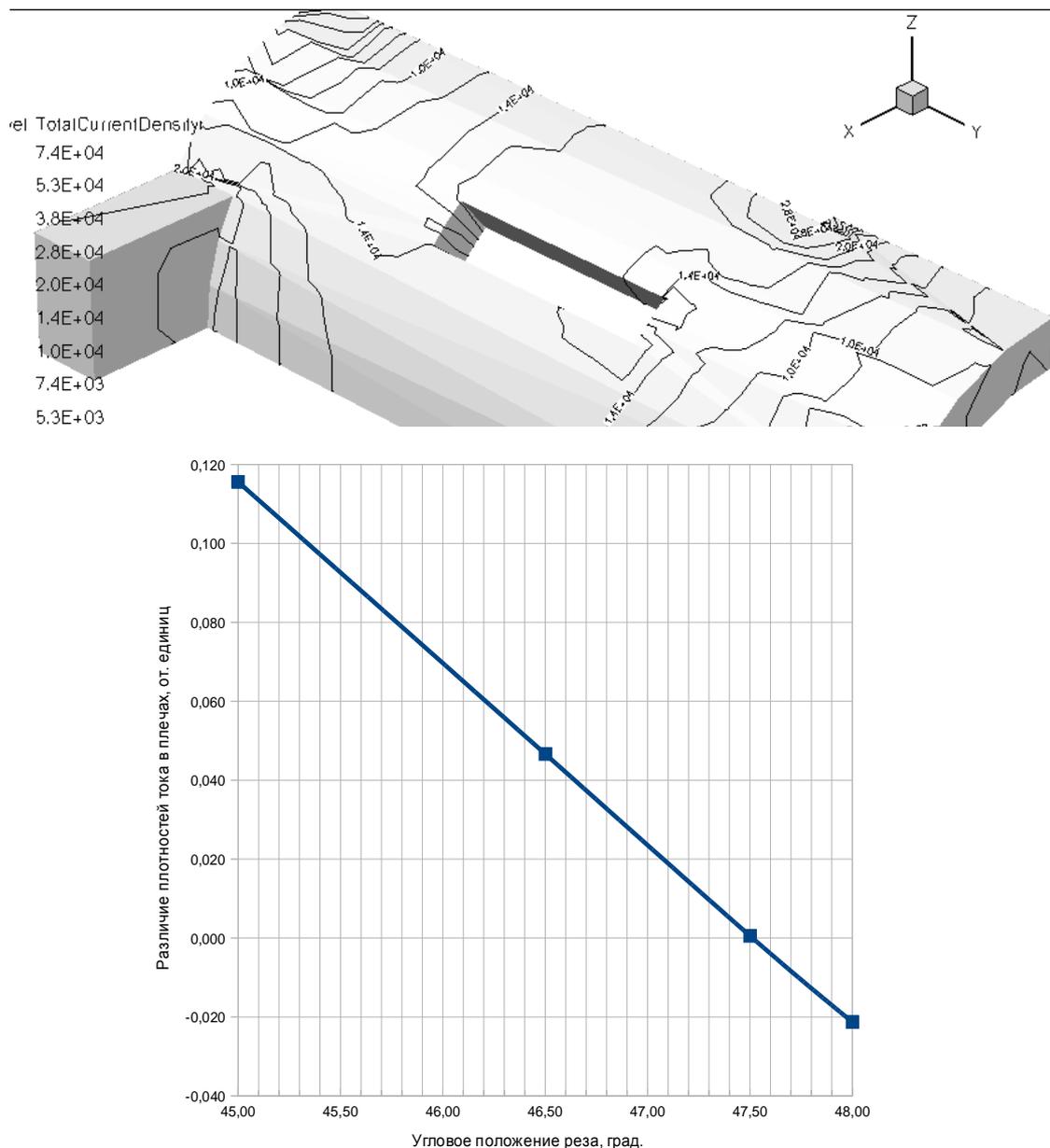


Рис.3. Зависимость различия плотностей тока в плечах от углового положения реза

Рис.4 показывает, что в такой простой конструкции как «базовый» вариант не возможно добиться большой равномерности протекания тока в рабочей области нагревателя (в центре). Кроме того, максимальная плотность тока наблюдается в вершинах резов. Это плохо для эксплуатации нагревателя. При высокой температуре графит будет разрушаться (окисляться) так, где выше температура, где больше плотность тока. Мы решили не полагаться на то, что высокая теплопроводность материала выровняет температуру нагревателя, а принять меры по снижению максимальной плотности тока, а также выровнять плотность тока в рабочей зоне с помощью двух приемов. Первый заключается в том, что на торцах стенки нагревателя сделали толще: это должно снизить плотность тока там, где она максимальна. Кроме того это должно повысить механическую прочность конструкции. Второй прием заключается в изготовлении отверстий в вершинах резов. Как выяснилось при моделировании, и максимальное значение и распределение тока (максимум плотности тока располагается в вершине отверстия или на боковой поверхности) зависит от радиуса отверстия в вершине реза (см. рис. 5 и рис.6). Графики, показанные на рис.6 были использованы для определения оптимального радиуса отверстий и его допуск.

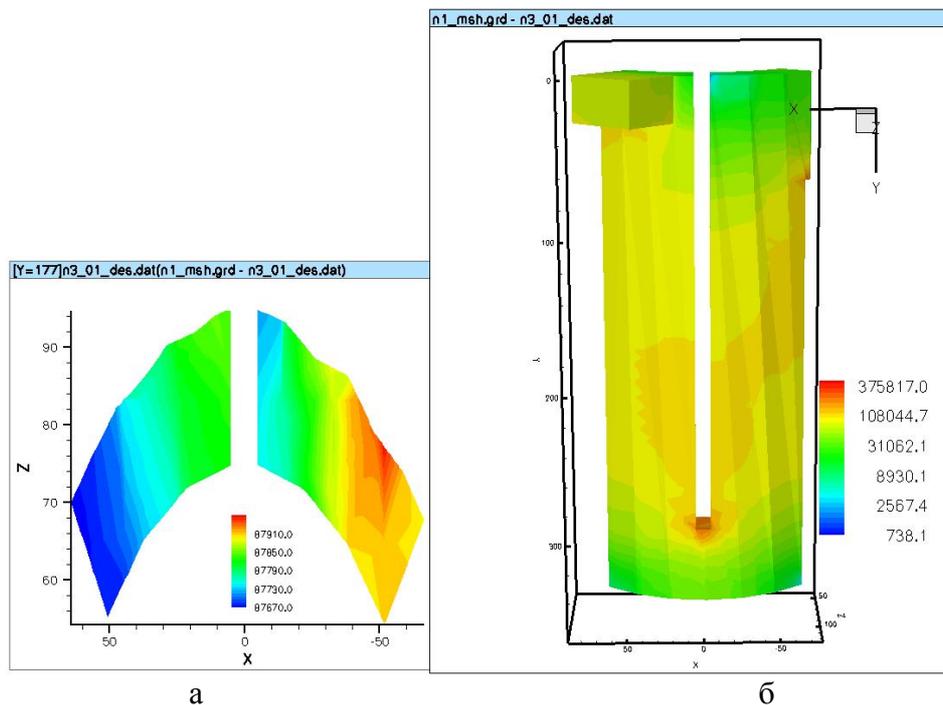


Рис.4. Распределения токов, рассчитанное в программе DESSIS для «базового» варианта

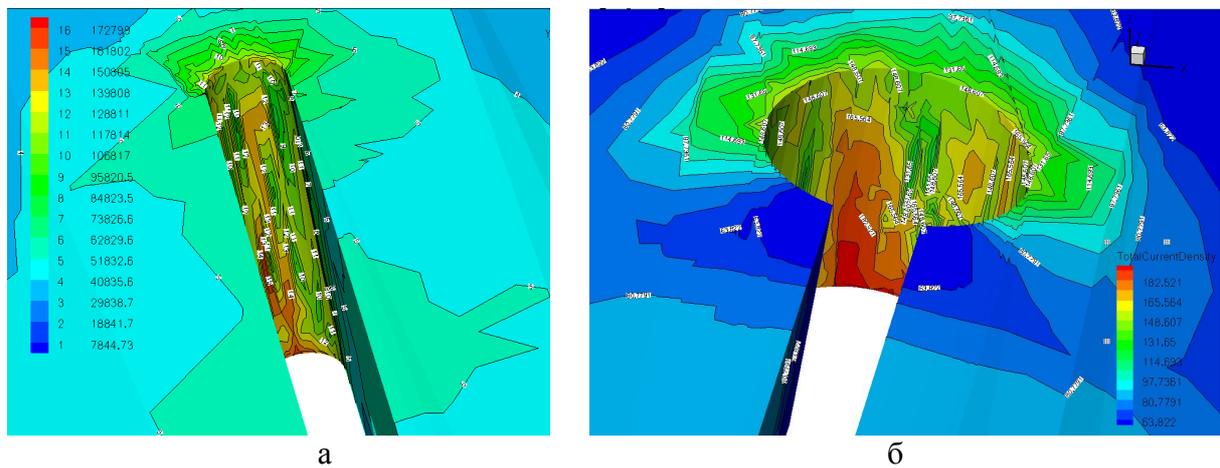


Рис.5. Зависимость распределения тока около вершины «среднего» реза от радиуса отверстия. а – радиус 5 мм, б – 15 мм

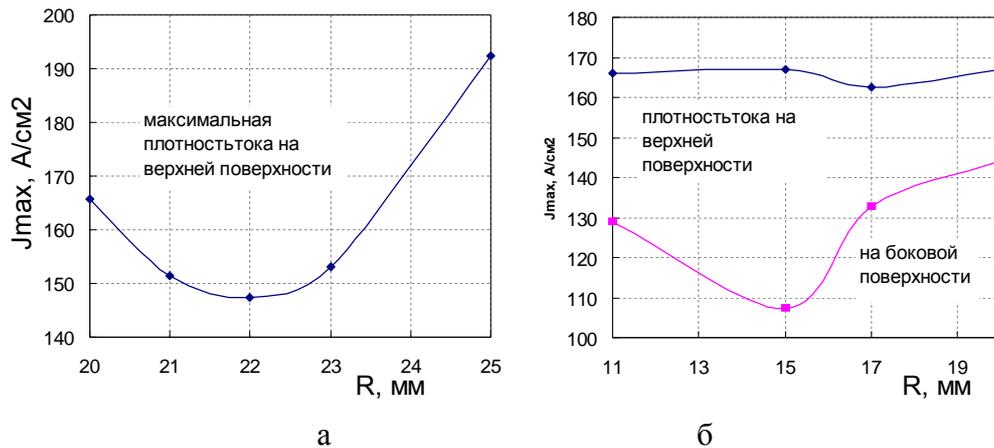


Рис.6 Оптимизация размеров отверстий в вершинах резов по общей силе тока через нагреватель 1000 А: а – нижнее отверстие; б – верхнее отверстие

Результаты моделирования были использованы для создания чертежа конструкции, показанного на рис.7.

е – окончательный вариант, отличие от варианта (д) в том, что выборка материала, необходимая для выравнивания плотности тока в рабочей области, сделана с внешней стороны цилиндра, сопротивление  $R = 9,95$  мОм. Размеры приведены на чертеже (рис.3)

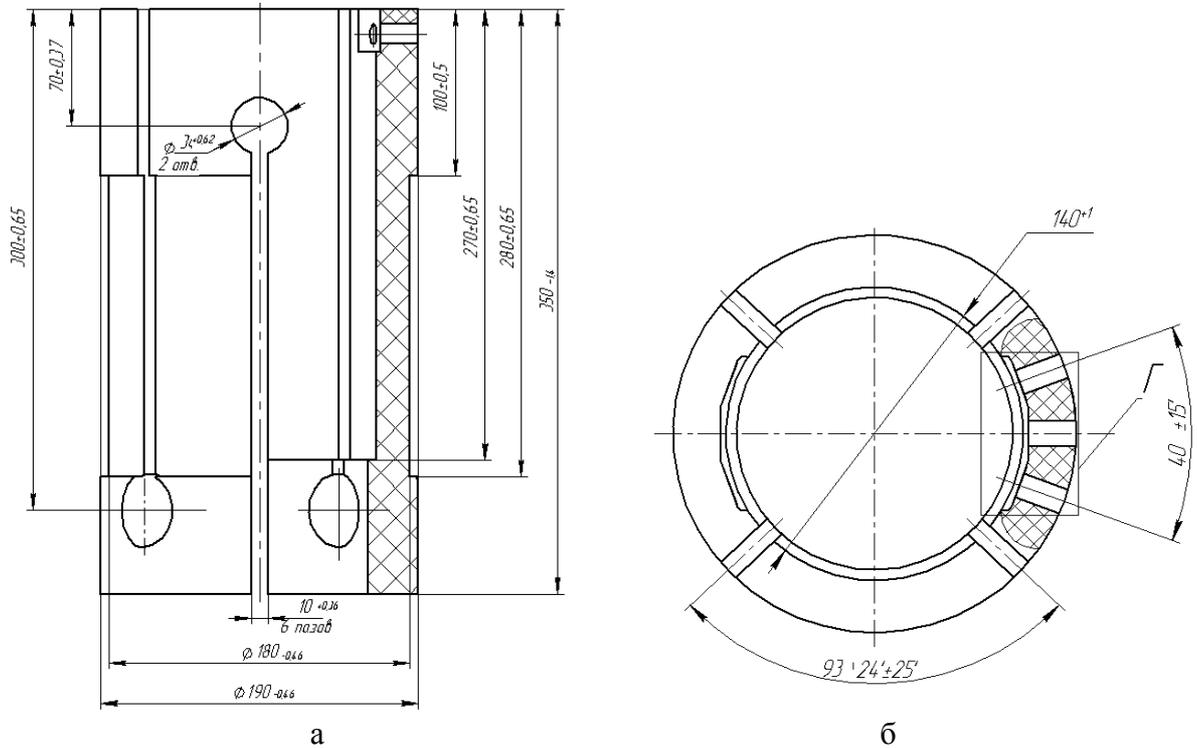


Рис.7. Чертеж нагревателя, созданного по результатам моделирования  
 а – вид сбоку, в – вид сверху  
 Внешний диаметр 190 мм, выборка материала с внешней стороны (модель на рис.2.е)  
 Рассчитанное сопротивление нагревателя  $R = 9,95 \text{ мОм}$

#### IV. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой работе показан пример успешного использования математического моделирования в САПР TCAD в довольно необычной области: оптимизация конструкции нагревателя высокотемпературной печи.

#### Список литературы

- 1 Гейфман Е. М. Моделирование сопротивления высокотемпературного нагревателя / Е. М. Гейфман, Б. П. Сурин, С. Д. Зинкин // Электроника и информационные технологии. – 2009 выпуск 1 (5) – 2009. – <http://fetmag.mrsu.ru/2010-2/pdf/Heater.pdf> – 04201000067/0042.

## HIGH TEMPERATURE RESISTIVE HEATER OPTIMIZATION

Chibirkin V. Vladimir<sup>1</sup>, Geyfman M. Evgeny<sup>1</sup>, Surin P. Boris<sup>2</sup>,  
Mushtaikin V. Evgeny<sup>2</sup>, Garzev F. Nikolay<sup>1</sup>

E-mail: [surin\\_bp@mail.ru](mailto:surin_bp@mail.ru), тел. +7 (927) 1732565

<sup>1</sup> CSC SPA «Electrovypryamitel», Russian Federation, Saransk city  
126, Proletarskaya Str., Saransk, 430001, Russia, Rep. Mordovia,

E-mail: [ovbp@mail.ru](mailto:ovbp@mail.ru), тел. +7 (834-2) 290630

<sup>2</sup> N. P. Ogarev's Mordovian State University, Russian Federation, Saransk city  
68, Bolshevistkaya str., 433000, Saransk, Mordovia, Russia

**Annotation.** Optimization design of a cylindrical resistive heater on the status of cuts to align the current densities in the shoulders heater thickness to achieve uniform density of current in the working area, and the diameters of the holes in the tops of cuts to reduce the maximum current density.

**Keywords:** modeling, heater, resistance, current density, optimization, silicon carbide, SiC.



Чиби́ркин Влади́мир Васи́льевич  
Россия, РМ, г. Саранск  
ОАО «Электровыпрямитель»  
E-mail: [info@elvpr.ru](mailto:info@elvpr.ru)  
Тел.: +7(83422)4-23-96

Депутат Государственного Собрания Республики Мордовия. В 1971г. окончил Мордовский госуниверситет им. Н.П. Огарева, в 1986 г. – аспирантуру ВЭИ им. В.И. Ленина. В 1971 г. – инженер НИИ Саранского завода "Электровыпрямитель", с 1973 г. – инженер-конструктор, начальник бюро, начальник отдела, заместитель директора по научной работе, директор научно-инженерного центра акционерного общества "Электровыпрямитель".  
С 1996 г. - генеральный директор ОАО "Электровыпрямитель".



Гейфман Евгений Моисеевич  
Россия, РМ, г. Саранск  
ОАО «Электровыпрямитель»  
E-mail: [ovbp@mail.ru](mailto:ovbp@mail.ru)  
Тел. +7-8342-24-52-70

Окончил Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва в 1974 г. по специальности «полупроводники и диэлектрики». С 1974 г. и по настоящее время работает в ОАО «Электровыпрямитель». В 1982 г. защитил кандидатскую диссертацию в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН. В 2000 г. защитил докторскую диссертацию в Санкт-Петербургском электротехническом университете (ЛЭТИ). В настоящее время является заместителем директора НИЦ СПП ОАО «Электровыпрямитель».



Гарцев Николай Александрович  
Россия, РМ, г. Саранск  
ЗАО НПК «Электровыпрямитель»  
E-mail: [ovbp@mail.ru](mailto:ovbp@mail.ru)  
Тел. +7-8342-47-15-75

Окончил Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва в 2002 г. по специальности микроэлектроника. В 2005 г. защитил кандидатскую диссертацию в Мордовском государственном университете им. Н. П. Огарёва. С 2005 г. и по настоящее время работает в ЗАО НПК «Электровыпрямитель». В настоящее время является начальником отдела Эпитаксии и полупроводниковых приборов на основе карбида кремния ЗАО НПК «Электровыпрямитель».



Сурина Борис Павлович  
Россия, РМ, г. Саранск  
ЗАО НПК «Электровыпрямитель», факультет электронной техники Мордовского государственного университета  
E-mail: [surin\\_bp@mail.ru](mailto:surin_bp@mail.ru)  
Тел. +7-92717-32-565

Окончил Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва в 1971 г. по специальности физика. С 1972 г. и по настоящее время работает на кафедре микроэлектроники МГУ им. Н.П. Огарева, с 2010 года также является заведующим лабораторией моделирования ЗАО НПК «Электровыпрямитель». В 1985 г. защитил кандидатскую диссертацию в Институте физик полупроводников СО АН СССР. Область научных интересов: физика полупроводников, математическое моделирование, программирование.



Муштайкин Евгений Викторович  
Россия, РМ, г. Саранск  
Студент факультета электронной техники Мордовского государственного университета, лаборант лаборатории моделирования ЗАО НПК «Электровыпрямитель»,  
Тел. +7-0266-97-621

В настоящее время студент 4 курса факультета электронной техники Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва. Специальность «Электроника и твердотельная микроэлектроника». С 2011 года работает в лаборатории моделирования ЗАО НПК «Электровыпрямитель».