

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММЫ LABVIEW ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ

Н.Н. Беспалов, М.В. Ильин, А.Е. Лысенков

Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева,  
Тел. (834-2) 24-17-77, 24-37-05. E-mail: bnn48@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются результаты моделирования в программной среде LabVIEW электрических и тепловых процессов, протекающих в силовых полупроводниковых приборах, соединенных в параллельную группу, на основе предварительно полученной информации об электротепловых параметрах и характеристиках каждого прибора.

**Ключевые понятия:** диод, параллельное соединение, подбор, моделирование, LabVIEW, АДПП.

### Введение

В настоящее время в различных отраслях промышленности применяются преобразовательные устройства мощностью десятки мегаватт. В связи с величинами коммутируемых мощностей, построение силовых блоков преобразователей осуществляется на основе групповых схем соединения силовых полупроводниковых приборов (СПП). В частности, параллельное соединение используется для увеличения коммутируемого тока. Однако эффективность его применения снижается вследствие введения в схемы преобразователей индуктивных делителей тока, равномерно распределяющих ток между отдельными СПП. Необходимость применения таких делителей связана с технологическим разбросом электротепловых параметров и характеристик СПП в состоянии высокой проводимости (СВП), а также разбросом электротепловых параметров соединительных и охлаждающих элементов. Поэтому параллельное соединение СПП без выравнивающих устройств приводит к существенному различию величин токов в отдельных приборах сформированной группы и, как следствие, изменению температуры  $T_j$  полупроводниковых структур (ПС). Это обуславливает различные надежности параллельно соединенных СПП при эксплуатации в рабочих и аварийных режимах. Данная проблема может быть устранена, если перед формированием группы подбирать СПП по их электротепловым параметрам и характеристикам.

## Постановка задачи

Поставлена задача, используя информацию об электрических параметрах вольтамперных характеристик и тепловых параметрах конкретных полупроводниковых приборов, разработать метод подбора СПП для группового параллельного соединения из трех диодов, оценивая состояния приборов путем моделирования протекающих в них электротепловых процессов с помощью программы, созданной в среде визуального программирования LabVIEW.

## Метод решения

В целях исследования тепловых и электрических процессов, протекающих в СПП в состоянии высокой проводимости, и их взаимного влияния при различных режимах эксплуатации были разработаны электротепловые модели (ЭТМ) СПП.

Электрические процессы, протекающие в СПП, в основном зависят от параметров вольтамперной характеристики (ВАХ) его полупроводниковой структуры. Поэтому система электрических параметров рассматривалась как самостоятельная часть электротепловой модели и была названа моделью электрических процессов (МЭП).

Способность корпуса СПП отводить тепловую энергию от ПС зависит от его конструкции и качества изготовления, но не зависит от параметров ВАХ ПС. Система теплофизических параметров корпуса определяет параметры второй части ЭТМ, названной тепловой моделью (ТМ).

Рассмотрим взаимосвязь электротепловых процессов в СПП. При протекании тока через СПП, в ПС выделяется электрическая энергия потерь, что создает тепловой поток в элементах конструкции корпуса СПП и охладителя. Тепловой поток, проходя через элементы конструкции, нагревает их. При этом ПС изменяет свои электрические параметры, что приводит к изменению величины энергии потерь и теплового потока. Следовательно, существует обратная тепловая связь.

На рис. 1 представлена обобщённая структура ЭТМ СПП.

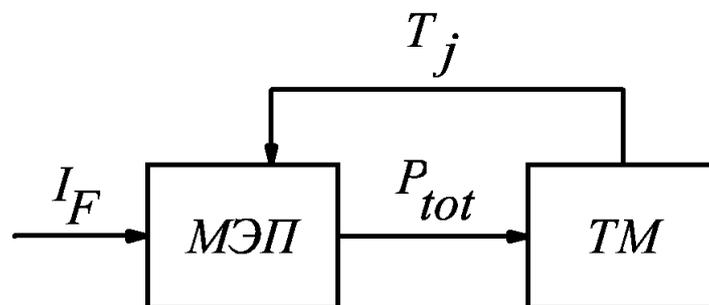


Рис. 1. Обобщённая структура ЭТМ СПП (МЭП – модель электрических процессов, ТМ – тепловая модель)

Разделение СПП на электрическую и тепловую части позволило разработать МЭП и ТМ с произвольным сочетанием тепловых и электрических параметров.

Каждая МЭП основывается на двух характеристиках: статическая ВАХ диода при определённой температуре ПС  $T_{j0}$  и зависимость температурного коэффициента напряжения (ТКН) от тока в СВП, которая определяется следующим уравнением:

$$TKH = a \lg I_{F(T)} + b, \quad (1)$$

где  $I_{F(T)}$  – ток в СВП;  $a, b$  – экспериментально определённые коэффициенты.

На основе этих характеристик восстанавливается ВАХ для любой температуры ПС. Напряжение в СВП определяется по формуле:

$$U_{F(T)} = U_{F(T)}(T_{j0}) + TKH \cdot \Delta T_j, \quad (2)$$

где  $U_{F(T)}$  – напряжение в СВП;  $\Delta T_j$  – перегрев ПС.

Исходные характеристики были получены с помощью аппаратуры для определения тепловых и электрических параметров и характеристик СПП типа АДПП – 6 [1].

Тепловые модели разрабатывались на основе метода электротепловой аналогии [2], согласно которому конструкция СПП описывается моделью в виде электрической схемы. При построении моделей были также приняты следующие основные допущения:

- 1) температурное поле в конструкции и электрическое в модели одномерны;
- 2) материалы элементов конструкции СПП однородны и изотропны в отношении теплофизических свойств, и эти свойства не зависят от температуры;
- 3) вся тепловая энергия рассеивается в слое структуры бесконечно малой толщины, проходящем через центр структуры параллельно её торцам;
- 4) в начальный момент времени температура всех элементов конструкции одинакова и статична.

Тепловое сопротивление анодной стороны СПП можно определить по формуле [3]:

$$R_{thjA} = \sum_i R_{thiA} + \sum_j R_{thjконA}, \quad (3)$$

где  $R_{thiA}$  – тепловые сопротивления однородных материалов анодной стороны СПП,  $R_{thj кон A}$  – контактные тепловые сопротивления каждого из прижимных контактов анодной стороны прибора.

В таком случае существенный вклад в ошибку аналитического расчёта вносит тепловое сопротивление контактов. Учитывая это, мы дополнили тепловую часть ЭТМ резисторами  $R_{ki}$  – аналогами тепловых сопротивлений межэлементных контактов  $R_{thк}$ .

Резистор  $R_k$  включается между  $i$  и  $i+1$  Т-образными цепочками электро-тепловыми аналогами элементов конструкции корпуса СПП. Величина сопротивления резистора  $R_k$  является случайной. Она зависит от качества обработки поверхностей элементов (в случае прижимной конструкции) или качества спая (в паяных конструкциях) и условий эксплуатации. Поэтому для упрощения расчётов величина сопротивления была выбрана как средняя, одинаковая для всех контактов конструкции. Её можно определить по формуле:

$$R_k = \frac{R_{thjc\text{ изм}} - R_{thjc\text{ мод}}}{n - 1}, \quad (4)$$

где  $R_{thjc\text{ изм}}$  – измеренная величина теплового сопротивления переход-корпус в установившемся режиме;  $R_{thjc\text{ мод}}$  – величина теплового сопротивления переход-корпус в установившемся режиме модели СПП, полученная в результате расчёта по геометрическим и теплофизическим параметрам конструкции корпуса;  $n$  – количество элементов конструкции на участке переход-корпус.

На основе всех перечисленных условий была разработана электрическая схема – обобщенный аналог конструкции СПП, которая приведена на рис. 2:

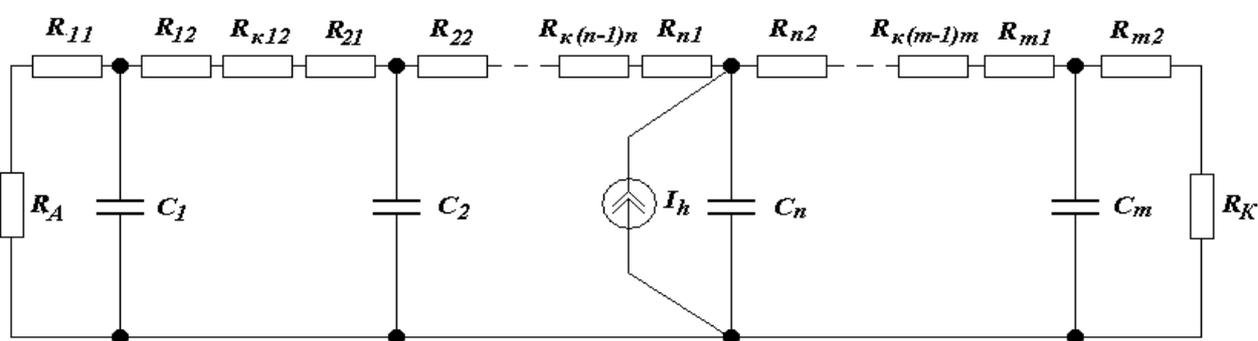


Рис. 2. Электрическая схема обобщенной ТМ СПП

Конструкция СПП состоит из  $m$  элементов, в которой элемент с индексом  $n$  является ПС. Обозначения элементов на рис. 2 соответствует табл. 1.

Таблица 1 – Обозначение элементов обобщенной тепловой модели СПП.

Обозначение	Элемент
$R_A, R_K$	Краевые условия охлаждения со сторон анода и катода
$R_{i1}, R_{i2}$	Эквиваленты теплового сопротивления элемента
$C_i$	Эквивалент теплоёмкости элемента
$R_{ki(i+1)}$	Эквивалент теплового сопротивления контакта между $i$ и $(i+1)$ элементами
$I_h$	Эквивалент выделяющейся мощности потерь в ПС

Целью моделирования являлось получение временных зависимостей температур ПС  $T_j$  приборов. Обобщённая ТМ описывается системами дифференциальных уравнений, полученных с помощью законов Кирхгофа:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{du_{C1}}{dt} = \frac{1}{C1} \left( \frac{u_{C1}}{R_A + R_{11}} - \frac{u_{C1} - u_{C2}}{R_{12} + R_{21} + R_{\kappa12}} \right); \\ \frac{du_{C2}}{dt} = \frac{1}{C2} \left( \frac{u_{C1} - u_{C2}}{R_{12} + R_{21} + R_{\kappa12}} - \frac{u_{C2} - u_{C3}}{R_{22} + R_{31} + R_{\kappa23}} \right); \\ \dots \\ \frac{du_{Cn}}{dt} = \frac{1}{Cn} \left( \frac{u_{C(n-1)} - u_{Cn}}{R_{(n-1)2} + R_{n1} + R_{\kappa(n-1)n}} - \frac{u_{Cn} - u_{C(n+1)}}{R_{n2} + R_{(n+1)1} + R_{\kappa n(n+1)}} + I_h \right); \\ \dots \\ \frac{du_{Cm}}{dt} = \frac{1}{Cm} \left( \frac{u_{C(m-1)} - u_{Cm}}{R_{(m-1)2} + R_{m1} + R_{\kappa(m-1)m}} - \frac{u_{Cm}}{R_{m2} + R_K} \right). \end{array} \right. \quad (5)$$

Решив эти системы уравнений относительно  $u_{Cn}(t)$ , можно получить временные зависимости  $T_j(t)$ .

Рассмотрим параллельное соединение трех диодов. В этом случае ЭТМ сформированной группы СПП примет вид, показанный на рис. 2:

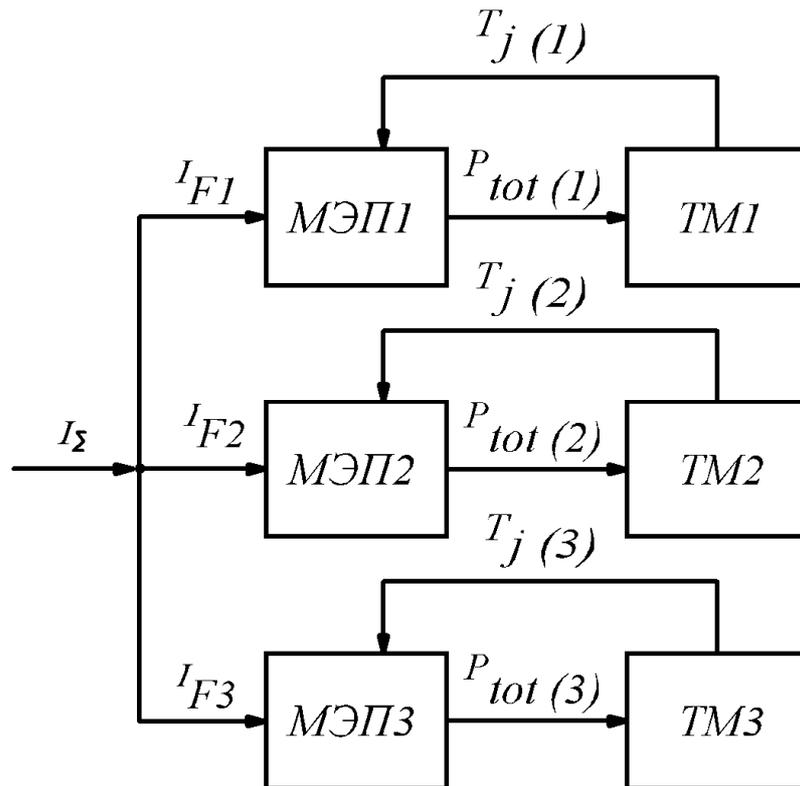


Рис. 3. Структура ЭТМ трех параллельно соединенных диодов

Информация о протекающих через диоды токах  $I_{F1}$ ,  $I_{F2}$  и  $I_{F3}$  поступает в МЭП1, МЭП2 и МЭП3 соответственно, где производятся необходимые вычисления. На выходе данных моделей формируется информация о величинах  $P_{tot(1)}$ ,  $P_{tot(2)}$ , и  $P_{tot(3)}$  в определенном режиме эксплуатации. Данные передаются в ТМ1, ТМ2 и ТМ3, где осуществляется расчёт  $T_{j(1)}$ ,  $T_{j(2)}$  и  $T_{j(3)}$ . Информация о температурах полупроводниковых структур передаётся по обратным связям в МЭП1, МЭП2 и МЭП3, где на ее основе осуществляется корректировка электрических параметров полупроводниковых структур, вследствие чего происходит перераспределение токов, протекающих через диоды.

ТМ1, ТМ2 и ТМ3 описываются системой дифференциальных уравнений (5), роль  $I_h$  выполняют токи  $I_{F1}$ ,  $I_{F2}$  и  $I_{F3}$ , причем  $I_{F1}+I_{F2}+I_{F3}=I_{\Sigma}=const$ . Выбранные для исследования диоды ВЛ200 имеют штыревую паяную конструкцию, состоящую из 10 элементов (таблица 2).

Таблица 2 – Значения элементов тепловых моделей СПП.

№ эл-та	Элементы конструкции	СПП №1			СПП №2			СПП №3		
		$R_{n1}$ , Ом	$R_{n2}$ , Ом	$C_n$ , Ф	$R_{n1}$ , Ом	$R_{n2}$ , Ом	$C_n$ , Ф	$R_{n1}$ , Ом	$R_{n2}$ , Ом	$C_n$ , Ф
1	Охладитель	820	820	0,011	820	820	0,011	820	820	0,011
2	Основание	430	430	0,0017	430	430	0,0017	430	430	0,0017
	$R_k$ , Ом	278			197			202		
3	Припой	150	150	$4 \cdot 10^{-6}$	150	150	$4 \cdot 10^{-6}$	150	150	$4 \cdot 10^{-6}$
	$R_k$ , Ом	278			197			202		
4	Термокомпенсатор	600	600	$5,5 \cdot 10^{-6}$	600	600	$5,5 \cdot 10^{-6}$	600	600	$5,5 \cdot 10^{-6}$
	$R_k$ , Ом	278			197			202		
5	Припой	70	70	$1,2 \cdot 10^{-6}$	70	70	$1,2 \cdot 10^{-6}$	70	70	$1,2 \cdot 10^{-6}$
	$R_k$ , Ом	278			197			202		
6	ПС	200	200	$5,6 \cdot 10^{-6}$	200	200	$5,6 \cdot 10^{-6}$	200	200	$5,6 \cdot 10^{-6}$
7	Припой	115	115	$1,2 \cdot 10^{-6}$	115	115	$1,2 \cdot 10^{-6}$	115	115	$1,2 \cdot 10^{-6}$
8	Термокомпенсатор	950	950	$3,5 \cdot 10^{-6}$	950	950	$3,5 \cdot 10^{-6}$	950	950	$3,5 \cdot 10^{-6}$
9	Припой	300	300	$6 \cdot 10^{-7}$	300	300	$6 \cdot 10^{-7}$	300	300	$6 \cdot 10^{-7}$
10	Верхний силовой вывод	200	200	$2 \cdot 10^{-6}$	200	200	$2 \cdot 10^{-6}$	200	200	$2 \cdot 10^{-6}$

В ТМ в качестве аналога мощности потерь в полупроводниковой структуре входит источник постоянного тока, что означает нагрев СПП постоянной мощностью. Однако при нагреве изменяется напряжение в СВП, что приводит к изменению мощности потерь и, как следствие, к изменению характера переходного процесса. Описать аналитическим выражением временную функцию изменения мощности потерь практически невозможно.

Для расчёта температур ПС приборов, соединённых параллельно, был применён метод расчёта на основе интеграла Дюамеля [4]. В зависимости от скорости изменения греющей мощности выбирается величина приращения

времени ступенчатой функции, обеспечивающую достаточную точность расчёта. Расчёт осуществляется циклическим повторением действий, в результате которых последовательно определяются:

- 1) начальные условия расчёта системы дифференциальных уравнений (5), т.е. температуры элементов конструкции;
- 2) ВАХ СПП, включённых в группу, в зависимости от температуры ПС;
- 3) напряжение на всей параллельной группе СПП в СВП;
- 4) токи, протекающие через каждый прибор группового соединения, в СВП;
- 5) мощность потерь, выделяющаяся в каждом приборе в СВП;
- 6) перегрев элементов конструкции в результате воздействия мощности потерь величиной, определенной в п. 5.

Определённые в п. 6 перегревы элементов, принимаются как начальные условия для расчёта системы дифференциальных уравнений (5) на следующей итерации.

В ходе вычислений значение напряжения для всех ЭМ приборов, соединённых в группу, постепенно увеличивается с определённым шагом. При этом величины напряжения на всех приборах при параллельном соединении всегда одинаковы:

$$U_{VD1} = U_{VD2} = U_{VD3} \quad (6)$$

Затем по ВАХ  $I_{FVDi} = f_{VDi}(U_{VD})$  определяются токи в каждом приборе при данном напряжении:

$$\begin{cases} I_{F1} = f_{VD1}(U_{VD}); \\ I_{F2} = f_{VD2}(U_{VD}); \\ I_{F3} = f_{VD3}(U_{VD}). \end{cases} \quad (7)$$

Далее определяется сумма этих токов:

$$I_F = \sum_{i=1}^n I_{Fi} \quad (8)$$

Если  $I_F < I_\Sigma$ , то происходит очередное приращение напряжения на модели группы приборов. Увеличение напряжения происходит до того момента, пока не будет достигнуто равенство  $I_F = I_\Sigma$  с заданной точностью. Полученные значения токов в каждом приборе  $I_{F1}, I_{F2}, \dots, I_{Fn}$  и напряжения на группе приборов  $U_{VD}$  используются далее для расчета мощности потерь, выделяющейся в каждом приборе.

Для исследования параллельного соединения СПП была разработана программа в среде графического программирования LabView. Исходной информацией для программы являются результаты измерения электрических и

тепловых параметров конкретных однотипных СПП, предоставляемые устройством АД ИП–6. Программа позволяет исследовать групповое параллельное соединение СПП, состоящее из произвольного количества приборов. На рис. 4 показана лицевая панель разработанной программы, на которой представлены временные диаграммы токов, протекающих через диоды, температур ПС и ВАХ.

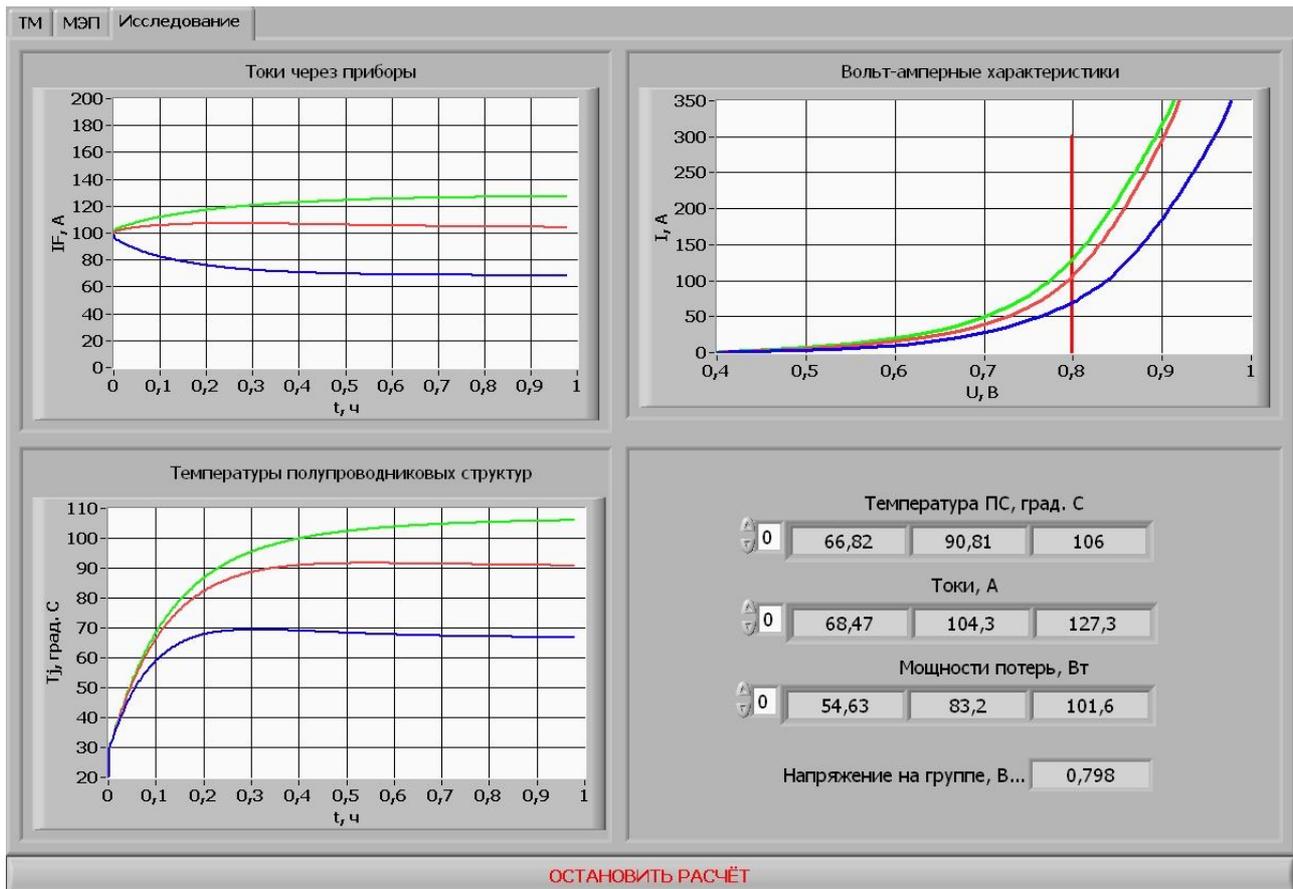


Рис. 4. Лицевая панель программы

### Результаты экспериментов

Для исследования и сравнения электротепловых процессов, происходящих в СПП с различными электротепловыми параметрами, приведено экспериментальные измерения и моделирование процессов для двух групп параллельно соединенных диодов ВЛ200 с количеством приборов в группе равных трем. Моделирование проводилось при общем постоянном токе в группы диодов в СВП равном 400 А. Исходные электротепловые зависимости и параметры группы №1 приборов, определённые устройством АД ИП–6 приведены в табл. 3. При этом обнаружено различие в зависимостях ТКН от величины тока в прямом направлении  $I_F$  и, соответственно, значениях ТКН, что подтверждается результатами исследований [5, 6].

Таблица 3 – Параметры диодов ВЛ200 группы №1.

№ СПП	Цвет на графиках	ТКН, мВ/°С	$R_{thjc}$ , °С/Вт
1	синий	$0,911 \cdot \lg(I_F) - 2,324$	0,09
2	красный	$0,577 \cdot \lg(I_F) - 2,094$	0,082
3	зеленый	$0,514 \cdot \lg(I_F) - 2,03$	0,083

На рис. 5 приведены ВАХ приборов всех групп при исходной температуре 20 °С. Красной вертикальной линией отображается рабочая точка группы по напряжению  $U_F$ .

На рис. 6 представлены временные зависимости прямых токов  $I_F$  через приборы группы №1 в СВП при моделировании.

На рис. 7 представлены временные зависимости температуры  $T_j$  ПС приборов группы №1 при моделировании.

На рис.8 представлены ВАХ нагретых приборов группы №1 и рабочая точка по напряжению  $U_F$  после достижения теплового равновесия в группе.

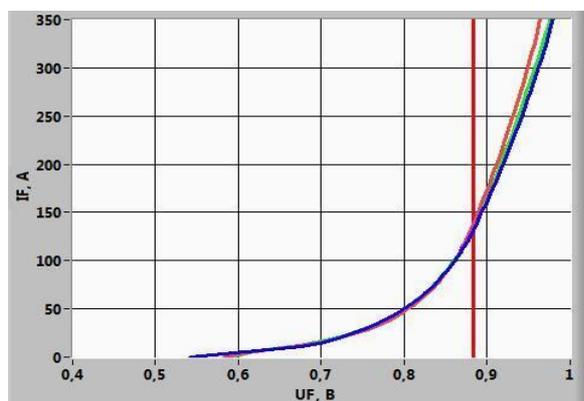


Рис. 5. ВАХ диодов ВЛ200 при  $T_j=20$  °С всех групп

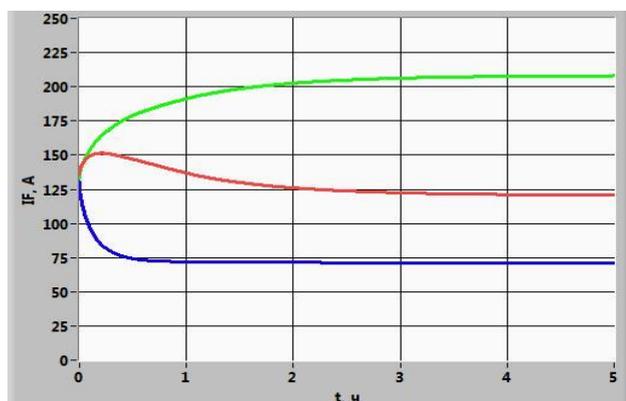


Рис. 6. Зависимости прямых токов  $I_F(t)$  приборов группы №1

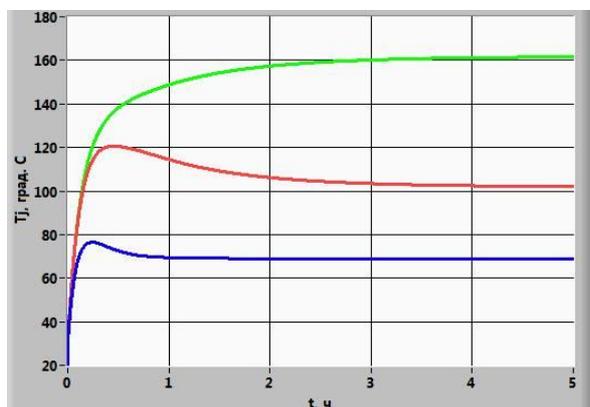


Рис. 7. Зависимости  $T_j(t)$  ПС приборов группы №1

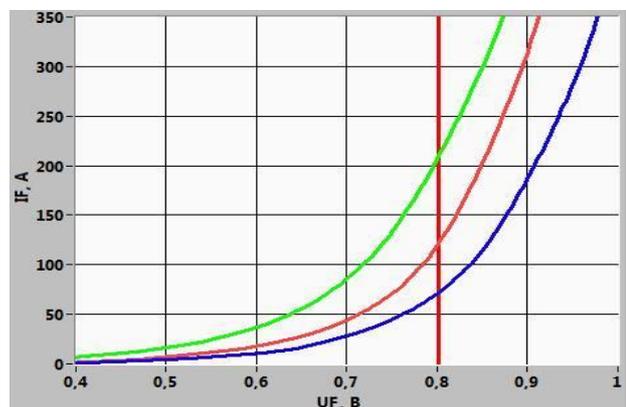


Рис. 8. ВАХ диодов группы №1 в установившемся режиме

Группа №2 диодов ВЛ200 подбиралась из партии приборов с одинаковыми зависимостями ТКН от величины тока в прямом направлении  $I_F$ . Исходные электротепловые зависимости и параметры группы №2 диодов ВЛ200 приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Параметры диодов ВЛ200 группы №2.

№ СПП	Цвет на графиках	ТКН, мВ/°С	$R_{thjc}$ , °С/Вт
1	синий	$0,911 \cdot \lg(I_F) - 2,324$	0,09
2	красный	$0,911 \cdot \lg(I_F) - 2,324$	0,082
3	зеленый	$0,911 \cdot \lg(I_F) - 2,324$	0,083

На рис. 9 представлены временные зависимости прямых токов  $I_F$  через приборы группы №2 в СВП при моделировании.

На рис. 10 представлены временные зависимости температуры  $T_j$  ПС приборов группы №2 при моделировании.

На рис. 11 представлены ВАХ нагретых приборов группы №2 и рабочая точка по напряжению  $U_F$  после достижения теплового равновесия в группе.

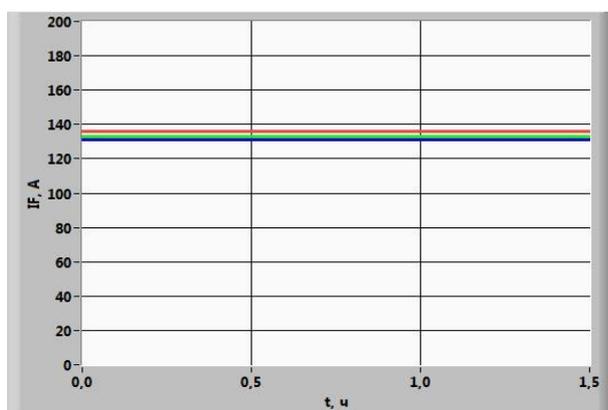


Рис. 9. Зависимости прямых токов  $I_F(t)$  приборов группы №2

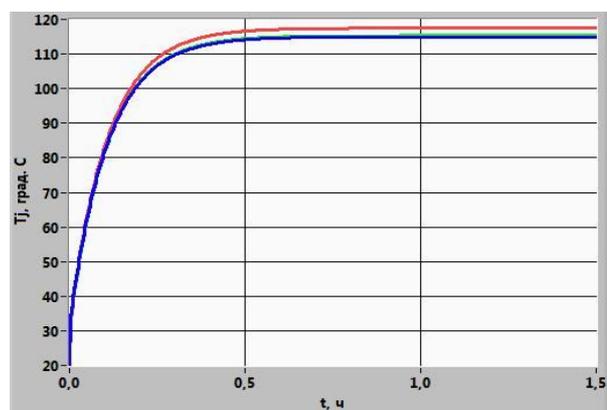


Рис. 10. Зависимости  $T_j(t)$  ПС приборов группы 2

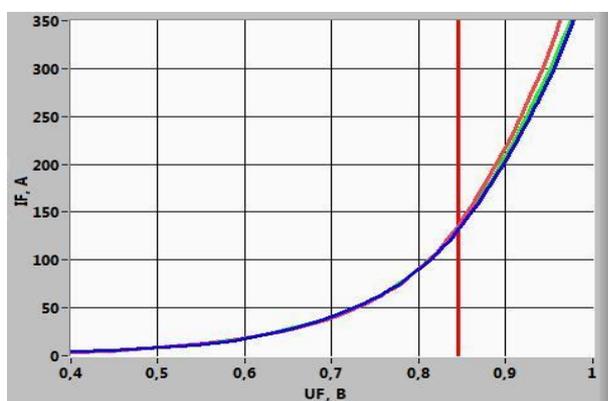


Рис. 11. ВАХ диодов группы №2 в установившемся режиме

Результаты измерений показали, что все исследуемые СПП обеих групп при  $T_j=20$  °С имеют практически одинаковые ВАХ (рис. 5). Можно констатировать, что при данной температуре такие параметры ВАХ диодов, как импульсное падение напряжения  $U_{FM}$ , динамическое сопротивление  $r_T$  и пороговое напряжение  $U_{(TO)}$  при линеаризации ВАХ приблизительно равны для всех при-

боров. Необходимо отметить важность этих параметров при расчете электрических и тепловых режимов СПП в преобразователях, так как в преобразовательной технике принято оценивать эти режимы по данным параметрам.

При токовом нагреве приборов группы №1 в установившемся тепловом режиме наблюдается резкое расхождение ВАХ всех приборов. При этом прослеживается достаточно существенное различие в значениях вышеперечисленных параметров. В данном случае наблюдается существенное перераспределение тока между приборами группы (рис. 6) и, как следствие этого, существенный разброс температуры  $T_j$  ПС приборов в группе (рис. 7). Наблюдается разброс значений тока  $I_F$  в установившемся тепловом режиме – от 73 А для наименее нагретого прибора № 1 до 210 А для наиболее нагретого прибора № 3, что превышает предельно допустимое значение тока  $I_{FAVm} = 200$  А, установленного для данного типа СПП. При этом, для прибора №3 с наименьшим значением ТКН= – 0,961 мВ/°С в установившемся тепловом режиме наблюдается наибольшее значение температуры ПС  $T_j = 162$  °С, что также превышает предельно допустимое значение температуры  $T_{jm} = 140$  °С для данного типа СПП. ПС прибора №1, имеющий наибольшее значением ТКН = – 0,616 мВ/°С, в установившемся тепловом режиме нагревается всего до  $T_j = 70$  °С.

Этот эффект, наблюдаемый при параллельном соединении приборов, обусловлен существенным различием их зависимостей ТКН= $f(I_F)$  (табл. 3), а также различием значений из тепловых сопротивлений  $R_{thjc}$ .

Для группы №2 наблюдается существенное снижение разброса токов  $I_F$  между приборами в группе (от 130 А до 136 А) (рис. 9) и температуры  $T_j$  ПС в установившемся тепловом режиме (от 115 °С до 118 °С) (рис. 10). В этом режиме для приборов группы не достигаются предельные величины  $I_{FAVm}$  и  $T_{jm}$ , установленные для исследуемого типа СПП. При этом не наблюдается существенного отличия ВАХ и параметров  $U_{FM}$ ,  $r_T$  и  $U_{(TO)}$  в прямом направлении приборов в установившемся тепловом режиме (рис. 11). Это объясняется тем, что группа №2 формировалась из приборов с одинаковыми зависимостями ТКН= $f(I_F)$  (табл. 4).

Необходимо отметить, что интервал времени до достижения теплового равновесия в приборах группы №1 составляет приблизительно 3 часа, а для приборов группы №2 приближенно 0,5 часа, что обуславливает необходимость нормирования времени испытаний группового параллельного соединения СПП.

## Выводы

1. В результате исследования выявлено, что для подбора однотипных приборов для группового параллельного соединения с целью выравнивания их тепловых режимов при эксплуатации важно измерять и определять параметры ВАХ при различных значениях температуры  $T_j$  ПС, а также тепловые параметры и зависимости ТКН всех СПП.

2. Примененный подход к моделированию тепловых процессов в СПП при групповом параллельном соединении позволяет достаточно просто и точно оценить температуру ПС и токи приборов в состоянии высокой проводимости и определить оптимальные температурные режимы эксплуатации.

3. Выбранный подход к моделированию электротепловых процессов позволяет исследовать СПП различных конструктивных исполнений с различными системами охлаждения.

4. Достоинством данного подхода к подбору СПП для группового параллельного соединения является то, что моделирование производится на основе реально измеренных электрических и тепловых параметров СПП. Это позволяет в дальнейшем создать автоматизированный аппаратно-вычислительный комплекс для формирования групп параллельного соединения СПП.

## Список использованной литературы

**1. Беспалов, Н.Н.** Диагностика и контроль параметров силовых полупроводниковых приборов / Н.Н. Беспалов, А.В. Мускатиньев, М. В. Ильин // Методы и средства управления технологическими процессами: МСУТП – 2007: материалы IV Междунар. Конф., Саранск, 24 – 26 окт. 2007 г. / редкол.: И.В. Гуляев (отв. ред.) [и др.]. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2007. – С. 88-91.

**2. Чесноков, Ю.А.** Определение температуры перегрева структуры тиристоров в импульсных режимах методом электротепловой аналогии (ЭТА). / Ю.А. Чесноков, А.А. Рабинерсон, В. Е. Челноков // Некоторые вопросы производства и применения средств малой силовой преобразовательной техники в народном хозяйстве. – М. : Информэлектро, 1970. – Ч. 2. – № 14. – С. 78-91.

**3. Дерменжи, П.Г.** Оценка массогабаритных параметров силового тиристора в зависимости от диаметра выпрямительного элемента и предельного тока. / П.Г. Дерменжи, В.Г. Кузнецов, А. А. Рабинерсон // Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника. – № 8, 1976. – С. 36-42.

**4. Бессонов, Л.А.** Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л.А. Бессонов – М.: Гардарики, 2007. – 701 с.

**5. Рабинерсон, А.А.** Режимы нагрузки силовых полупроводниковых приборов / А.А. Рабинерсон, Г.А. Ашкинази – М.: Энергия, 1976. – 296 с.

**6. Беспалов, Н.Н.** Исследование термочувствительного параметра полупроводниковых диодов / Н.Н. Беспалов, М.В. Ильин // Технические и естественные науки: проблемы, теория, эксперимент (Межвузовский сборник научных трудов). – Вып. V. – Саранск, 2005. – С. 29-30.

## Сведения об авторах

**Беспалов Николай Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматики Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева, тел. (834-2) 24-17-77, 24-37-05; e-mail: [bnn48@mail.ru](mailto:bnn48@mail.ru)

**Ильин Михаил Владимирович** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры автоматики Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва, тел. (834-2) 24-17-77, 24-37-05; e-mail: [imike@rambler.ru](mailto:imike@rambler.ru)

**Лысенков Алексей Евгеньевич** – студент 5-го курса факультета электронной техники Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва, научный руководитель – Беспалов Николай Николаевич, тел. (834-2) 24-17-77, 24-37-05; e-mail: [lysenkov@megabox.ru](mailto:lysenkov@megabox.ru)