

---

---

## СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

---

УДК 621.3

**М.В. Ильин<sup>1</sup>, И.В. Гуляев<sup>1</sup>,  
F. Briz del Blanco<sup>2</sup>, Е.А. Вилков<sup>1</sup>**

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЗАИМНОГО ТЕПЛОВОГО ВЛИЯНИЯ СИЛОВЫХ КРИСТАЛЛОВ IGBT-МОДУЛЯ**

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Мордовский  
государственный университет им. Н. П. Огарева

<sup>1</sup> Университет Овьедо, Испания

Описан подход к определению степени взаимного теплового влияния силовых полупроводниковых приборов в составе IGBT-модуля силового преобразователя. Новизна подхода заключается в определении величины взаимовлияния кристаллов на основании решения системы линейных уравнений и представления результатов в аналитическом виде, которые позволяют быстро и точно воспроизвести тепловые режимы силовых приборов с помощью тепловой модели основанной на электротепловой аналогии. Результаты моделирования показывают возможность использования цепей Фостера совместно с нелинейными элементами взаимосвязей для расчета тепловых режимов и сокращения времени моделирования и вычислительных ресурсов. Данная тепловая модель позволяет уточнить предсказание температуры при существенном тепловом взаимном влиянии кристаллов в режиме формирования инвертором низкочастотного тока нагрузки. Оценка тепловых параметров для создания модели силового модуля на основе метода электротепловой аналогии производилась путем исследования трехмерной модели IGBT модуля в среде ANSYS с использованием метода конечных элементов.

**Ключевые слова:** IGBT модуль, метод конечных элементов, тепловая модель, тепловые взаимосвязи кристаллов, электротепловая аналогия.

## 1. Введение

В настоящее время на производстве широко используются мощные электродвигатели. В зависимости от целей и задач использования, они работают на различную нагрузку и поддерживают различные скоростные режимы. Для управления электродвигателями используются преобразователи частоты, реализующие определенные законы управления. В современных преобразователях частоты все чаще используются силовые IGBT транзисторы, имеющие множество преимуществ по сравнению с полевыми и биполярными транзисторами, а также и тиристорами. Одной из тенденций развития этого направления является использование силовых IGBT транзисторов и диодов в интегрированном модуле.

Несмотря на общее повышение качества изделия и экономическую эффективность в результате применения интегрированных силовых модулей в преобразователях частоты, при работе силовых элементов в составе модуля увеличивается влияние тепловых эффектов. Использование нескольких силовых полупроводниковых приборов (СПП) в едином корпусе ухудшает тепловые характеристики каждого прибора в отдельности, что ведет к снижению времени безотказной работы модуля и соответственно преобразователя в целом. Прогнозирование тепловых режимов имеет первостепенную важность для повышения эксплуатационных свойств преобразователя. Для прогнозирования тепловых режимов данных силовых модулей разрабатываются тепловые модели, позволяющие определить температуру кристалла в любой момент времени [1]. Рабочие частоты тока двигателя зависят от конкретного его применения. Поскольку существуют такие режимы эксплуатации, в которых требуется частота питающего тока, измеряемая единицами герц, постольку за время одного периода выделения мощности потеря тепло успевает распространиться от нагреваемого кристалла к соседним кристаллам и изменить их тепловой режим. Данный эффект должен обязательно учитываться в тепловых моделях. Неправильное определение тепловых нагрузок, например, в момент старта двигателя, когда могут наблюдаться существенные перегрузки, может привести к накоплению ошибки при прогнозировании температуры в дальнейшем, и в предельном случае может привести к отказу модуля до срабатывания защиты от перегрева.

Существующие методы определения температуры кристаллов СПП хорошо зарекомендовали себя в случае дискретных силовых приборов. Одними из наиболее применимых видов моделей являются тепловые модели, основанные на электротепловой аналогии. Однако такие тепловые модели дают существенную погрешность при определении температуры кристаллов в модульной конструкции из-за отсутствия учета эффекта теплового взаимовлияния кристаллов друг на друга [2-3].

Таким образом, для уточнения тепловых режимов работы силового преобразователя на низких частотах, необходимо использовать тепловые модели, учитывающие тепловые взаимосвязи силовых кристаллов модуля.

## II. Определение сопротивлений тепловых взаимосвязей

На основании электротепловой модели силового IGBT-модуля с дискретным представлением тепловых сопротивлений СПП [4-5], была разработана электротепловая модель для модуля PS22A78-E, учитывающая тепловые взаимосвязи силовых кристаллов IGBT-модуля. Модель с взаимосвязями представлена на рис. 1.

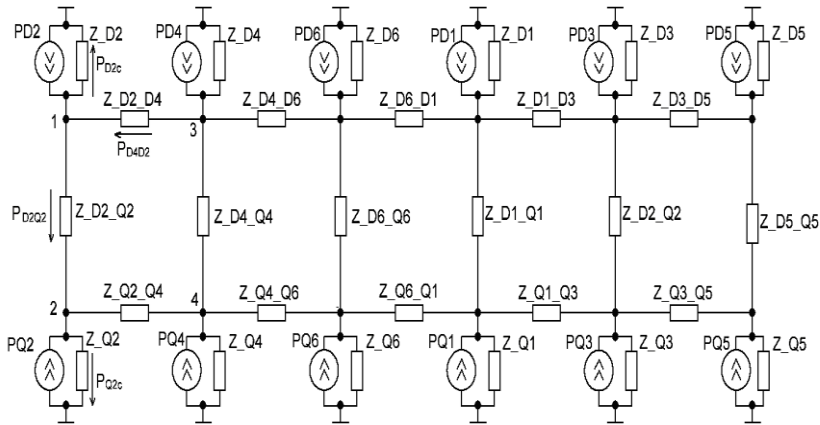


Рис. 1. Электротепловая модель IGBT-модуля PS22A78-E с тепловыми взаимосвязями между кристаллами

Данная модель содержит источники теплового потока  $PQ(D)n$ , которыми являются кристаллы СПП, собственные комплексные тепловые сопротивления кристаллов  $Z_Q(D)n$  в направлении кристалл-атмосфера, представляющие собой RC-цепь 5-го порядка типа Фостера и комплексные тепловые сопротивления взаимосвязей  $Z_Q(D)n_Q(D)k$ . Поскольку тепловые потоки зависят друг от друга, определить точно значение одного сопротивления взаимосвязи в конкретный момент времени невозможно. Поэтому необходимо нахождения всех взаимных сопротивлений одновременно с помощью системы уравнений.

Благодаря идентичности законов распространения тепла и электричества в электротепловых схемах, в соответствии первым законом Кирхгофа были составлены уравнения для всех узлов данной цепи. Пример систем уравнений (1) и (2) для крайних узлов № 1-2 и центральных узлов № 3-4 схемы приведен ниже.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{Q2} = P_{Q2c} + P_{Q2D2} + P_{Q2Q4} \\ P_{D2} = P_{D2c} + P_{D2Q2} + P_{D2D4} \\ P_{Q4} = P_{Q4c} + P_{Q4Q2} + P_{Q4D4} + P_{Q4Q6} \\ P_{D4} = P_{D4c} + P_{D4D2} + P_{D4Q4} + P_{D4D6} \\ \dots \end{array} \right. \quad (1)$$

Для удобства определения сопротивления в зависимости от направления тепловых потоков, переменные были разделены по знаку и переписаны в соответствии с тепловыми величинами.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{Q2} = \frac{T_{Q2}}{R_{Q2c}} + \frac{T_{Q2D2}}{R_{Q2D2}} + \frac{T_{Q2Q4}}{R_{Q2Q4}} - \frac{T_{D2Q2}}{R_{D2Q2}} - \frac{T_{Q4Q2}}{R_{Q4Q2}} \\ P_{D2} = \frac{T_{D2}}{R_{D2c}} + \frac{T_{D2Q2}}{R_{D2Q2}} + \frac{T_{D2D4}}{R_{D2D4}} - \frac{T_{Q2D2}}{R_{Q2D2}} - \frac{T_{D4D2}}{R_{D4D2}} \\ P_{Q4} = \frac{T_{Q4}}{R_{Q4c}} + \frac{T_{Q4Q2}}{R_{Q4Q2}} + \frac{T_{Q4D4}}{R_{Q4D4}} + \frac{T_{Q4Q6}}{R_{Q4Q6}} - \frac{T_{Q2Q4}}{R_{Q2Q4}} - \frac{T_{D4Q4}}{R_{D4Q4}} - \frac{T_{Q6Q4}}{R_{Q6Q4}} \\ P_{D4} = \frac{T_{D4}}{R_{D4c}} + \frac{T_{D4D2}}{R_{D4D2}} + \frac{T_{D4Q4}}{R_{D4Q4}} + \frac{T_{D4D6}}{R_{D4D6}} - \frac{T_{D2D4}}{R_{D2D4}} - \frac{T_{Q4D4}}{R_{Q4D4}} - \frac{T_{D6D4}}{R_{D6D4}} \\ \dots \end{array} \right. \quad (2)$$

Поскольку неизвестных величин в уравнения больше, чем выражений для узлов схемы, система была намеренно переопределена. Так как значения искомого сопротивлений должны удовлетворять любому состоянию системы, из моделирования были получены значения температур и тепловых потоков для каждого элемента в случае единичного нагрева. При таком условии проведения моделирования, уравнения системы являются линейно независимыми, а, следовательно, для 12 узлов, полученных при отдельном нагревании 12 элементов, количество уравнений составило 144. В данном случае собственные сопротивления элементов могут рассматриваться как известные величины, или как искомые параметры.

Данная система была решена для каждого момента времени и для всех возможных направлений тепловых потоков. Исходя из решения системы, были построены зависимости теплового потока, протекающего от

кристалла к кристаллу, от разности температуры между кристаллами. Данные зависимости позволяют определить характер взаимосвязи элементов для исследования тепловой модели. Пример зависимостей продемонстрирован на рис. 2.

$P$ , Вт

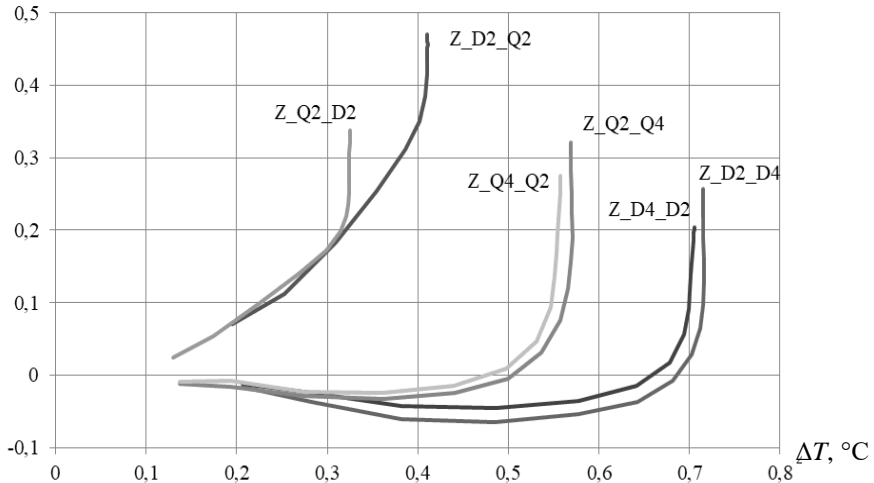


Рис. 2. Зависимости теплового потока, протекающего от кристалла к кристаллу, от разности температуры между кристаллами для кристаллов  $Q2$ ,  $Q4$ ,  $D2$  и  $D4$

Как видно из графика, наименьшим тепловым сопротивлением обладает взаимосвязь транзистор-диод. Кроме того, величина теплового потока при одной и той же разности температуры отличается в зависимости от направления его протекания.

Для взаимосвязей транзистор-транзистор и диод-диод характерно наличие отрицательных значений теплового потока, что говорит о наличии дополнительного источника тепла, в виде парного СПП. Поскольку распространение тепла от менее нагретого кристалла к более нагретому кристаллу невозможно, следует рассматривать момент перехода теплового потока через ноль, как граничное значение. Таким образом, тепловой поток от одного кристалла к другому будет распространяться только если разность температур между кристаллами превышает пороговое значение.

Разница значений для связей диод-диод и транзистор-транзистор в зависимости от направления распространения тепла не столь велика, как в

случае транзистор-диод, однако она есть. Значения сопротивлений транзистор-транзистор несколько меньше значений диод-диод. Это обусловлено конструктивно большей площадью поверхности транзисторов.

### III. Построение электротепловой модели

Для реализации данных зависимостей в среде схемотехнического моделирования PSIM были использованы нелинейные элементы, для которых необходимо было найти аналитические уравнения данных кривых и их первую производную. Был выбран полиномиальный способ аппроксимации, который с высокой точностью позволяет описать данные зависимости, и позволяет легко найти производную.

Для ограничения отрицательной области определения функции были введены идеальные диоды, которые не вызывают дополнительного падения напряжения. Для реализации собственного сопротивления кристаллов использовались RC-цепи 5-го порядка Фостера.

Фрагмент тепловой модели для элементов  $D2$ ,  $D4$ ,  $Q2$ ,  $Q4$  с нелинейными тепловыми взаимосвязями в среде схемотехнического моделирования PSIM изображен на рис. 3.

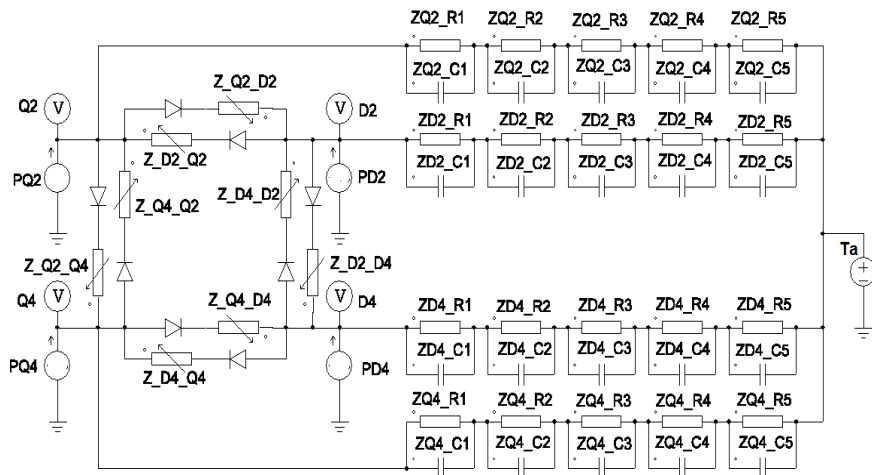


Рис. 3. Фрагмент электротепловой модели элементов  $D2$ ,  $D4$ ,  $Q2$ ,  $Q4$  с нелинейными связями в среде PSIM

В модели собственные сопротивления кристаллов представлены RC-цепями типа Фостера пятого порядка, элементы которых для теплового сопротивления и теплоемкости соответственно обозначены как  $ZQ(D)_n\_Ri$  и  $ZQ(D)_n\_Ci$ , где  $n$  – номер кристалла и  $i$  – номер элемента внутри цепи

собственного сопротивления кристалла  $n$ . Нелинейные элементы тепловых взаимосвязей обозначены  $Z_{Q(D)i\_Q(D)j}$ , где  $i$  и  $j$  – номера кристаллов источника и потребителя теплового потока соответственно. Источниками мощности потерь для кристаллов транзисторов и диодов являются  $PQ2(4)$  и  $PD2(4)$  соответственно. Источник  $Ta$  имитирует температуру окружающей среды. Диоды в модели используются для разделения направлений протекания теплового потока.

Структура модели для остальных кристаллов модуля идентична структуре, представленной на рис. 3. В общей модели нелинейные тепловые взаимосвязи присутствуют между всеми кристаллами модуля. Исследование модели проводилось для режима работы инвертора, соответствующему питанию нагрузки синусоидальным током. Частоты питающего тока были выбраны таковыми, чтобы в первом случае проявление тепловой взаимосвязи не было существенным, что соответствует частоте 20 Гц, а во втором случае значительно был выражен эффект тепловой взаимосвязи – частота 1 Гц.

Результаты моделирования данной цепи с входным полусинусоидальным сигналом мощности с частотой 20 Гц для амплитуды 5 Вт приведены на рис. 4.

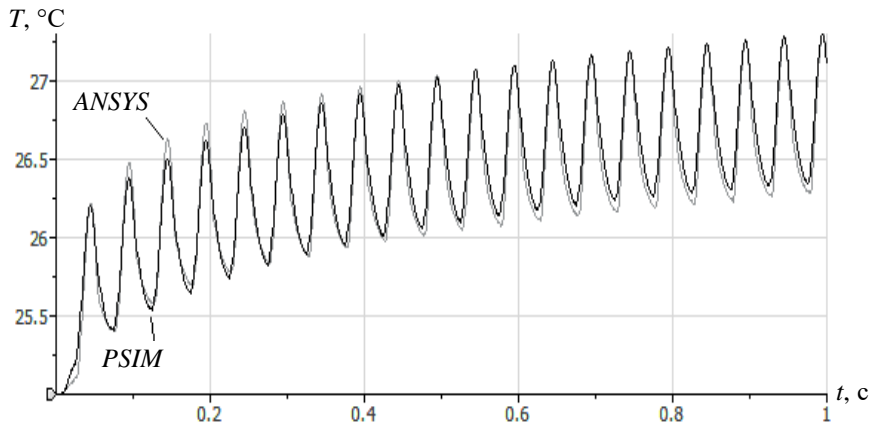


Рис. 4. Временные диаграммы температуры транзистора  $Q2$  на частоте 20 Гц: серый – результаты ANSYS, черный – результаты PSIM

Относительная погрешность оценки температуры на частоте 20 Гц изображена на рис. 5. В качестве эталона температуры использовались данные, полученные в результате исследования трехмерной модели в ANSYS.

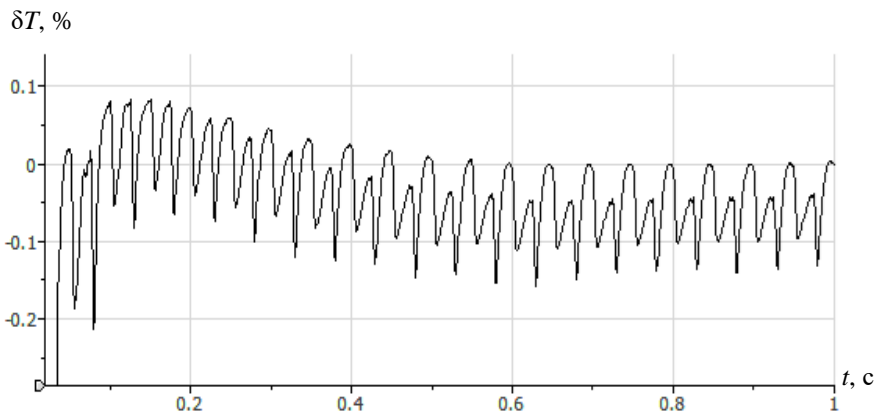


Рис. 5. Относительная ошибка температуры транзистора  $Q2$  на частоте 20 Гц

Результаты моделирования для частоты 1 Гц приведены на рис. 6.

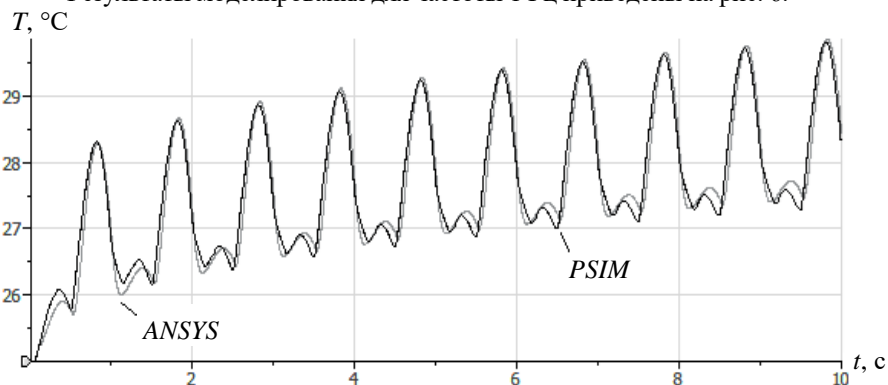


Рис. 6. Временные диаграммы температуры транзистора  $Q2$  на частоте 1 Гц: серый – результаты ANSYS, черный – результаты PSIM

Относительная погрешность оценки температуры изображена на рис. 7.

Применение полученных результатов было использовано при реализации ряда устройств [6-8]. Особенности практического использования данного подхода изложены в опубликованных работах [9, 10].



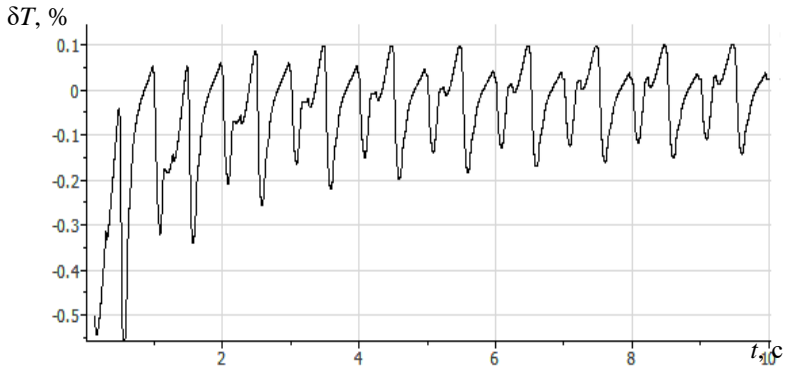


Рис. 7. Относительная ошибка оценки температуры транзистора  $Q2$  на частоте 1 Гц

Как видно из временных диаграмм на рис. 4 и 5, на относительно высоких частотах основными цепями кристаллов, влияющих на тепловой режим, являются цепи собственных сопротивлений кристаллов. Тепловое взаимодействие кристаллов очень слабо выражено. Относительная погрешность предсказания температуры не превышает 0,1 %.

В случае частоты 1 Гц проявляется влияние тепловой взаимосвязи в виде дополнительных пиков на временной диаграмме температуры. Введение нелинейных элементов позволило реализовать данный эффект и в электротепловой модели, что позволило достаточно точно предсказывать температуру и интервалах времени, когда существенно проявляется эффект тепловой взаимосвязи. Относительная погрешность предсказания температуры в состоянии теплового равновесия охладителя с окружающей средой не превышает 0,2 %. Как видно из диаграмм, применение нелинейных цепей в качестве тепловых взаимосвязей позволяет существенно улучшить предсказание температуры на низких частотах на интервалах времени, когда значительно проявляется тепловое взаимовлияния полупроводниковых элементов друг на друга и одновременно сохранить высокую точность определения температуры на относительно высоких частотах.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №15-19-20057П).*

© Ильин М.В., 2019

© Гуляев И.В., 2019

© Briz del Blanco F., 2019

© Вилков Е.А., 2019

## Библиографический список

- [1] Andresen M., Liserre M., Buticchi G. Review of active thermal and lifetime control techniques for power electronic modules // Proceedings of the 16th European Conference on Power Electronics and Applications, 2014, Lappeenranta, Finland. P. 1-10.
- [2] Khatir Z., Dupont L., Ibrahim A. Investigation on junction temperature estimation based on junction voltage measurements // Microelectronics Reliability. 2010. № 50 (9-11). P 1506-1510.
- [3] Ильин М.В., Вилков Е.А., Гуляев И.В., Бриз дель Бланко Ф. Определение собственных тепловых сопротивлений силовых транзисторов и диодов IGBT модуля на основе его трехмерной модели // Электротехника. 2019. № 7. С. 19-23.
- [4] Alavi O., Abdollah M., Viki A.H. Assessment of thermal network models for estimating IGBT junction temperature of a buck converter // Proceedings of the 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), 2017, Mashhad, Iran. P. 102-107.
- [5] Bahman A., Ma K., Blaabjerg F. A lumped thermal model including thermal coupling and thermal boundary conditions for high-power IGBT modules // IEEE Transactions on Power Electronics. 2018. № 33 (3). P. 2518-2530.
- [6] Сонин Ю.П., Шакарян Ю.Г., Прусаков Ю.И., Юшков С.А., Гуляев И.В. Способ управления двигателем двойного питания, выполненным на базе асинхронного двигателя с фазным ротором, и устройство для его осуществления, Пат. 1610589 РФ, опубл. 06.07.1987.
- [7] Сонин Ю.П., Шакарян Ю.Г., Юшков С.А., Прусаков Ю.И., Гуляев И.В. Бесконтактный асинхронизированный вентильный электродвигатель, Пат. 1561163 РФ, опубл. 27.10.1987.
- [8] Сонин Ю.П., Стромин Б.А., Тургенев И.В., Гуляев И.В. Исследование асинхронизированного вентильного двигателя // Электротехника. 1982. № 10. С. 49-51.
- [9] Бриз Дель Бланко Ф., Гуляев И.В., Ильин М.В., Попов А.А., Попова В.А. Оптимизация управления машиной переменного тока с анализом тепловых моделей силового модуля преобразователя. Саранск: Изд-во Мордовского унта, 2019. – 108 с.
- [10] Ильин М.В., Вилков Е.В., Гуляев И.В. Тепловая модель IGBT модуля с учетом тепловых взаимосвязей между кристаллами // Электротехника. 2019. № 1. С. 8-12.

M.V. Ilyin<sup>1</sup>, I.V. Gulyaev<sup>1</sup>,  
F. Briz del Blanco<sup>2</sup>, E.A. Vilkov<sup>1</sup>

## THE USE OF NONLINEAR ELEMENTS IN THERMAL MODEL TO PREDICT THERMAL COUPLING INFLUENCE OF POWER CRYSTALS OF IGBT MODULE

<sup>1</sup> National Research Ogarev Mordovia State University  
Saransk, Russia

<sup>2</sup> University of Oviedo  
Oviedo, Spain

**Abstract.** The article describes an approach to determining the degree of thermal coupling influence of power semiconductor devices as part of an IGBT module of a power converter. The novelty of the approach is to determine the degree of the interaction of crystals based on solving a system of linear equations and presenting the results in an analytical form that allow you to quickly and accurately reproduce the thermal conditions of power devices using a thermal model based on an electrothermal analogy. The simulation results show the possibility of using the Foster circuits in conjunction with nonlinear interconnection elements for calculating thermal modes and reducing the simulation time and computational resources. This thermal model allows us to refine the prediction of temperature with a significant thermal mutual influence of crystals in the mode of low-frequency load current by the inverter. Estimation of thermal parameters to create a model of a power module based on the electrothermal analogy method was carried out by researching the three-dimensional model of the IGBT module in the ANSYS environment using the finite element method.

**Key words:** electrothermal analogy, finite element method, IGBT module, thermal coupling, thermal model.

### References

- [1] M. Andresen, M. Liserre and G. Buticchi, «Review of active thermal and lifetime control techniques for power electronic modules», in proc. *16th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2014, Lappeenranta, Finland, pp. 1-10.
- [2] Z. Khatir, L. Dupont and A. Ibrahim, «Investigation on junction temperature estimation based on junction voltage measurements», *Microelectronics Reliability*, vol. 50 (9-11), pp 1506-1510, Sept.-Nov. 2010.
- [3] M.V. Il'in, E.A. Vilkov, I.V. Gulyaev and F. Briz del Blanco, «Determining the self-thermal impedances of power transistors and diodes of an IGBT module based on its 3D model», *Russian Electrical Engineering*, vol. 90, is. 7, pp. 491-495, July 2019.
- [4] O. Alavi, M. Abdollah and A.H. Viki, «Assessment of thermal network models for estimating IGBT junction temperature of a buck converter», in proc. *8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC)*, 2017, Mashhad, Iran, pp. 102-107.

- [5] A. Bahman, K. Ma and F. Blaabjerg, «A lumped thermal model including thermal coupling and thermal boundary conditions for high-power IGBT modules», *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, is. 3, pp. 2518-2530, March 2018.
- [6] Yu.P. Sonin, Yu.G. Shakaryan, Yu.I. Prusakov, S.A. Yushkov and I.V. Gulyaev, «Sposob upravleniya dvigatelem dvoynogo pitaniya, vypolnennym na baze asinkhronnogo dvigatelya s faznym rotorom, i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya (A method of controlling a dual-power motor made on the basis of an asynchronous motor with a phase rotor, and a device for its implementation) », R.F. Patent 1610589, July 6, 1987 (in Russian).
- [7] Yu.P. Sonin, Yu.G. Shakaryan, S.A. Yushkov, Yu.I. Prusakov, I.V. Gulyaev, «Beskontaktnyy asinkhronizirovanny ventil'nyy elektrodvigatel' (Contactless asynchronous valve motor)», R.F. Patent 1561163, Oct. 27, 1987 (in Russian).
- [8] Yu.P. Sonin, B.A. Stromin, I.V. Turgenov and I.V. Gulyaev, «Issledovaniye asinkhronizirovannogo ventil'nogo dvigatelya (Investigation of an asynchronous valve motor)», *Russian Electrical Engineering*, vol. 10, pp. 49-51, 1982 (in Russian).
- [9] F. Briz del Blanco, I.V. Gulyaev, M.V. Ilyin, A.A. Popov and V.A. Popova, *Optimizatsiya upravleniya mashinoy peremennogo toka s analizom teplovykh modeley silovogo modulya preobrazovatelya (Optimization of control of an alternating current machine with analysis of thermal models of the converter power module)*. Saransk: Izd-vo Mordovskogo un-ta, 2019 (in Russian).
- [10] M.V. Ilyin, E.A. Vilkov and I.V. Gulyaev, «A thermal model of an IGBT module taking into account thermal interconnections between chips», *Russian Electrical Engineering*, vol. 90, is. 1, pp. 6-10, Jan. 2019.