

Анализ напряженно-деформированного состояния IGBT-модулей технологии Press-pack для преобразователей железнодорожного транспорта
О.В. Мельниченко¹ А.В. Коновалов², А.О. Линьков³, А.Ю. Портной⁴

¹ д.т.н., Заведующий каф. "ЭПС", ИрГУПС, г. Иркутск

² Аспирант каф. «ЭПС», ИрГУПС, г. Иркутск

³ к.т.н., доцент, доцент каф. «ЭПС», ИрГУПС, г. Иркутск

⁴ д.ф.-м.н., профессор каф. «ФМиП», ИрГУПС, г. Иркутск

***Аннотация.** В условиях постоянного увеличения грузооборота и соответствующего роста нагрузки на железнодорожную инфраструктуру и подвижной состав актуальна разработка энергоэффективного выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) для электровозов переменного тока на базе IGBT-транзисторах. В данной статье рассматривается моделирование механических напряжений, возникающих при установке IGBT-модуля в охладители, с использованием двух подходов к зажиму: первый — создание нагрузки сверху и снизу с помощью «конусов», второй — соединение с помощью четырёх шпилек по периметру для сжатия конструкции до заданного усилия.*

Проведенное моделирование позволяет вычислить механические напряжения для каждого из способов. Особое внимание уделено неравномерному зажиму, который может привести к концентрации механических напряжений и, как следствие, к повреждению модуля. Механические повреждения модулей зачастую возникают в результате нарушения технологии монтажа, что как правило повлечёт за собой трещины, необратимые разрушения в полупроводниковых кристаллах из-за значительного механического воздействия.

***Ключевые слова:** IGBT-транзистор, моделирование, метод конечных элементов, электровозы, преобразователь*

Актуальность проблемы. В настоящее время электровозы переменного тока обеспечивают высокие показатели грузооборота. По железнодорожным магистралям Восточного полигона в 2021 году его величина составляла 144 млн т [1], уже в 2022 году он находился на отметке 158 млн т [2], и, согласно долгосрочной программе развития ОАО «РЖД», уже в 2025 году грузооборот должен достигнуть показателя 180 млн т [3]. Для повышения провозных способностей выполняются различные мероприятия, например: наращивают тяжеловесное движение, повышая массу поездов до 6300 и 7100 т [4]; увеличивают пропускные способности, организовывая движение соединённых поездов или по технологии «Виртуальная сцепка» [5]. Однако наряду с комплексом проводимых мероприятий для увеличения грузооборота остаётся актуальной проблема Восточного полигона – ограниченная пропускная способность железнодорожной инфраструктуры. Современные требования к надежности и безопасности конструкций в области локомотивостроения подчеркивают актуальность

моделирования статических и динамических характеристик различных элементов тягового подвижного состава.

Новыми элементами, требующими моделирование, являются IGBT-модули, которые могут применяться как в коллекторном электроприводе [7], так и в асинхронном [8]. Одной из задач, которые возникают при конструировании преобразователей, является система зажима модулей в охладителе, которая должна обеспечивать равномерность и хороший контакт.

IGBT-модуль имеет паяные соединения между полупроводниковыми кристаллами, платами и основанием. В связи с этим значительное механическое воздействие на корпус или основание модуля может привести к появлению трещин в кристаллах транзисторов и диодов. Особенно опасны концентрированные удары по основанию модуля и по охладителю с закрепленными на нем модулями. Ударная волна передается от охладителя на основание, в результате чего создаются условия для появления трещин в кристаллах и платах модуля. [6]. Характер разрушения IGBT-модулей представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Разрушения IGBT-модулей

На рисунке 2 представлены различные радиаторы охлаждения для IGBT-модулей.

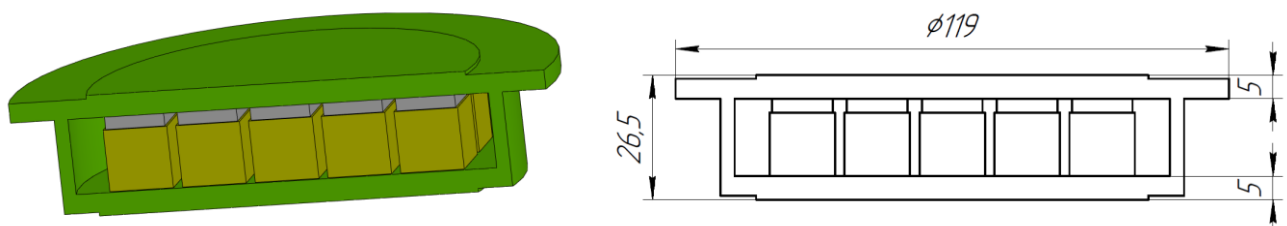
Целью работы является моделирование механических напряжений с целью обеспечения их равномерности внутри Press Pack IGBT-модуля.

Одна из конструкций IGBT-модуля широко используется в тяжелых условиях, например, на железнодорожном транспорте, является Press Pack конструкция. На рисунке 3 представлена упрощенная модель Press Pack IGBT-модуля.

Для исследования механических напряжений внутри такого модуля используется метод конечных элементов, конечно-элементный анализ, представляющий собой численный метод приближенного решения краевых (граничных) задач, имеющих место в технике и математической физике [9-12].



Рисунок 2 – Радиаторы охлаждения для IGBT-модулей



а.

б.

Рисунок 3 – Упрощенная модель Press Pack IGBT-модуля:
 а. IGBT-модуль в разрезе, б. габариты IGBT-модуля

Метод конечных элементов широко применяется сегодня при моделировании внутренних процессов, включающих процессы механических напряжений. Этот метод позволяет детально анализировать поведение конструкций под воздействием различных внешних факторов и физических процессов, возникающих в реальных условиях эксплуатации. В сочетании с современными вычислительными мощностями и программным обеспечением, метод конечных элементов открывает возможности для оптимизации конструкций при их проектировании, увеличивая их работоспособность, надежность и долговечность.

Моделирование проводилось в программной среде «Femap». Для дискретизации трехмерного пространства могут использоваться различные типы конечных элементов, наиболее простым из которых является четырехузловой тетраэдрический элемент [13-15]. При моделировании использовалась тетраэдрная сетка с изменяемым шагом, для оценки точности моделирования.

На рисунке 4 и 5 приведены габаритные размеры, задаваемая нагрузка и места закрепления к земле IGBT-модуля.

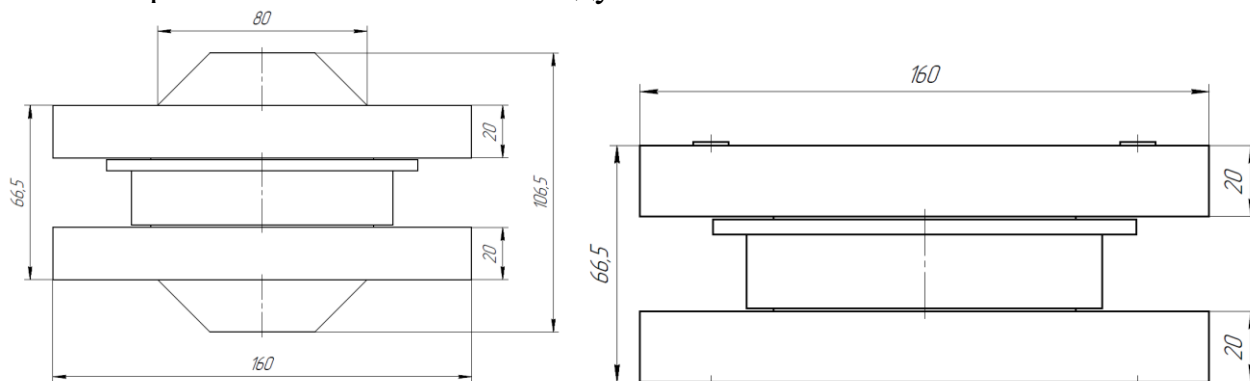


Рисунок 4 – Габаритные размеры IGBT-модуля

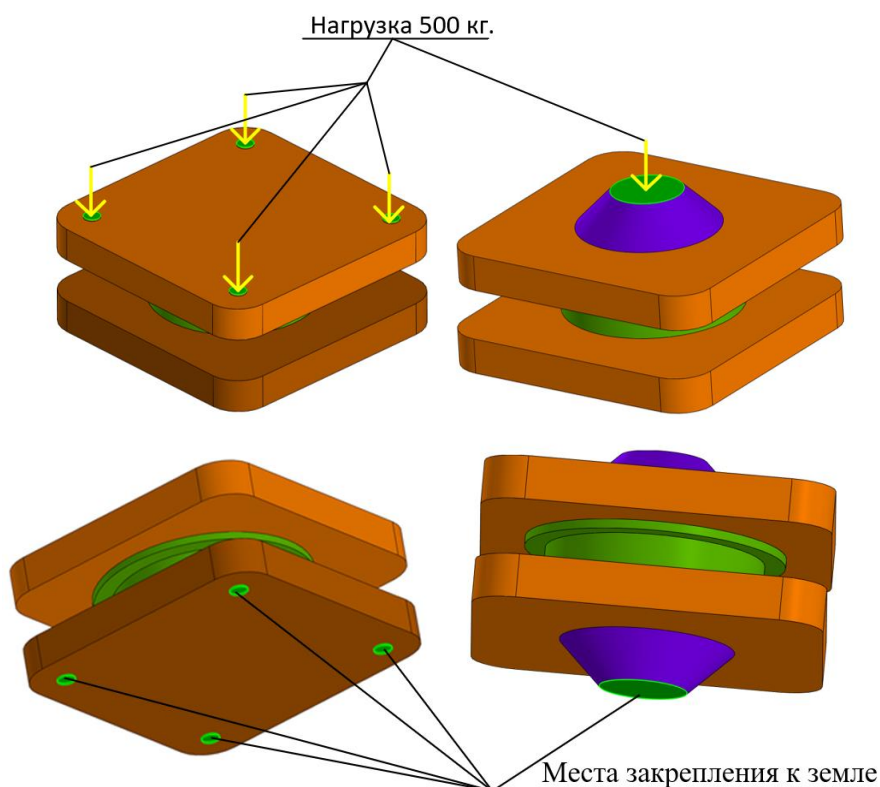


Рисунок 5 – Задаваемая нагрузка и места закрепления к земле IGBT-модуля

Закрепление объекта математической модели в пространстве выполнено с помощью функции «Constraints» (ограничения). Эта функция позволяет установить фиксированные точки или границы, которые не подвержены перемещению, что обеспечивает стабильность и надежность результатов моделирования. Используя функцию «Constraints», задаются жесткие связи для определенных узлов или элементов модели, фиксируя их в заданных координатах.

Сложные узлы и элементы на расчетной модели приводят к несоответствиям в наложении сетки, что, в свою очередь, вызывает концентрацию напряжений и деформаций в переходных сопряжениях. Это отрицательно сказывается на точности расчетов. Упрощение геометрии модели позволяет решить данную проблему, позволяя эффективно разбить модель на элементы с одинаковыми размерами и формой, что минимизирует погрешности вычислений и обеспечивает точность расчетов.

Сеточный шаг играет важную роль в точности и качестве модели. При проведении моделирования была выбрана величина сеточного шага, равная 2 мм. Пространство, в котором происходит моделирование, разбито на небольшие ячейки размером 2 мм.

Когда шаг сетки меньше, например, 1 мм, повышается детализация модели, но одновременно увеличивается вычислительная нагрузка. С другой стороны, сеточный шаг больше, чем 2 мм, может привести к потере достоверности результатов. Такой подход обеспечивает достаточную детализацию, чтобы точно отразить физические процессы, происходящие в модели, и в то же время позволяет эффективно использовать вычислительные мощности.

В процессе моделирования была проведена оценка двух различных способов прижатия IGBT-модуля. В первом варианте, где используется прижим, основанный на четырех шпильках (рисунок 6), удалось добиться максимально-равномерного распределения давления на модуль, при этом погрешность составила не более 23%. Это означает, что все его компоненты, благодаря такому зажиму, прижимаются к IGBT-модулю с одинаковой силой. В результате этого создаются оптимальные условия для работы модуля, что положительно сказывается на его эффективности и долговечности.

Во втором варианте, при использовании конусного прижима (рисунок 7), наблюдается, что нагрузка на IGBT-модуль распределяется неравномерно. В результате этого наблюдается значительная погрешность, которая составляет 48%. Это может привести к тому, что некоторые участки модуля будут подвергаться большему давлению, чем другие, что в конечном итоге может негативно сказаться на его работе и надёжности.

Таким образом, результаты моделирования подчеркивают преимущества первого способа прижима, который обеспечивает равномерное прижатие IGBT-модуля.

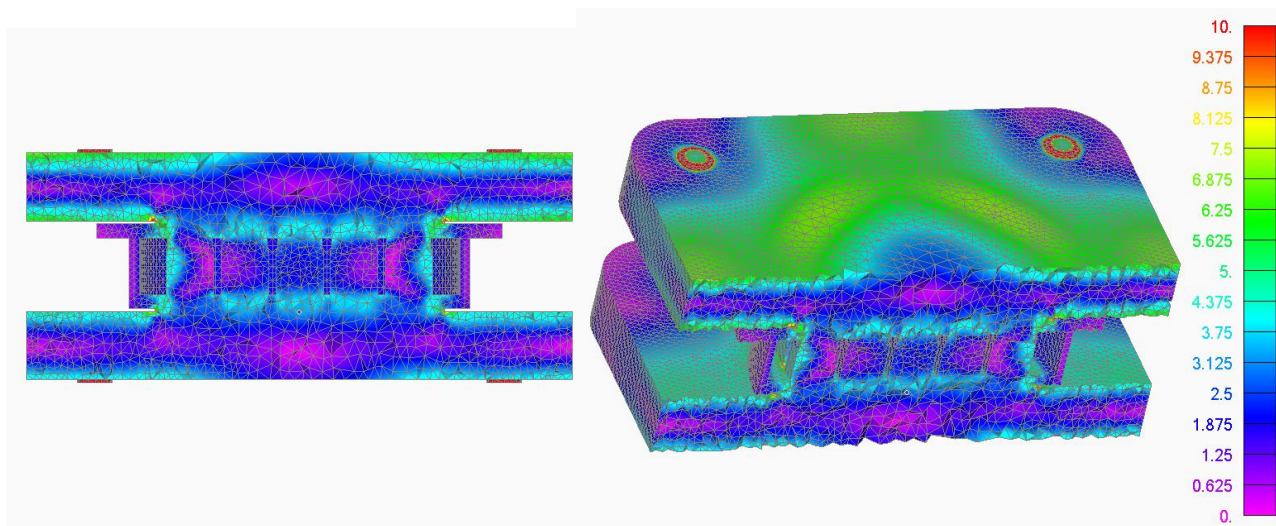


Рисунок 6 – Первый вариант прижима с помощью четырёх шпилек

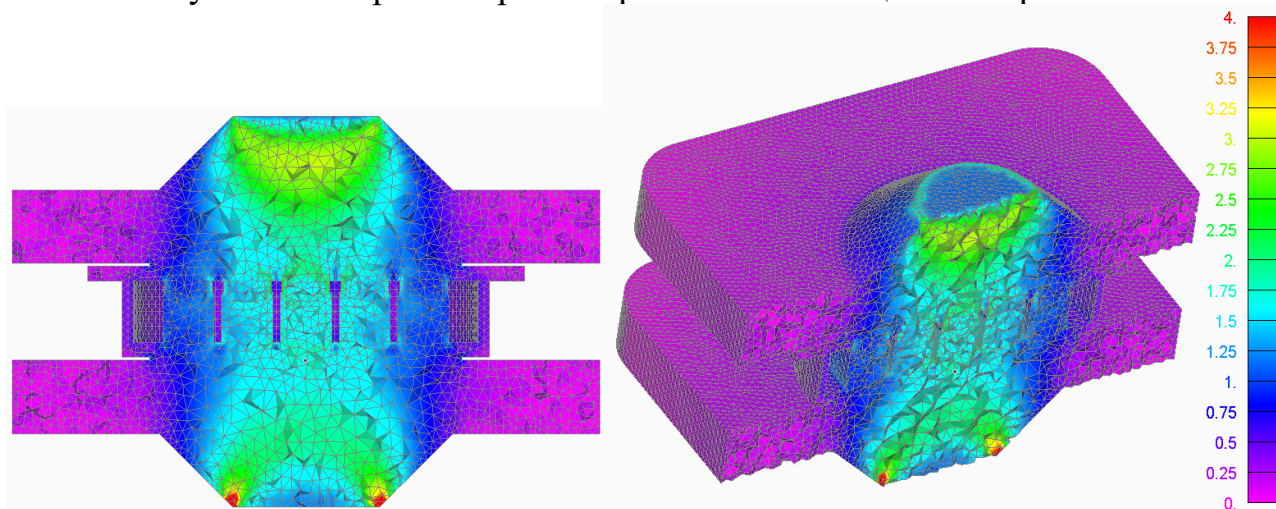


Рисунок 7 – Второй вариант прижима с помощью конуса

Заключение. В данной работе было проведено моделирование механических напряжений на IGBT-модули. Исследование подчеркнуло критическую важность методов прижима модуля, так как качество этого процесса напрямую влияет на его надежную работу и долговечность. Результаты анализа показали, что для достижения высоконадежных результатов моделирования необходимо обеспечить максимально равномерный прижим. Неравномерный прижим способен привести к концентрации механических напряжений, что может вызвать повреждение модуля и снизить его эффективность.

Работа вносит вклад в разработку современных и инновационных подходов к исследованию, проектированию и повышению надежности электрооборудования электровозов.

Библиографический список

1. Якушева, А. Рационализировать перевозки / А. Якушева // Гудок: [сайт]. – 2022. – № 168. – 17 сент. – URL: <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1614134> (дата обращения: 12.10.2023). – Текст: электронный.

2. Восточный полигон – Транссиб и БАМ. Итоги развития в 2013-2022 гг. // ОАО «РЖД»: официальный сайт, 2023. – URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/9787/page/103290?id=19721> (дата обращения: 12.10.2023). – Текст: электронный.

3. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги»: Утв. Указом Президента Российской Федерации № 466р от 07 мая 2018 г. / Правительство Российской Федерации. – Москва, 2019. – 135 с. – Текст: непосредственный.

4. Якушева, А. Вектор развития / А. Якушева. // Гудок: [сайт]. – 2022. – № 238. – 22 дек. – URL: <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1622858> (дата обращения: 12.10.2023). – Текст: электронный.

5. Оценка энергетической эффективности электровозов 3ЭС5К при использовании технологии интервального регулирования движения по типу «виртуальная сцепка» / С. В. Власьевский [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. – 2020. – Т. 79. – № 1. – С. 17-25. 6. Алексей Бормотов, Валентин Мартыненко, Вячеслав Мускатиньев «Некоторые вопросы эксплуатации IGBT-модулей»; Компоненты и технологии, №5 2005 г.

6. Алексей Бормотов, Валентин Мартыненко, Вячеслав Мускатиньев «Некоторые вопросы эксплуатации IGBT-модулей»; Компоненты и технологии, №5 2005 г.

7. Власьевский С. В., Малышева О. А., Грибенюк Д. В. Сравнительные возможности применения на электровозах переменного тока коллекторного и асинхронного привода // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2017. № 1. С 9-20. ISSN 2227-1384. EDN: ZQXRNB

8. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС10 с асинхронными тяговыми электродвигателями. Руководство по эксплуатации. [Текст] - 2011.

9. Каменев, С.В. Основы метода конечных элементов в инженерных приложениях. Учебное пособие. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 110 с.

10. Зенкевич, О.К. Метод конечных элементов в технике: Пер. с англ. / О.К. Зенкевич; под ред. Б.Е. Победри. — М.: Мир, 1975. — 541 с.: ил.; 22 см. — Библиогр.: с. 7–25, 28–29.

11. Метод конечных элементов / М. Секулович; Перевод с серб. Ю. Н. Зуева; Под ред. В. Ш. Барбакадзе. – М.: Стройиздат, 1993. – 660 с

12. Ашейчик, А. А. Расчет деталей машин методом конечных элементов / А. А. Ашейчик, В. Л. Полонский. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2016. – 243 с.

13. Рычков, С.П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. — М.: ДМК Пресс, 2013. — 784 с.: ил. ISBN 978-5-94074-638-6.

14. Рычков С.П. MSC.visual NASTRAN для Windows / Рычков С.П. – М.: НТ Пресс, 2004. – 552 с.: ил. (Проектирование и моделирование).

15. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC NASTRAN for Windows / ДМК Пресс, 2003. – 448 с.: ил. (ISBN 5-94074-028-6).