

Научная статья
УДК 629.371.21

Особенности проектирования тормозной системы гоночного болида

Пабло Эмилио Итурралде Бакеро¹, Роман Сергеевич Николаев²,
Ирина Игоревна Слесарева³

^{1,2,3}Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Московский политехнический университет» (Московский Политех), Москва, Россия

¹iturralde.p@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7714-5628>

²r.s.nikolaev@mospolytech.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7731-3010>

³irinaslesareva@mail.ru

Аннотация. Настоящее исследование посвящено анализу особенностей проектирования тормозной системы гоночных болидов на примере гоночного автомобиля класса Formula Student. Обоснование исследования основано на необходимости оптимизации проектирования тормозных систем в условиях высоких нагрузок и требований гоночных соревнований. Цель работы — получить понимание проектирования тормозной системы болида и определить особенности, отличающие данный процесс от проектирования других спортивных и гражданских автомобилей. Исследование включает анализ конструкции, обоснование выбора тормозных механизмов и результаты моделирования в программе ANSYS с применением метода конечных элементов. Результаты выявили особенности проектирования тормозных систем болидов, такие как: важность компоновки болида, индивидуальный подход к проектированию и соблюдение баланса между эффективностью и безопасностью. Исследование призвано способствовать развитию технологий гоночной индустрии и повышению безопасности в условиях постоянно развивающегося автоспорта.

Ключевые слова: гоночный болид, автоспорт, тормозная система, проектирование, Formula Student.

Благодарности: данная статья была создана в процессе реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет – 2030».

Для цитирования: Итурралде Бакеро П.Э., Николаев Р.С., Слесарева И.И. Особенности проектирования тормозной системы гоночного болида // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2025. № 1 (43).

Original article

Features of design of braking system of racing bolide

Pablo Emilio Iturralde Bakero¹, Roman Sergeevich Nikolaev², Irina Igorevna Slesareva³

^{1,2,3}Moscow Polytechnic University (Moscow Poly), Moscow, Russia

¹iturralde.p@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7714-5628>

²r.s.nikolaev@mospolytech.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7731-3010>

³irinaslesareva@mail.ru

Abstract. The present study is devoted to the analysis of peculiarities of design of braking system of racing cars on the example of Formula Student class racing car. The rationale of the study is based on the need to optimize the design of braking systems under conditions of high loads and requirements of racing competitions. The purpose of the work is to gain an understanding of the design of a bolide brake system and to identify the features that distinguish this process from the design of other sports and civilian vehicles. The study includes design analysis, justification of brake mechanisms selection and simulation results in ANSYS program using finite element method. The results revealed the characteristics of the design of braking systems in racing cars, such as: the importance of the layout of the car, the individual approach to design and the balance between efficiency and safety. The study aims to contribute to the development of racing industry technology and improve safety in an ever-evolving motorsport environment.

Keywords: racing car, motorsport, braking system, design, Formula Student.

Acknowledgements: this article was created in the process of implementing the strategic academic leadership program “Priority 2030”.

For citation: Iturralde Bakero P.E., Nikolaev R.S., Slesareva I.I. Features of design of braking system of racing bolide // *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2025. № 1 (43).

Актуальность темы

В рамках автомобильного спорта тормозная система гоночных болидов является одной из наиболее важных составляющих, подвергающейся постоянному инженерному совершенствованию с целью обеспечения максимальной эффективности и безопасности на трассе, чему посвящены многие научные публикации [1-4]. Проектирование тормозных систем гоночных болидов, ввиду особых задач, поставленных перед инженерами, имеет свои особенности, значительно отличающиеся от процесса

инжиниринга тормозных систем для гражданских автомобилей. Более того, команда инженеров сильно ограничена регламентом соревнований, представляющим ряд обязательных требований к проектированию болида. Например, согласно регламенту, традиционно, гоночный болид должен иметь открытые колеса в целях безопасности, а также, чтобы водитель мог контролировать траекторию прохождения поворота, наблюдая за положением колёс¹. Системы торможения гоночных болидов, представляющие собой ключевой элемент технического комплекса, подвергаются постоянному усовершенствованию с учетом требований повышенной эффективности и безопасности в условиях высоких динамических нагрузок. Важной характеристикой тормозных систем является способность обеспечивать точный и мгновенный контроль над скоростью автомобиля, что имеет критическое значение при преодолении трасс с различными конфигурациями и профилем. Технологическое развитие автомобилестроения достигает своего пика именно в автоспорте, так как команды инженеров вынуждены постоянно совершенствовать свои технологические решения. В частности, такой интенсивный опыт проектирования предоставляется и студенческим командам в рамках соревнований Formula Student. Конструкции и техническим решениям болидов класса Formula Student также посвящены научные публикации [5-7].

Основная часть

Для более полного понимания особенностей проектирования тормозной системы гоночного болида необходимо анализировать процесс создания конкретного автомобиля, успешно участвующего в гоночных соревнованиях. В целях данного анализа в настоящей статье был выбран гоночный болид класса Formula Student – Iguana G10T1, разработанный студенческой командой Московского политехнического университета (рис.

¹ Официальный сайт Formula Student Russia: <https://fstudent.ru/documents>

1). Болид Iguana G10T1 принимал участие во множестве соревнований и продемонстрировал спортивные результаты², что подтверждает его актуальность для настоящего анализа.



Рис. 1. Гоночный автомобиль класса Formula Student – Iguana G10T1

Основной особенностью гоночного болида, отличающей его от гражданских и спортивных автомобилей, является компоновка деталей и узлов. Так как гоночный болид предназначен только для соревнований в рамках автоспорта, и не допускается на дороги общего пользования, главная задача данного автомобиля заключается в достижении максимально эффективных показателей на гоночной трассе, чему способствует особая компоновка, имеющая ряд особенностей в сравнении с автомобилями гражданского пользования. Все системы гоночного болида оказывают непосредственное влияние друг на друга, поэтому для проектировки тормозной системы нужно учитывать компоновку всех систем автомобиля, чтобы соблюсти правила безопасности и извлечь максимальную выгоду из

² Официальный сайт Московского политехнического университета:
https://old.mospolytech.ru/news_new.php?id=9760

выбранной конструкции. Болид Iguana G10T1 имеет традиционную для автоспорта компоновку с центральным продольным расположением двигателя и задним приводом. Согласно регламенту соревнований Formula Student, допускается привод колес только одной оси³. Двигатель и трансмиссия расположены за спиной гонщика, но перед задней осью, что позволяет добиться наиболее сбалансированной развесовки автомобиля, так как в таком случае учитываются требования по управляемости (развесовка ближе к соотношению 50/50) и по разгону автомобиля (необходимость догружать ведущие колёса для реализации большей силы тяги). Также в данном гоночном болиде присутствует аэродинамический пакет.

Преимущество хорошо развитого аэродинамического пакета очевидно: даже медленный автомобиль с хорошей аэродинамикой снимает несколько секунд с круга, по сравнению с любым другим более быстрым автомобилем без аэродинамических элементов. Согласно данной компоновке выполнялось проектирование тормозной системы для болида Iguana G10T1.

Правила проектирования тормозных систем установлены в ряде российских и международных нормативных документах (ГОСТ Р 41.13-99⁴, ОСТ Р 41.13Н-99⁵, ГОСТ Р 51709-2001⁶. ОСТ 37.001.454-87⁷). Данные нормативные документы устанавливают правила надежности, эффективности и безопасности как для новых автомобильных средств, так и для находящихся в эксплуатации. Однако, для гоночных автомобилей класса Formula Student существует ещё одно обязательное требование – прохождение теста на торможение в рамках технической инспекции. Данный тест заключается в проверке способности тормозной системы болида

³ Официальный сайт Formula Student Russia: <https://fstudent.ru/documents>

⁴ Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: <https://docs.cntd.ru/document/1200027803>

⁵ Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: <https://docs.cntd.ru/document/1200027803>

⁶ Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: <https://docs.cntd.ru/document/1200017699>

⁷ ГОСТ АССИСТЕНТ: <https://gostassistant.ru/doc/a44e6b0b-91bb-4942-9e52-dbed5168ea15>

заблокировать все четыре колеса при сохранении прямолинейного движения. Способность тормозной системы к блокировке колес при сохранении прямолинейной траектории обеспечивает безопасность и эффективность болида при развитии большой скорости. Согласно результатам испытаний и расчетам, проводившимся студенческой командой Московского политехнического университета, крутящий момент, создаваемый тормозным диском на передней оси болида Iguana G10T1, равен 1294,2116 Нм, а максимальный крутящий момент на передней оси, достаточный для блокировки колес, равен 324,68527 Нм.

Исходя из требований технической инспекции, происходит выбор тормозных механизмов. Подбор тормозных механизмов для гоночного болида зависит от различных условий и конкретных задач инженеров. Изначально для болида Iguana G10T1 был выбран дисковый тормозной механизм с фиксированной скобой. Данный тормозной механизм позволяет облегчить конструкцию и увеличить эффективность при помощи установки поршней большего диаметра в меньший корпус, с плавающим тормозным диском. Дисковые тормозные механизмы демонстрируют меньший тормозной путь, по сравнению с барабанными тормозными механизмами, имеют малое время срабатывания, высокую энергоемкость, стабильность работы, недороги в обслуживании и отличаются простотой конструкции [8]. Но в процессе проектирования также важно учитывать способность детали выдерживать заданные нагрузки, что особенно значимо в автоспорте, где необходимо соблюдать баланс безопасности и эффективности гоночного автомобиля. Студенческой командой был проведен прочностной расчет ступицы и тормозного диска в сборе (рис. 2). Данный расчет проводился в программе ANSYS R19.1 с использованием метода конечных элементов. В результате расчет показал, что в месте крепления суппорта к тормозному диску отсутствуют какие-либо деформации, что является благоприятным фактором при эксплуатации. Но максимальные деформации тормозного

диска составляют 1,2 мм – это достаточно существенное значение. В следствии этого, было принято решение использования тормозного диска с плавающей скобой: диск крепится непосредственно на ступицу, используя механизм, позволяющий перемещение диска в осевом и радиальных направлениях [9]. В большинстве случаев, такая система используется для возможности компенсации перемещений между диском и суппортом, которые образуются при максимальной нагрузке на колесную сборку, при разгоне либо при прохождении поворота.

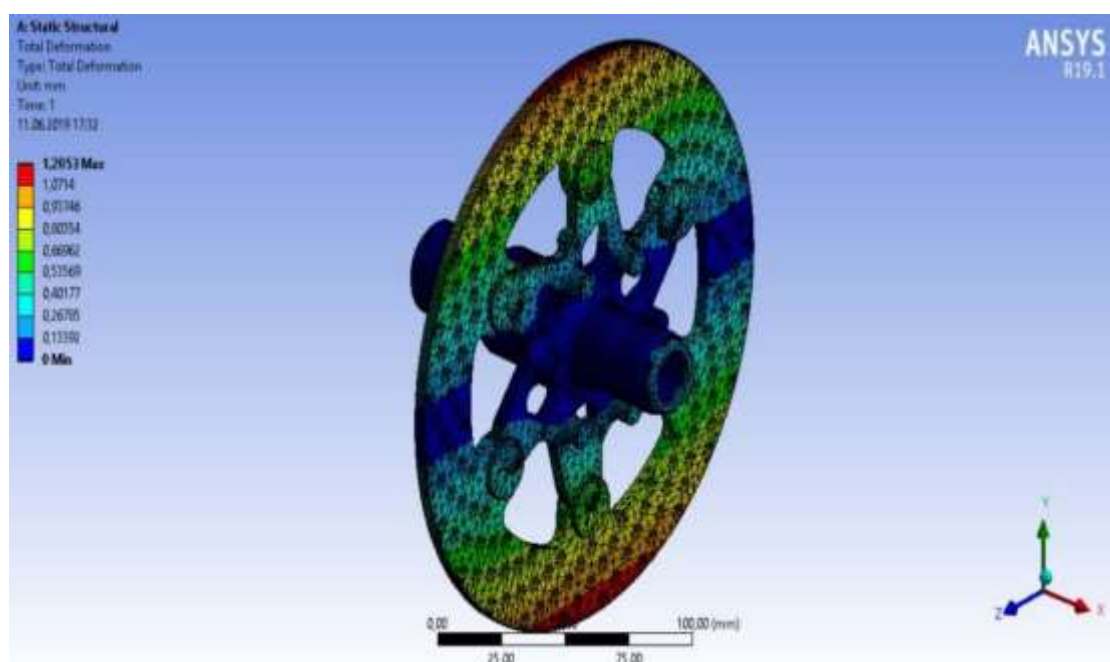


Рис. 2. Прочностной расчет тормозного диска в сборе со ступицей

Касательно тормозного привода, для Iguana G10T1 был выбран гидравлический привод, который позволяет эффективно передавать давление тормозной жидкости в исполнительные механизмы. Вдобавок, такая система позволяет изменять тормозное усилие на осях при движении автомобиля с помощью системы балансировки давления, что крайне важно для управляемости гоночного болида. Для повышения надежности тормозного управления, гидравлические тормозные приводы выполняют разделенными на самостоятельные контуры. Для тормозной системы болида Iguana G10T1 был выбран 2-контурный гидравлический привод с раздельным управлением

передними и задними тормозными механизмами (рис. 3). Преимущество такого тормозного контура заключается в низкой стоимости и простоте при проектировании и эксплуатации.

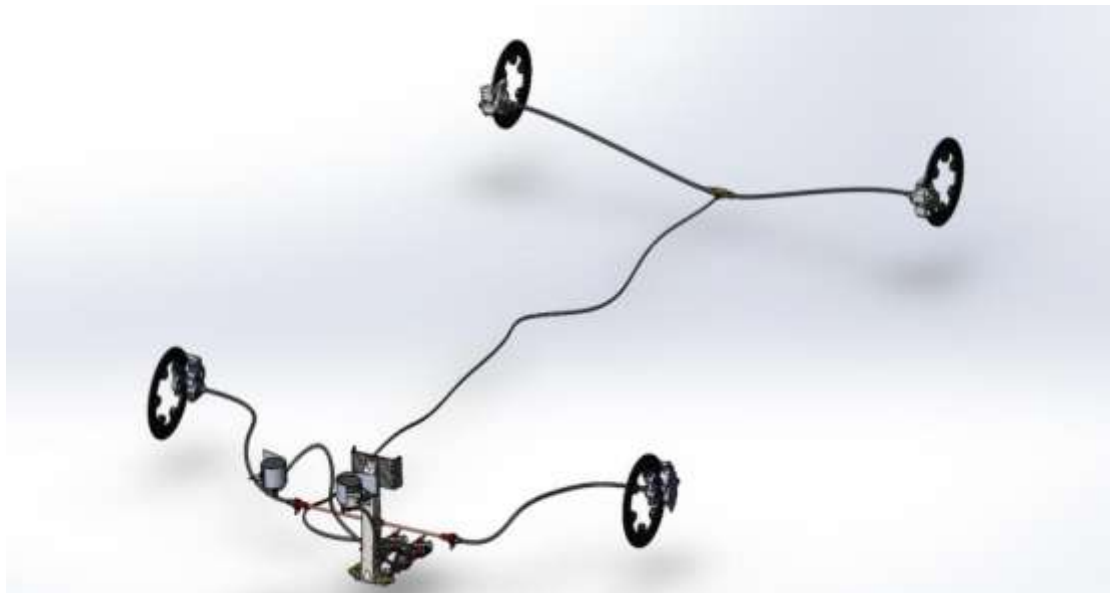


Рис. 3 Общий вид тормозной системы автомобиля Iguana G10T1

Выводы

Анализируя процесс проектирования тормозной системы гоночных болидов, в частности болида Iguana G10T1, можно выделить следующие особенности, которым инженеры должны уделять повышенное внимание:

- Компоновка гоночного болида непосредственно влияет на все системы автомобиля, в том числе на тормозную систему. Необходимо тщательно рассчитывать расположение деталей и узлов, чтобы добиться наибольшей эффективности и безопасности.
- Тормозная система автомобиля требует индивидуального подхода к проектированию, в зависимости от необходимых характеристик, так как гоночный болид предназначен для выполнения сложных задач в постоянно меняющихся условиях предельных нагрузок и скоростей.
- Баланс между эффективностью и безопасностью тормозной системы гоночного болида является одним из важнейших элементов при проектировании. Регламент и правила соревнований задают команде

инженеров жесткие рамки, которые необходимо соблюдать. Например, повышение безопасности может значительно повлиять на вес болида, что понизит эффективность при прохождении трассы. В таких условиях команде инженеров необходимо придерживаться равновесия между значимыми характеристиками болида.

Список источников

1. Design of Mechanically Actuated Aerodynamic Braking System on a Formula Student Race Car / V. Muralidharan, A. Balakrishnan, V.K.Vardhan, N. Meena // Journal of The Institution of Engineers (India) Series. – 2018. – Vol. 99. – P. 247-253. – DOI 10.1007/s40032-017-0354-1.
2. Разработка тормозной системы гоночного болида формульного типа класса "Formula Student" / В. В. Саплинова, С. Н. Глаголев, А. Н. Новиков, И. А. Новиков // Вестник гражданских инженеров. – 2019. – № 5(76). – С. 270-277. – DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-5-270-277. – EDN QXDCDK.
3. Зелюков, И. М. Устройство защиты тормозной системы гоночного болида "Формула студент" / И. М. Зелюков, Г. Л. Штрапенин // Инновационный транспорт. – 2022. – № 2(44). – С. 57-60. – DOI 10.20291/2311-164X-2022-2-57-60. – EDN PDHKXG.
4. Köglspurger, C. Brake-by-Wire - From Formula E to Concept Development / C. Köglspurger, V. Unterfrauner, S. Zollitsch // ATZ Worldw. – 2020. – Vol. 122. – P. 54-59. – DOI 10.1007/s38311-019-0170-8.
5. Failure Analysis of a Wheel Hub of Formula Student Racing Car / T. Shinde, R. Chavan, P. Savadekar; et al. // J. Inst. Eng. India Ser. D. – 2021. – Vol. 102. – P. 73-78. – DOI 10.1007/s40033-020-00244-z.
6. Ott, S. Development of a state-of-charge estimation for a formula student racing car / S. Ott, F. Reichenberger // ATZextra Worldw. – 2017. – Vol. 22. – P. 54-57. – DOI 10.1007/s40111-017-0005-9.
7. Горелов, В. А. Разработка комплексной системы управления движением спортивного автомобиля класса "Формула Студент" по заданной трассе / В. А. Горелов, Б. Б. Косицын // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2016. – № 7(676). – С. 45-55. – EDN WBOQKB.
8. Султанаев, М. А. Сравнительный анализ дисковых и барабанных тормозных механизмов автомобиля / М. А. Султанаев // Инновации. Наука. Образование. – 2020. – № 23. – С. 891-893. – EDN PTFPDA.
9. Войтенко, В. А. Особенности тепловых процессов и процессов изнашивания в дисковом тормозе с плавающей тормозной колодкой / В. А. Войтенко // Бюллетень транспортной информации. – 2019. – № 2(284). – С. 17-23. – EDN ZBOQHZ.

References

1. Muralidharan V., Balakrishnan A., Vardhan V.K. Meena N. *Journal of The Institution of Engineers (India) Series*, 2018, vol. 99, pp. 247–253.
2. Saplinova V.V., Glagolev S.N., Novikov A.N., Novikov I.A. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2019, no. 5(76), pp. 270-277.
3. Zelyukov I.M., Shtrapein G.L. *Innovatsionnyy transport*, 2022, no. 2(44), pp. 57-60.
4. Köglspurger, C., Unterfrauner V., Zollitsch S. *ATZ Worldw*, 2020, vol. 122, pp. 54-59.
5. Shinde T., Chavan R., Savadekar P., Shinde D., Jagtap N. *J. Inst. Eng. India Ser. D*, 2021, vol. 102, pp. 73-78.
6. Ott S., Reichenberger F. *ATZextra Worldw*, 2017, vol. 22, pp. 54-57.
7. Gorelov V.A., Kositsyn B.B. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*, 2016, no. 7(676), pp. 45-55.
8. Sultanayev M.A. *Innovatsii. Nauka. Obrazovaniye*, 2020, no. 23, pp. 891-893.
9. Voytenko V.A. *Byulleten' transportnoy informatsii*, 2019, no. 2(284), pp. 17-23.

Рецензент: А.Ю. Харламов, руководитель Службы агрегатов,
ООО «Инновационный центр «КАМАЗ»

Информация об авторах

Итурралде Бакеро Пабло Эмилио, директор Передовой инженерной школы
электротранспорта, Московский Политех.

Николаев Роман Сергеевич, аналитик, аспирант, Московский Политех.

Слесарева Ирина Игоревна, начальник центра развития инжиниринга,
Московский Политех.

Information about the authors

Iturralde Bakero Pablo E., Director of the Advanced Engineering School of the Electrical
Transport, Moscow Poly.

Nikolaev Roman S., Analyst, postgraduate, Moscow Poly.

Slesareva Irina I., Head of Engineering Development Center, Moscow Poly.

Статья поступила в редакцию 24.12.2024; одобрена после рецензирования 11.02.2025; принята к публикации 26.03.2025.

The article was submitted 24.12.2024; approved after reviewing 11.02.2025; accepted for publication 26.03.2025.