

Сапон Владислав Михайлович, студент кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, РФ, Москва

E-mail: vlad866891@gmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ТРУБЧАТОЙ РАМЫ БОЛИДА КЛАССА «ФОРМУЛА СТУДЕНТ»

Аннотация: В ходе представленной работы были определены жесткостные характеристики рамы болида. Рассмотрено несколько вариантов модернизации конструкции с целью повышения жёсткости и сокращения массы. Созданы 3D модели и конечно-элементные (КЭ) модели для проведения расчётов с целью выявления наиболее оптимальных вариантов. Подробно описана методика определения крутильной жёсткости пространственной рамы.

Ключевые слова: пространственная рама, метод конечных элементов, гоночный болид, формула студент, оптимизация, крутильная жёсткость.

Abstract: During the work, the stiffness characteristics of the car frame were determined. Several options for improving the structure were considered in order to increase the torsional stiffness and reduce weight. 3D models and finite element models were created for carrying out calculations in order to choice the best way of modernization. The method for determining the torsional stiffness of the space frame was described in detail.

Keywords: space frame, finite element method, racing car, formula student, optimization, torsional stiffness.

Введение

На поведение гоночного автомобиля на трассе и его динамические показатели значительное влияние оказывают весовые характеристики [1; 2].

Известно, что в любой гоночной технике инженеры-конструкторы ищут способы снизить массу деталей и всего изделия в целом, при этом конструкция детали должна удовлетворять всем прочностным и жесткостным критериям. Крутильная жёсткость несущей системы болида является важной характеристикой, влияющей на поведение автомобиля на трассе. Изменяя значения жесткостей несущей системы и подвески автомобиля, можно добиться различных распределений усилий между осями при входе машины в поворот, что напрямую влияет на поворачиваемость и управляемость автомобиля [3; 6]. В инженерной практике широкое применение получили конечно-элементные расчёты. Они отлично справляются со сложными, статически неопределимыми задачами, когда методы классической теории «сопротивления материалов» неприменимы из-за сложности и громоздкости полученных систем уравнений [4]. В данной работе был рассмотрен способ оптимизации пространственной трубчатой рамы болида класса «формула студент» с помощью КЭ расчётов в ПО Siemens NX 10.

Цель работы – получить раму, имеющую большую жёсткость на кручение, чем исходная конструкция, обеспечив при этом минимальный прирост массы, либо вовсе её снижение.

Описание исходной конструкции и расчёт её крутильной жёсткости

Исходная конструкция представляла собой пространственную трубчатую раму, изготовленную при помощи ручной дуговой сварки в инертном газе с применением неплавящегося электрода (TIG-сварка). Трубы бесшовные, холоднодеформированные, материал – сталь 20, трубы имеют различные диаметр и толщину стенки: 25x2,5, 25x2, 25x1,5, 20x1,5. 3D модель рамы, созданная в SolidWorks 2015, представлена на рисунке 1.

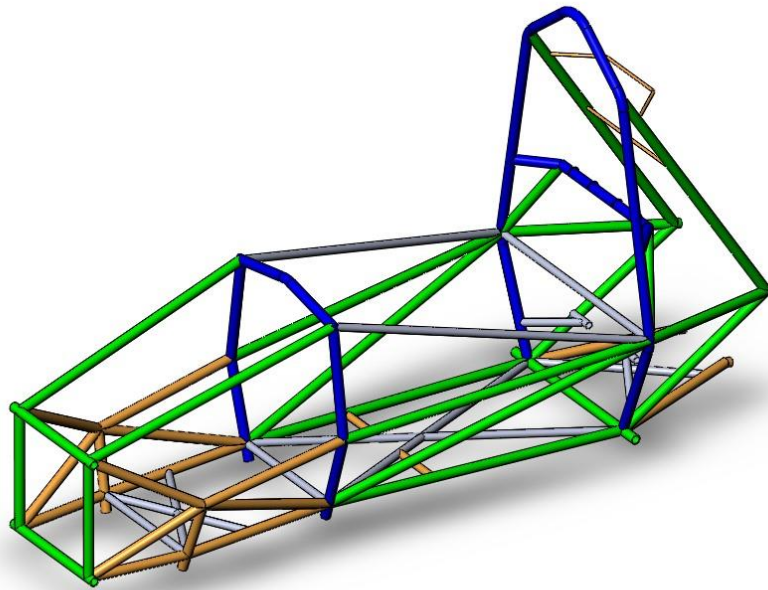


Рисунок 1 – 3D модель рамы

Стоит отметить, что для моделирования режима нагружения, который бы имитировал закрутку рамы наиболее правдоподобно, при создании КЭ модели необходимо было учесть все элементы несущей системы, т. е. как раму, так и алюминиевую плиту (рисунок 2), расположенную в задней части машины, а также рычаги и упругие элементы подвески. На основе приведённой выше 3D модели в Siemens NX 10 была создана КЭ модель (рисунок 3), при этом 1D балочные элементы моделировали трубы рамы, рычаги подвески, упругие элементы подвески и стойки, а 2D оболочечные элементы – алюминиевую плиту.

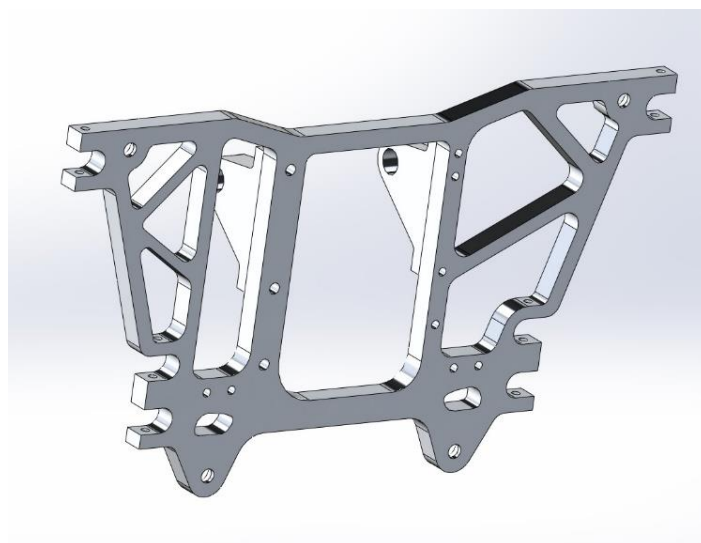
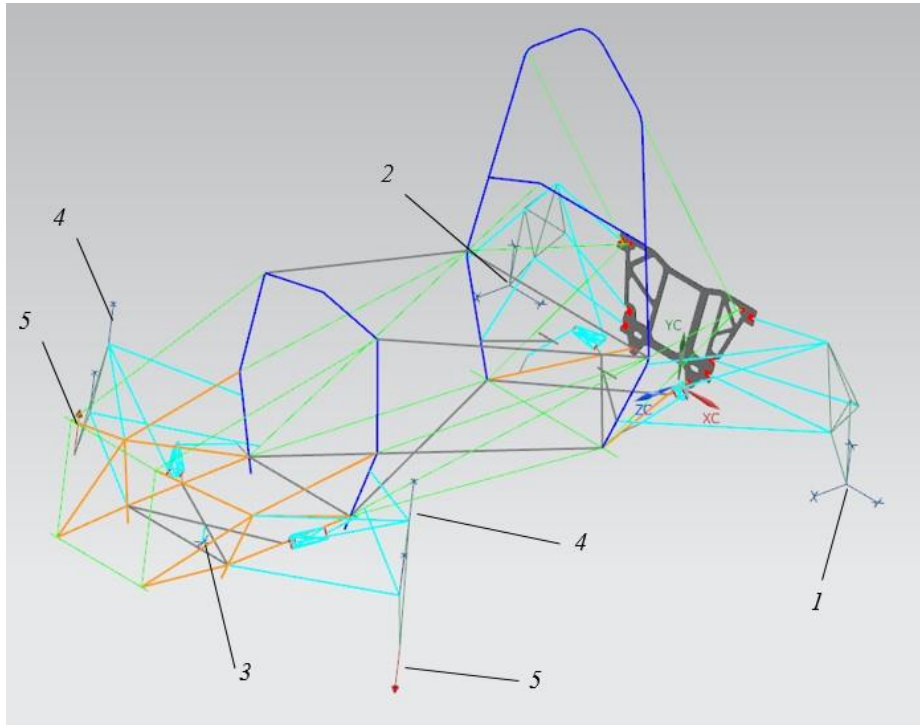


Рисунок 2 – Алюминиевая плита



1, 2 – граничные условия для задних колёс; 3 – заделка;
 4 – граничные условия для передних колёс; 5 – пара сил
 Рисунок 3 – КЭ модель с граничными условиями

Модель имела следующие граничные условия: 1 – ограничивает перемещения по осям X, Y, и Z; 2 – аналогично 1; 3 – заделка, создающая продольную ось, вокруг которой происходит вращение машины; 4 – ограничивает вращение вокруг оси Y; 5 – пара сил, закручивающая раму ($F = 1000 \text{ Н}$).

Расчёт крутильной жёсткости рамы происходит следующим образом: после запуска решателя и получения результатов в виде перемещений узлов по осям X, Y и Z находят перемещения точек 1 и 2 (рисунок 4) в плоскости XOY (плоскость, расположенная поперёк рамы), зная это перемещение и расстояние по нормали от этих точек до продольной плоскости симметрии машины для случая когда нагрузка ещё не приложена, рассчитываются углы закрутки переднего и заднего сечений рамы (рисунок 5). Чтобы исключить влияние подвески необходимо найти разницу этих углов, эта разница и характеризует крутильную жёсткость всей рамы.

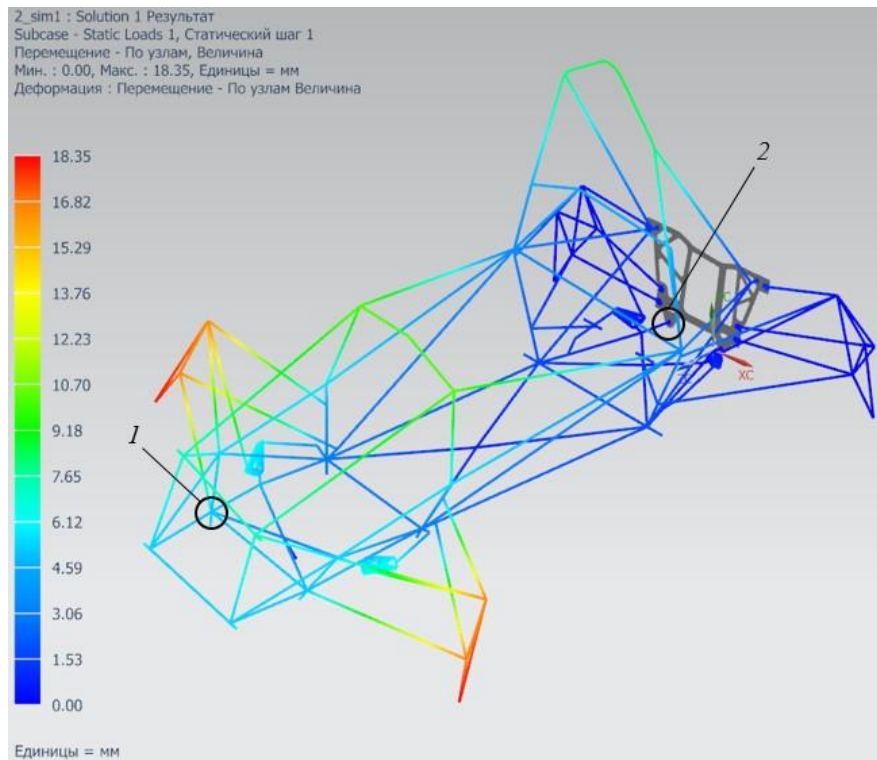


Рисунок 4 – Результаты КЭ расчёта

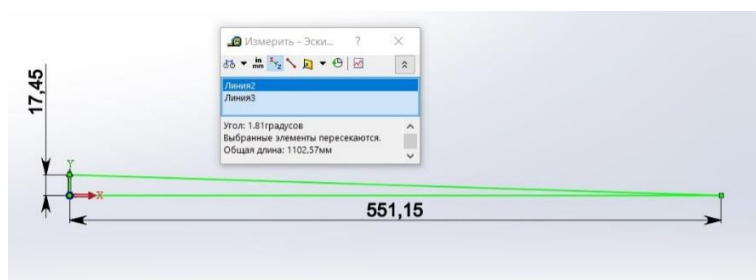


Рисунок 5 – Схема расчёта угла закрутки сечения рамы

Для исходной конструкции углы закрутки переднего и заднего сечения соответственно $\varphi_1 = 1,254^\circ$ и $\varphi_2 = 0,163^\circ$, тогда угол закрутки рамы:

$$\varphi_p = \varphi_1 - \varphi_2 = 1,254 - 0,163 = 1,091^\circ .$$

На этот угол рама была закручена под действием момента $T = 1160 \text{ Н} \cdot \text{м}$, следовательно момент, закручивающий раму на 1° определяется из пропорции:

$$T_p = \frac{1 \cdot 1160}{1,091} = 1063,2 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{град}} .$$

Полученное значение и есть крутильная жёсткость исходной рамы.

Доработка конструкции с целью повышения крутильной жёсткости

В ходе работы было рассмотрено несколько вариантов доработки конструкции рамы с целью увеличения крутильной жёсткости и снижения массы.

Вариант №1

Усилить переднюю часть рамы крестом из двух труб, в ходе расчётов были рассмотрены различные варианты диаметров и толщин стенок добавленных труб: 8x1, 8x2, 14x1,5, 20x1, 20x2. 3D модель изображена на рисунке 6.

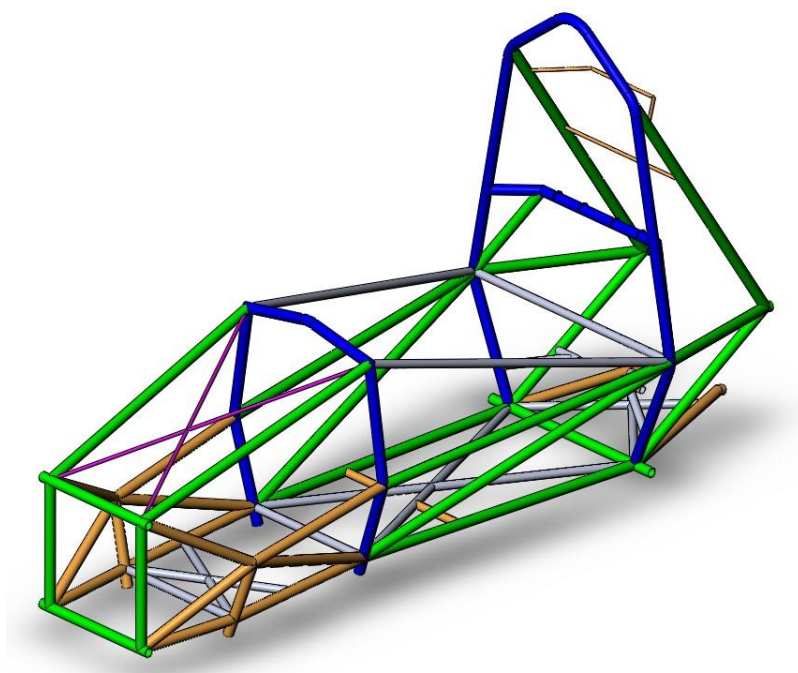


Рисунок 6 – Первый вариант доработки конструкции

Вариант №2

Для снижения массы был рассмотрен вариант замены труб в средней части рамы (указаны стрелками на рисунке 7) на трубы 20x1, 18x1,5, 15x2,5 (вместо 20x1,5). Для данного случая необходимо было оценить, как сильно уменьшится жёсткость и оправдано ли будет такое решение с целью снижения массы.

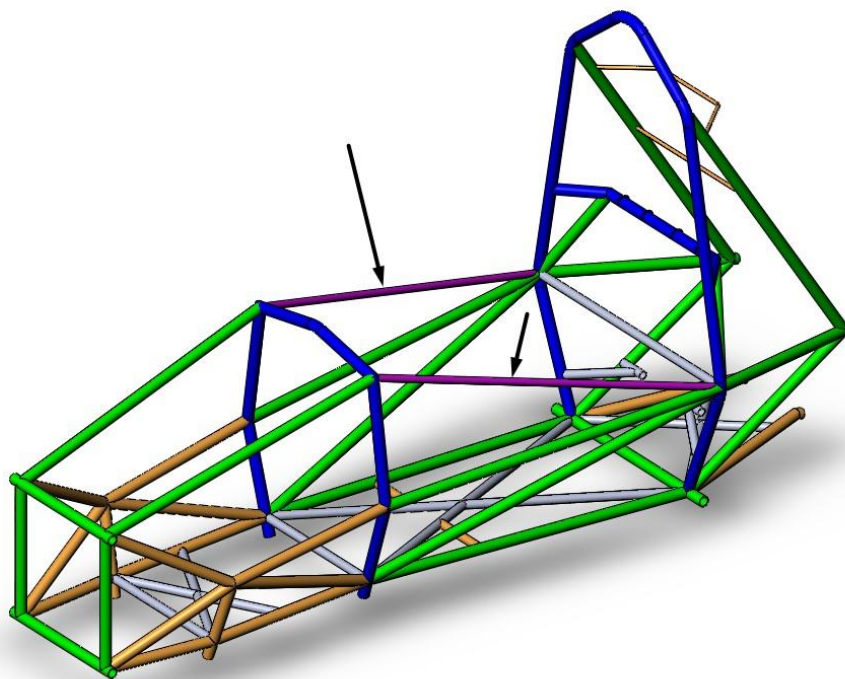


Рисунок 7 – Второй вариант доработки конструкции

Вариант №3

В среднюю часть рамы по бокам были добавлены диагонально расположенные трубы (указаны стрелками на рисунке 8), рассматриваемые размеры: 10x1, 16x1.

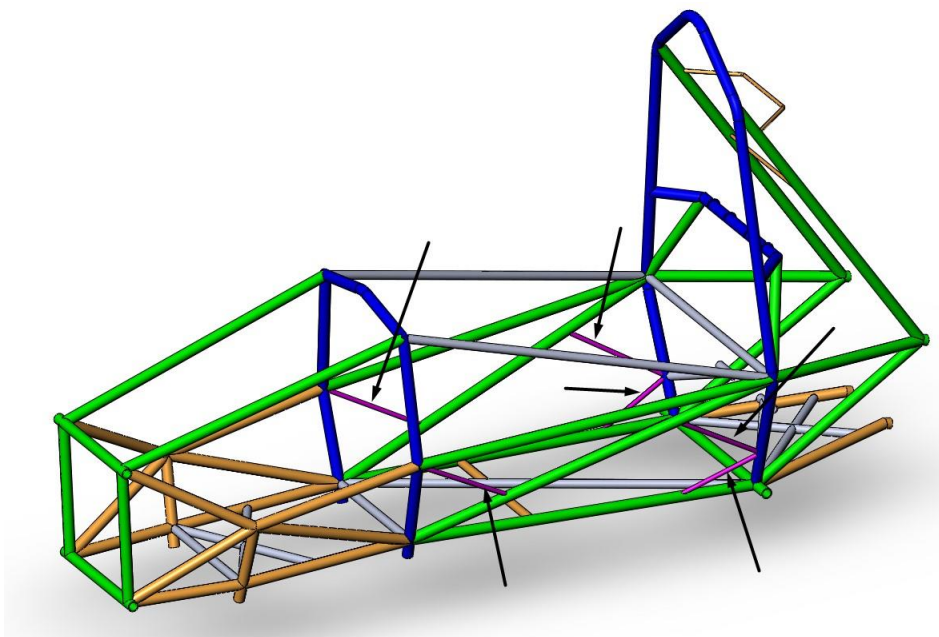


Рисунок 8 – Третий вариант доработки конструкции

Создание КЭ моделей и расчёт

На основе представленных выше 3D моделей были созданы КЭ модели, их структура и граничные условия аналогичны КЭ модели исходной конструкции, которая была детально описана выше. КЭ модели изображены на рисунках 9, 10 и 11.

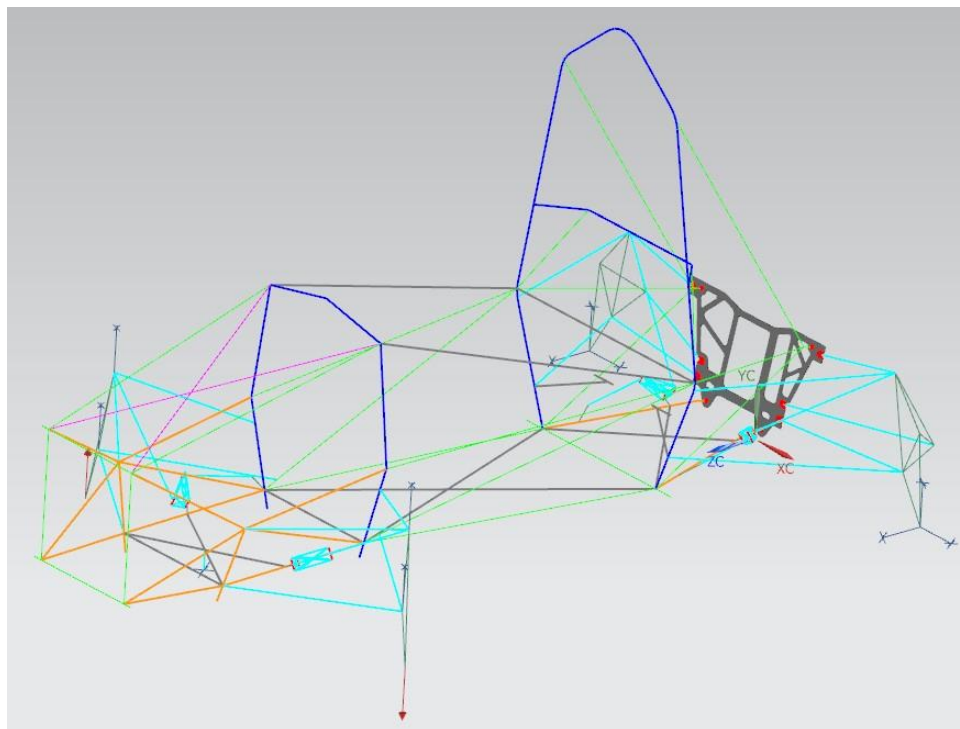


Рисунок 9 – КЭ модель первого варианта доработки конструкции

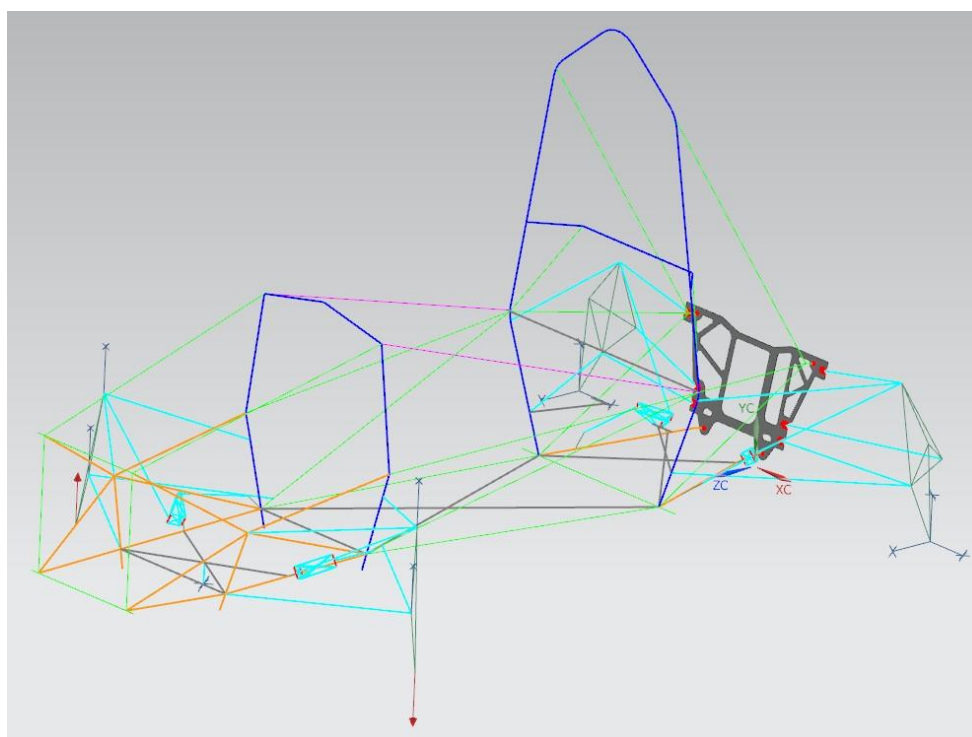


Рисунок 10 – КЭ модель второго варианта доработки конструкции

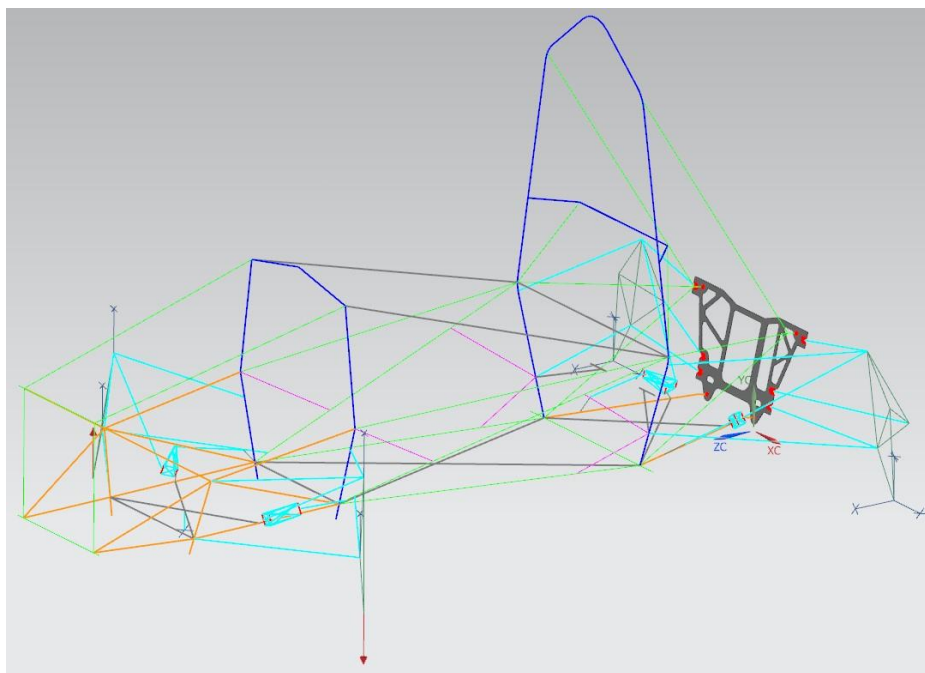


Рисунок 11 – КЭ модель третьего варианта доработки конструкции

Значения углов закрутки и крутильных жёсткостей были рассчитаны аналогично тому, как это делалось для исходной конструкции.

Анализ полученных результатов

Полученные в результате расчётов значения, а также другие ключевые параметры приведены в таблице 1, в которой столбцы содержат следующую информацию: первый – номер варианта конструкции (0 – исходный вариант); второй – размеры труб, для которых проводились расчёты ($D \times \delta$); третий и четвёртый – углы закрутки переднего и заднего сечений рамы (φ_1 и φ_2); пятый – угол закрутки рамы (φ_p); шестой – крутильная жёсткость (C); седьмой – прирост жёсткости (ΔC); восьмой – прирост массы, вследствие изменения конструкции (Δm); девятый – прирост жёсткости на единицу добавленной массы ($\Delta c = |\Delta C / \Delta m|$), является по сути эффективным показателем для данного конструктивного решения.

Таблица 1 – Результаты расчётов и ключевые параметры

№	$D \times \delta$	φ_1	φ_2	φ_p	$C, \frac{H \cdot m}{\text{град}}$	$\Delta C, \frac{H \cdot m}{\text{град}}$	$\Delta m, \text{ кг}$	$\Delta c, \frac{H \cdot m \cdot \text{кг}}{\text{град}}$
0	-	1,254	0,163	1,091	1063,2	-	-	-
1	8x1	0,856	0,166	0,700	1681,2	617,9	0,276	2242,1
	8x2	0,845	0,167	0,678	1710,9	647,7	0,472	1371,4
	14x1,5	0,839	0,167	0,672	1726,2	662,9	0,738	898,5
	20x1	0,837	0,167	0,670	1731,3	668,1	0,748	893,5
	20x2	0,831	0,167	0,664	1747,0	683,7	1,417	482,6
2	20x1	1,301	0,164	1,137	1020,2	-43,0	-0,390	110,2
	18x1,5	1,279	0,164	1,115	1040,4	-22,9	-0,134	170,9
	15x2,5	1,272	0,164	1,108	1046,9	-16,3	0,156	104,5
3	10x1	1,253	0,162	1,091	1063,2	0	0,336	0
	16x1	1,250	0,161	1,089	1065,2	2,0	0,560	3,5

Из данных, представленных в таблице, видно, что для первого варианта изменения конструкции наибольшей величиной Δc обладает случай при трубах 8x1, жёсткость выросла более чем на 50%, при этом масса возросла всего на 276 грамм. Второй вариант доработки также показал положительный эффект для труб 20x1: масса сократилась на 390 грамм, крутильная жёсткость снизилась при этом совсем незначительно (порядка 4%). Третий вариант доработки оказался совершенно бессмысленным – крутильная жёсткость не изменилась, при этом масса выросла либо на 336, либо на 560 грамм.

Таким образом, после анализа полученных результатов, были приняты следующие конструкторские решения:

- 1) Усилить переднюю часть рамы крестом из двух труб с размерами 8x1 (первый вариант);
- 2) Заменить трубы 20x1,5 в средней части рамы на трубы 20x1 (второй вариант).

Расчёт крутильной жёсткости итоговой конструкции

3D модель рамы, с учётом перечисленных выше изменений, представлена на рисунке 12. Её КЭ модель для расчёта крутильной жёсткости – на рисунке 13.

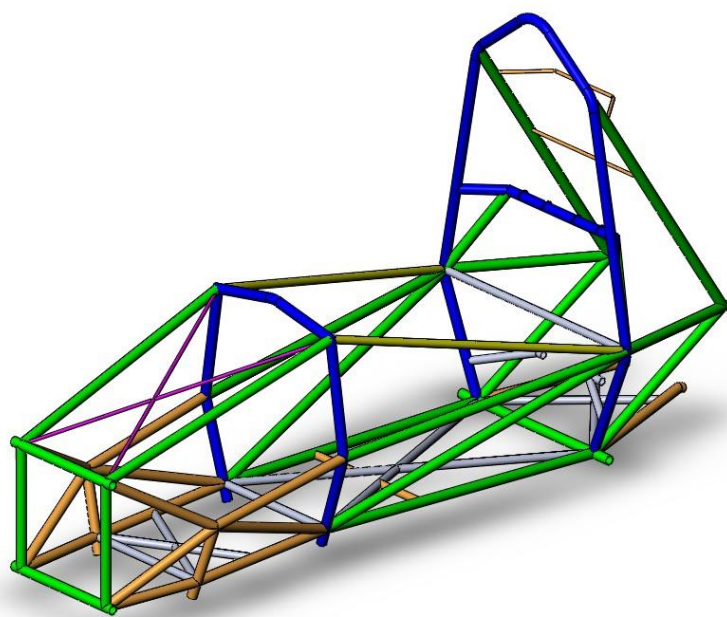


Рисунок 12 – Итоговая конструкция рамы

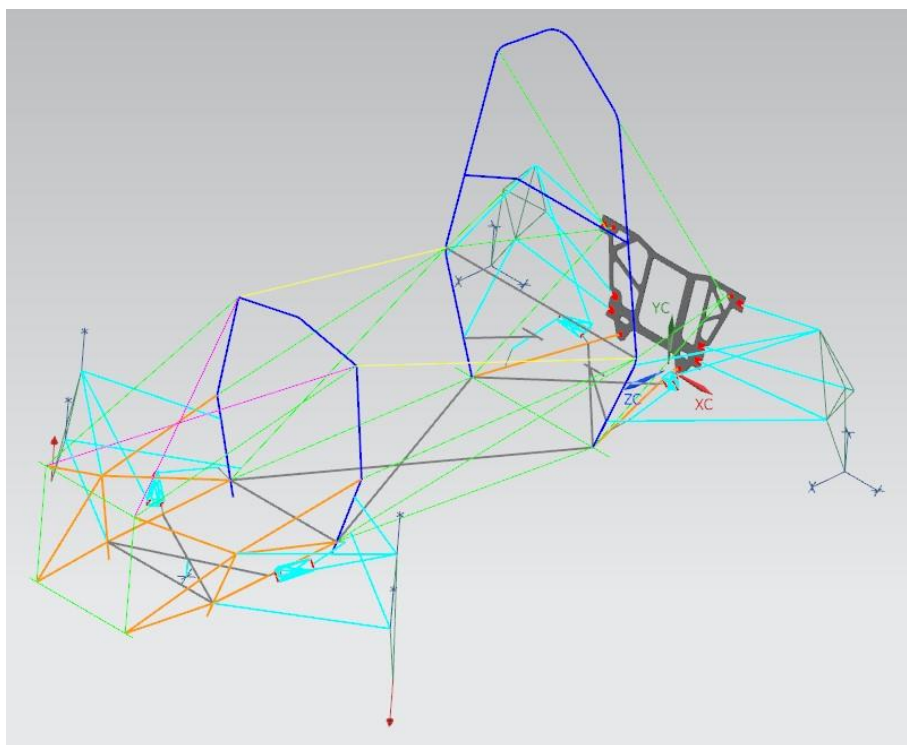


Рисунок 13 – КЭ модель итоговой конструкции рамы

Полученная в результате расчётов крутильная жёсткость составила 1459,1 Н·м/град. При этом за счёт добавления труб в передней части масса возросла на 276 грамм, но из-за замены труб в средней части конструкция стала легче на 390 грамм.

Заключение

В ходе проведённой работы были рассмотрены различные способы модернизации конструкции рамы гоночного болида класса «формула студент», проведены КЭ расчёты с целью выявить наиболее оптимальные пути доработки конструкции. В итоге были внесены конструктивные изменения, позволившие увеличить крутильную жёсткость рамы на 54,59%, сократив при этом массу конструкции на 115 грамм. Цель работы можно считать достигнутой.

Библиографический список:

1. Б.А. Афанасьев, Б. Н. Белоусов, Л. Ф. Жеглов, под ред. А. А. Полунгяна, учебник для вузов «Проектирование полноприводных колесных машин», издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008.
2. Шасси автомобиля: Конструкции подвесок. Райпель Й. / Пер. с нем. В. П. Агапова. – М: Машиностроение 1989.
3. Шасси автомобиля: Элементы подвески. Райпель Й. / Пер. с нем. А. Л. Карпухина; под ред. Г. Г. Гридясова – М: Машиностроение 1989.
4. A.D. Belegundu, L. Berke, S.N. Patnaik, An optimization based on the method of feasible directions, Springer-Verlag, 1995.
5. G.I.N. Rozvany, Topology Optimization in Structural Mechanics, Essen University, Springer-Verlag Wien GmbH, 1997.
6. Andrew Deakin, David Crolla, Juan Pablo Ramirez and Ray Hanley. The Effect of Chassis Stiffness on Race Car Handling Balance. School of Mech. Eng., The University of Leeds, 2000.
7. Bc. Pavol Petro. Torsional stiffness of the formula student chassis. Faculty of mechanical engineering, institute of automotive engineering, brno university of technolog, 2016.