

УДК 629.113

А.П. Фалалеев, доцент, канд. техн. наук,**Л.И. Соустова, аспирант***Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053**auto@sevntu14.sebastopol.ua***МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ ЖЕСТКОСТИ РАМЫ КАРТА С УЧЕТОМ ГЕОМЕТРИИ ГОНОЧНОЙ ТРАССЫ**

Предложена методика выбора рациональных значений жесткости рамы карта в условиях конкретной гоночной трассы из условия минимальной потери энергии движения на проскальзывание колес в повороте.

Ключевые слова: карт, жесткость рамы, управляемость.

Отсутствие дифференциала в конструкции карта предъявляет особые требования к раме, которая за счет собственных упругих деформаций должна обеспечить разгрузку заднего внутреннего колеса при прохождении поворота. Наилучшими условиями для поворота карта является разгрузка колеса, а не его полный отрыв от поверхности трека. При недостаточной разгрузке колеса мощность двигателя будет расходоваться на преодоление сил трения при проскальзывании этого колеса, ухудшая тягово-скоростные характеристики, генерируя дополнительные возмущающие силовые воздействия, ухудшая управляемость и курсовую устойчивость карта.

Большое количество настроечных параметров в конструкции карта позволяет существенно изменять его ходовые свойства в зависимости от условий трассы, но с другой стороны значительно усложняет процесс поиска оптимальных значений, делая настройку «на ощупь» практически невозможной.

Моделированию поведения шасси карта посвящены работы Д. Франчука. В работе [1] исследовано изолированное влияние настроечных параметров рулевой трапеции, таких как, продольный и поперечный углы наклона оси поворота колеса, длины цапфы на кинематическую высоту опускания передних колес. В работах [2–4] приведены практические рекомендации по настройке шасси карта для различных условий соревнований. В работе [2] оцениваются возможности дополнительных конструктивных настроек карта за счет изменения сечения приводного заднего вала. Практические рекомендации по изменению жесткости рамы приведены в работе [1]. В большинстве исследований содержится анализ влияния отдельных настроечных параметров и качественные рекомендации по настройке шасси под конкретные эксплуатационные условия. Из основных рекомендаций по настройке рамы можно выделить следующие:

- уменьшить жесткость рамы на мокрой трассе;
- уменьшить жесткость при неровной трассе;
- увеличить жесткость, если преобладают повороты большого радиуса;
- уменьшить жесткость при более извилистой трассе с радиусами большой кривизны.

В основе поиска рациональных значений настроечных параметров лежит предварительное математическое моделирование кинематики движения с целью определения области оптимальных решений, а затем более точная доводка в реальных условиях трассы.

В связи с вышесказанным задача моделирования и исследования влияния жесткости рамы карта на тягово-скоростные характеристики с учетом влияния условий эксплуатации представляется интересной и актуальной.

Моделирование движения карта в повороте.

Согласно условию движения карта в повороте без проскальзывания колес (рисунок 1), внутреннее колесо должно быть повернуто на угол ($\varphi_{ПВ}$), больший, чем угол поворота наружного колеса ($\varphi_{ПН}$), что обеспечивается конструкцией рулевой трапеции, а заднее внутреннее колесо, как указывалось выше, должно разгружаться (рисунок 2). В данной схеме упрощенно не принимается в учет боковой увод колес и боковое скольжение в связи с тем, что исследование посвящено жесткости кузова, но для создания полной модели движения автомобиля в повороте они, безусловно, играют важную роль.

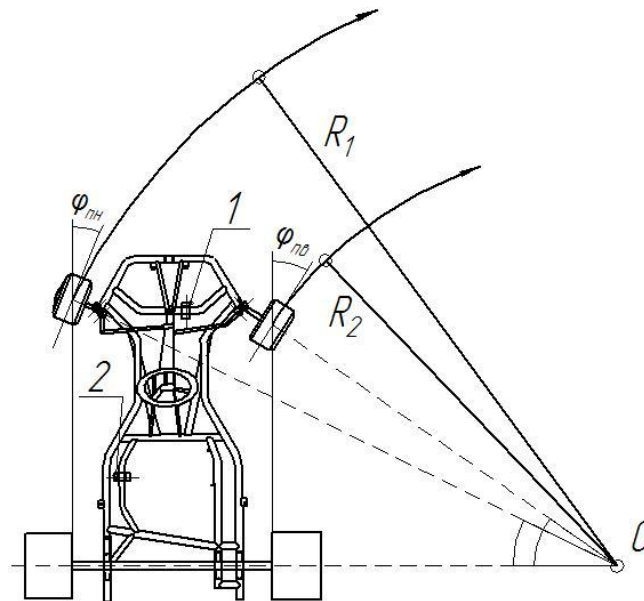


Рисунок 1 – Схема поворота карта

Для обеспечения разгрузки заднего внутреннего колеса переднее внутреннее колесо при повороте на угол φ опускается, а наружное переднее поднимается, тем самым приподнимая переднюю внутреннюю часть карта. Величина вертикального перемещения передних колес (внутреннего $h_{пв}$ и наружного $h_{пн}$) зависит от углов наклона осей поворота управляемых колес и плеча обкатки колеса $R_{\gamma\beta}$.

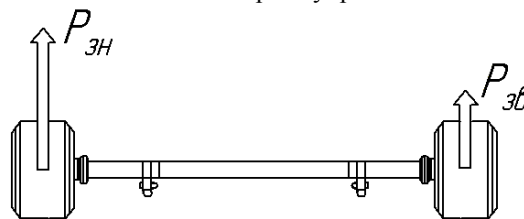


Рисунок 2 – Разгрузка заднего внутреннего колеса карта при повороте

Для определения величины кинематического вертикального перемещения колеса в повороте при не нулевом значении поперечного угла наклона оси колеса γ , продольном угле наклона оси поворота колеса β и не нулевом плече обкатки $R_{\gamma\beta}$ рассмотрим графическую модель перемещения колеса карта при его повороте (рисунок 3).

При повороте колеса относительно шкворня центр пятна контакта колеса (точка В) описывает окружность (1) радиусом $R_{\gamma\beta}$ с центром в точке O_1 :

$$\begin{cases} x_1 = R_{\gamma\beta} \cdot \cos \varphi; \\ y_1 = R_{\gamma\beta} \cdot \sin \varphi; \\ z_1 = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где φ – угол поворота колеса.

В системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$ окружность лежит в плоскости $O_1X_1Y_1$, а ось вращения O_1A совпадает с осью O_1Z_1 .

Для перехода к системе координат $AX_2Y_2Z_2$ выполним параллельный перенос системы координат по оси O_1Z_1 на расстояние O_1A .

Тогда в системе координат $AX_2Y_2Z_2$ окружность можно параметрически описать следующим образом:

$$\begin{cases} x_2 = x_1 = R_{\gamma\beta} \cdot \cos \varphi; \\ y_2 = y_1 = R_{\gamma\beta} \cdot \sin \varphi; \\ z_2 = z_1 + L \cdot \cos \varepsilon = L \cdot \cos \varepsilon. \end{cases} \quad (2)$$

Величины R_{γ_β} , ε , L находятся из геометрических построений (рисунок 3) и не приводятся в статье в виду их громоздкости.

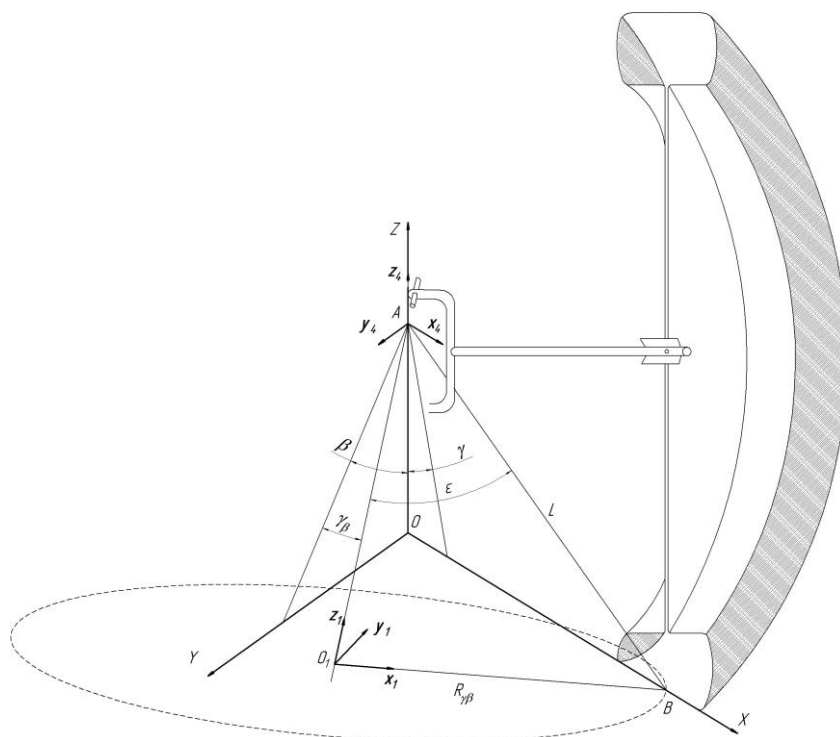


Рисунок 3 – Расчетная схема перемещения колеса карта при его повороте

Выполним поворот системы координат $AX_2Y_2Z_2$ относительно оси AY_2 на угол $(-\gamma_\beta)$:

$$\begin{vmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{vmatrix} = |A| \cdot \begin{vmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{vmatrix}, \quad (3)$$

где $|A| = \begin{vmatrix} \cos \gamma_\beta & 0 & -\sin \gamma_\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma_\beta & 0 & \cos \gamma_\beta \end{vmatrix}$ – матрица поворота относительно оси AY_2 .

Для перехода к системе координат $AX_4Y_4Z_4$, параллельной системе координат $OXYZ$, повернем систему $AX_3Y_3Z_3$ на угол $(-\beta)$ относительно оси AX_3 :

$$\begin{vmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \end{vmatrix} = |B| \cdot \begin{vmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{vmatrix} = |B| \cdot |A| \cdot \begin{vmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{vmatrix} = |C| \cdot \begin{vmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{vmatrix}, \quad (4)$$

где $|B|$ – матрица поворота относительно оси AX_3 на угол $(-\beta)$.

$$|B| = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{vmatrix}.$$

Матрица перехода из системы координат $O_1X_1Y_1Z_1$ к системе $AX_4Y_4Z_4$ примет вид:

$$\begin{vmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \end{vmatrix} = |C| \cdot \begin{vmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \gamma_\beta & \sin \gamma_\beta \cdot \sin \beta & -\sin \gamma_\beta \cdot \cos \beta \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ \cos \gamma_\beta \cdot \sin \gamma_\beta & -\cos \gamma_\beta \cdot \sin \beta & \cos \gamma_\beta \cdot \cos \beta \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Окончательно искомое положение колеса по вертикальной оси при повороте найдем из (5) в виде

$$h = z_4 = \cos \gamma_\beta \cdot \sin \gamma_\beta \cdot R_{\gamma_\beta} \cdot \cos \varphi - \cos \gamma_\beta \cdot \sin \beta \cdot R_{\gamma_\beta} \cdot \sin \varphi + \cos \gamma_\beta \cdot \cos \beta \cdot L \cdot \cos \varepsilon. \quad (6)$$

Разгрузка заднего колеса автомобиля пропорциональна сумме вертикальных перемещений передних колес Δh , при этом коэффициент пропорциональности характеризует диагональную жесткость рамы. Рама карта работает в области упругих деформаций и разгрузка заднего внутреннего колеса при подъеме переднего внутреннего может быть представлена в виде

$$P_{B.3} = P_0 - B \cdot \Delta h, \quad (7)$$

где $P_{B.3}$ – вес на внутреннем заднем колесе в повороте; B – коэффициент диагональной жесткости рамы.

Сумма вертикальных перемещений передних колес Δh :

$$\Delta h = h_{H.П} + h_{B.П}, \quad (8)$$

где $h_{B.П}, h_{H.П}$ – вертикальные кинематические перемещения центров пятна контакта передних внутреннего и наружного колес, соответственно, с трассой в повороте в системе координат $AX_4Y_4Z_4$.

Картинговые трассы, в отличие от кольцевых трасс, характеризуются переменными радиусами поворотов, поэтому в качестве целевой функции при определении рациональной жесткости рамы предлагается использовать работу пробуксовки заднего внутреннего колеса карта в повороте, рассчитанную для каждого участка трассы. Жесткость рамы карта, позволяющая потратить наименьшее количество энергии на пробуксовку можно считать оптимальной для данной трассы. Учитывая, что в силу конструктивных особенностей картов жесткость рамы регулируется дискретно (хомутами), то на практике зачастую невозможно точно реализовать оптимальные значения. В реальных условиях комбинация хомутов, обеспечивающая наименьшую работу пробуксовки, может считаться наиболее рациональным вариантом настройки рамы на данную трассу.

Суммарная работа пробуксовки внутреннего заднего колеса карта в поворотах всей трассы может быть представлена:

$$A = \sum_{i=1}^n \int_{S_i}^{S_{i+1}} P_{B.3} \cdot dS = \sum P_{B.3i} \cdot S_i, \quad (9)$$

где S_i – длина кривой i -го участка трассы.

Экспериментальная проверка модели.

Выбор рациональных настроек жесткости рамы карта АКУ-83 проводился для траектории трассы «Чайка», г. Киев (рисунок 5). Для расчетов принимаем длину цапфы $C = 150$ мм, радиус колеса $R_k = 130$ мм – для шины YDS 4,5/10.0-5, $\beta = 10^\circ$, $\gamma = 11^\circ$.

Тогда значение $h_{B.П}$ для внутреннего переднего колеса найдем из (6) в виде

$$h_{B.П} = -30,136 \cdot \sin(\varphi_B) + 32,99 \cdot \cos(\varphi_B) + 32,99. \quad (10)$$

Аналогичным образом определим значение $h_{H.П}$ для наружного переднего колеса:

$$h_{H.П} = -30,136 \cdot \sin(\varphi_H) + 32,99 \cdot \cos(\varphi_H) + 32,99. \quad (11)$$

Жесткость рамы изменялась за счет установки хомутов 1 и 2 (рисунок 1). Коэффициенты диагональной жесткости рамы определены эмпирически и для рамы АКУ-83 имеют следующие значения: $B_1 = 10,0$ (оба хомут), $B_2 = 8,13$ (только задний хомут), $B_3 = 6,84$ (только передний хомут), $B_4 = 5,02$ (без хомутов).

Для всех криволинейных участков трассы были построены идеальные траектории прохождения поворотов и их протяженность, определены углы поворота внутреннего и наружного передних колес, соответствующие этим траекториям, рассчитано абсолютное значение разгрузки заднего внутреннего колеса и работа пробуксовки. Условно угол поворота колеса принимался постоянным на протяжении всего криволинейного участка.

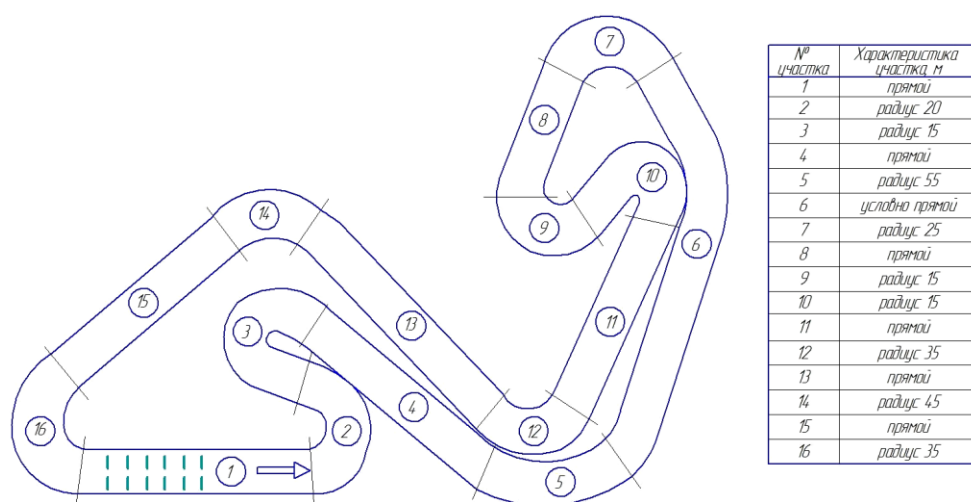


Рисунок 5 – Схема картинговой трассы «Чайка» (г. Киев)

Результаты расчета сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты расчета

№ участка	Угол поворота $\varphi, ^\circ$	Длина участка $S, м$	Работа пробуксовки внутреннего колеса $A, Дж$			
			Оба хомута	Задний хомут	Передний хомут	Без хомутов
2	43	45	-43	3835	6511	10286
3	45	40	-903	2706	5196	8709
5	21	45	10641	12522	13820	15650
6	25	25	4837	6083	6942	8155
7	40	35	1101	3906	5841	8570
9	45	35	-790	2368	4546	7621
10	45	40	-903	2706	5196	8709
12	34	30	2891	4931	6338	8324
14	30	30	4188	5985	7225	8974
16	34	40	3855	6575	8451	11098
Всего			24876	51621	70071	96102

По результатам расчетов наименьшую работу пробуксовки карт производит при установке обоих хомутов, но при этом на участках 2, 3, 9, 10 наблюдается отрыв заднего колеса, о чем свидетельствуют отрицательные значения в таблице 1. Для условий данной трассы наиболее рациональным является установка заднего хомута, не обеспечивающего наименьшую работу пробуксовки, но позволяющего сохранить контроль сцепления на всех участках. Следует отметить, что рама карта не всегда является симметричной конструкцией, как и распределенная на ней нагрузка. В этом случае необходимо учитывать индивидуальные особенности рамы при повороте вправо или влево.

Выводы.

Математическая модель кинематических перемещений колеса в повороте разработана с учетом ненулевых значений углов подвески и рулевого привода. Жесткость рамы карта является индивидуальной особенностью каждой конкретной конструкции и поэтому для моделирования ее поведения была выполнена экспериментальная оценка диагональной жесткости рамы карта АКУ-83. Это позволило осуществить подбор рациональных настроек рамы для условий гоночной трассы «Чайка».

Предлагаемая методика настройки карта позволяет учитывать особенности гоночных трасс, несимметричность конструкции рамы, значительно сокращая поиск оптимальных параметров в условиях каждой гонки. Результаты выбора рациональной жесткости могут быть также использованы при конструировании новых рам или модернизации существующих.

Предлагаемый критерий может быть в дальнейшем использован при подборе значений геометрии подвески и рулевого привода карта.

Библиографический список использованной литературы

1. Франчук Д.Н. Управляемость карта: теория и практика / Д.Н. Франчук. — К.: ООО «Иван Федоров», 2007. — 320 с.
2. Рихтер Т. Картинг / Т. Рихтер / пер. с польского Д.И. Юренкова. — М.: Машиностроение, 1988. — 400 с.
3. Тодоров М.Р. Картинг / М.Р. Тодоров. — М.: ДОСААФ, 1979. — 112 с.
4. Ерецкий М.И. Автомобиль карт / М.И. Ерецкий. — М.: ДОСААФ, 1976. — 64 с.

Поступила в редакцию 3.10.2010 г.

Фалалеев А.П., Соустова Л.И. Методика вибору оптимальної жорсткості рами карта з урахуванням геометрії гоночної траси

Запропоновано методику вибору раціональних значень жорсткості рами карта з врахуванням геометрії конкретної гоночної траси за умови мінімізації витрат енергії руху на проковзування коліс у повороті.

Ключові слова: карт, жорсткість рами, керованість.

Falaleev A.P., Soustova L.I. A methodology for choosing an optimal rigidity for a kart's frame taking into account the racing track geometry

A methodology for choosing an optimal rigidity for a kart's frame under conditions of a specific racing track by minimizing motion energy loss caused by the wheel sliding in turns is proposed.

Keywords: kart, frame rigidity, controllability.