

УДК 519.23:796.712

**ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ТРАССЫ НА ВЕЛИЧИНУ
ОТСТАВАНИЯ (GAP) В ГОНКАХ ФОРМУЛЫ-1**

Белоногов Матвей Александрович, студент гр. ИИБ-241, II курс
Картышева Елизавета Константиновна, студент гр. ИИБ-241, II курс
Научные руководители: Дягилева Анна Владимировна, к.н., доцент;
Кульпин Александр Геннадьевич, старший преподаватель
Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф.
Горбачева, г. Кемерово

Анализ количественных характеристик соревновательного процесса в Формуле-1 позволяет описать структуру результатов гонки. Ключевым показателем является временное отставание финишировавших пилотов от победителя (GAP), отражающее плотность борьбы, уровень конкуренции и влияние внешних факторов на итоговые позиции.

Конфигурация автодрома определяется инженерно-геометрическими и эксплуатационными параметрами: длиной круга, числом и радиусами поворотов, протяжённостью прямых, зонами DRS, шириной трассы, свойствами покрытия и перепадами высот. Эти характеристики формируют аэродинамическую нагрузку, режимы торможения, износ шин и стратегическую вариативность, влияя на темп и распределение временных разрывов. [2-6]

В существующих работах основное внимание уделяется аэродинамике, стратегиям пит-стопов и техническому регламенту, тогда как количественная оценка инфраструктурного фактора (конфигурации трассы) в контексте распределения итоговых GAP представлена ограниченно. Недостаточно изучена и доля её влияния при сопоставимых регламентных условиях. [6-7]

Научная проблема формулируется как проверка гипотезы о статистически значимом влиянии типа трассы на величину итогового временного отставания.

Цель исследования – оценка влияния конфигурации трассы на величину GAP в гонках Формулы-1.

Эмпирическую базу составили официальные результаты трёх этапов чемпионата мира Формулы-1 сезона 2025 года:

- Circuit Zandvoort (Нидерланды) (рис. 1);
- Baku City Circuit (Азербайджан) (рис. 2);
- Autódromo José Carlos Pace (Бразилия) (рис. 3).

Трассы выбраны по критерию различий конфигурации: технически извилистый автодром с ограниченными зонами обгона (Зандворт), городская скоростная трасса с протяжёнными прямыми участками (Баку) и комбинированная трасса с выраженными перепадами высот (Интерлагос).

В анализ включены значения временного отставания (GAP) финишировавших пилотов относительно победителя. Наблюдения, соответствующие сходам с дистанции (DNF), исключены.

Объёмы выборок:

- Зандворт – $n_1 = 17$;
- Баку – $n_2 = 19$;
- Интерлагос – $n_3 = 17$.

Общий объём выборки – $N = 53$ наблюдения.

Фактор исследования – тип трассы (номинальная переменная с тремя уровнями).

Зависимая переменная – величина временного отставания GAP (секунды, непрерывная количественная переменная). [1]

Проверялась гипотеза о равенстве средних значений величины GAP в трёх независимых группах.

H_0 : средние значения GAP равны.

H_1 : по крайней мере одно среднее отличается.

Уровень статистической значимости принят равным $\alpha = 0,05$.

Перед применением параметрических методов выполнена проверка статистических предпосылок: нормальности распределений, отсутствия грубых выбросов и гомогенности дисперсий.

Соответствие эмпирических распределений нормальному закону оценивалось критериями χ^2 Пирсона и Колмогорова–Смирнова. Во всех группах статистически значимых отклонений от нормального распределения не выявлено ($p > 0,05$). Графический анализ гистограмм и сопоставление эмпирических и теоретических частот не показали выраженной асимметрии или эксцесса. Предпосылка нормальности распределения внутри групп принята выполненной.

С учётом малых объёмов выборок ($n < 20$) выполнена проверка наличия грубых выбросов с использованием чисел Вестергарда и критерия Романовского. Критические значения не превышены, аномальные наблюдения отсутствуют.

Равенство дисперсий проверялось критерием Левена.

Нулевая гипотеза:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2$$

Альтернативная гипотеза: как минимум одна дисперсия отличается.

Результаты теста Левена представлены в таблице 1.

Таблица 1. Проверка гомогенности дисперсий (тест Левена)

Показатель	Значение
SS_{between}	1664,31
SS_{within}	7227,56
df_1	2

df_2	50
MS_{between}	832,16
MS_{within}	144,55
F	5,75
p-value	0,0056

Значение $p = 0,0056 < 0,05$ указывает на нарушение предпосылки гомогенности дисперсий. Применение классического однофакторного дисперсионного анализа нецелесообразно.

Для сравнения средних использован дисперсионный анализ Уэлча, устойчивый к неоднородности дисперсий. Статистика F вычислялась с поправкой Уэлча–Саттертуэйта, степени свободы аппроксимированы по соответствующей формуле. [8]

Результаты анализа Уэлча представлены в таблице 2.

Таблица 2. Дисперсионный анализ Уэлча

Показатель	Значение
F	20,55
df_1	2
df_2	32
p-value	< 0.001

Получено $F = 20,55$ при $p < 0,001$, что свидетельствует о статистически значимых различиях средних значений GAP. Нулевая гипотеза отвергнута.

Для оценки практической значимости рассчитан показатель ω^2 , характеризующий долю общей вариации зависимой переменной, объясняемую фактором. Результаты расчёта приведены в таблице 3.

Таблица 3. Размер эффекта (ω^2)

Показатель	Значение
SS_{between}	10 338,97
SS_{within}	24 340,75
SS_{total}	34 679,72
MS_{within}	486,82
df_{between}	2
ω^2	0,266

Значение $\omega^2 = 0,266$ означает, что 26,6% вариации величины GAP объясняется конфигурацией трассы. В соответствии с общепринятыми критериями интерпретации размер эффекта относится к крупным, что указывает на высокую практическую значимость выявленных различий. Конфигурация трассы выступает количественно значимым фактором формирования распределения временных разрывов. [9]

Для проверки устойчивости результатов применён непараметрический критерий Крускала–Уоллиса.

Н₀: распределения величины GAP в сравниваемых группах идентичны. Альтернативная гипотеза: по крайней мере одно распределение отличается.

Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4. Критерий Крускала-Уоллиса

Показатель	Значение
N	53
d_f	2
H	23,20
Критическое $\chi^2(0,05;2)$	5,99
p-value	< 0.001

Получено $H = 23,20$ при $p < 0,001$, что превышает критическое значение $\chi^2(2) = 5,99$ при $\alpha = 0,05$. Нулевая гипотеза отвергнута; различия распределений величины GAP между трассами статистически значимы. Совпадение результатов дисперсионного анализа Уэлча и критерия Крускала–Уоллиса подтверждает устойчивость выводов к выбору статистической процедуры.

В таблице 5 приведены описательные статистические характеристики величины GAP.

Таблица 5. Описательная статистика GAP

Трасса	n	Среднее (сек)	Стандартное отклонение	Дисперсия	95% ДИ (ниж.)	95% ДИ (верх.)
Зандворт	17	12.37	7.40	54.74	8.59	16.15
Баку	19	43.20	29.58	874.88	28.94	57.46
Интерлагос	17	41.16	21.96	482.32	29.91	52.41

95%-ные доверительные интервалы среднего значения GAP:

- Зандворт – (8,59; 16,15),
- Баку – (28,94; 57,46),
- Интерлагос – (29,91; 52,41).

Интервал для трассы Зандворт не перекрывается с интервалами Баку и Интерлагоса, что указывает на существенно более низкий уровень временных разрывов. Интервалы Баку и Интерлагоса частично перекрываются, что свидетельствует о сопоставимости средних значений GAP при различной дисперсии.

Разности средних значений составляют:

- Баку – Зандворт $\approx 30,83$ с;
- Интерлагос – Зандворт $\approx 28,79$ с;

- Баку – Интерлагос $\approx 2,04$ с.

На трассах Баку и Интерлагос среднее отставание превышает значения Зандворта примерно на 30 с.

Для интерпретации выявленных различий выполнен анализ геометрических и эксплуатационных характеристик трасс. Основные параметры представлены в таблице 6.

Таблица 6. Характеристика исследуемых трасс

Параметр	Зандворт	Баку	Интерлагос
Длина круга, км	4.259	6.003	4.309
Количество поворотов	14	20	15
Медленные повороты	4	12	5
Средние повороты	6	6	7
Быстрые повороты	4	2	3
Ширина трассы, м	13–15	7.5–13	11–15
Абразивность покрытия	высокая	низкая	средняя
Длинные прямые	отсутствуют	2.2 км	отсутствуют
Количество зон DRS	2	2	2
Тип трассы	постоянная	городская	постоянная

Результаты гонки:

1. PIA 1:12.271
2. VER +1.271
3. HAD +3.233
4. RUS +5.654
5. ALB +6.327

- Start Line
- Control Line
- S1 Sector 1 [110m before turn 7]
- S2 Sector 2 [150m before turn 11]
- T Speed Trap [95m before turn 1]
- DRS Detection1 [At entry to turn 10]
- DRS Detection2 [20m after turn 12]
- DRS Activation1 [50m after turn 10]
- DRS Activation2 [40m after turn 13]
- 14 Corner Numbers
- M22 Marshal Post
- 19 FIA Marshal Light No.

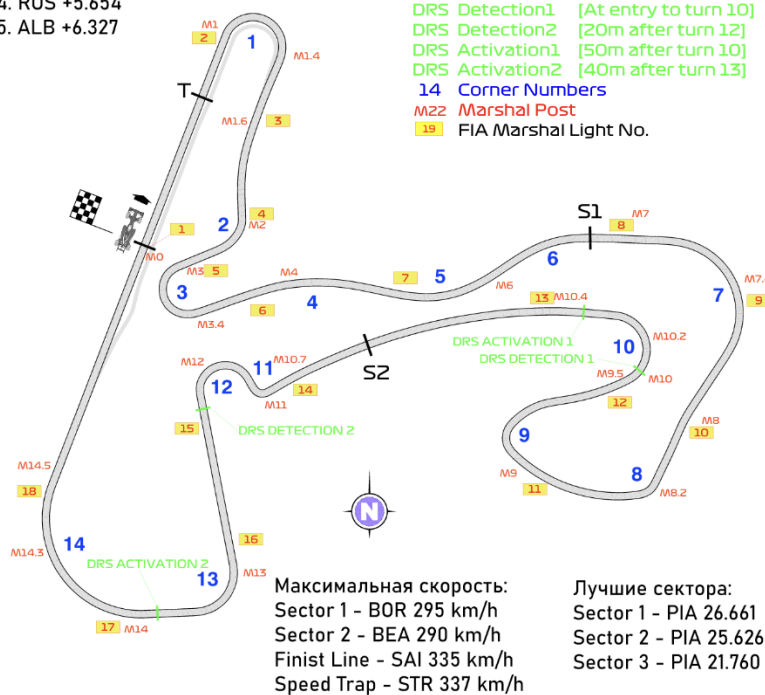


Рисунок 1. Конфигурация трассы Зандворт

Результаты гонки:

1. VER 1:43.388
2. RUS +14.609
3. SAI +19.199
4. ANT +21.760
5. LAW +33.760

Лучшие сектора:

- Sector 1 - VER 36.446
Sector 2 - VER 41.638
Sector 3 - NOR 24.655

Максимальная скорость:

- Sector 1 - HAD 224 km/h
Sector 2 - HUL 229 km/h
Finist Line - BEA 359 km/h
Speed Trap - NOR 333 km/h

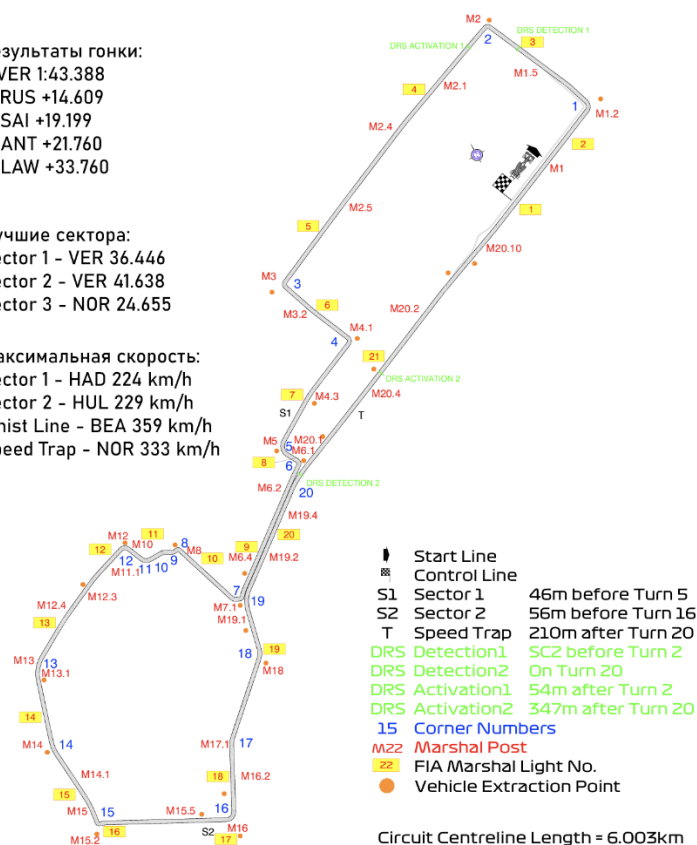


Рисунок 2. Конфигурация городской трассы Баку

Результаты гонки:

1. NOR 1:13.040
2. ANT +10.388
3. VER +10.750
4. RUS +15.267
5. PIA +15.749

Лучшие сектора:

- Sector 1 - ALB 18.386
Sector 2 - VER 36.746
Sector 3 - RUS 16.536

Максимальная скорость:

- Sector 1 - ALB 340 km/h
Sector 2 - RUS 263 km/h
Finist Line - SAI 339 km/h
Speed Trap - VER 335 km/h

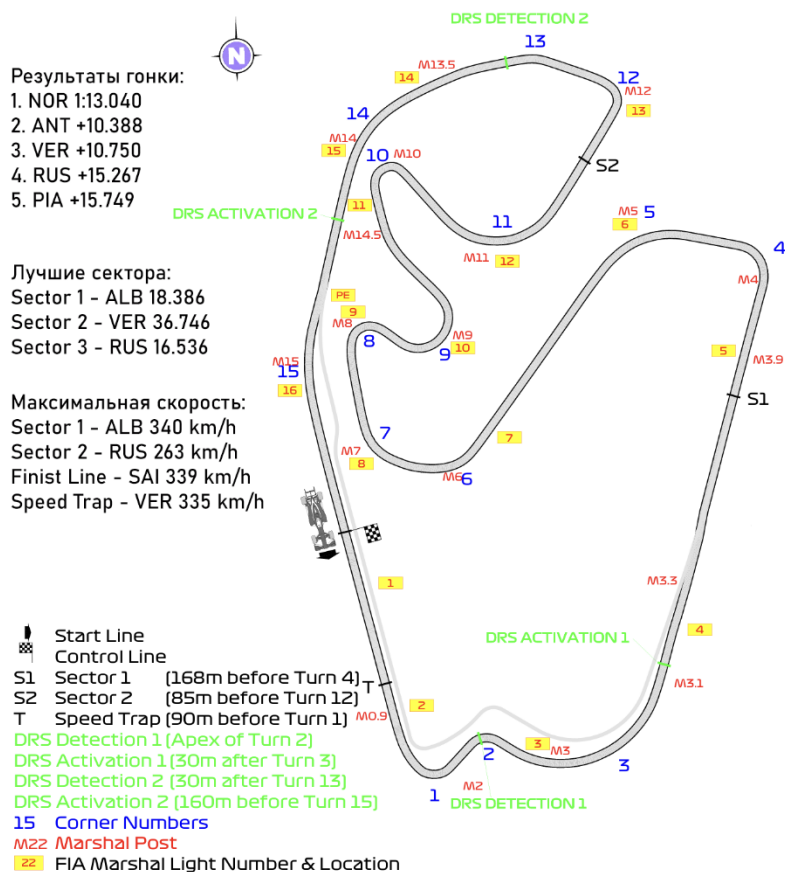


Рисунок 3. Конфигурация трассы Интерлагос

Для оценки влияния характеристик трассы использована линейная регрессионная модель методом наименьших квадратов. В модели зависимой переменной выступает GAP (сек.), в качестве факторов использованы длина трассы, количество медленных поворотов, наличие длинных прямых, температура трассы и число периодов SC/VSC.

Модель имеет вид:

$$GAP_i = \beta_0 + \beta_1 Length_i + \beta_2 SlowTurns_i + \beta_3 LongStraight_i + \beta_4 TrackTemp_i + \beta_5 SC_i + \varepsilon_i$$

Оценивание выполнено на выборке из 53 наблюдений, результаты представлены в таблице 7. Модель статистически значима (F-статистика = 11,36; $p < 0,001$) и объясняет 31,7% дисперсии зависимой переменной ($R^2 = 0,317$; скорректированный $R^2 = 0,289$).

Длина трассы оказывает отрицательное влияние на величину временного разрыва ($\beta = -1,44$; $p = 0,031$), что указывает на уменьшение разрывов на более протяжённых трассах. Количество медленных поворотов положительно связано с GAP ($\beta = 1,63$; $p = 0,023$), усиливая роль пилотажа и механического сцепления. Длинные прямые участки снижают величину разрывов ($\beta = -4,63$; $p = 0,001$), за счет аэродинамического следования и DRS. Температура трассы положительно связана с GAP ($\beta = 2,25$; $p < 0,001$), обусловленное ускоренной деградацией шин и дивергенцией стратегий. Наличие режимов Safety Car оказывает отрицательное влияние ($\beta = -7,76$; $p = 0,001$), сжимая пелетон.

Выявлена мультиколлинеарность геометрических параметров трассы (высокая обусловленность матрицы), а их детерминированность внутри групп ограничивает интерпретацию коэффициентов как причинных эффектов.

Таблица 7. Результаты многофакторного регрессионного анализа влияния характеристик трассы на GAP

Переменная	Коэффициент	Std. error	p-value
Length	-1.44	0.65	0.031
SlowTurns	1.63	0.69	0.023
LongStraight	-4.63	1.30	0.001
TrackTemp	2.25	0.55	<0.001
SC	-7.76	2.25	0.001
Intercept	-0.37	0.13	0.005
R^2	0.317		
N	53		

Результаты анализа показали, что среднее значение GAP на трассах Баку и Интерлагос примерно на 30 с превышает значение на трассе Зандворт. Это объясняется различной конфигурацией автодромов. Протяженная прямая

на трассе в Баку усиливает влияние максимальной скорости и эффективности системы DRS, способствуя увеличению дистанции между болидами, в то время как высокая абразивность покрытия на трассе Зандворт ускоряет износ шин, нивелируя технические преимущества отдельных команд и выравнивая темп пилотов, снижая разброс временных показателей. Узкие городские секции Баку повышают риск инцидентов, увеличивая вариативность результатов.

Анализ лучших времён по секторам показал распределение между разными пилотами и отсутствие однозначной связи между максимальной скоростью и результатом. Это указывает на необходимость сбалансированной настройки болида и комплексный характер формирования итогового результата.

Размер эффекта ($\omega^2 = 0,266$) показывает, что около четверти вариации GAP объясняется типом трассы. Практическая значимость связана с прогнозированием плотности борьбы, моделированием стратегий и оценкой динамики гонки. Исследование имеет ограничения: данные одного сезона, отсутствие учёта погодных условий и технических различий болидов, использование агрегированного итогового отставания без фазовой сегментации. [1]

Перспективы дальнейших исследований включают расширение выборки на несколько сезонов, увеличение числа трасс, многофакторный анализ с учётом погодных, стратегических и технических параметров, а также количественную оценку влияния длины прямых участков и числа зон DRS.

Список литературы

1. Fédération Internationale de l'Automobile. 2025 Formula One Sporting Regulations. – Paris : FIA, 2025.
2. Fédération Internationale de l'Automobile. 2025 Formula One Technical Regulations. – Paris : FIA, 2025.
3. Milliken W. F., Milliken D. L. Race Car Vehicle Dynamics. – Warrendale : SAE International, 1995. – 893 p. – ISBN 1-56091-526-9.
4. Katz J. Race Car Aerodynamics: Designing for Speed. – Cambridge : Bentley Publishers, 2016. – 280 p. – ISBN 978-0-8376-0142-7.
5. Jain A., Morari M. Computing the Racing Line Using Bayesian Optimization // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2020.
6. Belgaid A. Statistical Analysis of the Impact of FIA Regulations on Safety, Racing Dynamics, and Spectacle in Formula 1 // arXiv. – 2024.
7. Mastromarco C., Runkel M. Rule Changes and Competitive Balance in Formula One Motor Racing // Discussion Papers in Economics. – Munich : University of Munich, 2004.
8. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments. – Hoboken : Wiley, 2017. – 734 p. – ISBN 978-1-119-11347-8.
9. Lakens D. Calculating and Reporting Effect Sizes to Facilitate Cumulative Science: A Practical Primer for t-tests and ANOVAs // Frontiers in Psychology. – 2013. – Vol. 4. – Art. 863.