

Новые прикладные критерии колебательной и апериодической устойчивости движения колёс транспортных средств

Ю. А. Гурвич

Предпосылки к введению новых критериев устойчивости движения

Практика эксплуатации транспортных средств (автомобилей, тракторов и других самоходных машин с управляемыми осями (мостами)) показала, что иногда управляемые колеса совершают незатухающие колебания относительно шкворней (автоколебания или шимми), обладают недостаточной стабилизацией, интенсивно изнашиваются. В результате резко ухудшаются выходные характеристики всей машины – управляемость и устойчивость, плавность хода и т. д. Понижаются показатели безопасности движения транспортного средства и уменьшается продолжительность работы его деталей и узлов.

Поэтому исследованию выходных характеристик машин в зависимости от значений параметров моста, рулевой трапеции, колес с шинами и подвески (углов развала, схождения, наклона шкворней, длины продольных рычагов рулевой трапеции, цапф и балки, моментов инерции колес и балки, жесткости рулевой трапеции и пружин подвески, жесткостных коэффициентов катящихся шин и т. д.) посвящено большое число теоретических и экспериментальных работ специалистов различных стран мира, в том числе [1-21].

В результате разработаны математические описания (системы дифференциальных уравнений) движения и стабилизации управляемых колес различных машин. Причем, описание автоколебаний включает в себя: описание стабилизации [6-8] и уравнения неголономных связей катящегося эластичного колеса [1,3,4,15,16]. Получены многочисленные экспериментальные и расчетные данные, касающиеся взаимодействия колеса с опорной поверхностью, влияния различных параметров машин на их выходные характеристики (на их критерии). Предложены различные критерии устойчивости движения управляемых колес, плавности хода машины и т. д. В качестве критерия стабилизации предлагается использовать время возвращения повернутых управляемых колес в нейтральное положение [6-10].

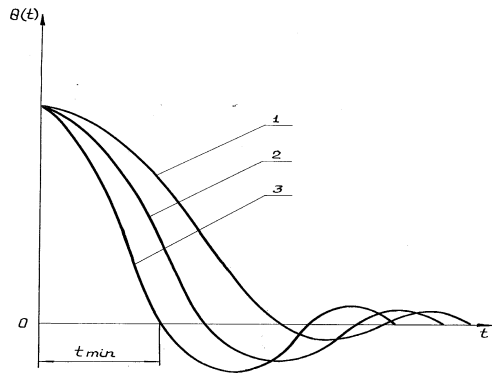


Рис. 1. Экспериментальные зависимости углов поворота управляемых колёс в функции времени [6,9,10]

Несмотря на то, что автоколебания - нелинейный процесс, в практике автостроения используются линеаризованные описания [1-4], которые в отличие от нелинейных описаний правильно отражают не весь процесс колебаний, а лишь его начальный период. Решая задачу об устранении автоколебаний управляемых колес на стадии проектирования машин, не имеет смысла проследивать после начального периода, где нелинейности практически не влияют на характер движения, весь последующий процесс колебаний вплоть до наступления установившегося режима - колебаний с постоянной амплитудой (именно здесь нелинейности играют решающую роль). Следовательно, при проектировании моста, обладающего минимальной тенденцией к самовозбуждению колебаний нужно знать только начальный период развития колебаний [1, 2, 4], с помощью которого можно установить характер движения управляемых колес (затухающие или нарастающие движения).

Задача проектирования управляемых мостов машин, несмотря на многокритериальность, до сих пор рассматривается как однокритериальная (причем, существующие критерии устойчивости не учитывают показатели стабилизации, среднее время реакции водителя и т. д.). Оптимизируют лишь несколько параметров математического описания при каком-то одном (фиксированном) значении скорости машины, поочередно варьируя величину одного из параметров при неизменных значениях остальных [15,16,19]. При этом строятся области устойчивости и неустойчивости как на плоскости (зависимость скорости движения машины от множества значений, придаваемых какому-нибудь одному из параметров [1] рис.2), так и в пространстве (скорость в функции всех значений, придаваемых уже каким-нибудь двум из параметров [4], где впервые приведена пространственная область устойчивости влияния демпфирования и жесткости стойки на скорость самолета, движущегося по взлетно-посадочной полосе (рис.3)). Авторы [4] также установили, что для исследования устойчивости систем с линеаризованными неголономными связями можно применять все известные критерии устойчивости линеаризованных описаний Рауса-Гурвица, Михайлова, Найквиста, метод Д-разбиения и т.д.

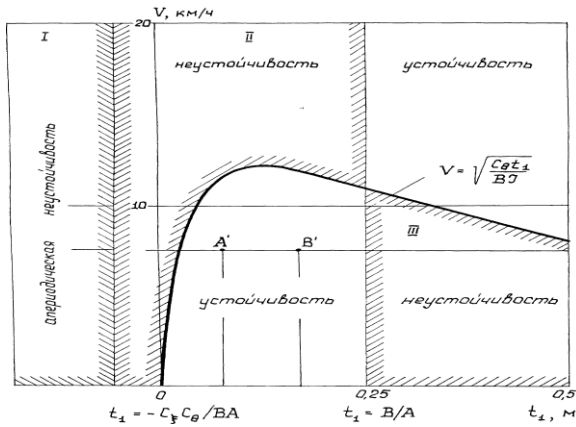


Рис. 2. Зоны устойчивости движения колеса шасси самолета (в случае варьирования величины одного параметра [1]): t_1 - вынос переднего колеса шасси самолета относительно стойки, J - момент инерции колеса относительно вертикальной оси

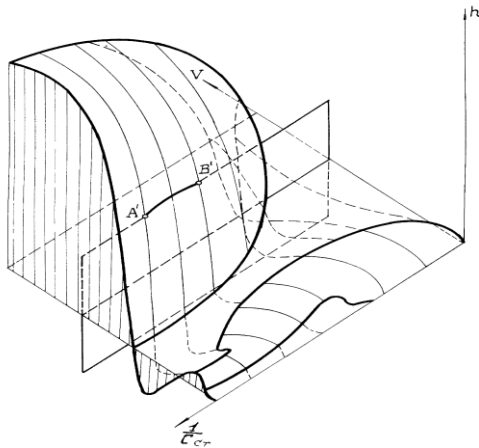


Рис. 3. Пространственная область устойчивости колеса шасси самолета (в случае варьирования величины двух параметров [4]): $1/C_{ст}$ - мягкость стойки, h - коэффициент демпфирования

При большом числе варьируемых параметров эта методика, заключающаяся в переборе всех значений в узлах n -мерной сетки (n – мерного пространства параметров) не эффективна, даже, несмотря на применение ЭВМ при одном значении скорости движения машины. Тем более нет возможности выбрать такую совокупность значений параметров описания шимми, при которой диапазон скоростей устойчивого движения машины содержит в себе все ее рабочие и транспортные скорости.

К этому добавляется еще одно негативное обстоятельство. Дело в том, что исследовать устойчивость линеаризованных описаний шимми, применяя теоремы Ляпунова или один из критериев Рауса - Гурвица, Михайлова, Найквиста, метод Д-разбиения и т.д., можно лишь качественно. Тем самым можно определить множество значений варьируемого параметра, при которых система устойчива (неустойчива).

Для того, чтобы выполнить количественный анализ, т.е. определить, например, какой из точек A' или B' зоны устойчивости, изображенных на рис. 2-3 отдать предпочтение, необходимо провести дополнительное исследование. Однако в литературе отсутствуют эффективные методы количественного анализа устойчивости движения управляемых колес. Известные методы теории автоматического регулирования - методы приближенных оценок устойчивости движения по качеству переходного процесса: частотные, корневые и интегральные методы [5] - исключительно трудоемки, тяжело поддаются алгоритмизации, поэтому реализация их на ЭВМ затруднена. Эти методы практически не приспособляются к учету особенностей процесса движения управляемых колес.

Поэтому, отечественными и зарубежными исследователями были предложены критерии количественной оценки устойчивости (неустойчивости) движения управляемых колес.

1. Первый критерий - отношение последовательных амплитуд A_i/A_{i+1} (применялся в работах американских авторов [11])

$$F_{01} = A_i/A_{i+1}. \quad (1)$$

2. Второй критерий - логарифмический декремент колебаний (применялся в работах [12-14])

$$F_{02} = \ln (A_i / A_{i+1}). \quad (2)$$

3. Третий критерий - время или количество циклов, за которое амплитуда колебаний уменьшится до величины, составляющей определенную долю первоначальной (использовался в работах [11, 15,16])

$$F_{03} = \frac{T}{\frac{A_i}{A_{i+1}}}, \quad \text{где } T\text{-период колебаний.} \quad (3)$$

4. Четвертый критерий - величина среднеквадратичного отклонения колес относительно шкворней (использовался в работах [17-19]):

$$F_{04} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \bar{\theta})^2 / (n - 1)} \quad i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

где $\bar{\theta}$ - среднее арифметическое результатов n измерений угла отклонения управляемых колес относительно шкворней; $\bar{\theta}_i$ - результат i -га измерения.

Обратим внимание на определенную условность оценки устойчивости (неустойчивости) движения управляемых колес критериями F_{01} , F_{02} и F_{04} .

Значения первого критерия (1) для кривых 1 и 2, изображенных на рис. 4 - одинаковы ($A_1/A_1' = A_2/A_2'$). Это не позволяет установить, какой из процессов 1 или 2 затухает быстрее.

Значение второго критерия (2) для кривых типа 1 и 2 (см. рис. 4) - равны ($\ln (A_1/A_1') = \ln (A_2/A_2')$), что также не позволяет установить, какой из процессов 1 или 2 предпочтительнее.

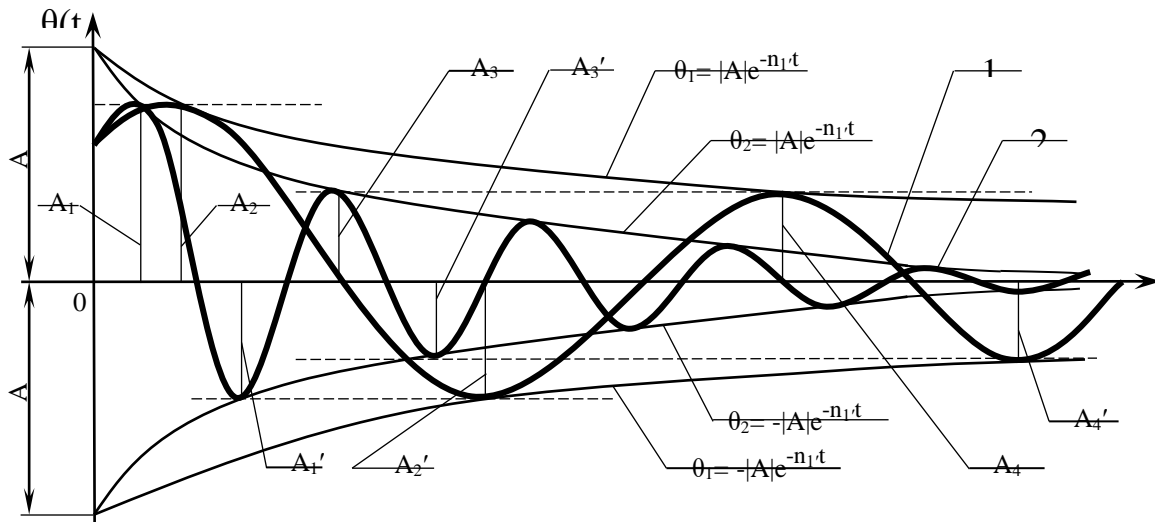


Рис. 4. К оценке работы первого (1) и второго (2) критериев

На условность оценки темпа затухания логарифмическим декрементом колебаний [20] указали в [21]. Анализируя виброграммы двух различных процессов затухающих колебаний (рис. 5), авторы пришли к выводу, что затухание процесса 1 происходит медленнее, чем затухание процесса 2, хотя логарифмический декремент в первом случае больше, чем во втором. Объясняется это тем, что "... логарифмический декремент колебаний характеризует затухание не за объективную единицу времени (например, за одну секунду), а за один период колебаний" [21, с.304].

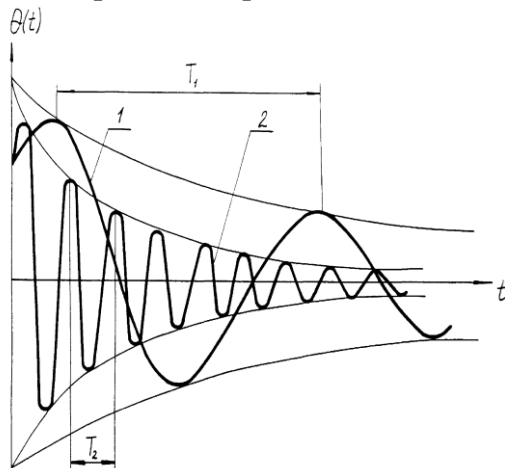


Рис. 5. К оценке работы второго (2) критерия [21]

Значения четвертого критерия (4) для затухающих и нарастающих колебаний (1 и 2) или для затухающих и нарастающих апериодических движений (3 и 4), изображенных на рис. 6, будут соответственно равны, что не позволяет установить, какому процессу (затухающему или нарастающему) соответствует величина критерия F_{04} .

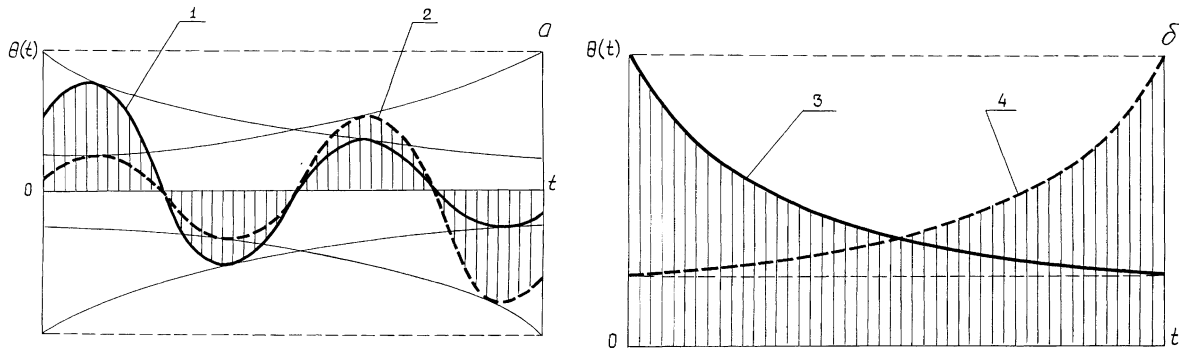


Рис . 6. К оценке работы четвертого (4) критерия:
 а - колебательные движения управляемых колес;
 б - аperiodические движения управляемых колес

Третий критерий (3) способен оценивать только колебательные (затухающие или нарастающие) движения управляемых колес, изображенные на рис. 4 - 6.

В настоящее время в отечественном автотракторостроении отсутствуют методики расчетного определения совокупности параметров управляемых мостов, рулевых трапеций и подвесок, которые позволили бы в короткий срок и с малыми затратами добиваться наилучшей, хотя бы одной из выходных характеристик во всем скоростном диапазоне движения машин. Поэтому совокупности параметров моста, рулевой трапеции и подвески вынуждены определять путем многочисленных и дорогих экспериментов. Тем не менее, полной уверенности, что при этих параметрах моста будут реализованы его потенциальные возможности, нет.

Одной из причин отсутствия такой методики заключается в том, что каждым из приведенных четырех критериев невозможно учесть, некоторые особенности движения управляемых колес. Например, несмотря на то, что система дифференциальных уравнений движения управляемых колес включает в себя и описание стабилизации [6-8], этими критериями нельзя одновременно учесть свойства устойчивости и стабилизации, среднее время реакции водителя, а также обеспечить количественную оценку затухающих (нарастающих) колебательных и аperiodических движений управляемых колес.

Критерии колебательной и аperiodической устойчивости движения и стабилизации управляемых колес

Так как процесс колебаний управляемых колес характеризуется одновременно показателями устойчивости и стабилизации, иногда противоречащими друг другу, то предполагается компромисс между этими показателями (с учетом среднего времени реакции водителя - показатель безопасности движения) характеризовать двумя критериями.

Первый — обеспечивает оценку только колебательных движений управляемых колес. Второй критерий необходим для определения характеристики аperiodических движений.

Рассмотрим вопросы формирования первого критерия, который должен обладать следующими свойствами: 1. Не противоречить теории линейных колебаний. 2. Отражать основные свойства процесса стабилизации управляемых колес. 3. Учитывать среднее время реакции водителя [4]. Отличать “медленные” и “быстрые” движения управляемых колес относительно шкворней.

Под свойством критерия не противоречить теории линейных колебаний понимается следующее. Во-первых, предлагаемый критерий не должен противоречить логарифмическому декременту колебаний, с помощью которого определяется темп затухания любых колебаний [20] - линейных (для них логарифмический декремент является постоянным числом) и нелинейных (для которых логарифмический декремент не является постоянным числом, а постепенно меняется). Во-вторых, предлагаемый критерий будет аппроксимирован экспонентой в связи с тем, что в основу логарифмического декремента колебаний положена экспоненциальная функция. В-третьих, с помощью предлагаемого критерия можно оценить колебания управляемых колес относительно шкворней с увеличивающейся амплитудой (нарастающие или расходящиеся колебания - признак неустойчивости движения управляемых колес или склонности к автоколебаниям колес, поведение которых описывается системой линеаризованных дифференциальных уравнений движения).

Согласно второму свойству предлагаемый критерий должен отразить основное качество стабилизации, характеризующееся временем возвращения повернутых колес в нейтральное положение. Причем, основное качество стабилизации необходимо использовать в критерии колебательного движения по следующим причинам. Во-первых, в отличие от траекторий апериодического движения, которые зачастую не пересекают ось времени, траектории колебательных движений пересекают ось времени. Это позволяет определить то минимальное время, за которое траектория колебательного движения управляемых колес пересекает ось времени. Во-вторых, качество стабилизации будет сначала учитываться в критерии колебательных движений из-за отсутствия в литературе критерия (критериев) апериодических движений (их еще нужно создавать).

Подробное объяснение третьего свойства (почему в критерии колебательного движения должно учитываться среднее время реакции водителя) будет сделано в будущем при выполнении анализа совместной работы критериев колебательного и апериодических движений (при стыковке или сшивании этих двух критериев). Сейчас только констатируем, что среднее время реакции водителя (равное 0,5 ... 0,7 с) приблизительно равно по времени двум периодам T^* автоколебаний управляемых колес относительно шкворней, совершающимися с наиболее часто встречающимися на практике частотами (равными 3...5 Гц).

Объяснение четвертого свойства. Сначала поясним, что понимается под “медленными” и “быстрыми” движениями управляемых колес относительно шкворней. Допустим, что мост с управляемыми колесами имеет логарифмический декремент колебаний, равный десяти, то есть $n_1 \cdot T = 10$.

n_1	T	$n_1 T$
1	10	10
.	.	.
.	.	.
.	.	.
10	1	10

Из таблицы следует, что величину, равную десяти, можно получить бесчисленным количеством способов. При этом верхняя строчка таблицы и другие строчки, которые имеют большую величину периода колебаний T , соответствуют “медленному” движению управляемых колес. В противном случае, все наоборот: нижняя строчка и другие строчки с маленьким значением периода T соответствуют “быстрому” движению управляемых колес.

При наезде транспортного средства управляемыми колесами на неровность при скорости движения, например, $V=10$ м/с произойдет следующее. При “быстрых” движениях управляемых колес (см. кривые 2 на рис.4-5) и при ширине дорожной полосы движения, равной трем метрам машина не успеет сойти с полосы. При “медленных” движениях управляемых колес (см. кривые 1 на рис.4-5) все – наоборот.

На основании изложенного предложим в качестве первого критерия следующую зависимость:

$$F_1 = \frac{1}{n_{11}} = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{|A_1| + |A_2|}{|A_5| + |A_6|}}, \quad (5)$$

где n_{11} - обобщенный коэффициент демпфирования (затухания) системы;

t_1 и $t_2 = 2T^* + t_1$ - время, за которое траектория колебательного движения управляемых колес относительно шкворней достигает соответственно первого и пятого экстремумов; T^* - период колебаний; $|A_1|, A_2|$ и $|A_5|, A_6|$ - соответственно модули амплитуд первого и третьего колебаний (модули амплитуд введены из-за специфики счета на ЭВМ),

Критерий F_1 с помощью величины, обратной обобщенному коэффициенту демпфирования колебательной системы, одновременно оценивает своим числителем основное качество стабилизации (с учетом среднего времени реакции водителя), а знаменателем - тенденции к нарастанию или затуханию колебаний. Если знаменатель больше нуля, то имеет место колебательная устойчивость (затухание колебаний), если меньше нуля, то - колебательная неустойчивость (нарастание колебаний).

Определим свойства критерия F_1 . В случае затухающих колебаний груза на пружине при наличии демпфера логарифмический декремент колебаний равен $n'_1 T/2 = \ln(A_i/A_{i+1})$. Из этого выражения имеем:

$$\frac{1}{n'_1} = \frac{T^*}{2 \ln \frac{A_i}{A_{i+1}}}. \quad (6)$$

Легко доказать (доказательство из-за простоты не приводится), что зависимость (7) идентична выражению (6)

$$\frac{1}{n'_1} = \frac{2T^*}{\ln \frac{A_i + A_{i+1}}{A_{i+4} + A_{i+5}}} . \quad (7)$$

Сравнивая правые части критерия F_1 и выражения (7), отметим их полную аналогию. Это позволяет утверждать, что критерий F_1 обладает всеми свойствами, которые были положены в основу при его формировании.

Учет среднего времени реакции водителя в критерии F_1 существенно расширил область его применения. Теперь критерий может использоваться не только для точной оценки всех линейных колебаний управляемых колес, поведение которых характеризуется линеаризованными дифференциальными уравнениями движения), но и для более точной (по сравнению с критерием (6), тем не менее, приближенной (в определенном смысле осредненной величиной) оценки нелинейных колебаний (автоколебаний).

Оценим возможности критерия F_1 . Для этого приведем два примера, в которых осуществляется анализ решений дифференциального уравнения движения груза на пружине при наличии демпфера: $\ddot{x} + 2n'_1 + C'_1/m'_1 x = 0$.

Первый пример. При одинаковых начальных условиях $X_{t=0} = X_0$, $\dot{X}_{t=0} = \dot{X}_0$ и различных сочетаний значений параметров C_{1i} и m'_{1i} ($1, n$) колебательной системы будем получать различные решения $x_i = x_i(t)$, $i = 1, n$. Для решений $x_1 = \theta_1$ и $x_2 = \theta_2$, изображенных на рис. 4 (здесь $i = 1, 2$), значения критерия F_{11} будут составлять:

$$F_{11} = \frac{2T_1}{\ln \frac{A_2 + A'_2}{A_6 + A'_6}}, \quad F_{12} = \frac{2T_2}{\ln \frac{A_1 + A'_1}{A_5 + A'_5}}.$$

Знаменатели этих двух критериев равны, так как $A_2 = A_1$, $A'_2 = A'_1$, $A_6 = A_5$, $A'_6 = A'_5$. Числитель первого критерия больше, чем у второго. Следовательно, величина второго критерия меньше величины первого. Так как $F_{11} < F_{12}$, то процесс, отображаемый кривой 2, затухает быстрее, чем процесс 1.

Второй пример. Оценим с помощью критерия F_1 два различных процесса затухающих колебаний, изображенных на рис. 5, которые не были оценены логарифмическим декрементом колебаний [21]. Согласно этому рисунку примем, что $T_1 \approx 6T_2$.

Тогда

$$F_{11} = \frac{12T_1}{\ln \frac{A_2 + A'_2}{A_6 + A'_6}}, \quad F_{12} = \frac{2T_2}{\ln \frac{A_1 + A'_1}{A_5 + A'_5}}.$$

Так как

$$\ln \frac{A_2 + A_2'}{A_6 + A_6'} > \ln \frac{A_1 + A_1'}{A_5 + A_5'}$$

но не в шесть раз, а меньше, то $F_{12} < F_{11}$. Следовательно, процесс, отображаемый кривой 2, затухает быстрее, чем процесс 1.

Таким образом, с помощью критерия F_1 можно однозначно оценить все те затухающие процессы, которые не были оценены логарифмическим декрементом колебаний.

Теперь оценим возможности критерия F_1 на примере, в котором выполнен анализ решений линеаризованных дифференциальных уравнений движения управляемых колес. Здесь, как и в первом примере при одинаковых начальных условиях $\theta_{t=0} = \theta_0$ и $\dot{\theta}_{t=0} = \dot{\theta}_0$ (речь идет только о повороте управляемых колес относительно осей шкворней) и различных совокупностях значений параметров описания шимми $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j, \dots, \lambda_j; j = 1, k$ будем получать различные решения $\theta_i = \theta_i(t), i = 1, n$. Выделенные три решения из n решений, изображены на рис. 7. Для процессов 1 и 3 знаменатель критерия F_1 , больше нуля. Поэтому в обоих случаях имеет место затухающий процесс - колебательная устойчивость. Для процесса 2 знаменатель критерия F_1 меньше нуля, что говорит о расходящемся процессе - колебательная неустойчивость. Минимальное значение критерия F_1 соответствует первому процессу.

Допустим, что нам необходимо проанализировать те решения математического описания движения управляемых колес относительно шкворней, которые соответствуют их различным апериодическим движениям, и выбрать из них наилучшее. Сначала уточним, что мы понимаем под термином "наилучшее апериодическое движение". В самом деле, какой из апериодических процессов, изображенных на рис. 8. является наилучшим? На наш взгляд, наилучшим процессом будет тот, который для данного промежутка времени t - имеет:

- минимальную площадь под кривой $\theta_i = \theta_i(t), i = 1, 3;$
- минимальное значение ординаты θ_{1i} в конце промежутка времени t .

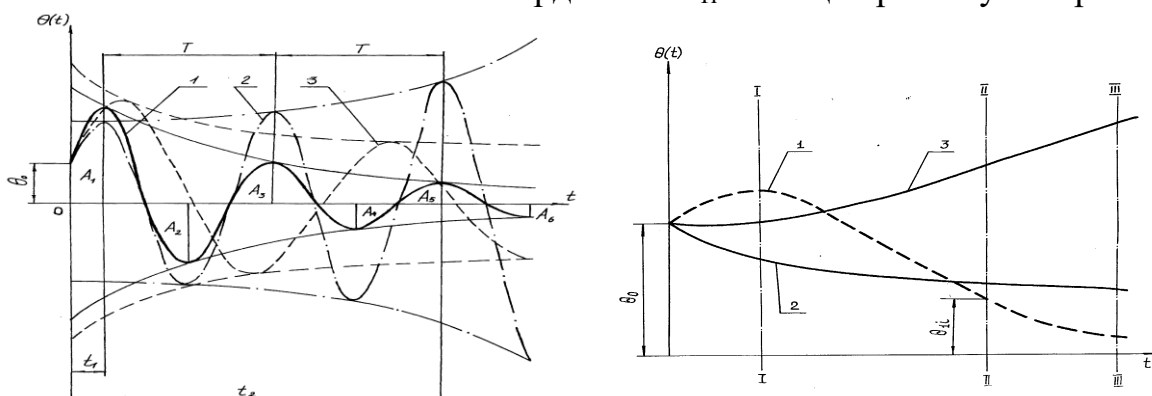


Рис. 7. Оценка возможностей критерия колебательных движений управляемых колес самоходной машины

Рис. 8. Формирование критерия аперриодических движений управляемых колес самоходной машины

Однако для рассматриваемых в данном случае трех процессов ответы могут быть неоднозначными и даже противоречивыми. Все зависит от промежутка времени, на котором будут рассматриваться эти процессы. Например, если рассматривать процессы на промежутке времени от 0 до 1 (0-1), то наилучшая кривая - это кривая 2, а кривая 3 предпочтительнее первой. На промежутке времени 0-II третья кривая - наихудшая. Ее необходимо вообще исключить из дальнейшего рассмотрения. На промежутке времени, равном 0-III, у кривой 1 величина θ_{11} меньше, чем у кривой 2 ($\theta_{11} < \theta_{12}$), но зато площадь под кривой 1 меньше, чем под кривой 1 и т.д.

Анализ колебаний управляемых колес различных машин показал, что при выборе промежутка времени, на котором сравниваются аперриодические движения управляемых колес, необходимо руководствоваться еще и психофизическими возможностями водителя (т.е. временем его реакции и степенью утомляемости).

Предположим, проектировщиком выбран промежуток времени 0-1, равный, например, 0,2 с. Лучшим процессом на этом промежутке времени является второй. Но для него при времени, равном 0,5 ... 0,7 с, величина θ_{12} может оказаться недопустимо большой. Это заставит вмешаться водителя, который будет пытаться исправить траекторию движения машины. Иначе, водитель будет пытаться уменьшить величину θ_{12} за счет поворотов рулевого колеса. Подобные действия приводят к повышению степени утомляемости водителя, что, в свою очередь, увеличивает время его реакции. Поэтому рассматриваемый промежуток времени должен быть приблизительно равен среднему времени реакции водителя, чтобы водитель успевал исправить траекторию движения. Для уменьшения утомляемости водителя необходимо выбирать процесс, для которого в конце промежутка времени, равного среднему времени реакции водителя, величина θ_{1i} - минимальная.

Для уменьшения утомляемости водителя необходимо из различных аперриодических затухающих движений управляемых колес выбирать монотонные процессы (без экстремумов на кривых). Наличие экстремума у кривой 1 на промежутке времени, меньшем, чем среднее время реакции водителя, вызовет его инстинктивное желание исправить траекторию движения машины. Мысленно водитель ее исправляет, однако его практические действия будут отставать по времени от реальной ситуации движения машины.

Для эффективного анализа аперриодических движений управляемых колес предлагаемый критерий должен обладать следующими свойствами:

1. Не противоречить теории колебаний.
2. Отражать основные свойства процесса стабилизации.
3. Иметь одинаковую размерность с критерием F_1 .
4. Учитывать среднее время реакции водителя.

Первое свойство заключается в следующем. Во-первых, предлагаемый критерий необходимо аппроксимировать экспонентой, чтобы не войти в противоречие с физикой затухающих (или нарастающих) процессов, которые базируются на экспоненциальных функциях. Во-вторых, предлагаемый критерий должен оценивать аperiodические нарастающие процессы (аperiodическая неустойчивость). В третьих, данный критерий должен оценивать и колебательные процессы.

Второе свойство должно отразиться в стремлении формируемого критерия при оценке им аperiodических движений к монотонным процессам (для процесса стабилизации управляемых колес экстремумы на кривых аperiodических движений нежелательны).

Третье свойство заключается в одинаковой размерности первого критерия F_1 и предлагаемого второго критерия в связи с совместной их работой.

Четвертое свойство заключается во введении в критерий среднего времени реакции водителя, чтобы на основе этого времени стыковать (или сшивать) критерии для их совместной работы.

Все сказанное отражено в предлагаемом критерии аperiodических движений. Причем интенсивность уменьшения или увеличения начального угла поворота колес от нейтрального положения одновременно учитывается числителем и знаменателем этого критерия, если знаменатель больше нуля, то наблюдается аperiodическая устойчивость (см. кривые 1 и 2 на рис. 8), если меньше нуля, то – аperiodическая неустойчивость (см. кривую 3 на рис. 8). Предлагаемый критерий имеет вид:

$$F_2 = \frac{\int_{t_1}^{t_2} |\theta(t)| dt}{\ln \frac{|\theta'_0|}{|\theta_1|}}, \quad (8)$$

где $\theta(t)$ – зависимость угла поворота управляемых колес относительно шкворней в функции времени, t – время, θ'_0 – угол поворота управляемых колес при $t = t_1$, θ_1 – угол поворота управляемых колес, совершающих аperiodическое движение при $t_1 = t_2$ (модули θ'_0 и θ_1 введены из-за специфики счета на ЭВМ).

Порядок совместной работы критериев F_1 и F_2 . Оптимизация параметров управляемых мостов во всем скоростном диапазоне движения транспортных средств

Прежде, чем приступить к изложению сути этого пункта, опишем сначала порядок совместной работы двух критериев F_1 и F_2 (рис. 9), который заключается в следующем:

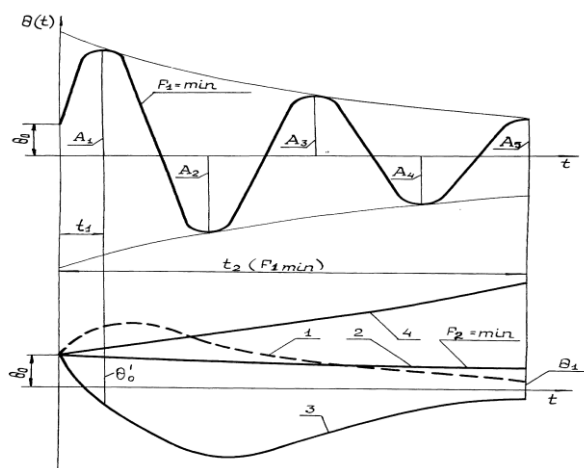


Рис. 9. Геометрическая интерпретация работы совокупности двух критериев: колебательных и аperiodических

В n -мерное пространство параметров моста, например, с помощью ЛП-поиска [24] выбрасываются пробные точки (совокупности параметров моста). Для каждой пробной точки одним из численных методов решается система дифференциальных уравнений движения моста. Сначала с помощью критерия F_1 исследуются зоны колебательной устойчивости и неустойчивости. При этом на числитель этого критерия, т.е. на величину T необходимо ввести ограничения, так как:

–при малых значениях T будут большими главный вектор Φ и главный момент M^Φ сил инерции колеса (совершающего общий случай движения), которые негативно скажутся на работе деталей рулевого привода;

–при больших величинах T появляется опасность отклонения центра масс машины от прямолинейного движения в случае поворота колес от нейтрального положения (правда, в силу большой инерционности машины эти отклонения, например трактора "Беларусь", невелики [23]).

Поэтому на величину T предлагается ввести следующие ограничения:

1. $T \leq 0,1$ - когда величинами Φ и M^Φ нельзя пренебречь (T измеряется в секундах);
2. $0,1 < T \leq 0,25$ - когда величинами Φ и M^Φ можно пренебречь (при этом $2T$ меньше среднего времени реакции водителя).

Вычисленные значения критерия F_1 , с учетом второго ограничения, ранжируются в порядке возрастания. Затем определяется время t_1, t_2 , соответствующее минимальному значению критерия F_1 . Это время используют в качестве верхнего и нижнего пределов интеграла критерия F_2 .

Выбор совокупности значений параметров, приемлемой для всего диапазона скоростей движения машины, осуществляется следующим образом. В предполагаемом скоростном диапазоне движения проектируемой машины выбирается несколько скоростей. Затем последовательно выполняются три расчетные процедуры.

Первая - определение для каждой скорости значения критерия с учетом ограничения 2 и ранжирование F_1 в порядке возрастания (если для какой-то пробной точки ограничение 2 не выполняется, то на соответствующее значе-

ние критерия накладывается штраф в виде большого числа и при ранжировании это значение критерия займет последнее место в данном столбце). Так формируется таблица ранжирования значений критерия F_1 с соответствующими номерами пробных точек (количество столбцов соответствует числу скоростей). Из этой таблицы для каждого значения скорости конструктором определяется множество допустимых решений. Затем для всего диапазона скоростей из множества допустимых значений параметров выбираются точки Парето, из которых конструктор выбирает одну точку Парето [24,25] (причем при каждом значении скорости у этой точки Парето будут свои значения t_1 и t_2).

Вторая. Для каждого значения скорости определяются значения критерия F_2 для выбранной точки Парето колебательного движения (Парето (а.д.)) и для всех пробных точек с апериодическим движением управляемых колес.

Ранжируются значения критерии F_2 в порядке возрастания.

Третья. При каждом значении скорости конструктор определяет множество допустимых решений, из которых выбираются точки Парето апериодических движений (Парето (а.д.)). Если точка Парето (к.д.) вошла в точки Парето (а.д.), то конструктор может выбирать точку Парето колебательного или апериодического движений. Если точка Парето (к.д.) не вошла в точки Парето (а.д.), то конструктор обязан выбрать точку Парето апериодических движений.

Семейство новых прикладных критериев колебательной устойчивости движения колес транспортных средств

Для исследования колебательной устойчивости и неустойчивости в различных областях науки и техники предлагается (без вывода) семейство различных критериев, которые имеют вид:

$$F_{11} = \frac{\frac{T}{2}}{\ln \frac{A_i}{A_{i+1}}}, \dots, F_{1j} = \frac{\frac{j}{2} T}{\ln \frac{A_i}{A_{i+j}}}. \quad (9)$$

$$F_1 = \frac{T}{\ln \frac{A_1 + A_2}{A_3 + A_4}}, \dots, F_1 = \frac{\frac{T}{2}}{\ln \frac{A_1 + A_3}{A_2 + A_4}}, \dots, F_1 = \frac{\frac{3}{2} T}{\ln \frac{A_1 + A_2}{A_4 + A_5}}, \dots, F_1 = \frac{\frac{3}{2} T}{\ln \frac{A_1 + A_2 + A_3}{A_4 + A_5 + A_6}} \dots$$

Подчеркнем, что критерии (9) могут использоваться как самостоятельно, так и в сочетании с критерием F_2 .

1. Келдыш М.В. Шимми переднего колеса трехколесного шасси. - Тр. ЦАГИ, 1945, N 564. - 33 с. 2. Колесников К.С. Автоколебания управляемых колес. - М.:

- Гостнаучтехиздат, 1955. - 238 с. **3.** Морозов Б.И., Пчелин И.К., Хачатуров А.А. Поперечные колебания (виляние) автомобильных прицепов. - В кн.: Применение математических машин при конструировании и испытаниях автомобилей и двигателей. - М.: НАМИ-НТО. Машпром, 1963, с. 37-43. **4.** Неймарк Ю.И., Фуфаев Н.А. Динамика неголономных систем. - М.: Наука, 1967. - 519 с. **5.** Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. - М.: Наука, 1975. - 767 с. **6.** Фортунков Д.Ф. О стабилизации и колебаниях управляемых колес автомобиля. - Автомобильная промышленность, 1980, N 11, с. 17-19. **7.** Литвинова Т.А. Исследование процесса стабилизации управляемых колес автомобиля. - Тр. МАДИ, 1973, N 55, с. 49-62. **8.** Литвинова Т.А. Исследование процесса стабилизации управляемых колес автомобиля. - Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - М.: МАДИ, 1978. - 22 с. **9.** Иларионов В.А. Стабилизация управляемых колес автомобиля. М.: Транспорт, 1966. - 168 с. **10.** Чайковский И.П. Исследование процесса стабилизации управляемых колес с применением аналоговой ЭВМ. - Автомобильная промышленность, 1967, N 6, с. 18-22. **11.** Управляемость и устойчивость автомобиля. Под редакцией А.С. Литвинова. - М.: Машгиз, 1963. - 267 с. **12.** Крылов О.В., Гродко Л.Н. Инженерный метод расчета автоколебаний управляемых колес автомобиля. - Автомобильная промышленность, 1971, N 8, с. 20-23. **13.** Гродко Л.Н., Арбузов Н.В., Ткаченко О.И. Устойчивость свободного руля мотоцикла. - Автомобильная промышленность, 1978, N 7, с. 15-18. **14.** Гродко Л.Н., Ткаченко О.И., Ковалева О.Б., Арбузов Н.В. О параметрических колебаниях управляемого колеса мотоцикла и их связи с устойчивостью мотоцикла на неровной дороге. - Автомобильная промышленность, 1978, N 12, с. 20-23. **15.** Применение теории качения деформируемого колеса к исследованию колебаний управляемых колес трактора /Левин М.А., Гуськов В.В., Гурвич Ю.А., Скойбеда А.Т. - В кн.: Теоретическая и прикладная механика. Минск: Вышэйшая школа, 1977, вып. 4, с. 56-67. **16.** Исследование устойчивости, управляемости и динамики торможения тракторного поезда (Гуськов В.В., Левин М.А., Гурвич Ю.А. и др.). Научно-технический отчет БПИ, инв. N Б 506010 (сб. рефератов НИР и ОКР, "Транспорт", 1977, N 2). - 216 с. **17.** Акопян Р.А., Макаров В.В. К вопросу оценки влияния конструктивных параметров подвески на устойчивость движения автобусов. - Автомобильная промышленность, 1977, N 2, с. 25-28. **18.** Акопян Р.А. Пневматическое подрессоривание автотранспортных средств. Львов. Виша школа. 1980. - 208 с. **19.** Ясюкович Э.И. Влияние параметров установки управляемых колес на курсовую устойчивость трактора класса 14 кН: Дис. ... канд. техн. наук. - Минск, БПИ, 1982. - 234 с. **20.** Пановко Я.Г. Основы прикладной теории упругих колебаний. - М.: Машиностроение, 1967, - 316 с. **21.** Пановко Я.Г., Губанова И.И. Устойчивость и колебания упругих систем. - М.: Наука, 1967, - 420 с. **22.** Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. - М.: Наука, 1981. - 110 с. **23.** Кабанов В.И. Исследования поперечных колебаний управляемых колес тракторов класс 1,4 тонны: Дис. ... канд.техн.наук. - Минск, БПИ,1969. - 137 с.

24. Современное состояние теории исследования операций. Под ред. Н.Н. Моисеева. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979 (оптимизация и исследование операций). - 464 с. **25.** Подиновский В.В. Об относительной важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. - В кн.: Многокритериальные задачи принятия решений. - М.: Машиностроение, 1978, с. 48-82.