

Литература

1. Кейс В.М., Лондон А.Л. Компактные теплообменники. –М.: Государственное Энергетическое Издательство, 1962. -158с.
2. Гусенков А.П., Котов П.И. Длительная и неизотермическая малоцикловая прочность элементов конструкций. –М.: Машиностроение, 1988. -264с.

Системные оценки управляемости колесных машин

д.т.н. проф. Катанаев Н.Т.
МГТУ «МАМИ»
(495)223-05-23, доб. 1277

Аннотация. В работе рассматриваются важнейшие проблемы в теории колесных и гусеничных машин, связанные с понятиями управляемость, наблюдаемость и устойчивость транспортных средств. Существуют фундаментальные теоретические исследования в области прямых оценок динамических свойств объекта, однако современный уровень теоретических изысканий требует разработки системного подхода к решению этих проблем, чему и посвящены данные теоретические исследования.

Ключевые слова: управляемость, наблюдаемость, устойчивость, система, интегральные оценки, автомобиль, водитель, гиперматрицы.

Понятия управляемость и устойчивость являются одним из самых обсуждаемых вопросов в теории колесных машин. Часто встречаются работы, в которых в качестве оценок управляемости и устойчивости рассматриваются динамические или статические характеристики «изолированного» движения автомобиля, полученные путем подачи нормированного сигнала на управляющий вход, например, «рывок руля». Здесь следует иметь в виду, что после подачи такого сигнала автомобиль реагирует на него без участия водителя. Сам же сигнал может быть реализован с помощью технического средства.

Нормированный сигнал можно организовать также и в форме гармонических колебаний. В том и другом случаях задается не сама траектория движения автомобиля, а закон изменения положения рулевого колеса θ . Объект совершает неуправляемое движение по траектории, зависящей от собственной кинематики и динамики, а также от внешних и внутренних воздействиях на объект.

В силу целого ряда технических сложностей в процессе такого рода испытаний в качестве оценочного параметра обычно регистрируется боковое ускорение, да и в математическом описании боковое движение представляется уравнением сил, динамическая составляющая которых определяется как произведение массы на то же боковое ускорение. Относительно траектории объект в этом случае представляет динамическое звено, обладающее астатизмом второго порядка. Для получения траектории движения, необходимо уравнение динамики бокового движения автомобиля проинтегрировать дважды и каждый раз мы получим постоянную интегрирования, зависящую от многих факторов. В результате получим действительную траекторию, стремящуюся при $t \rightarrow \infty$ по экспоненциальному закону к бесконечности.

Таким образом, оценить управляемость «изолированного» автомобиля относительно заданной траектории не представляется возможным. Свойство управляемости приемлемо для автомобиля, замкнутого водителем (либо аналитическим управляющим автоматом). Такая система является замкнутой и представляет собой человеко-машинную систему (ЧМС) «автомобиль-среда-водитель» (АСВ).

Рассмотрим понятия управляемости и наблюдаемости с системных позиций. Исследования человеко-машинной системы АСВ целесообразно начинать с определения самого понятия управляемости и наблюдаемости. Заметим, что существуют классические определения наблюдаемости и управляемости. Предложены они Калманом в 1961 г. [2] и с успехом используются в теории автоматического управления [9]. Под наблюдаемостью системы пони-

мается возможность определения состояния невозбужденной системы по результатам наблюдения над выходными сигналами этой системы на некотором временном интервале. Математическая трактовка этого понятия сводится к следующему. Пусть автономная линейная система записана в виде некоторого уравнения

$$\dot{X} = AX + BU, \quad (1)$$

где: $U \in R^m$ - вектор управления;

$X \in R^n$ - решение, или вектор состояния системы;

A - $(n \times n)$ - матрица состояния,

B - $(n \times m)$ - матрица управления.

Описание системы дополняется уравнением наблюдения

$$Z = CX, \quad (2)$$

где: Z - r -мерный вектор наблюдения, зависящий от n -мерного вектора состояния X ;

C - действительная постоянная $(r \times n)$ матрица, определяющая наблюдаемый выход системы.

Совокупность уравнений (1) и (2) полностью описывающих зависимость выхода от входа, называется автономной линейной наблюдаемой системой.

Необходимым и достаточным условием наблюдаемости системы, описываемой уравнениями (1) и (2) является невырожденность граммаиана наблюдаемости Γ , представляющего собой гиперматрицу

$$\Gamma = [C^T, A^T C^T, (A^T)^2 C^T, \dots, (A^T)^{(n-1)} C^T]. \quad (3)$$

Если это условие выполняется, то ранг гиперматрицы Γ должен быть равен n , то есть

$$\text{rank} \Gamma = n. \quad (4)$$

Для ненаблюдаемой системы ранг матрицы Γ оказывается меньше n .

Управляемость состояния означает существование таких управляющих функций, определенных на интервале $[t_0, t_k]$, которые переводят любой начальный вектор состояния $X(t_0)$ в любой конечный вектор состояния $X(t_k)$ за конечное время.

Система (1), (2) обладает управляемостью состояния, если ранг гиперматрицы M

$$M = [B, AB, A^2 B, \dots, A^{(n-1)} B] \quad (5)$$

равен n , то есть

$$\text{rank} M = n \quad (6)$$

Это условие является необходимым и достаточным.

Система (1), (2) называется системой с управляемым выходом, если существуют управляющие функции, определенные на интервале $[t_0, t_k]$, которые переводят начальный вектор выхода $Z(t_0)$ в любой конечный вектор выхода $Z(t_k)$ за конечное время.

Для того чтобы система обладала свойством управляемости выхода, необходимо и достаточно, чтобы ранг гиперматрицы H

$$H = [CB, CAB, CA^2 B, \dots, CA^{(n-1)} B] \quad (7)$$

был равен m

$$\text{rank} H = m \quad (8)$$

Если $m=1$ (B является вектором-столбцом), то для системы (1) следующие критерии управляемости будут эквивалентными:

- (1) обладает свойством управляемости;
- $\text{rank} [B, AB, A^2 B, \dots, A^{n-1} B] = n$;
- $\det [B, AB, A^2 B, \dots, A^{n-1} B] \neq 0$;
- векторы-столбцы $B, AB, A^2 B, \dots, A^{n-1} B$ линейно независимы.

Управляемость и наблюдаемость обладают свойством двойственности. Доказано [9],

что автономная линейная наблюдаемая система (1) является вполне наблюдаемой в том, и только в том случае, если двойственная динамическая система будет вполне управляемой.

Схематически (рисунок 1) можно представить различные случаи комбинаций характеристик управляемости и наблюдаемости. Система разбивается на четыре состояния: 1 – управляемую и наблюдаемую, когда соблюдаются условия (8) и (4); 2 – управляемую и ненаблюдаемую; 3 - неуправляемую и наблюдаемую; 4 - неуправляемую и ненаблюдаемую, когда оба условия (8) и (4) не соблюдаются.

<p>1-управляемая и наблюдаемая $rank H = m$ $rank \Gamma = n$</p>	<p>2-управляемая и ненаблюдаемая $rank H = m$ $rank \Gamma \neq n$</p>
<p>3-неуправляемая и наблюдаемая $rank H \neq m$ $rank \Gamma = n$</p>	<p>4-неуправляемая и ненаблюдаемая $rank H \neq m$ $rank \Gamma \neq n$</p>

Рисунок 1 - Комбинации характеристик управляемости и наблюдаемости систем

Таким образом, для того, чтобы можно было бы говорить об управляемости автомобиля, необходимо, как минимум, наличие в уравнении (1) вектора управления U , формирующего в этом уравнении составляющую BU . Матрица управления B - $(n \times m)$ является одним из главных элементов критерия (8) и его отсутствие делает систему неуправляемой. Как раз водитель (или аналитический автомат) выполняет функцию слежения за заданной траекторией, формирует вектор управления, делает систему замкнутой, превращая ее в человеко-машинную систему «автомобиль-среда-водитель».

Качество работы системы слежения оценивается величиной ошибки $\Delta y(t)$, определяемой разностью между заданной - $y_T(t)$ и действительной - $y(t)$ траекториями движения автомобиля на заданном участке пути. Поведение системы зависит от ее передаточной функции $W(s)$. При изменении траектории движения $y_T(t)$ на входе системы выходную координату можно записать как

$$y(t) = y_c(t) + y_T(t) \quad (9)$$

где: $y(t)$; $y_c(t)$; $y_T(t)$ - соответственно общее решение, собственная составляющая решения и вынужденная составляющая решения дифференциального уравнения, описывающего движение системы.

Вынужденная составляющая решения $y_T(t)$ определяется видом правой части дифференциального уравнения.

Переходный процесс может носить не только аperiodический (расходящийся или сходящийся), но и колебательный, и это зависит от поведения собственной составляющей решения $y_c(t)$, определяемой из выражения:

$$y_c(t) = \sum_{i=0}^n C_i \exp^{s_i t}, \quad (10)$$

где: C_i – постоянная интегрирования, определяемая из нулевых начальных условий;

n – порядок собственного оператора системы $D_y(s)$, корни s_i которого определяются из уравнения $D_y(s) = 0$.

Важно заметить, что анализ устойчивости касается поведения собственной составляющей (10) общего решения уравнения движения системы (9), которая может рассматриваться как *собственная устойчивость* системы. Наличие хотя бы одного корня s_i с положительной

вещественной частью при $t \rightarrow \infty$ приводит к тому, что выражение (10) будет стремиться к бесконечности, следом за которым и общее решение (9) также будет стремиться к бесконечности, т.е. $y(t) \rightarrow \infty$.

Причиной неустойчивости системы может служить также расходящийся процесс вынужденной составляющей $y_T(t)$, влияющей на общее решение $y(t)$ дифференциального уравнения системы. В этом случае устойчивость системы должна рассматриваться в зависимости от характера изменения вынужденной составляющей и может называться *вынужденной устойчивостью* системы.

Таким образом, анализ структуры и содержания общего интеграла уравнения движения системы дает возможность раскрыть причины сходимости аналитического решения этого уравнения, с которыми связана важнейшая характеристика системы – ее устойчивость. Именно устойчивость является необходимым условием управляемости системы. Неустойчивая система теряет свойство управляемости, поэтому первоочередной задачей должна быть разработка комплекса мероприятий, направленных на ликвидацию причин, вызывающих расходящиеся процессы в системе.

Качество слежения за данной траекторией зависит от поведения собственной и вынужденной составляющих. Каждая из них определяет группу показателей работы системы. Первая группа связана с показателем качества переходного процесса, то есть с собственной составляющей решения $y_c(t)$. Вторая – характеризует вынужденную составляющую $y_T(t)$ и определяет точность системы в установившемся (равновесном) движении.

Показатели качества определяются непосредственно по кривой переходного процесса и называются прямыми оценками. К прямым оценкам качества относят: время регулирования, перерегулирование, частоту колебаний, число колебаний, декремент затухания и другие оценки, обусловленные спецификой конкретной системы. Их получение предполагает подачу на вход системы единичного или импульсного воздействия.

Прямые оценки качества могут быть получены и при гармоническом воздействии на систему. Оценка в этом случае ведется по показателю колебательности, резонансной (собственной) частоте, полосе пропускания системы, частоте среза и запасам устойчивости по модулю частотной характеристики и по фазе.

Прямые оценки широко используются при исследовании динамических свойств автомобиля как объекта управления [1, 7]. В процессе движения рулевое колесо с определенной угловой скоростью поворачивается на определенный угол θ_p (поворот руля). При этом рассматривается величина реакции на управляющий сигнал. В качестве измерителя реакции на поворот руля используется угловая скорость поворота автомобиля ω_r , отнесенная или к углу поворота (ω_r / θ_p) или к продольной скорости V автомобиля ((ω_r / V) – кривизна траектории) [1,7]. Автомобиль в этом случае рассматривается как разомкнутый объект управления (ОУ), поэтому не случайно за наблюдаемую координату принята угловая скорость поворота автомобиля. Отмеченные оценки являются несистемными и характеризуют лишь динамические или статические свойства объекта.

В силу того, что прямые оценки дают характеристику лишь переходным процессам, в технической кибернетике [9] разработаны косвенные оценки качества работы системы. Из них наиболее приемлемой является интегральная оценка качества.

Интегральная оценка качества относится к комплексному критерию, дающему оценку некоторых свойств, учитывающих одновременно точность, запас устойчивости и быстродействие. При этом необходимо, чтобы система была замкнута. Управляющий блок (УБ) на основе сравнения координат заданной $y_T(t)$ и текущей $y(t)$ траекторий определяет управляющий сигнал Δu (ошибка слежения), преобразует его с помощью исполнительного блока (ИБ) в управляющее воздействие θ , подающееся в объект управления (ОУ).

Теперь анализ системы можно вести по линейным и квадратичным интегральным

оценкам.

Линейные оценки J_{on} формируются как моменты i -того порядка:

$$J_{on} = \int_{t_0}^{t_k} \Delta y(t) dt \quad (11)$$

Эти оценки можно использовать при исследовании монотонных или аperiodических процессов. Поскольку площади, ограниченные кривой $\Delta y(t)$, складываются алгебраически, при колебательном процессе с малым затуханием амплитуды интегральная оценка может оказаться бесконечно малой. В этом случае наиболее пригодными являются квадратичные интегральные оценки:

$$J_{2n} = \int_{t_0}^{t_k} [\Delta y^2(t) + \tau_1^2 \Delta \dot{y}^2(t) + \dots + \tau_n^2 \Delta y^{(n)2}(t)] dt, \quad (12)$$

где: $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ - постоянные величины.

Для наиболее типичного маневра испытаний “перестановка” можно рекомендовать аппроксимирующее выражение типа (11) или (12) и критерии оценки качества системы, основанные на интегрировании отклонений действительной траектории движения от нормированной (программной).

При аналитическом конструировании оптимальных автоматов слежения за заданной траекторией может быть использован функционал вида:

$$J(u) = \int_{t_0}^{t_k} \sum_{i=1}^n (\alpha_i x_i^2 + u^2) dt \quad (13)$$

где: x_i - фазовые координаты; α_i - весовые коэффициенты.

Здесь же следует сделать существенную оговорку – использование оценок (13) возможно лишь в том случае, если автомобиль “следит” за заданной траекторией с помощью специального автомата, позволяющего точно и объективно измерять и регистрировать ошибку слежения.

Использование линейных и квадратичных интегральных оценок качества системы АСВ чрезвычайно затруднено, так как это связано с перцептивно – моторной деятельностью водителя, обеспечивающей режим слежения.

Водитель (В) сам формирует стратегию движения, сравнивает ее с текущими координатами, поэтому ошибка Δy слежения в этом случае носит существенно условный характер и не поддается точной регистрации. Оценка возможна лишь по работе, которую совершают эффекторы (Э) водителя, управляемые центральной нервной системой (ЦНС).

Систему АСВ с минимальной энергией управления будем называть такую систему, в которой при переводе объекта управления из начальной точки фазового пространства в заданную обеспечивается минимум функционала

$$J(u) = \int_{t_0}^{t_k} u^2(t) dt \quad (14)$$

Оценка (14) носит случайный и субъективный характер, поэтому окончательный результат может быть получен после статистической обработки результатов экспериментов.

Под системой, оптимальной по расходу энергоресурсов, следует понимать систему, у которой обеспечивается перевод объекта управления в фазовом пространстве из начального состояния в заданное при минимальных затратах энергоресурсов.

В этом случае должен достигаться минимум функционала

$$J(u) = \int_{t_0}^{t_k} \sum_{i=1}^m c_i / u_i(t) dt, \quad (15)$$

где: c_i - коэффициенты связи скорости расхода энергоресурсов с управляющими воздействиями.

Среди экономических критериев для специалистов по теории автомобиля особое место занимает показатель расхода топлива g двигателем (Д), формирующим тяговую силу

$$g = \int_{t_0}^{t_k} g_t dt, \quad (16)$$

где: g_t – часовой расход топлива.

Перечисленные показатели качества функционирования системы (11)-(16) относятся к категории системных оценок.

Деятельность водителя в системе АСВ преимущественно сводится к функции компенсаторного слежения, которое можно представить в виде стереотипной последовательности сенсомоторных актов, состоящих из двух основных взаимосвязанных компонентов: перцептивной оценки величины и знака рассогласования и координированной с результатами перцептивной оценки двигательных управляющих воздействий, направленных на устранение текущего рассогласования.

Работа оператора в режиме слежения имеет ярко выраженную взаимосвязь сенсорных и моторных процессов и является наиболее типичным видом деятельности в системах ручного управления.

Зрительная система выполняет функцию измерения величины рассогласования; кинестетическая – величина перемещения рук. На основании соизмерения зрительных и кинестетических сигналов находится «чувственная» мера движения, обеспечивающая объединение парциальных движений в относительную непрерывность зрительно-моторной координации. Проприоцептивные сигналы об условиях и положениях управляющих конечностей является основной входной величиной в системе регулирования движений. Сравнительный анализ психической регуляции и процесса управления в системах автоматического регулирования показывает, что существуют общие кибернетические принципы управления, распространяющиеся как на автоматы, так и на нервную систему, осуществляющую психическое регулирование.

На начальных ступенях адаптации водителя к автомобилю образование управляющих навыков осуществляется под контролем зрительных, слуховых и вестибулярных анализаторов. Преобразование в центральной нервной системе (ЦНС) идет по поисковому каналу в форме сознательной деятельности, включающей трансформации образов, понятий, признаков. В процессе адаптации образуется автоматизированный канал, представляющий собой прочно закрепленные условно-рефлекторные связи.

Сформированные в ЦНС сигналы (рисунок 2) подаются на эффекторы (мышцы рук и ног), с помощью которых осуществляется воздействие через органы управления на параметры состояния и движения автомобиля.

Отметим еще одно важное свойство человека, как управляющего звена системы. Вначале формирование двигательного навыка происходит под контролем зрительного анализатора; впоследствии же этот контроль постепенно переходит к чувствительным органам двигательного аппарата – к тактильному и кинестетическому анализаторам (например, восприятие кожно-мышечными рецепторами усилия на руле). При этом образуется внутренний контур регулирования, определяемый действием этих анализаторов. В этом контуре сигналы проходят значительно быстрее (с задержкой 0,4 с.), чем по внешнему контуру, включающем зрительный анализатор (задержка 1-2 с.) [8].

Каждый водитель при этом имеет индивидуальные сенсомоторные показатели, которые к тому же носят случайный характер. Поэтому интегральные оценки, полученные с участием водителя в качестве управляющего звена, также носят случайный характер и, зачастую, доля влияния водителя на интегральные оценки становится соизмеримой с влиянием характеристик самого автомобиля. И если к тому же добавить техническую сложность постановки натурального эксперимента, то перспектива развития экспериментально-теоретических работ в

этом направлении еще длительное время будет связана с преодолением значительных трудностей.

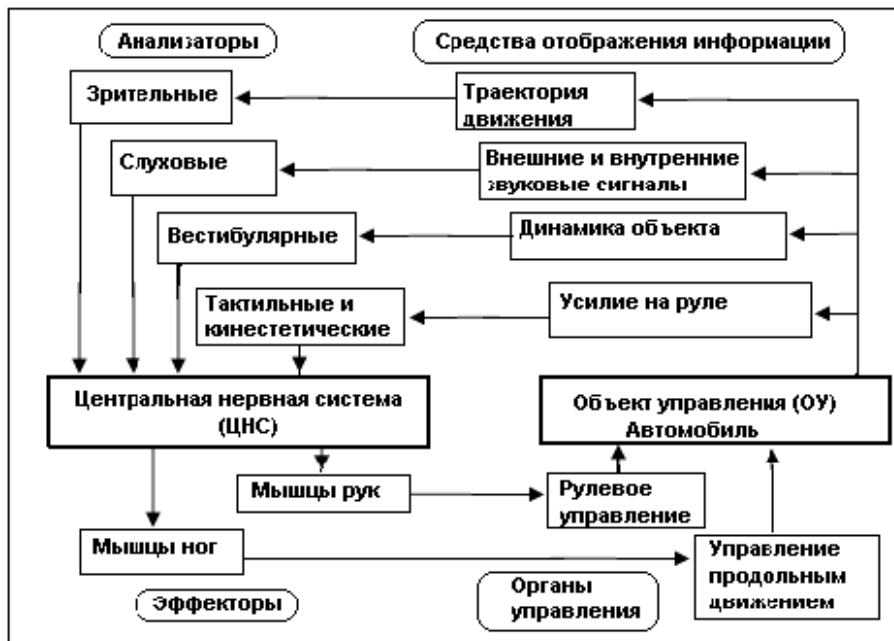


Рисунок 2- Информационная модель человеко-машинной системы «Автомобиль-среда-водитель»

С целью получения объективных интегральных характеристик управляемости автомобиля авторами работ [4, 5] была представлена конструкция системы «автомат-автомобиль», дающая возможность исключить водителя из контура управления, сохраняя при этом связь заданной и действительной траекторий движения автомобиля. Подробная структурная схема и математическое описание системы, а также результаты натурных экспериментальных исследований, приведены в работе [3]. К сожалению, в периоды глубоких кризисов и затянувшейся стагнации интенсивность работ в этом направлении значительно снизилась. Однако в фазе оживления нашей экономики появляется надежда инициировать работы по исследованию системы «автомат-автомобиль» с целью получения объективных оценок управляемости и устойчивости автомобиля.

Таким образом, использование классических определений и математического аппарата анализа управляемости и устойчивости систем, а также разработанных и апробированных систем «автомат-автомобиль» открывает возможность на основе научных достижений в технической кибернетике, благотворно влиять на развитие теории управляемого движения автомобиля.

Литература

1. Гинцбург Л.Л., Носенков М.А. Методы оценки управляемости автомобиля на поворотах. – Автомобильная промышленность, 1971, № 2, с.14 – 17.
2. Kalman R.E., HO Y.C., Narendra L.S. Controllability of Linear Dynamical Systems, Contributions to Differential Equations; Interscience Publishers Inc. N.Y., 1962, p.p. 189 – 213.
3. Катанаев Н.Т. Анализ и синтез человеко-машинной системы «Автомобиль-среда-водитель». Дисс. на соискание д.т.н., М. 1990, 395 с.
4. Катанаев Н.Т., Вихман В.С., Морозов Б.И., Карелин В.И. Устройство для исследования характеристик управляемости автомобиля в режиме слежения. А.С. № 662841 от 15.05.79. Б.И. №18, 1979.
5. Катанаев Н.Т., Карелин В.И. Устройство для исследования управляемости транспортного средства. А.С. № 887975, Б.И. № 45, 1981
6. Красовский А.А., Поспелов Г.С. Основы автоматки и технической кибернетики. – М. – Л., Госэнергоиздат, 1962. – 600с.
7. Носенков М.А., Бахмутский М.М., Гинцбург Л.Л., Кисуленко Б.В. К вопросу о нормиро-

вании реакций автомобиля на поворот руля. – Автомобильная промышленность, 1979, № 3, с.18 – 19.

8. Основы инженерной психологии. Учеб. пособие. /Под ред. Б.Ф.Ломова. – М.: Высшая школа, 1977. – 335с.
9. Чаки Ф. Современная теория управления. Нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. – Перевод с английского. – М.: Мир.: 1975. – 424с.

Совершенные и несовершенные неголономные кинематические связи автомобильного колеса с опорой

д.т.н. проф. Катанаев Н.Т.
МГМУ (МАМИ)
(495) 223-05-23, доб. 1277

Аннотация. В работе приводятся различные виды уравнений неголономных кинематических связей автомобильного колеса с опорной поверхностью, решаются проблемы доказательства их адекватности результатам экспериментальных исследований, а также даются обоснования областей использования каждого из видов уравнений связей.

Ключевые слова: шина, неголономная связь, испытания, фазовые характеристики, увод, автомобильное колесо, экспериментальные исследования.

В процессе неустановившегося движения из-за наличия сил инерции и внешних возмущений автомобильное колесо отклоняется от заданного направления. Появляется так называемое “псевдоскольжение” (упругое скольжение), приводящее к появлению боковой составляющей движения – уводу [1-6]. При этом возникает реакция связей эластичного в боковом направлении колеса.

Чаще всего, в работах [2,3], построенных на гипотезе установившегося увода, боковую реакцию определяют как линейную функцию или боковой деформации шины, или угла увода автомобильного колеса. В первом случае в качестве коэффициента пропорциональности принимают боковую жесткость шины, во втором – коэффициент сопротивления уводу.

При описании движения автомобиля широкое распространение получили уравнения связей М.В. Келдыша [1], полученные для условий полного отсутствия проскальзывания контактного пятна относительно опоры с учетом предположений:

1. касательная к линии качения пневматика совпадает с осью поверхности контакта;
2. кривизна линии качения пневматика однозначно определяется параметрами деформации h_y, ψ, h_k (h_y – боковая деформация, ψ - угловая деформация, h_k – деформация, вызванная наклоном колеса относительно опорной поверхности).

На основании этих предположений была записана функциональная зависимость:

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{d(\theta + \psi)}{dx} = f(h_y, \psi, h_k), \quad (1)$$

где: ρ - кривизна линии качения пневматика;

x – координата продольного движения;

θ - угол поворота плоскости колеса относительно первоначального положения ($\theta \leq 0,2$).

После разложения (1) в ряд Макларена для линейной части было получено:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{(\dot{\theta} - \dot{\psi})}{V} = c_1 h_y + c_2 \psi + c_3 h_k, \quad (2)$$

где: V – скорость продольного движения колеса;

$c_1 = \left(\frac{\partial f_0}{\partial h_y} \right)_0$, $c_2 = \left(\frac{\partial f_0}{\partial \psi} \right)_0$, $c_3 = \left(\frac{\partial f_0}{\partial h_k} \right)_0$ - постоянные коэффициенты, для определения