

УДК 621.526

А.М. СУББОТА, А.Г. ГОРДИН, И.Ю. ДЫБСКАЯ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина***СИСТЕМА TRANSRAPID – НАЗЕМНЫЙ АЭРОБУС XXI ВЕКА**

В статье представлены направления развития высокоскоростного наземного транспортного средства (ВСНТС), конструктивные особенности и уравнения движения ВСНТС в вертикальной плоскости. Приведены функциональная схема системы стабилизации и структурная схема алгоритма стабилизации, а также результаты машинного моделирования системы в среде MATLAB/SIMULINK. Обоснован выбор измерителей параметров системы. Определены задачи дальнейших исследований.

транспортная система, высокоскоростное наземное транспортное средство, электромагнитная система, магнитный подвес, путевая структура, феррорельс, система стабилизации

Введение

Система Transrapid – это транспортное средство, форма вагонов которого напоминает фюзеляж самолета, движущееся с большой скоростью без контакта с путевой структурой, оснащенное электронной системой автоматического управления [1]. Transrapid находится на более высоком уровне технического развития по сравнению с традиционной системой «колесо-рельс». Как ни парадоксально, но совершенно очевидно, что преимущества железнодорожного транспорта, обусловленные даже применением наиболее современных систем «колесо-рельс» в XXI веке становятся его недостатком. По сравнению с системой «колесо-рельс» в Transrapid за счет электромагнитного подвеса полностью устранено трение, а следовательно, значительно снижены шумоизлучение и эксплуатационные затраты. Кроме того, поезд Transrapid более безопасен в отношении схода с «рельсов» и, несмотря на скорость, иногда достигающую 500 км/ч и более, обеспечивает высокий уровень комфортности пассажиров.

В настоящее время в мире имеется два типа транспортных систем на магнитном подвесе, которые практически доведены до стадии внедрения в коммерческую эксплуатацию. Это германская система Transrapid и японская ML (Magnetic Levitation).

Для обеих транспортных систем общим является то, что движение вагонов в них обеспечивается за счет использования линейного электрического синхронного двигателя. Однако системы подвеса и бокового направления вагона относительно путевой структуры принципиально различаются: в Transrapid для этих целей применяется электромагнитная система, а в ML – электродинамическая [2].

В общем случае подобные транспортные средства включают систему подвеса, путевую структуру, движитель, системы стабилизации и управления [3].

В статье основное внимание уделено транспортному средству типа Transrapid и системе его стабилизации в вертикальной плоскости, поскольку от точности и качества регулирования зазора между магнитами подвеса и путевой структурой зависит надежность, работоспособность системы и безопасность пассажиров.

1. Направления развития систем электромагнитного подвеса

На рис. 1 дан общий вид высокоскоростного транспортного средства на электромагнитном подвесе. Конструктивно высокоскоростное наземное транспортное средство (ВСНТС) – поезд – выполняется в виде вагона, система подвеса которого включает электромагниты 1, расположенные симметрично с обеих

сторон вдоль него. Электромагниты обычно притягиваются либо феррорельсом, либо статорной обмоткой, уложенной в путевую структуру 2 на нижней поверхности ее несущей балки. Сила притяжения электромагнитов $F_{ЭМ}$ автоматически регулируется с помощью бортовой электронной системы стабилизации ВСНТС в вертикальной плоскости таким образом, чтобы ее величина уравновешивала

силу тяжести G при условии сохранения воздушного зазора S требуемой величины между магнитами и путевой структурой. Регулирование смещения в горизонтальной плоскости возлагается на так называемую систему направления, включающую в себя расположенные с обеих сторон вагона электромагниты с электронной системой регулирования, которые взаимодействуют с реактивными шинами.

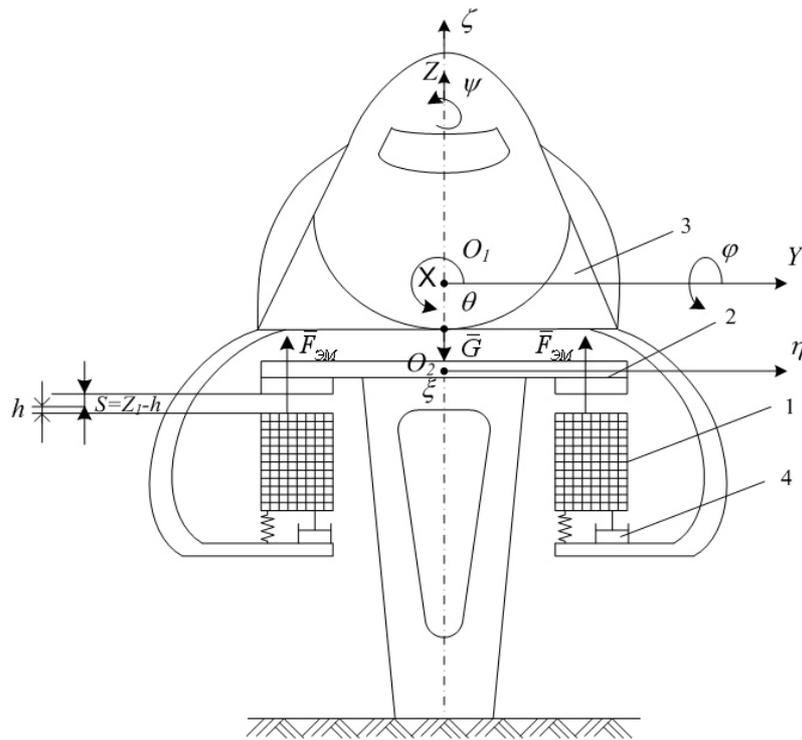


Рис. 1. Общий вид транспортной системы Transrapid: 1 – катушка электромагнита; 2 – путевая структура; 3 – пассажирский салон; 4 – элементы подвеса и полезного груза

Шины закрепляются с обеих сторон балок путевой структуры по всей их длине. До «всплытия» и на остановках поезд может находиться на колесах.

Как известно, в обычном колесном транспорте усилие от колес к кузову вагона (экипажа) передается через систему рессор, пружин и демпферов, что обеспечивает требуемые условия комфорта и надежность работы системы подвеса вагона в целом. Аналогичные задачи возникают и при использовании систем с магнитным подвесом. К настоящему времени разработаны различные механические свя-

зи системы передачи усилия от магнитного подвеса к корпусу вагона.

Среди них можно выделить такие:

1 – системы с жестким креплением электромагнитов к промежуточной тележке, которая в свою очередь через рессоры и демпферы передает усилие к корпусу вагона;

2 – системы, работающие по принципу «магнитного колеса», состояния каждого из которых не зависят от состояния соседних электромагнитов и самого корпуса вагона;

3 – системы, в которых соседние «магнитные ко-

леса» или так называемые «магнитные лыжи» имеют шарнирные или гибкие связи друг с другом.

В первом случае возникают значительные сложности в обеспечении устойчивости электромагнитного подвеса. Такая конструкция применена, например, в системе «Maglev» железных дорог Великобритании при скорости движения поезда, не превышающей 42 км/ч. Система второго типа реализована на поезде TR-06 общей массой 122 т и длиной 54,2 м, что позволило обеспечить скорость движения, равную 350 км/ч. Применение третьего типа электромагнитного подвеса позволило не только достичь скорости 400 км/ч, но и в два раза увеличить величину полезной нагрузки.

2. Описание углового положения ВСНТС

Для описания углового положения экипажа на магнитном подвесе выберем две системы координат: O_1XYZ – связанную с вагоном и $O_2\xi\eta\zeta$ – стартовую, связанную с путевой структурой (рис. 1).

Начало координат O_1 совпадает с центром масс вагона, ось O_1X (ось подёргивания) совпадает с продольной осью вагона, ось O_1Z (ось подпрыгивания) совпадает с вертикальной осью симметрии вагона, ось O_1Y (боковой относ) проводится так, чтобы образовать правую систему координат, совпадает или параллельна поперечной оси вагона.

Точка O_2 совпадает с точкой старта, а при движении вагона перемещается по средней линии путевой структуры. Ось $O_2\xi$ совпадает с направлением движения, является касательной к указанной средней линии и лежит в горизонтальной плоскости. Ось $O_2\zeta$ совпадает с местной вертикалью, ось $O_2\eta$ лежит в горизонтальной плоскости и проводится перпендикулярно плоскости $\xi O_2\zeta$.

Угловые координаты вагона определяют в предположении, что начало O_1 и O_2 систем координат

O_1XYZ и $O_2\xi\eta\zeta$ совпадают. Тогда вращение вагона относительно оси $O_2\zeta$ определится углом виляния ψ , относительно $O_2\eta$ – углом галопирования φ , относительно оси $O_2\xi$ – углом боковой качки θ .

На рис. 2 показана взаимосвязь и пространственное расположение систем координат O_1XYZ и $O_2\xi\eta\zeta$ при условии следующей последовательности поворотов связанной системы координат относительно стартовой: $\zeta(\psi) \rightarrow \eta(\varphi) \rightarrow \xi(\theta)$.

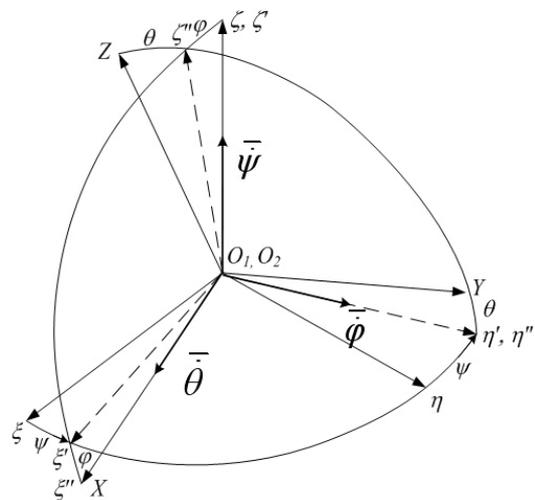


Рис. 2. Связь и взаимное положение систем координат

3. Особенности системы стабилизации ВСНТС в вертикальной плоскости

В процессе движения ВСНТС «скользит» над поверхностью путевой структуры, положение в пространстве которой зависит от рельефа местности. Зазор между магнитным подвесом и путевой структурой можно представить равным $Z_1 = S - h$ (см. рис. 1), где Z_1 – координата верхней кромки полюса электромагнита; h – величина, учитывающая возмущение путевой структуры. Таким образом, возникает задача стабилизации зазора $S = const$. Обычно требуемое значение зазора S во всех диапазонах скоростей поддерживается равным 10 мм.

Система стабилизации зазора может быть построена с использованием различных вариантов со-

става измерителей параметров движения электромагнита и вагона:

- а) зазора, измеряемого при помощи датчиков зазора;
- б) ускорения, измеряемого акселерометром;
- в) зазора и ускорения, измеряемых комбинированным составом датчиков.

Для решения задачи синтеза алгоритма стабилизации может быть использована следующая математическая модель системы магнитного подвеса:

$$\begin{aligned} \ddot{Z}_1 &= a_1 S - a_2 I; \\ TI + I &= \frac{1}{R} U + \frac{a_3 \dot{S}}{R}; \\ Z_1 &= S + h. \end{aligned} \quad (1)$$

Коэффициенты вычисляются по следующим зависимостям:

$$\begin{aligned} a_1 &= -\frac{1}{m_1} \left. \frac{\partial F}{\partial S} \right|_{S=S_0, I=I_0}; \quad a_2 = \frac{1}{m_1} \left. \frac{\partial F}{\partial I} \right|_{S=S_0, I=I_0}; \\ T &= \frac{L_0}{R}; \quad a_3 = -I_0 \left. \frac{\partial L}{\partial S} \right|_{S=S_0, I=I_0} \end{aligned} \quad (2)$$

- где I – ток в обмотке электромагнита;
- U – входное напряжение обмотки электромагнита;
- m_1 – масса электромагнита;
- F – подъемная сила электромагнита;
- L – коэффициент самоиндукции электромагнита;
- R – активное сопротивление катушки электромагнита.

Анализ использования состава измерений показывает, что наиболее рациональным является ком-

бинированный вариант, основанный на одновременном измерении зазора и ускорения транспортного средства в вертикальной плоскости. Аналогичный подход может быть использован при рассмотрении двухмассовой модели ВСНТС: объект управления включает электромагнит и парциальную часть полезного груза (вагона). В этом случае функциональная схема системы стабилизации ВСНТС по вертикальной оси может быть представлена в виде, показанном на рис. 3.

Возможный вариант закона управления электромагнитом, реализуемого регулятором:

$$U_y(t) = K_0 Z_1 + K_1 \dot{Z}_1 + K_2 \ddot{Z}_1, \quad (3)$$

где K_0, K_1, K_2 – коэффициенты закона управления, подлежащие определению в процессе синтеза. Структурная схема алгоритма стабилизации показана на рис. 4.

Обратные связи с параметрами ξ_0 и ω_0 введены для получения необходимых амплитудно-частотных характеристик системы по отношению к возмущению путевой структуры.

Сигнал с выхода акселерометра проходит через фильтр, передаточную функцию которого выбирают в виде $W(s) = \frac{T\phi s}{T\phi s + 1}$ с целью исключения постоянной составляющей. После двойного интегрирования получаем текущее значение координаты Z_1 . Таким образом, выбранный алгоритм стабилизации реализует принцип управления по возмущению.

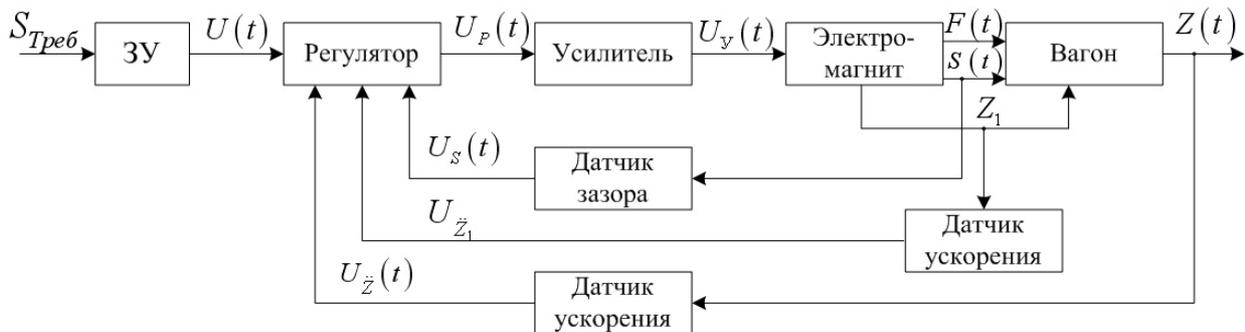


Рис. 3. Функциональная схема системы стабилизации

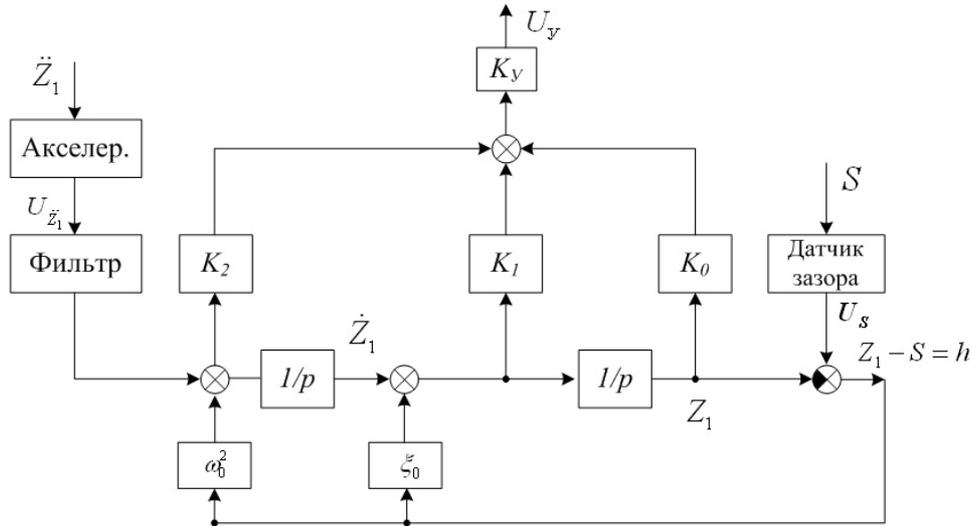


Рис. 4. Структурная схема алгоритма стабилизации

На основе уравнения (1) и зависимостей (2) получим следующее уравнение, описывающее динамику электромагнита:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{Z}_1 &= G - F - K_\partial \dot{Z}_1 - K_{ynp} Z_1 = \\ &= \Delta P - K_\partial \dot{Z}_1 - K_{ynp} Z_1, \end{aligned} \quad (4)$$

передаточная функция которого представима в виде

$$W(s) = \frac{Z_1(s)}{\Delta P(s)} = \frac{K_{Oy}}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2}, \quad (5)$$

где $\omega = \sqrt{\frac{K_{ynp}}{M}}$ – частота собственных колебаний объекта управления;

$$\xi = \frac{K_\partial}{2\sqrt{m_1 \cdot K_{ynp}}} \text{ – степень затухания;}$$

$$K_{Oy} = \frac{1}{m_1} \text{ – постоянный коэффициент;}$$

K_{ynp} – коэффициент упругости подвеса;

K_∂ – коэффициент демпфирования подвеса.

Для частоты вынужденных колебаний электромагнита $\omega = 25,12 \text{ c}^{-1}$, с использованием параметров закона управления $K_0 = 12,5$, $K_1 = 650$, $K_2 = 11500$, соответствующих параметров усилителя мощности, датчиков зазора и ускорения была построена и исследована модель системы стабили-

зации зазора в среде MATLAB/SIMULINK (рис. 5). Результаты моделирования показаны на рис. 6, где обозначено: 1 – переходный процесс по изменению величины зазора, 2 – реакция системы стабилизации на возмущение.

В результате моделирования были получены следующие показатели качества:

время переходного процесса $t = 0,4 \text{ с}$; перерегулирование $\sigma = 0 \%$; установившаяся ошибка $\varepsilon = 0 \text{ м}$. Запасы устойчивости по амплитуде составили 18 дБ, по фазе – 41,5 град.

Анализ результатов моделирования показал, что изменение параметров в законе стабилизации в пределах допусков не влияет на общую устойчивость системы, а только изменяет запасы устойчивости. Однако изменение большинства параметров влияет на ширину полосы пропускания и диапазон амплитуд входного сигнала, что может привести к снижению точности и быстродействия системы стабилизации электромагнита.

Следует отметить, что по такой же методике исследуется модель двухмассовой системы (электромагнит – полезный груз). При этом выбор оптимального состава измерителей параметров состояния электромагнитов и полезного груза должен обеспечивать наблюдаемость системы в целом.

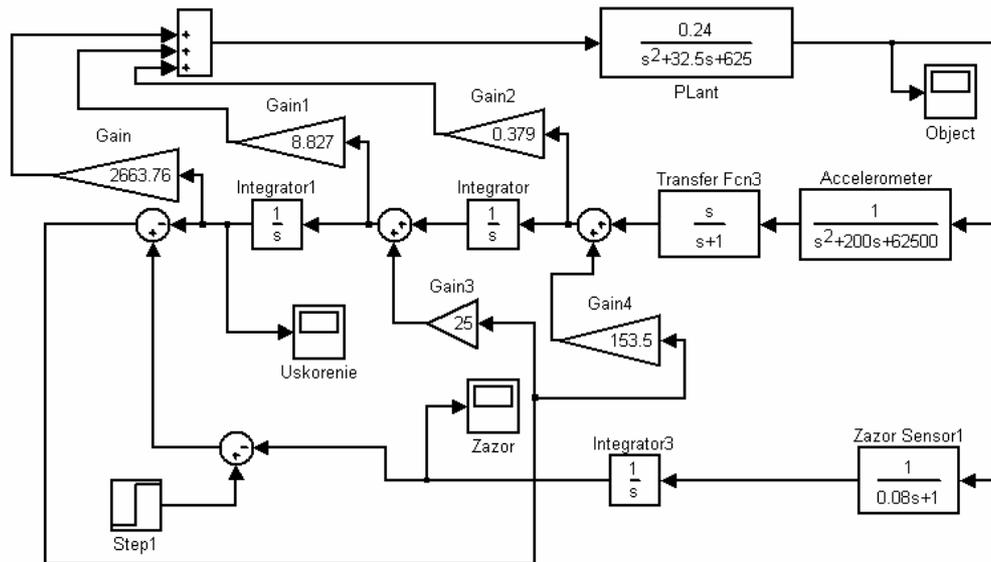


Рис. 5. Схема моделювання системи стабілізації ВСНТС в MATLAB/SIMULINK

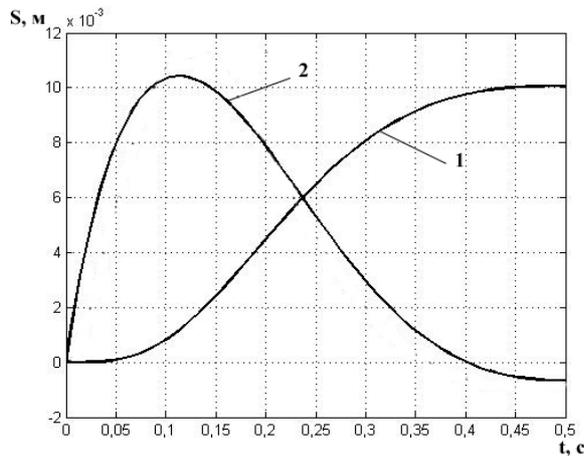


Рис. 6. Результати моделювання системи стабілізації ВСНТС

Заключення

Таким образом, задача проектирования транспортных средств на магнитном подвесе и систем управления ими является весьма актуальной. Важными являются следующие частные задачи:

- разработка математических моделей и исследование динамических свойств многомассовой системы (n электромагнитов системы подвеса – полезный груз) с учетом характера связей между элементами системы и пространственного движения каждого элемента;

- синтез системы стабилизации многомерного статически неустойчивого объекта управления.

Дальнейшие исследования предусматривают решение вышеперечисленных частных задач с последующим полунатурным моделированием исследуемых систем и реализацией управляющего устройства на микропроцессорной основе в реальном масштабе времени.

Литература

1. Züblin Ed., Bachmann H. MSB-Track-2010. A new guideway for the TRANSRAPID [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://technologie.zueblin.de> (6.09.2007).
2. Дзензерский В.А., Омеляненко В.И., Васильев С.В., Матин В.И., Сергеев С.А. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией. – К.: Наук. думка, 2001. – 497 с.
3. Зайцев Г.Ф., Бурсов Г.В. Повышение динамической точности и показателей качества переходных процессов системы автоматического управления магнитным подвесом с помощью дифференциальной связи // Проблемы управления и информатики. – 2007. – № 4. – С. 23-32.

Поступила в редакцию 27.11.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И. Рогачев, Национальный технический университет “ХПИ”, Харьков.