

толщины входной кромки на разброс величины критического кавитационного запаса.

Литература

1. Шейпак А.А. Влияние технологических отклонений размеров проточной части динамического пневмопривода на изменение его КПД. *Машиностроение и инженерное образование*. 2009, №4 (21), с. 2-10 (0)
2. Лепешкин А.В., Михайлин А.А., Шейпак А.А. Гидравлика и гидропневмопривод. Часть 2-ая, Гидравлические машины и гидропневмопривод: Учебник / Под ред. А.А. Шейпака. - 5-е изд., доп. и перераб. - М: МГИУ, 2008. - 352 с.
3. Берков Н.А., Миносцев В.Б., Шишанин О.Е. Курс высшей математики ч.3 —МГИУ, 2007. — 192 с.

Обеспечение управляемости мобильных платформ для роботизированных комплексов вооружения и военной техники

д.т.н. проф. Шипилевский Г.Б.
Университет машиностроения
(495) 223-05-23, доб. 1527

Аннотация. Обеспечение управляемости мобильных платформ для роботизированных комплексов вооружения и военной техники должно происходить с учётом особенностей ограниченной информационной поддержки оператора, наблюдающего за движением управляемого объекта по монитору видеоканала и управляющего этим движением по каналу дистанционного управления. При этом управление скоростью не предполагает особых затруднений, но остановка объекта перед внезапно обнаруженным препятствием должна происходить с минимальной задержкой. В то же время для обеспечения траекторной управляемости с учётом неизбежной инерционности рекомендуется ввести в структуру системы управления форсирование управляющего сигнала по первой производной и обратную связь по фактической угловой скорости поворота.

Ключевые слова: *мобильные платформы, роботизированные комплексы вооружения и военной техники, управляемость, скорость, траектория*

Мобильные платформы являются несущей частью комплексов вооружения и военной техники (ВВТ), призванной обеспечивать их подвижность с нужными свойствами. Укажем, что термин «роботизированные» слабо отражает суть таких объектов, которые на самом деле следует рассматривать как находящиеся под дистанционным управлением по радио или проводам подвижные средства ВВТ, причём в этом управлении присутствует обратная связь посредством установленных на них видеокамер.

Особенностью этого управления является ограниченное информационное обеспечение, существенно уступающее тому, которое имеет водитель обычного наземного транспортного средства. Оператор, управляющий движением объекта, имеет только изображение на дисплее того, что видит и передаёт видеокамера, направленная вперёд по ходу (может присутствовать и видеокамера заднего вида, но её использование не рассматривается). Из-за этого он лишён таких вроде бы вспомогательных, но на самом деле достаточно важных источников информации, как боковое зрение и ощущения вестибулярного и опорного аппаратов. Понятно, что это не может не сказаться на качестве управления и потребует несколько иных подходов, отличающихся от обычных решений.

Специфическое назначение объектов такого рода и условия их использования вкупе с указанными особенностями накладывают специфические требования качества управления движением. Во-первых, нужно сформулировать эти требования, а во-вторых, попытаться предложить средства, облегчающие их выполнение. За базовое соображение примем высказанное в [1] предложение оценивать управляемость по точности отработки управляющего воздействия. При этом будем рассматривать обе задачи управления – по скорости движения

и по кривизне траектории.

Управление скоростью в данном случае также имеет определённую специфику. Оператор по реальной обстановке определяет необходимость перемещения объекта в другое место и скорость, с которой оно должно происходить. Оценка действительной скорости движения объекта опирается на динамику изменения изображения на мониторе оператора.

Ограничения могут возникнуть в случае, если перемещение должно будет происходить по достаточно неровной поверхности, и колебания объекта могут оказаться недопустимыми по виброударным нагрузкам на установленные средства ВВТ. Точно так же более осторожное управление понадобится, если имеется опасность слишком жёсткого наезда на неровности, чреватого повреждением или опрокидыванием объекта. Однако оператор может видеть окружающую объект местность только в пределах поля обзора видеокамеры, и прогноз ожидаемых условий движения будет весьма неуверенным, а оценка фактической скорости движения будет весьма приблизительной (если, конечно, не принимать во внимание возможность предварительной тренировки оператора на местности, похожей на ту, где предстоит управление). Вряд ли поможет передача по каналам обратной связи данных о фактической скорости движения объекта, например, накладкой изображения спидометра или цифрового значения на экран монитора.

Исходя из этого можно с уверенностью считать, что в основном оператор не будет иметь адекватной информации о фактической скорости движения объекта и её соответствии условиям движения. Поэтому его решения об изменении этой скорости в ту или иную сторону будут приниматься в условиях существенной неопределённости. Однако и требования к точности задания и поддержания необходимой скорости здесь достаточно свободны, если не считать указанных выше ограничений, а также то, что изменение скорости по команде оператора будет происходить с некоторой задержкой, в основном из-за естественной инерционности привода и самого объекта. Единственным случаем более жёстких требований к заданию и изменению скорости можно считать ситуацию обнаружения на пути объекта неожиданного препятствия, что потребует интенсивного торможения вплоть до полной остановки.

Поэтому необходимая управляемость объекта по скорости может быть обеспечена достаточно просто, если будут предусмотрены два ограничения. Первое должно быть связано с возможным появлением чрезмерных колебаний остова на неровной поверхности. Здесь может быть рекомендовано снабдить объект датчиками колебаний (например по ускорениям), и при выходе их сигналов за допустимые пределы снижать скорость движения ниже заданной оператором. В какой-то степени возможна оценка оператором такой ситуации по колебаниям изображения на мониторе, принимающем сигнал видеокамеры, установленной на объекте. Во всяком случае здесь придётся искать разумное решение в ходе испытаний в реальных условиях.

Второе должно обеспечивать максимально возможную интенсивность торможения с учётом того, что оснащение объекта тормозной системой с приводом, включаемым по электрическому сигналу из приёмника команд, вряд ли целесообразно из-за необязательного усложнения и неизбежного запаздывания. Представляется более разумным, учитывая преимущественное использование в объектах такого рода аккумуляторного электропривода, применить в нём самотормозящийся редуктор, например червячный. Тогда для самого интенсивного торможения оператору достаточно будет просто сбросить задание скорости до нуля.

Более сложными являются вопросы, связанные с траекторным управлением, осуществляемым посредством задания оператором кривизны траектории. Здесь сразу же нужно подчеркнуть, что большинство объектов такого рода, судя по информации, доступной в Интернете по запросу «Наземные боевые роботы», имеют гусеничные ходовые системы. Что касается объектов на колёсном ходу, то сведений о применяемых способах управления поворотом не приводится. Косвенно, но с большой долей вероятности, по изображениям таких объектов можно предположить, что они не имеют поворачивающихся колёс и управляются аналогично гусеничным. Это позволяет делать некоторые общие предположения.

Как известно, управление поворотом гусеничных машин может осуществляться одним из двух способов (не считая четырёхгусеничных машин с шарнирно-сочленённым остовом или машин двухзвенных). Разностно-тяговый способ реализуется за счёт образования поворачивающего момента ограничением тягового усилия отстающей гусеницы с помощью фрикционного или планетарного механизма поворота. Однако, несмотря на отсутствие в открытых источниках каких-либо подробностей устройства рассматриваемых объектов, можно с уверенностью предполагать, что этот способ вряд ли используется, и механизмы поворота указанных типов скорее всего не применяются. Они усложняют и утяжеляют объект и требуют затрат энергии на сервоприводы управления. В пользу такого мнения говорит также упомянутое выше преимущественное применение тягового электропривода, при котором гораздо легче и проще использовать разностно-скоростной способ за счёт применения индивидуальных приводов ведущих колёс.

Этот способ заключается в том, что частоты вращения ведущих колёс с разных сторон объекта задаются неодинаковыми. Как правило, различие вводится таким образом, чтобы увеличение частоты вращения ведущих колёс с внешней стороны и уменьшение её с внутренней стороны были равными. При этом сохраняется заданная поступательная скорость мгновенного центра поворота, который является проекцией мгновенного центра скоростей на продольную ось машины. Динамика такого поворота описывается достаточно сложными соотношениями. Применительно к электроприводу ведущих колёс она может быть описана следующим образом.

Прежде всего, рассмотрим динамику формирования управляющего сигнала на поворот объекта. Оператор вводит команду посредством имеющегося у него органа управления, например джойстика, отклоняя его в ту или иную сторону на угол, определяющий задаваемую кривизну поворота (и здесь приходится предполагать, что управление движением объекта производится отклонением джойстика с двумя степенями свободы, что можно считать наиболее простым и удобным). Далее команда преобразуется в кодовую комбинацию, передаваемую по радиоканалу или по кабелю, принимается и декодируется на объекте, после чего становится управляющим воздействием для тяговых электродвигателей на повышение или понижение частоты вращения. Обычно рассматривается случай пропорциональности между отклонением органа управления (джойстика) от среднего положения и задаваемыми приращениями частот вращения ведущих колёс с разных сторон (с внешней стороны на увеличение, а с внутренней на уменьшение).

Считая, что суммарной длительностью этих действий можно пренебречь, динамику реального изменения частот вращения можно описать общеизвестным видом передаточной функции преобразования отклонения джойстика α в приращение частот вращения электроприводов ведущих колёс $\Delta\omega$:

$$W_k(p) = \frac{k}{(T_{em}p+1)(T_{mech}p+1)} \quad (1)$$

где: k - коэффициент передачи; p — оператор Лапласа; T_{em} - электромагнитная постоянная времени; T_{mech} - электромеханическая постоянная времени.

Наличие двух постоянных времени говорит об инерционности преобразования, причём более весомой здесь будет постоянная T_{mech} , на которую будет существенно влиять инерционная масса вращающихся частей объекта (кстати говоря, эта же инерционность наложится и на управление скоростью). Затем рассмотрим соотношения, приведенные в [2], и придём к выводу, что характер формирования управляющего воздействия на поворот объекта в силу особенностей электропривода, отражённых в характере передаточной функции (1), будет отличаться от описанного в упомянутом источнике процесса. Там указывалось, что при входе в поворот можно ожидать заброса тягового усилия с внешней (забегающей) стороны, пропорционального скорости ввода разницы $\Delta\omega$. Здесь же инерционность нарастания этого воздействия скорее заставит ожидать запаздывания входа в поворот.

Второе обстоятельство будет связано с тем, что такой способ поворота при постоянном соотношении $\Delta\omega$ и α ставит радиус или кривизну поворота в зависимость от скорости движения объекта. Чем она больше, тем при одном и том же значении α кривизна будет меньше, что ещё добавит инерционности управления. Не случайно в современной тракторной технике в гусеничных тракторах с разностно-скоростным способом управления поворотом осуществляется инвариантное управление, при котором зависимость между $\Delta\omega$ и α не является постоянной, а растёт с увеличением скорости движения.

Третье обстоятельство вытекает из самой сути тракторного управления. Водитель, управляющий самоходной машиной, в конечном итоге изменяет направление движения (курсовой угол), воздействуя на угловую скорость поворота через изменение кривизны. Фактически имеет место интегрирование угловой скорости, в результате которого и происходит необходимое изменение курсового угла.

Наконец, нужно учитывать возможность заноса при входе в поворот или выходе из поворота. Хотя скорости таких объектов вряд ли сравнимы со скоростями обычных машин, попадание на скользкие участки дороги нельзя исключать. Применительно к быстроходным гусеничным машинам такие ситуации рассмотрены в [3], где предложены рекомендации по коррекции управления. Здесь также можно предложить аналогичные, но несколько иные меры, которые должны свести к минимуму действие отмеченных затруднений.

Представляется, что в совокупности повышение тракторной управляемости рассматриваемых объектов может быть достигнуто следующими средствами. Система тракторного управления должна быть запрограммирована на то, чтобы каждому значению отклонения органа управления (джойстика) α соответствовало значение задаваемой угловой скорости поворота объекта ω . При этом максимальному отклонению α_{\max} должна соответствовать максимальная угловая скорость ω_{\max} , определяемая поворотом вокруг остановленных движителей внутренней (отстающей) стороны. На объекте управляющее воздействие в виде приращений $\pm\Delta\omega$ должно формироваться по условию:

$$\Delta\omega = \frac{\omega_{\text{зад}} \times B}{2r}, \quad (2)$$

в котором $\omega_{\text{зад}}$ – задаваемая угловая скорость поворота; B – ширина колеи; r – радиус ведущего колеса.

Такое управление обеспечит требуемую инвариантность, но нужно иметь в виду, что реальная угловая скорость поворота $\omega_{\text{факт}}$ будет отставать от задаваемой не столько из-за инерции самого объекта, которая уже учтена постоянной времени T_{mech} , сколько из-за скольжения гусениц или увода колёс. Эти факторы давно описаны как в упомянутой работе [3], так и в [4], и в конечном итоге приведут к тому, что реальное преобразование приращения $\Delta\omega$ в угловую скорость поворота $\omega_{\text{факт}}$ будет описываться передаточной функцией

$$\omega_{\text{факт}} = \frac{2\Delta\omega \times r}{B} \times \frac{1}{T_0 p + 1}, \quad (3)$$

в которой T_0 – постоянная времени неустановившегося поворота, зависящая от массы объекта и грунтовых условий.

Для компенсации этой инерции целесообразно наложить дополнительную обратную связь по фактическому протеканию поворота, для чего на объекте должно вестись измерение его угловой скорости, не связанное с вращением ведущих колёс, а выполняемое автономным датчиком. В результате этого измерения к приращениям $\Delta\omega$ должна добавляться поправка $\delta\omega$, определяемая соотношением

$$\delta\omega = A \times (\omega_{\text{зад}} - \omega_{\text{факт}}), \quad (4)$$

в котором A – коэффициент пропорциональности, найденный опытным путём в ходе испытаний или с помощью компьютерного моделирования.

Эта обратная связь даст ещё один полезный эффект. Она будет способствовать стаби-

лизации заданного режима движения, в том числе прямолинейного, который можно трактовать как поворот с нулевой угловой скоростью, препятствуя действию неизбежных возмущений.

Для полной компенсации инерционности может быть также добавлено форсирование команды управления $\omega_{зад}$ по производной с постоянной времени T_ϕ , которую также придётся определять экспериментально. Ориентировочно область поиска значений T_ϕ можно указать вблизи суммы значений T_0 и T_{mech} , хотя здесь могут быть затруднения. Если T_{mech} определяется массами частей объекта и может быть определена довольно точно, то T_0 больше зависит от условий поворота и её оценка априори будет приблизительной. Структурная схема предлагаемой системы управления поворотом показана на рисунке 1.

Осуществление этого управления при наличии на объекте электронных управляющих устройств никаких затруднений не вызовет. В частности, изменение коэффициента обратной связи A и постоянной времени T_ϕ будет выполняться корректировкой программного обеспечения. С помощью этих устройств может быть осуществлено также и такое специфическое управление, как разворот на месте. Необходимость в нём будут определять тактико-технические требования к использованию установленных средств ВВТ. Поясним, что такой разворот достигается разнонаправленным вращением ведущих колёс разных бортов.

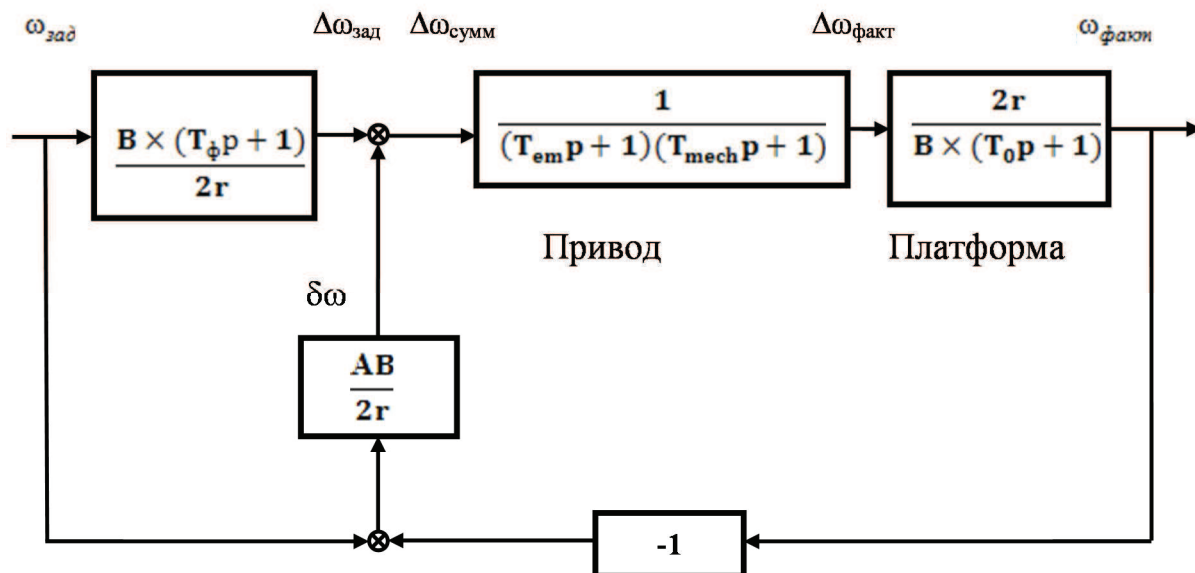


Рисунок 1. Структурная схема предлагаемой системы управления

Сочетание такого управления с управлением скоростью наиболее просто реализовать с помощью того же джойстика, имеющего две степени свободы. Его отклонения вперёд и назад будут задавать скорость движения объекта, а вправо и влево угловую скорость его поворота в нужную сторону. Разворот на месте может быть получен, если джойстик будут отклонять строго вправо или влево в поперечной плоскости без перемещения вперёд или назад. Величина перемещения будет задавать угловую скорость поворота через регулирование частот вращения ведущих колёс в разные стороны. Для безопасности во избежание произвольного разворота неподвижного объекта при случайном отклонении джойстика может быть предусмотрена блокировка отдельным средством. Им может быть, например, кнопка на головке джойстика, нажатие на которую принудительно обнуляет сигнал скоростного задания, даже если отклонение джойстика слегка вышло из поперечной плоскости.

Заключение

По всей видимости, обеспечение необходимой управляемости мобильных платформ по скорости особых затруднений не представит. Единственные предосторожности должны быть связаны с возможным попаданием объекта в условия, когда придётся снижать скорость движения по условиям защиты установленных средств ВВТ от чрезмерных виброударных

нагрузок или для предупреждения аварии объекта в целом. Кроме того, представляется целесообразным не оснащать платформу тормозной системой, а применить в приводе ведущих колёс самотормозящие механизмы типа червячных редукторов.

Необходимая траекторная управляемость может быть обеспечена за счёт того, что оператор будет задавать угловую скорость поворота, а она будет осуществляться с форсированием по первой производной и наложением дополнительной обратной связи по фактическому значению этой величины. Однако постоянную времени форсирования и коэффициент обратной связи придётся определять экспериментально.

Наиболее удобным органом управления движением объекта представляется джойстик с двумя степенями свободы и кнопкой, обнуляющей задаваемую скорость для осуществления разворота на месте. Нажатие этой кнопки может при отсутствии бокового отклонения джойстика служить командой экстренного торможения.

Литература

1. Шипилевский Г.Б. Методические основы решения задач управления движением наземных транспортных средств. В сб. «Проектирование колёсных машин» изд. МГТУ им. Баумана М. 2006.
2. Шипилевский Г.Б. Особенности динамики неустановившегося поворота гусеничного трактора с разностно-скоростным механизмом. Журнал «Тракторы и сельскохозяйственные машины» № 5, 1995.
3. Кондаков С.В. Повышение подвижности быстроходной гусеничной машины путём автоматизации управления криволинейным движением. Докт. дисс. М., 2009.
4. Клейн Ю.К. Исследование системы автоматического вождения шарнирно-сочленённых колёсных тракторов на пахоте. Канд. дисс. М., 1973.

Самовозбуждение колебаний остова колесного трактора при работе в тяговом режиме

к.т.н. проф. Щетинин Ю.С., к.т.н. доц. Есеновский-Лашков М.Ю., к.т.н. доц. Сергеев А.И.
Университет машиностроения
(495)223-05-23, доб.1527, jsetinin@mail.ru

Аннотация. Теоретически обосновывается возможность самовозбуждения колебаний остова колесного трактора в продольной плоскости при работе его в тяговом режиме. Используются зависимость радиуса качения пневматического колеса от вертикальной нагрузки на него и от величины крутящего момента, математическая модель качения пневматического колеса при переменной вертикальной нагрузке и двухмассовая линейная модель колебаний остова трактора в продольной плоскости.

Ключевые слова: колебательная система, математическая модель, самовозбуждение колебаний, радиус качения, пневматическая шина

Рассмотрим случай прямолинейного движения колесного полноприводного трактора с нагрузкой на крюке. В общем случае под действием переменных внешних сил остов трактора будет совершать колебания. Ограничимся рассмотрением колебаний только в продольной плоскости и только двух видов: вертикальных колебаний центра масс и угловых колебаний вокруг этого центра.

Схема сил и моментов, действующих на трактор (без учета моментов сопротивления качению колес), представлена на рисунке 1. Здесь G - вес трактора; N_1 и N_2 - нормальные реакции со стороны опорного основания соответственно на передние и задние колеса; $P_{к1}$ и $P_{к2}$ - касательные силы тяги передних и задних колес; $P_{кр}$ - крюковая нагрузка; P_j - верти-