

УДК 629.37

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ РАССРЕДОТОЧЕННОГО САМОХОДНОГО
МОДУЛЬНОГО ТРАНСПОРТЕРА© 2019 г. А. А. Лавриков^{1,*}, С. М. Зуев¹, А. А. Скворцов¹, Д. О. Варламов¹¹Московский политехнический университет, г. Москва, Россия

*e-mail: near2@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.06.2017 г.

Приводятся доводы в пользу применения транспортеров, предназначенных для перевозки крупногабаритных неделимых тяжеловесных объектов, которые состоят из отдельных самоходных модулей. Приводятся основные принципы управления таким рассредоточенным транспортером с помощью современных информационных технологий, с точки зрения рулевого управления. Представлены варианты схем компоновки некоторых транспортеров, а также схемы рулевых программ, которые они могут выполнять. Рассмотрена работа трехуровневой системы управления движением рассредоточенного транспортера, приведена ее функциональная схема.

DOI: 10.1134/S0235711919010115

Самоходные модульные транспортеры (СМТ) – это специальные средства перевозки грузов, скомпонованные из самоходных и несамоходных транспортных модулей (рис. 1). Самоходные транспортеры используют для перевозки тяжеловесных неделимых грузов сложной формы. Они являются проводником передовых технологий в таких стратегических отраслях хозяйственной деятельности как промышленное строительство, судостроение, тяжелое машиностроение, нефтегазовая промышленность, энергетика и добывающие отрасли (рис. 2).

Высокие требования, предъявляемые к качеству и срокам готовности объектов в этих отраслях, побуждают изготовителей большую часть работ выполнять в заводских условиях. Такие условия позволяют максимально использовать возможности высоких заводских технологий, близость расположения складов и коммуникаций. Такое решение проблемы ускорения готовности объектов и повышения качества их изготовления приводит к тому, что изготавливаемые объекты становятся все более крупноблочными, габаритными и тяжеловесными. К подобным объектам можно отнести крупные строительные модули, фрагменты океанских судов, реакторы для атомных станций,

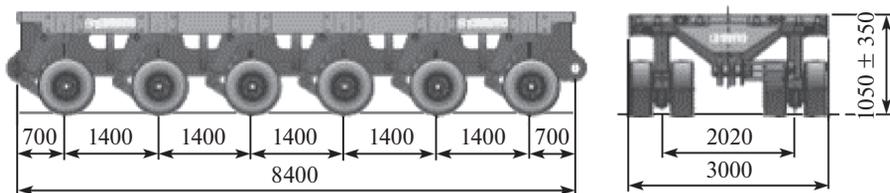


Рис. 1. Пример элементарного транспортного модуля [1].

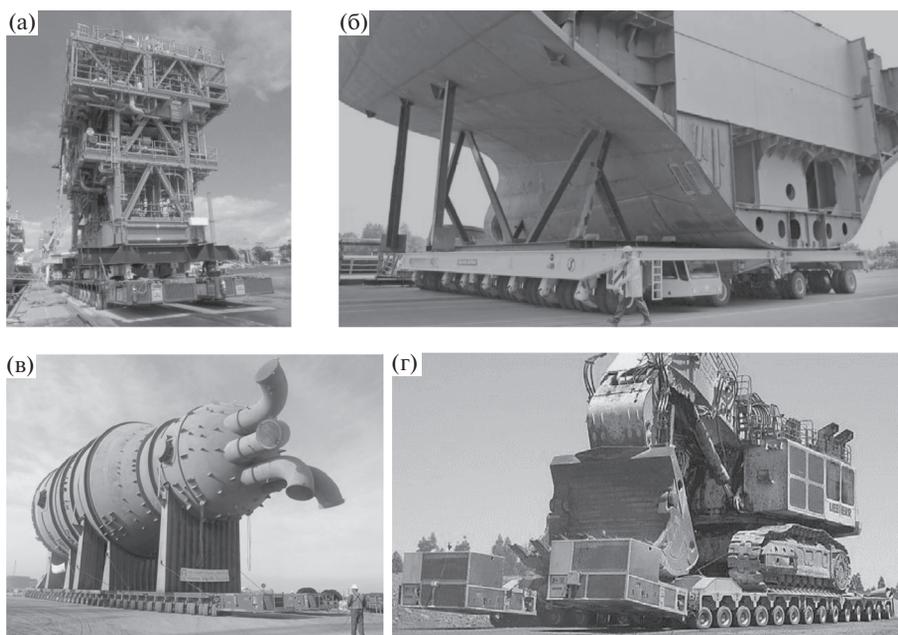


Рис. 2. Области промышленного применения СМТ: а – промышленное строительство; б – судостроение; г – добывающие отрасли; в – энергетика [2].

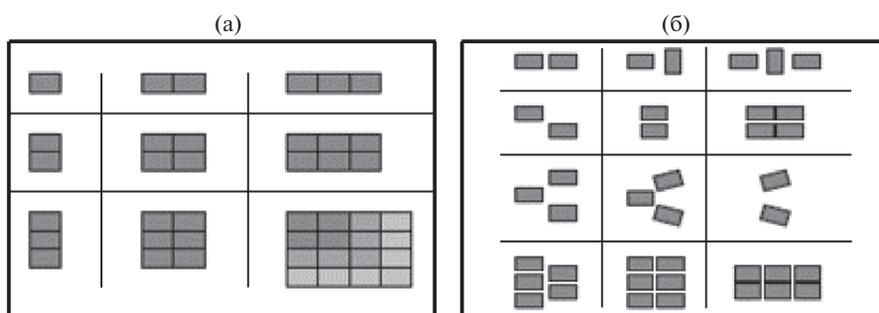


Рис. 3. Варианты возможных схем СМТ: а – жесткие; б – разнесенные [2].

парогенераторы, оборудование и емкости для нефтегазовой и химической промышленности. Перевозимая масса подобных объектов к концу 80-х годов прошлого века достигала 2–3 тысяч тонн. При этом использовалась строгая схема построения СМТ, где все модули располагались симметрично и были жестко связаны между собой (рис. 3, а).

Максимальную массу перевозимых объектов можно довести до 15 тысяч тонн, а их длину – до десятков метров, если использовать гибкую схему построения СМТ (рис. 3, б). Гибкая схема подразумевает отдельные грузовые модули и жестко связанные между собой модульные группы (все самоходные), число и вид которых определяется конфигурацией и массой перевозимого груза. Эти модули и группы связанных модулей, подведенные под несколько точек перевозимого объекта, поднимают и перемещают его к

месту финальной установки. Согласованное управление движением отдельных модулей и модульных групп этого рассредоточенного по площади СМТ осуществляется из единого центра. Учитывая малую скорость передвижения СМТ, можно пренебречь анализом продольно-угловых колебаний этих систем принимая тот факт, что коэффициент гашения колебаний и угловая частота уменьшаются наиболее интенсивно (до 35% и более [3]) с увеличением числа осей до шести и более при дальнейшей их стабилизации.

Опытные и расчетные исследования на механических моделях и с использованием современных программных продуктов вынужденных колебаний СМТ с различным размещением заданного числа осей по базе одной длины с заданными допущениями показали, что расстановка осей по базе не оказывает влияния на колебания подрессоренных масс, поэтому ее нельзя считать решающим конструктивным фактором для получения высоких показателей плавности хода СМТ. В связи с этим, при выборе схемы ходовой части следует исходить из других более важных эксплуатационно-технических характеристик: грузоподъемность, масса ходовой части, ее габариты и т.д.

Анализ опытных данных и теоретические исследования показали, что для получения высоких показателей плавности хода многоосных СМТ особое внимание необходимо сосредоточить на выборе оптимальных характеристик подрессоривания. При этом стоит обратить внимание на то, что рекомендации по оптимизации характеристик подрессоривания, касающихся выбора жесткости подвески, а также величин статических и динамических ходов подвески, величин гашений и сухого трения, разработанные для двух- и трехосных СМТ, можно отнести к многоосным и многоопорным СМТ.

Рассредоточенный модульный транспортер имеет ряд принципиальных особенностей, на которые следует обратить внимание.

Во-первых, это модульный принцип построения транспортера, который обеспечивает жесткую связь между самоходными и несамоходными модулями в модульных группах и дистанционную связь между самоходными модулями и самоходными модульными группами. Задействованные в СМТ модули могут иметь различную грузоподъемность и разнообразные конструкции. Модульный принцип позволяет наращивать грузоподъемность транспортера и изменять его габариты и конфигурацию по мере необходимости.

Во-вторых, самоходные модули оборудуются гидростатической трансмиссией, которая имеет следующий принцип действия: дизель приводит в действие поршневой насос с регулируемой подачей, который перекачивает жидкость под давлением в гидродвигатели с регулируемой подачей. Это приводит в действие планетарные шестерни-редукторы ступиц ведущих колес. Гидросистема транспорта является закрытой, поскольку главный насос забирает жидкость прямо от гидродвигателей, что ускоряет работу системы путем быстрого прогона масла в обратном направлении и исключает попадание в систему воздуха. Избыток подаваемого масла охлаждается и сливается в бачок.

В-третьих, изготовленные в заводских условиях тяжеловесные негабаритные объекты в местах монтажа располагаются на опорных подушках или поддонах над поверхностью земли. С помощью активной гидроподвески опор, имеющей рабочий ход до 700 мм, объекты перевозки можно загружать на СМТ без помощи кранов и перевозить в нужном направлении для проведения последующих операций или для финальной установки. Выгрузка объекта, как и его погрузка, выполняется путем опускания/подъема подвески. Выполнить погрузку и разгрузку СМТ в цеховых помещениях при помощи мостовых или стрелочных кранов представляется затруднительным, или даже невозможным, из-за ограниченного пространства. Кроме этого, система активной гидроподвески обеспечивает горизонтальное положение грузовой платформы СМТ и расположенного на ней груза во время преодоления транспортером дорожных

неровностей ландшафта. Специальное противоразрывное устройство обеспечивает безотказную работу подвески в случае внезапного разрыва одного из шлангов гидросистемы.

В-четвертых, самоходные модульные транспортеры оборудуются системой рулевого управления с приводом на каждую колесную опору. При криволинейном движении по радиусу все колесные опоры управляются так, что их центральные линии пересекаются в общем фокусе, который называют полюсом поворота транспортера, исключая чрезмерное стирание колес о дорожное покрытие. Такой тип рулевого управления обеспечивает транспортеру возможность описать полный круг вокруг полюса поворота. Каждая опора транспортера поворачивается под действием гидронасоса, которым управляет золотниковый гидрораспределитель по сигналу рассогласования, поступающему с контроллера управления поворотом опоры.

Если требуется перевезти крупногабаритный, тяжеловесный и несимметричный объект, у которого точки опоры на поверхности удалены друг от друга на расстояние от нескольких метров до десятков, то наиболее перспективным решением такой задачи видится в обеспечении согласованного и синхронного управления несколькими удаленными друг от друга и жестко не связанными между собой модулями и связками модулей. Это позволит с помощью современных информационных технологий и управления, практически не меняя материальную базу (модули те же самые), существенно (в 2–5 раз) увеличить габариты и массу перевозимых объектов, а также перевозить крупные объекты сложной конфигурации.

Для решения задачи управления разнесенным (рассредоточенным) транспортером необходимо иметь: единую систему управления трансмиссией всех самоходных модулей транспортера; единую систему управления подвеской всех модулей СМТ; единую систему рулевого управления всех модулей СМТ; согласованную работу всех перечисленных СМТ.

Ошибка хотя бы одной из упомянутых систем управления или отсутствие слаженности в их работе может привести к опрокидыванию перевозимого объекта, чему способствует высокое расположение его центра тяжести. Такая авария может иметь серьезные последствия для безопасности людей и подразумевает ощутимые экономические затраты на восстановление, подъем и транспортировку упавшего объекта, а также на ремонт поврежденных транспортера.

Рассмотрим подробнее организацию управления движением разнесенного СМТ на примере рулевого управления.

Контроллер опоры устанавливается на каждой колесной опоре и выполняет сравнение текущего углового положения опоры, полученного с датчика положения этой опоры, с заданным положением, полученным по мультиплексной шине с центрального контроллера и заданного рулевым колесом или джойстиком оператора.

Центральный контроллер связан по мультиплексной шине со всеми контроллерами опор, по которой передает на них задающее воздействие и принимает от них запросы на прерывание в случае неисправности (например, если отработанный угол поворота опоры отличается от заданного более чем на 5 градусов). Угловое положение каждой опоры в транспортере программируется по мультиплексной шине, когда установлена связь центрального контроллера со всеми контроллерами опор. При рулевой программе “криволинейное движение” каждая опора, при одинаковом для всех опор задающем воздействии, поворачивается на свой угол. Полный поворот такой опоры составляет 145 градусов, что позволяет реализовать другие типы рулевых программ, таких как “параллельное движение”, “перпендикулярное движение”, “диагональное движение”, “карусельное движение” (рис. 4).

Управлять движением разнесенного модульного транспортера целесообразно по уровневой схеме. Для этого один из модулей транспортера (один из головных) определяется как командный. На этом модуле располагается центральный контроллер, кото-

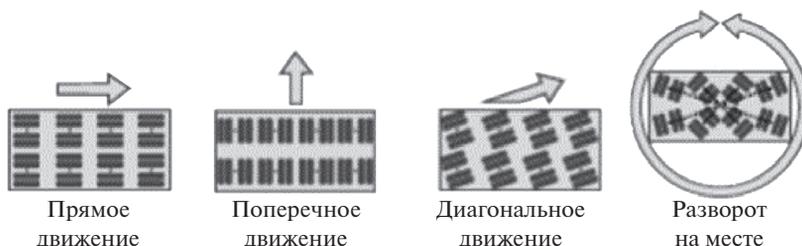


Рис. 4. Рулевые программы позиционирования СМТ [4].

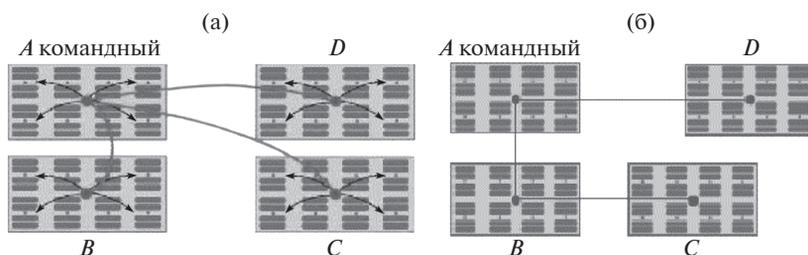


Рис. 5. Схемы межмодульной связи СМТ: а – схема “Звезда”; б – схема “Шина – Звезда” [5].

рый задает режим движения всего транспортера в целом. Центральный контроллер обеспечивает взаимодействие всех систем управления движением и синхронизирует работу всех модулей транспортера. Центральный контроллер является верхним уровнем управления СМТ, который получает команду от оператора и ретранслирует ее на модульные контроллеры, которые устанавливаются на каждом элементарном (единичном) модуле. Модульный контроллер обеспечивает средний уровень управления в качестве посреднической связи между командным модулем и каждой колесной опорой на других модулях разнесенного транспортера. Работой каждой колесной опоры СМТ управляет контроллер этой опоры, который следит за отработкой исполнительным устройством опоры, заданного с центрального контроллера и перенаправленного с модульного контроллера на контроллер опоры задающего воздействия. Контроллер опоры – это низший уровень управления СМТ.

Связь между центральным контроллером и модульным контроллером можно осуществлять как по проводной технологии, так и беспроводной. Проводная технология представляется более надежной, при этом для передачи данных целесообразно использовать хорошо проверенные временем оптоволоконную или CAN-BAS технологии. В качестве топологии проводного соединения, в зависимости от расстояния между модулями и количества модулей, наиболее подходят схемы типа “звезда”, “шина”, “звезда – шина” (рис. 5). Использование беспроводных технологий передачи данных типа расширенный $Wi-Fi$ ограничено числом модулей и расстоянием между ними. Такая 3-х уровневая схема целесообразна к применению в одной из ключевых систем управления движением распределенного СМТ – в системе рулевого управления.

Работа системы рулевого управления начинается с момента формирования СМТ, т.е. с момента погрузки, когда отдельные модули (единичные и сборные) будущего СМТ подгоняются под все опорные точки стоящего на поддонах объекта. Задача погрузки состоит в том, чтобы опорные точки объекта совпали с центрами тяжести под-

гоняемых под них модулей, при этом от модулей не требуется строгого геометрического расположения между собой.

У каждого единичного модуля 3-х уровневой системы, на его крайних, расположенных по диагонали опорах, (например, на передней левой и на задней правой) располагаются приемопередатчики глобальной системы геопозиционирования (GPS, ГЛОНАСС). В специальном исполнении данные приемопередатчиков определяют местоположение крайних опор с точностью до нескольких сантиметров. После расстановки всех модулей под опорными точками объекта, выбирается модуль, который в дальнейшем будет командным (на нем устанавливается центральный контроллер). Устанавливается и проверяется связь (проводная, беспроводная) между центральным контроллером и всеми модульными контроллерами.

По команде с центрального контроллера включаются приемопередатчики на всех модулях и определяют глобальное местоположение каждого модуля и каждой его опоры. На сенсорном экране центрального контроллера высвечивается схема расположения каждого модуля и всех его опор. Чтобы от глобальной системы координат перейти к локальной неподвижной системе координат, необходимо на сенсорном экране задать два базовых контура (базу) СМТ (например, его передний и левый габаритные контуры). Пересечение этих контуров будет являться началом локальной системы координат (рис. 6, а), где ось X – это продолжение одного из боковых контуров вновь скомпонованного СМТ, а ось Y – продолжение переднего контура данного СМТ.

На сенсорном экране центрального контроллера обозначается координата точки центра тяжести перевозимого объекта (точка Q) и через нее вдоль бокового базового контура строится продольная ось модульного СМТ. По команде инициализации, поступающей с центрального контроллера, все колесные опоры поворачиваются вдоль оси СМТ вне зависимости от положения модулей транспортера относительно друг друга. Углы поворота всех опор разнесенного СМТ считаются равным нулю и отсчет углового положения любой опоры СМТ начинают от данного.

В эту локальную систему координат центральный контроллер переводит координаты всех колесных опор. Для программы руления “криволинейное движение”, оператором вводятся следующие дополнительные данные: L – длина СМТ; B – ширина СМТ (рис. 6, а). Каждый конкретный СМТ характеризуется своими константами L и B , которые выполняют роль абсолютных координат. Зная эти константы можно задать координату продольной оси СМТ, как $B_0 = B/2$ и соответственно координаты всех его поворотных опор B_{ij}^k и L_{ij}^k .

Радиус поворота R , который определяет углы поворота опор относительно продольной оси СМТ и полюса поворота O , задается оператором с помощью рулевого колеса или джойстика на пульте управления центрального контроллера.

На отдельных участках дороги после полной остановки СМТ, с целью повышения его маневренности, оператор может изменить координату полюса поворота L_n , что изменит конфигурацию поворота (рис. 6, б), например, с целью уменьшения ширины коридора движения транспортера. Параметры L_n и R транспортера являются изменяемыми. Величина L_n задает положение точки Q на продольной оси транспортера. Относительно этой точки оператор задает радиус поворота транспортера R путем поворота опор на углы ϕ_{ij}^k , которые являются управляемыми параметрами (рис. 6, а).

Угол поворота каждой колесной опоры на каждом элементарном модуле рассчитывается модульным контроллером по формуле [3]

$$\phi_{ij}^k = \arctg \left(\frac{L_n}{R \mp B_{ij}^k} \right),$$

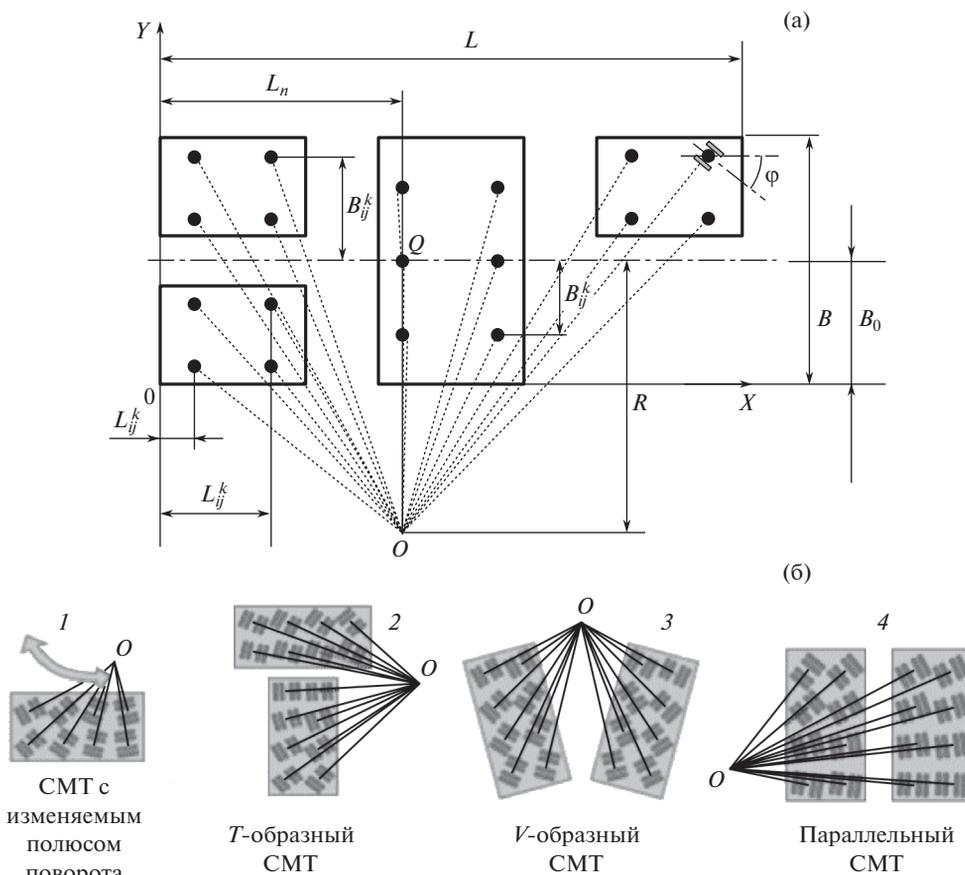


Рис. 6. Схема поворота опор разнесенного СМТ (а) и варианты конфигураций СМТ с регулируемым полюсом поворота (б).

где k – наименование (номер) элементарного модуля; i – номер опоры левого ряда элементарного модуля; j – номер опоры правого ряда элементарного модуля. Рассчитанный на модульном контроллере угол поворота опоры подается на каждый контроллер опоры в качестве задающего воздействия.

Центральный контроллер периодически связывается с приемопередатчиками всех модулей с целью мониторинга конфигурации СМТ. Если деформирование конфигурации превышает допустимые пределы, то центральный контроллер включает режим аварийного прерывания и останавливает СМТ для контроля и диагностики.

Рулевая программа “криволинейное движение” является основной программой руления СМТ при перемещении грузового объекта от места его сборки до места финальной установки. Некоторые из компоновок, разнесенных СМТ несимметричны, но это не является препятствием для эффективного управления ими. Возможные компоновки разнесенных СМТ представлены на рис. 6, б.

В местах погрузки и разгрузки СМТ целесообразно применять рулевые программы позиционирования “параллельное движение”, “диагональное движение”, “карусельное движение” [6, 7] и т.д., что требует отдельного исследования.

При наличии естественных ограничений на пути движения СМТ (например, при наличии неровностей ландшафта), движение транспортера по заданной траектории обеспечивается работой единой системы управления подвеской транспортера.

Таким образом, несмотря на большой практический интерес к использованию самоходных модульных транспортеров, в наибольшей степени за счет возможности перевозки крупногабаритных тяжелых грузов и улучшения маневренности, имеется ряд практических задач, связанных с анализом и улучшением режимов работы этого типа устройств. Одним из перспективных направлений развития направления самоходных модульных транспортеров заключается в разработке оригинальных универсальных алгоритмов управления их движением, направленной на повышение управляемости и устойчивости. Это направление активно развивается на кафедре “Электрооборудование и промышленная электроника” Московского политехнического университета, в том числе, в рамках, проводимых НИР и ОКР.

Работа выполнена в рамках проекта Минобрнауки России № 8.5171.2017/БЧ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. www.scheuerle.com (дата обращения: 12.01.2018)
2. www.kamag.com (дата обращения: 12.01.2018)
3. *Аксенов. П.В.* Многоосные автомобили. М.: Машиностроение, 1989. 140 с.
4. www.goldhofer.de (дата обращения: 12.01.2018)
5. www.cometto.com (дата обращения: 12.01.2018)
6. *Демидов Л.В.* Зависимости движения звеньев транспортного средства для перевозки крупногабаритных тяжеловесных грузов и их применение при создании системы управления поворотом колес. М.: Мир науки. 2014. Вып. 4.
7. *Горелов В.А., Масленников Л.А., Тропин С.Л.* Прогнозирование характеристик криволинейного движения многоосной колесной машины при различных законах всеколесного рулевого управления. М.: Наука и образование. 2012. Вып. 5.