

Анализ возможностей применения безвоздушных шин на автотракторной технике и сельхозмашинах

Analysis of possibilities for application of airless tires for motor-and-tractor vehicles and agricultural machinery

А. В. МИХЕЕВ, студ.

З. А. КОСТРОВА, инж.

В. В. БЕЛЯКОВ, д-р техн. наук

Д. В. ЗЕЗЮЛИН, канд. техн. наук

В. С. МАКАРОВ, канд. техн. наук

**Нижегородский государственный технический
университет имени Р. Е. Алексеева,
Нижний Новгород, Россия, micheev-av@mail.ru**

A. V. MIKHEEV, Student

Z. A. KOSTROVA, Engineer

V. V. BELYAKOV, DSc in Engineering

D. V. ZEZYULIN, PhD in Engineering

V. S. MAKAROV, PhD in Engineering

**R. E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical
University, Nizhny Novgorod, Russia,
micheev-av@mail.ru**

Ключевую роль в решении проблемы обеспечения устойчивого, безопасного и производительного функционирования мобильной наземной автотракторной техники, сельскохозяйственных машин и транспортно-технологических комплексов играет обеспечение подвижности и эффективности. На современном этапе развития для достижения требуемых значений тягового усилия и подвижности становится рациональным применение безвоздушных шин. Данный вид шин исключает потерю подвижности вследствие потери внутреннего избыточного давления газа и способен обеспечивать большее тяговое усилие по сравнению с традиционными пневматическими шинами. В результате анализа выявлено, что безвоздушные шины имеют характеристики, аналогичные пневматическим шинам, и в полной мере способны заменить их. Однако в ходе эксплуатации безвоздушные шины не способны изменять

жесткостные характеристики, в отличие от пневматических, в которых варьирование значения избыточного давления газа внутри шины приводит к изменению жесткости. В связи с этим в конструкцию безвоздушных шин необходимо ввести упругие элементы с изменяемыми в ходе эксплуатации характеристиками. Упругие элементы могут быть представлены пневмомышцами, электроактивными полимерами или особой механической конструкцией перемычек-спиц. Введение в конструкцию безвоздушных шин упругих элементов с изменяемыми жесткостными характеристиками приведет к повышению подвижности и эффективности тракторной и сельскохозяйственной техники. Появится возможность автоматического управления параметрами шины при помощи электронного блока управления без вмешательства оператора, благодаря чему влияние человеческого фактора сведется к минимуму.

Ключевые слова: сельхозмашиностроение; трактор; колесный движитель; непневматические шины; безвоздушные шины.

Ensuring of mobility and efficiency plays the key role in solution of problem of providing the stable, safe and efficient operation of mobile terrestrial motor-and-tractor vehicles, agricultural machinery, transport and technological complexes. At the present stage of development, for achievement of desired values of traction force and mobility, the application of airless tires becomes rational. This type of tires excludes the loss of mobility because of the loss of excessive internal gas pressure, and it is able to provide higher traction force in comparison with conventional pneumatic tires. As a result of analysis, it is found that the airless tires have characteristics similar to pneumatic ones, and they are fully capable to replace them. However, the airless tires cannot change stiffness properties during operation, in contrast to the pneumatic ones, in which the variation of value of excessive gas pressure inside the tire leads to stiffness change. Therefore, it is necessary to introduce in the design of airless tire an elastic element with characteristics that can vary during operation. Such elastic element could be represented by pneumatic muscles, electroactive polymer or special mechanical design of crosspieces-spokes. Introduction of elastic element with variable characteristics in the design of airless tire leads to the increasing of mobility and efficiency of tractors and agricultural machinery. It will make possible the automatic control of tires' parameters by means of electronic control units, without operator's assistance, thereby the human factor will be reduced to a minimum.

Keywords: agricultural engineering; tractor; wheeled mover; non-pneumatic tires; airless tires.

Введение

В автотракторной технике и сельхозмашинах используются практически все известные на сегодняшний день движители: колесные, гусеничные, а в редких случаях даже роторно-винтовые. Их разнообразие обусловлено прежде всего разнообразием поверхностей движения — от асфальтобетонных и щебнево-гравийных до заболоченных и снежных, включая с.-х. ландшафты. Любой из этих видов движителей эффективен лишь при движении по конкретным поверхностям и не справляется со своими функциями при их изменении. Для обеспечения лучшей проходимости транспортных и технологических средств (ТТС) при проектировании их стремятся снабдить универсальными движителями.

Наиболее распространен колесный движитель, состоящий, как правило, из ступицы, обода и шины. Однако он значительно уступает гусеничному движителю по развиваемой силе тяги. Гусеницы обеспечивают высокие тягово-сцепные характеристики, но они значительно тяжелее колес, имеют большую стоимость обслуживания и ремонта, меньший ресурс и сильно уступают колесам в эффективности. Поэтому колесо, а точнее шина, имеет огромный потенциал развития. Например, чешская компания Mitas создала концепт шины Pneu-Trac [1]. Оригинальная конструкция ее боковин позволяет увеличить длину пятна контакта, за счет чего возрастает тяговое усилие, развиваемое трактором. Но даже такая шина имеет ряд существенных недостатков и не во всех случаях гарантирует необходимую подвижность и эффективность ТТС.

Цель исследования

Подвижность автотракторной техники включает способность машины выполнять поставленную задачу с оптимальной адаптивностью к условиям эксплуатации и состоянию самой машины [2]. Из определения следует, что подвижность описывается двумя характеристиками — условиями эксплуатации и состоянием машины. Это определение можно отнести не только к комплекtnому ТТС, но и к отдельным его частям. Для движителя это означает возможность противостоять внешним и внутренним факторам, препятствующим выполнению поставленной задачи.

Под эффективностью понимается обобщающий показатель, характеризующий отношение результатов деятельности к затратам на их получение [3]. Эффективность ТТС полностью зависит от конструкции самой машины и ее движителя. При оценке эффективности движения ТТС необходимо учитывать степень соответствия условиям эксплуатации. Проходимость и эффективность должны рассматриваться с учетом меняющихся в течение года климатических условий.

Таким образом, подвижность и эффективность играют ключевую роль в решении проблемы обеспечения устойчивого, безопасного и производительного функционирования мобильной наземной автотракторной техники, с.-х. машин и транспортно-технологических комплексов в целом.

Материалы и методы

Неправильное давление в традиционных пневматических шинах значительно затрудняет или даже полностью останавливает движение ТТС, в результате чего производительность ТТС снижается в разы. Между тем, сохранение эффективности особенно важно для тракторной и с.-х. техники при выполнении агротехнических работ, требующих завершения в сжатые сроки. Обездвиживание ТТС неизбежно приводит к финансовым потерям. К недостаткам пневматических шин относятся также сложность технологических процессов изготовления и большие расходы на утилизацию.

Помимо пневматических на рынке представлены сплошные (массивные) прессованные шины, защищенные от проколов благодаря многослойной структуре. Шина состоит из основного слоя, внутри которого располагается ряд плоских металлических колец, служащих каркасом, эластичной резиновой подушки для улучшения плавности хода и поглощения неровностей, протектора с боковинами. Недостатки таких шин — чрезмерная жесткость, из-за которой их можно использовать только на твердых поверхностях, таких как асфальт и бетон, а также повышенные вибронгрузки на оператора и агрегаты ТТС. Эксплуатация сплошных шин в ходе с.-х. работ приводит к снижению тяги и повреждению грунта, а именно к разрушению почвенно-растительного слоя и утрате его плодородных свойств.

Таким образом, для достижения требуемых значений тягового усилия и подвижности становится рациональным применение колес, оснащенных безвоздушными шинами с упругими элементами из эластомерных материалов — натурального или синтетического каучука, полиуретана, вспененного каучука и вспененного полиуретана, сегментированных сополиэфиров и блок-сополимеров, нейлона. Упругость шины определяют сечение и конструкция упругих элементов.

На сегодняшний день известно несколько моделей безвоздушных шин. Шины Michelin Tweel (рис. 1, а) [4], разработанные на базе традиционной радиальной технологии, состоят из жесткой ступицы, соединенной с протектором посредством гибких деформируемых спиц из полиуретана. Поскольку в шинах Michelin Tweel не используется сжатый воздух, для них не опасны проколы и порезы, возможные при выполнении работ в сельском хозяйстве, благоустройстве территории, строительстве, переработке отходов. Шина не требует постоянного контроля давления воздуха, просто монтируется, обеспечивает повышенный комфорт для оператора спецтехники и имеет значительно больший ресурс в сравнении с пневматическими шинами.

Шина NTP (рис. 1, б) [4] разработана Resilient Technologies специально для военных автомобилей. Она способна выдерживать статическую нагрузку до 1746 кг и не лишает автомобиль возможности двигаться даже при 30 %-ном разрушении. Упругие элементы конструкции выполнены в форме сот, что обеспечивает хорошую несущую способность шины.

Компания Bridgestone представила конструкцию безвоздушной шины AirFree (рис. 1, в) [4]. На металлическом диске колеса находится шина, которая представляет собой два кольца, соединенных упругими элементами. Они состоят из двух разнонаправленных рядов

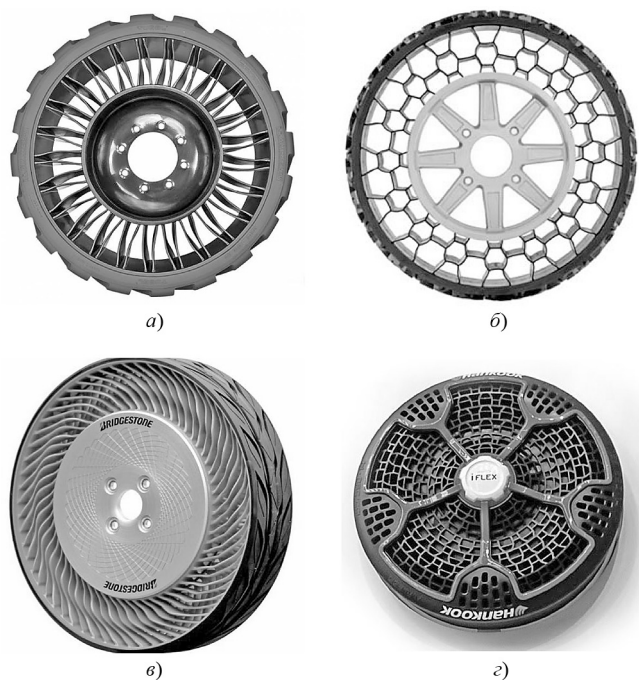


Рис. 1. Конструкции непневматических шин:

а — Michelin Tweel; б — Resilient Technologies NTP; в — Bridgestone AirFree; г — Hankook I-Flex

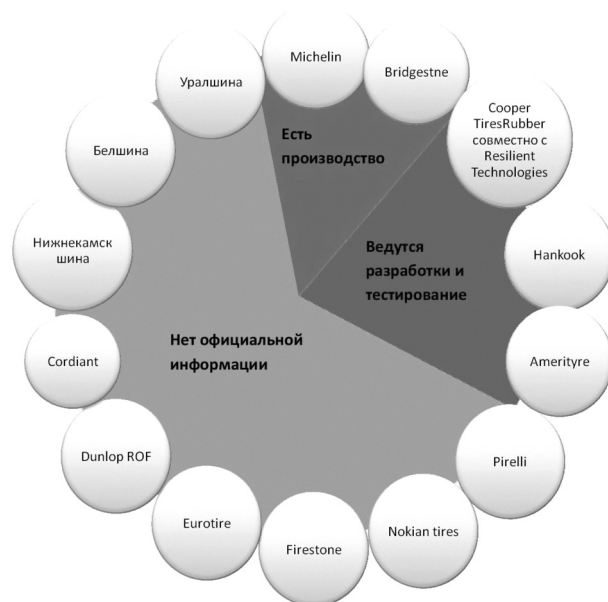


Рис. 2. Производство и разработка безвоздушных шин

спиц, расположенных под определенным углом к нормали контактируемой поверхности, что и обеспечивает деформацию шины под нагрузкой. Главный недостаток этой конструкции заключается в том, что она рассчитана только на автомобили с малым весом и скоростью до 60 км/ч.

Совершенно другой формат шин представила корейская компания Hankook (рис. 1, г) [4]. Шина и обод модели I-Flex представляют собой одно целое и на 95 % состоят из вторично переработанного материала. Представленные на Франкфуртской выставке безвоздушные шины имели радиус 14 дюймов и оригинальный дизайн. Компания планирует установить их на малолитражные автомобили Volkswagen Up.

Некоторые предприятия-лидеры шинной индустрии уже начали разработку безвоздушных шин и даже наладили производство (рис. 2). Обобщив информацию об описанных безвоздушных шинах, можно сделать вывод, что их конструкция включает армированный кольцевой пояс, удерживающий нагрузку на шину, и множество перемычек, которые посредством натяжения передают силы нагрузки между кольцевым поясом и колесом или ступицей. Соответственно, несущая способность шин обеспечивается только за счет структурных характеристик, а не за счет внутреннего давления воздуха, как в пневматических шинах.

Результаты и их обсуждение

При соприкосновении шины с опорной поверхностью под действием внешней нагрузки возникает сложная деформация, которую принято разделять на ряд простых: нормальную (радиальную), окружную (тангенциальную), продольную, поперечную (боковую), угловую [5].

В данном исследовании проводилась оценка деформации, возникающей при приложении нормальной нагрузки G_k к колесу, оснащеному самонесущей непневматической шиной и взаимодействующему с твердой опорной поверхностью. По всем внешним габаритным и

присоединительным размерам шины близки к традиционным пневматическим резино-кордовым.

Построена конечно-элементная модель (рис. 3), которая насчитывает 54 000 элементов. Геометрия упругого элемента выполнена в виде шестиугольника, соединяющего внешнее кольцо шины с внутренним. Выбор данной формы обусловлен тем, что она обеспечивает

требуемую грузоподъемность и достаточные демпфирующие свойства шины. Размеры модели: толщина внутреннего кольца 24 мм; толщина тонкостенных перегородок 4 мм; толщина наружного кольца 31 мм; радиус колеса в свободном состоянии 370 мм; толщина диска колеса 5 мм. Диск выполнен из стали и имеет характеристики: $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; $\rho = 7850$ кг/м³; $\nu = 0,3$. Ма-

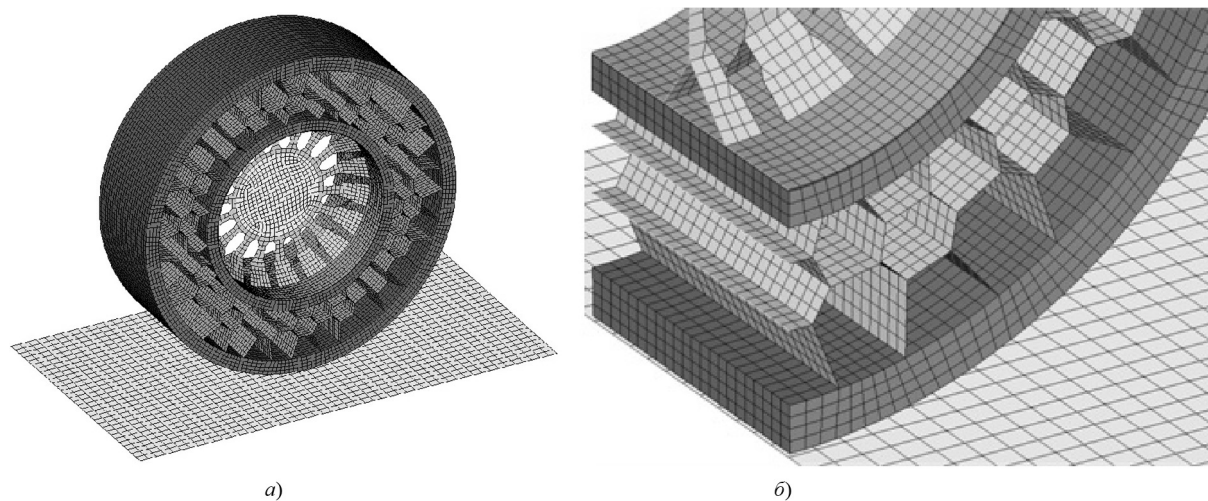


Рис. 3, а–б. Конечно-элементная модель колеса в сборе

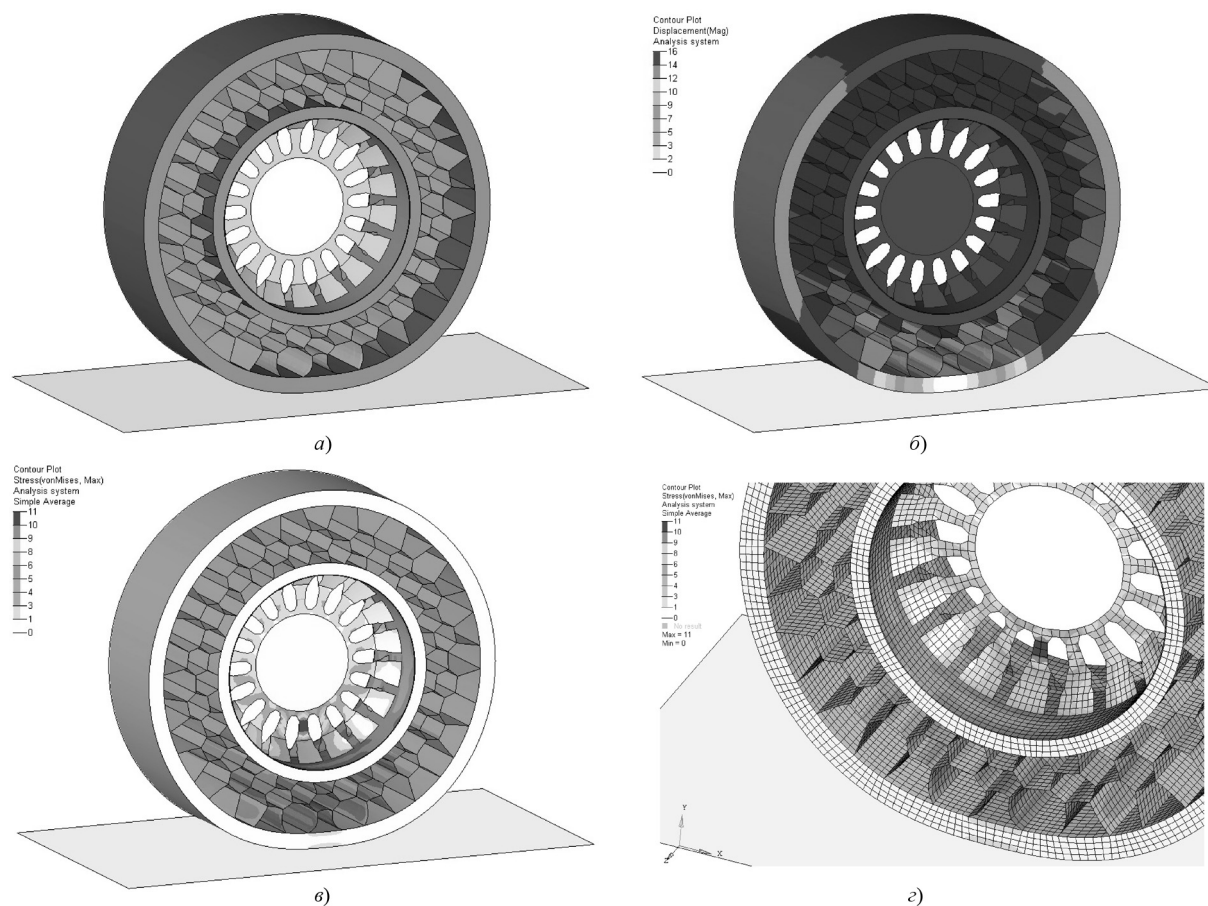


Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования:

а — характер деформации шины под нормальной нагрузкой G_K ; б — характер деформаций, мм; в, г — характер распределения эквивалентных напряжений колеса, МПа, в зоне контакта с опорной поверхностью

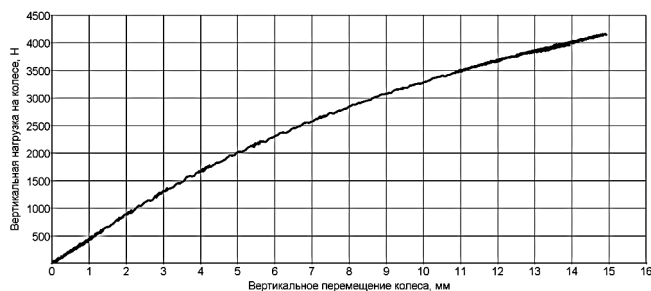


Рис. 5. График зависимости вертикальной нагрузки на колесо от вертикальных перемещений

териал шины имеет характеристики, близкие к резине: $E = 100$ МПа; $\rho = 1200$ кг/м³; $\nu = 0,4$. Исходя из выбранного материала и геометрии модели, масса диска составила 16,5 кг; масса шины 34,8 кг; полная масса колеса в сборе 51,3 кг.

Для оценки несущей способности шины была приложена вертикальная статическая нагрузка, равная нагрузке, приходящейся на одно колесо ТТС снаряженной массой 1600 кг. Нагрузка при этом составляет 400 кг (3924 Н).

Из результатов расчета видны значительные деформации упругих элементов в зоне пятна контакта с опорной поверхностью (рис. 4, а). В остальной части шины совершенно не изменили своей формы. Максимальные напряжения в шине (рис. 4, в, г) составляют 8 МПа, что допустимо при данном виде нагружения. Наиболее нагруженные элементы шины — две перегородки, соединяющие шестиугольник с ее внешним кольцом. Они также имеют наибольшую деформацию по сравнению с другими элементами.

При нагружении статический радиус колеса (рис. 4, б) равен 354 мм, что на 16 мм меньше свободного радиуса. Работа сжатия A при нормальной нагрузке составляет 62,8 Н·м, что соответствует аналогичной полной работе сжатия пневматических шин:

$$A = hG_k = (r_o - r_c)G_k.$$

Нормальный прогиб h имеет определяющее значение при оценке работоспособности шины, а также устанавливает такой важный эксплуатационный параметр, как нормальная жесткость шины, тесно связанный с плавностью хода автомобиля, его демпфирующей способностью и нагрузками в деталях ходовой части.

Нормальная жесткость шины определяется по нагрузочной, или упругой, характеристике. Она равна углу наклона касательной к кривой средней линии упругой характеристики. Значения радиальной жесткости шины в каждой точке упругой характеристики можно определить по формуле:

$$C_{ш} = P_H / L_{пр},$$

где $L_{пр}$ — приведенный статический прогиб (прогиб линейного упругого элемента с жесткостью $C_{ш}$ под нагрузкой P_H).

При помощи программных средств по данной зависимости построен график зависимости вертикальной нагрузки на колесо от вертикальных перемещений (рис. 5).

Дальнейшие исследования предполагают проведение испытаний всех видов нагружения с учетом конструктивных особенностей шин.

Заключение

Главный недостаток безвоздушных шин — невозможность, в отличие от пневматических, изменять в ходе эксплуатации жесткость и площадь пятна контакта. Такие шины рассчитаны только на определенную массу ТТС. Поэтому целесообразно ввести в конструкцию дополнительные элементы, выполняющие изменение площади пятна контакта посредством регулировки жесткости шины. Благодаря им значительно повышается опорная проходимость по слабонесущим грунтам, сокращается расход топлива вследствие снижения сил сопротивления движению по твердым опорным поверхностям.

Регулировка жесткости безвоздушных шин представляет собой систему, аналогичную по назначению системе подкачки пневматических шин. Ее можно представить в виде схемы (рис. 6). Рассматриваемая конструкция безвоздушных шин в совокупности с такой системой открывает перспективы создания инновационного колесного движителя, который позволит выполнять широчайший спектр задач и кардинально расширить возможности не только с.-х. и тракторной техники, но и остальных ТТС.

Возможны три варианта конструкции инновационных безвоздушных шин, обеспечивающих повышение эксплуатационных характеристик ТТС при движении в различных условиях. Первый вариант — шина с механической регулировкой жесткости (рис. 7) с функцией изменения радиальной, угловой, окружной и боковой жесткостей одновременно без возможности управлять ими в отдельности. Второй вариант — шина с упругими элементами из пневмомышц, управляемыми при помощи электронного блока управления. Эта конструкция позволяет изменять жесткостные характеристики не только по всему объему, но и дискретно, а также осуществлять движение по принципу работы движителя Мац-

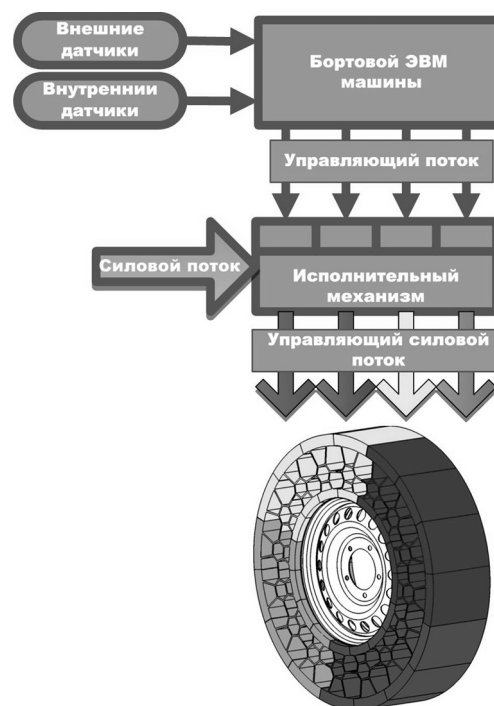


Рис. 6. Схема управления упругими элементами шины



Рис. 7. Непневматическая шина с механической регулировкой жесткости

керле. Третий вариант — шина с упругими элементами из электроактивных полимеров. Данная шина, как и предыдущая, позволяет изменять жесткостные характеристики по всему объему и дискретно, но при этом не имеет недостатков, связанных с инертностью процессов, наличием пневмомагистралей и компрессора.

Шина с механическим устройством, выполняющим управление ее жесткостными характеристиками, включает три ряда спиц. Средний ряд установлен так, что часть, прикрепленная к внутреннему кольцу, имеет возможность вращения от 0 до 15° относительно боковых рядов. Необходимый угол поворота определяется по заложенным в блок управления алгоритмам в зависимости от условий движения, приходящейся на колесо нагрузки, сил и моментов. При вращении среднего ряда спиц против часовой стрелки происходит натяжение всех спиц шины, и она становится жестче. При вращении по часовой стрелке натяжение спиц снижается, и шина становится мягче.

Шина с упругими элементами из пневмомышц отличается дискретным управлением каждым упругим элементом (пневмомышцей), что значительно расширяет возможности движителя в плане проходимости, управляемости, устойчивости и других эксплуатационных показателей. Оснащенное такими шинами ТТС лучше преодолевает пороговые препятствия благодаря изменению формы внешнего кольца шины (протектора и армирующего слоя), что позволяет также осуществлять движение по типу движителя Мацкерле. При движении по криволинейной траектории и на уклонах можно добиться улучшения управляемости и повышения активной безопасности ТТС, изменяя жесткости колес, проходящих по внешней или внутренней траектории. Главный недостаток такой системы — наличие весьма габаритной и сложной системы пневмомагистралей, компрессора и большого количества управляющих устройств (клапанов, вентилей и т. д.). Система также имеет значительную инертность управляющих действий.

Самонесущая шина с упругими элементами из электроактивных полимеров имеет возможности, как у шины с пневмомышцами, но уже без ряда ее значительных недостатков. Система обладает меньшими массой и габаритами за счет отсутствия пневмомагистралей, ком-

прессора и клапанов, а также значительно лучшим быстроедействием, так как управляющие и силовые потоки передаются исключительно по проводникам. Упругие элементы шины можно разделить на меньшие по размеру регулируемые участки и добиться более тонкой и точной регулировки параметров шины.

С развитием уровня техники и повышением потребительских требований традиционные пневматические шины становятся неактуальными. По многим параметрам они проигрывают безвоздушным шинам, способным обеспечить наилучшую подвижность и эффективность не только автотракторной и с.-х. техники, но и ряда других ТТС. Управление большинством систем современных ТТС осуществляется автоматически при помощи электронных блоков управления. Пневматические шины не имеют конструкционных возможностей для управления их объемом, поэтому их использование в будущем станет нерациональным. Конструкция безвоздушных шин позволяет создать целый ряд абсолютно новых шин с управляемыми характеристиками, обладающих огромным потенциалом развития.

Литература и источники

1. Компания Mitas начала испытание сельскохозяйственных шин PneuTrac // Национальный шинный альянс [Электронный ресурс]. URL: <http://nta-tyre.ru/kompaniya-mitas-nachala-ispytanie-selskohozyajstvennyh-shin-pneutracs/> (дата обращения 26.01.2016).
2. Беляков В. В., Беляев А. М., Бушуева М. Е. и др. Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2013, № 3. С. 145—174.
3. Береснев П. О., Михеев А. В., Беляев А. М. и др. Статистическая модель выбора геометрических параметров, массо-инерционных, мощностных и скоростных характеристик многоосных колесных транспортно-технологических машин // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2015, № 4. С. 136—150.
4. Что такое "безвоздушные" шины // АвтоМотоСпец [Электронный ресурс]. URL: <http://avtomotospec.ru/poleznoe/chto-takoe-bezvozdushnye-shiny.html> (дата обращения 26.01.2016).
5. Кнороз В. И., Кленников Е. В., Петров И. П. и др. Работа автомобильной шины. М.: Транспорт, 1976. 238 с.

References

1. Mitas began testing of PneuTrac agricultural tires. *Natsional'nyy shinnyy al'yans*. URL: <http://nta-tyre.ru/kompaniya-mitas-nachala-ispytanie-selskohozyajstvennyh-shin-pneutracs/> (accessed 26.01.2016).
2. Belyakov V. V., Belyaev A. M., Bushueva M. E., Vakhidov U. Sh., Goncharov K. O., Zezyulin D. V., Kolotilin V. E., Leliovskiy K. Ya., Makarov V. S., Papunin A. V., Tomasov A. V., Fedorenko A. V. Mobility concept of ground transport and technological machines. *Trudy NGTU im. R. E. Alekseeva*, 2013, no. 3, pp. 145—174 (in Russ.).
3. Beresnev P. O., Mikheev A. V., Belyaev A. M., Papunin A. V., Kostrova Z. A., Kolotilin V. E., Eremin A. A., Makarov V. S., Zezyulin D. V., Belyakov V. V., Kurkin A. A. Statistical model of selection of geometrical parameters, weight and inertia, power and speed characteristics of multiaxis wheel transport and technological machines. *Trudy NGTU im. R. E. Alekseeva*, 2015, no. 4, pp. 136—150 (in Russ.).
4. What is airless tire. *AvtoMotoSpets*. URL: <http://avtomotospec.ru/poleznoe/chto-takoe-bezvozdushnye-shiny.html> (accessed 26.01.2016).
5. Knoroz V. I., Klennikov E. V., Petrov I. P., Shelukhin A. S., Yur'ev Yu. M. *Rabota avtomobil'noy shiny* [Operation of an automobile tire]. Moscow, Transport Publ., 1976, 238 p.