

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ АДАПТИВНОЙ ПОДВЕСКИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А.В. Пузанов (ФГБОУ ВО «Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева»)

*Уменьшение массогабаритных показателей автономной мобильной робототехники аварийно-спасательного назначения накладывает ограничение на внешние силовые воздействия применяемого оборудования, их величину, направление, темп. Повысить производительность мобильного комплекса аварийно-спасательного назначения, при этом обеспечить устойчивость базового шасси, повысить удельную мощность внешних воздействий, возможно посредством использования адаптивной гидропневмоподвески. В статье приведены результаты моделирования функционирования адаптивной подвески мобильного робота аварийно-спасательного назначения при работе гидромолота.*

*Ключевые слова:* аварийно-спасательные работы, робототехнический комплекс, адаптивная подвеска, гидромолот.

Мобильный робототехнический комплекс (МРТК) аварийно-спасательного назначения предназначен для разрушения и демонтажа железобетонных конструкций, асфальтных и каменных оснований, обрушений построек жилого и производственного назначения, прокладывания путепровода и разбора завалов, явившихся следствием природных катаклизмов или техногенных аварий. Отсутствие экипажа позволяет использовать МРТК в неблагоприятных условиях химической, климатической, радиационной или бактериологической обстановки.

Развитие мобильной робототехники идет по пути минимизации габаритных характеристик и повышения мощности и оснащенности возимого оборудования для выполнения одним устройством как можно большего числа операций. Минимальные габариты МРТК благоприятствуют их оперативной доставке к фронту работ без привлечения специальных транспортных средств. Расширение числа выполняемых операций в зоне с неизвестной или неблагоприятной для людей окружающей обстановкой позволяет сократить количество применяемой техники и обслуживающего персонала.

С другой стороны, важным эксплуатационным свойством аварийно-спасательного комплекса является ее высокая мобильность (как при выполнении основных операций, так и при перемещении между объектами), обеспечиваемая в свою очередь высокими скоростями движения. При этом плавность хода оказывает влияние на эффективность используемого в данный момент оборудования, установленного на шасси [1].

Отсутствие необходимости обеспечения безопасности и комфортных условий работы водителя (оператора) приводит к снижению веса беспилотной бронетехники, что отражается на увеличении удельной мощности и мобильности. Однако снижение габаритов и массы мобильной робототехники накладывает ограничение на мощность применяемого оборудования. Обеспечить устойчивость шасси, повысить эффективность использования оборудования возможно посредством адаптивной гидропневмоподвески [2],

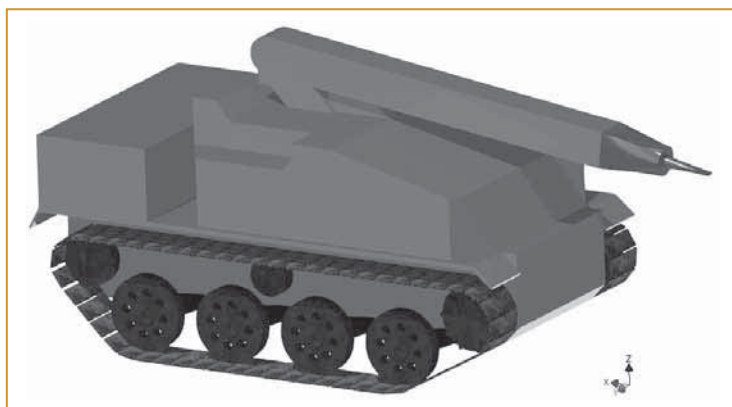


Рис. 1. CAD-модель мобильного робототехнического комплекса аварийно-спасательного специального назначения с установленным гидромолотом

изменением параметров демпфирования каждого катка в режиме реального времени при изменении темпа внешнего воздействия гидромолота.

Робототехнический аварийно-спасательный комплекс оснащен гидромолотом с переменной силой и темпом ударного воздействия (рис. 1).

Устойчивость к опрокидыванию МРТК определяется силой и темпом ударного воздействия, положением и углом наклона рабочего элемента гидромолота относительно центра тяжести МРТК, его углом наклона относительно горизонтальной плоскости, свойствами упругости, податливости и трения сопряженных поверхностей гусеницы и грунта, наличием между ними жидкости, грязи. При нарушении устойчивости МРТК может опрокинуться, что приведет к выходу из строя оборудования, а также возможно реверсивное скольжение в продольном и поперечном направлении [3], что снижает производительность аварийно-спасательных работ.

Для повышения устойчивости и предотвращения опрокидывания подобных устройств применяются выдвигные опоры [4], однако для обработки (как правило) протяженных поверхностей завалов (например, для обеспечения транспортного сообщения) для подобных процедур необходимо дополнительное время, а также больше места и достаточно ровная площадка, что в условиях ликвидации аварий

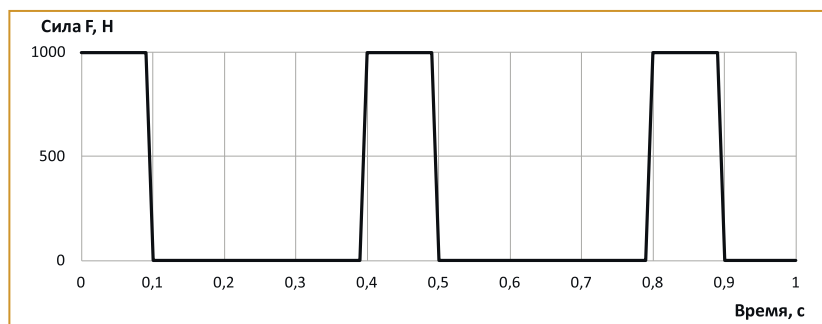


Рис. 2. График силового воздействия гидромолота

не всегда возможно. Кроме этого, выдвигные опоры и их сопутствующее оборудование увеличивают габариты и массу МРТК, что негативно отражается на его собственной мобильности и возможностях транспортировки его к месту аварии.

Целью работ в данном направлении является обеспечение устойчивости мобильного робототехнического комплекса аварийно-спасательного назначения при максимальных силе и темпе ударного воздействия гидромолота. Указанные цели достигаются посредством применения адаптивной пневмогидроподвески и системы ее управления. Рассмотрим результаты работ в основном для идентификации модели подвески МРТК. Модель будет использована для конструктивной проработки и схемных решений подвески и ее элементов, выбора параметров и алгоритмов управления самой адаптивной подвеской, системой управления гидромолота. Требуемый уровень демпфирования мультиопорной мобильной платформы зависит от характера внешнего возмущения [5]. Важнейшим вопросом при этом является определение амплитуды и частоты силовых воздействий на подвеску и смещения рабочего элемента гидромолота. Результаты в дальнейшем будут использованы при корректировке параметров подвески в процессе

реальной эксплуатации с высокой неопределенностью множества непредсказуемых условий. Корректное решение этой задачи требует исследований трехмерной модели МРТК с помощью кинематической математической модели и соответствующего ПО. Задача моделирования системы управления решается с помощью однокоординатной имитационной модели гидравлической части в специализированном программном комплексе.

Кроме геометрических и массоинерционных характеристик МРТК, механических элементов шасси, гидромолота и подвески, исходными данными для модели является зависимость сил реакции отдачи при воздействии гидромолота от времени. Характеристика силы отдачи ударного воздействия принята абсолютно жесткой и отражается графиком, пример которого представлен на рис. 2.

На рис. 2 приведен пример задания усилия отдачи ударного воздействия, равного 10 тыс. Н, при темпе порядка 3 уд./с, длительность воздействия — 0,1 с. Усилие и темп ударов регулируются системой управления гидромолотом. При повышении вязкоупругих свойств поверхности материала, подвергаемого разрушению, увеличиваются сила и продолжительность воздействия. При увеличении жесткости обрабатываемой поверхности — темп (а, возможно, и сила воздействия) снижается.

Таким образом, применительно к системе поддресоривания в момент ударного воздействия гидромолота жесткость подвески должна быть максимальной с последующим ослаблением для минимизации углового заброса рабочего элемента гидромолота (возможности его заклинивания или повреждения) и раскочки при максимальном темпе ударного воздействия.

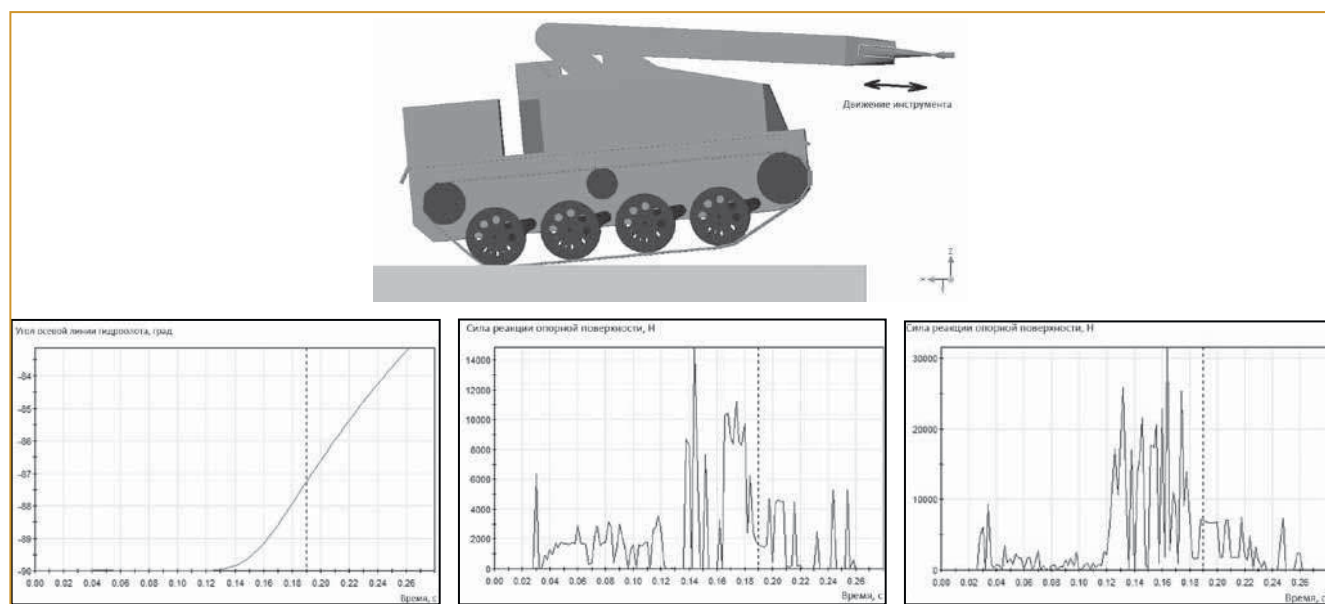


Рис. 3. Результаты моделирования реакции отдачи при жесткой блокировке подвески

В данном случае на отдельный каток воздействует не только сила отдачи и реакция от взаимодействия с грунтом, но и положение соседних катков, соединенных посредством гусениц, а также самими элементами гусеничного обвода, их инерционными, упругими и демпфирующими свойствами. Типичная модель гусеничного обвода описана в [6].

Проблема аналитического определения силы реакции элементов подвески на воздействие отдачи и реакции взаимодействия с грунтом заключена в комплексном и взаимном воздействии внешних и внутренних факторов, их случайном характере. Решение этой задачи возможно посредством современного программного обеспечения.

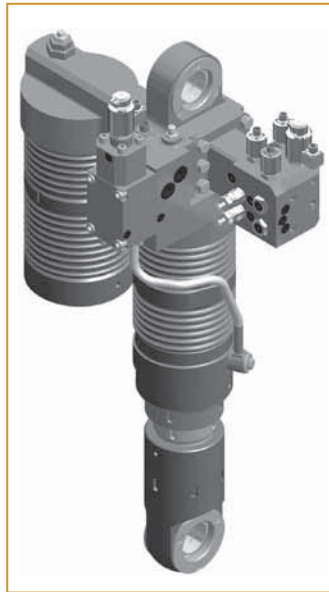


Рис. 4. Пневмогидроподвеска

**Моделирование реакции отдачи при работе гидромолота со штатной торсионной подвеской**

На данном этапе исследований механические элементы приняты упругими, зазоры в механических элементах не учитывались. Реакция взаимодействия гусениц с грунтом описана упругой моделью (наихудший вариант: металлическая гусеница и бетонное основание).

На рис. 3 представлены 3D модель (сверху) и результаты: угол линии ударного воздействия гидромолота (внизу слева), контактные усилия опорной поверхности, действующие на задние катки — правый (внизу в центре) и левый (внизу справа).

Гусеничные элементы имеют различные значения натяжения звеньев (с учетом провисания, но без учета люфтов), в результате чего реализовано перераспределение нагрузок [6].

Угол линии ударного воздействия (на рисунке внизу слева) отражает угловое изменение центральной линии гидромолота. Увеличение этого параметра может привести к заклиниванию рабочего элемента гидромолота в породе. За счет снижения величины изменения угла возможно уменьшение остроты бойка, что повышает общую эффективность деструктивного процесса.

Контактные усилия опорной поверхности, действующие на задние катки (правый — на рисунке внизу в центре, левый внизу справа) необходимы для оценки условий работы подвески и используются для проработки конструкции механических элементов подвески и настройки системы ее управления.

На представленном рисунке виден момент отрыва гусеничного обвода от грунта, начало опрокидывания шасси, чрезвычайно большие углы отклонения линии воздействия рабочего элемента гидромолота, что увеличивает время воздействия на заданную область (снижается темп), снижает надежность узлов подвески и оборудования, установленного на шасси.

Этот режим отражает базовый вариант работы системы поддрессоривания — отключение системы управления адаптивной подвеской (в том числе в случае выхода ее из строя).

**Моделирование реакции отдачи при работе гидромолота с адаптивной системой управления подвеской**

Пневмогидравлическая подвеска позволяет регулировать клиренс, обеспечивать горизонтирование шасси (что особенно ценно при перемещении

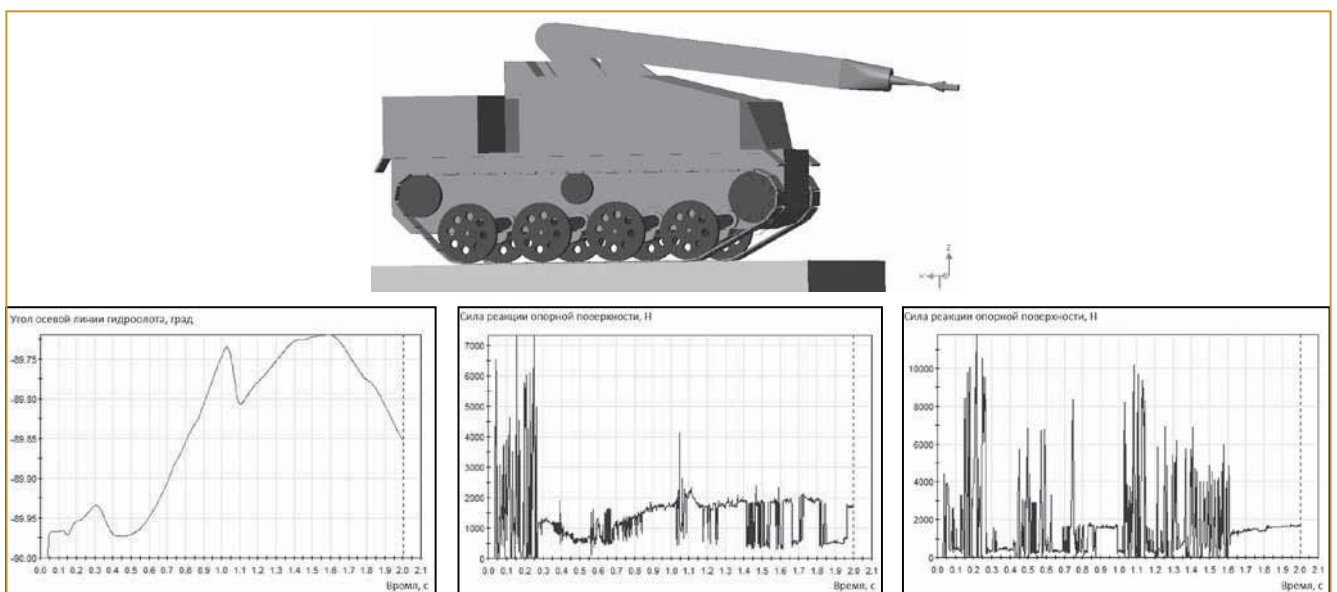


Рис. 5. Результаты моделирования: коэффициенты упругости 1000 и демпфирования 10 одинаковы

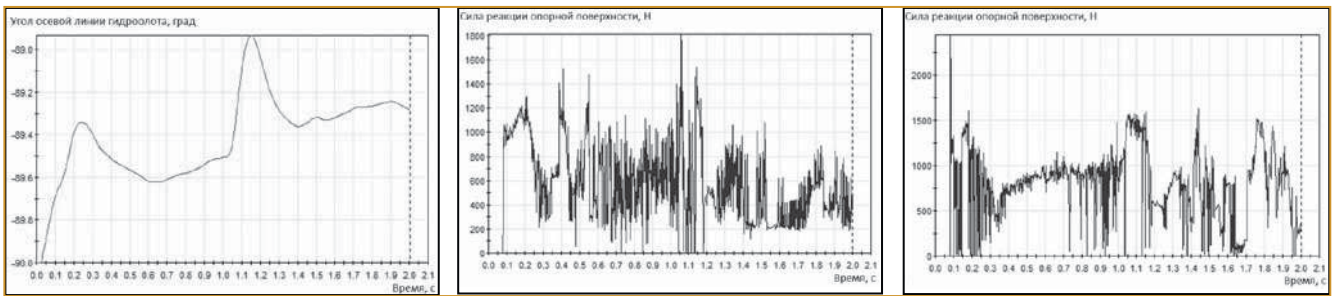


Рис. 6. Результаты моделирования: коэффициенты упругости и демпфирования последних двух и предыдущих двух отличаются мягкостью

по чрезвычайно пересеченной местности), а также изменять упругодемпфирующие свойства отдельного элемента подвески в реальном времени по заданному алгоритму или в зависимости от значений внешних нагрузок и их характера.

Система адаптивной подвески предназначена для управления демпфированием, жесткостью, положением каждой подвески катка МРТК и должна обеспечивать минимизацию раскачки при работе с фиксированного положения и при движении МРТК.

Результаты моделирования должны обеспечить набор зависимостей для настройки компонентов системы управления подвеской в режиме реального времени.

Адаптивная подвеска (рис. 4) обычно включает следующие элементы:

- электронный блок управления подвеской;
- регулируемые стабилизаторы поперечной устойчивости;
- активные (регулируемые) стойки амортизаторов;
- датчики (ускорения кузова, неровной дороги, дорожного просвета и др.).

На рис. 5 представлены результаты с одинаковыми настройками упругодемпфирующих свойств каждой подвески.

Из анализа графика углового изменения центральной линии гидромолота (на рисунке внизу, слева) следует наличие раскачивания шасси, усиливающегося при последующем импульсе силового воздействия.

На рис. 6 представлены результаты работы подвески с прогрессивными настройками: подвески последних катков (и левого и правого борта) одинаковы и имеют минимальный коэффициент упругости и максимальный коэффициент демпфирования, следующие две подвески от заднего борта имеют промежуточные значения параметров упругости и демпфирования. Остальные (подвески первых двух катков по обоим бортам) имеют параметры максимальной жесткости и минимального демпфирования.

Очевидно снижение раскачивания (график углового изменения центральной линии гидромолота — на рисунке слева) за счет перераспределения пиковых значений контактных сил катков.

Для компенсации раскачивания (с целью повышения темпа ударного воздействия) применялись различные настройки прямого и обратного хода подвески.

На рис. 7 представлены результаты моделирования работы подвески при ударном воздействии гидромолота под углом 45° по курсу. Настройки пара-

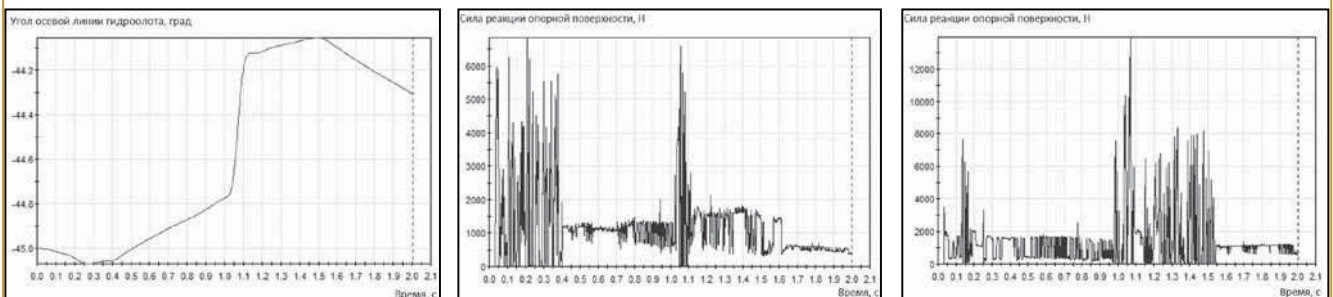
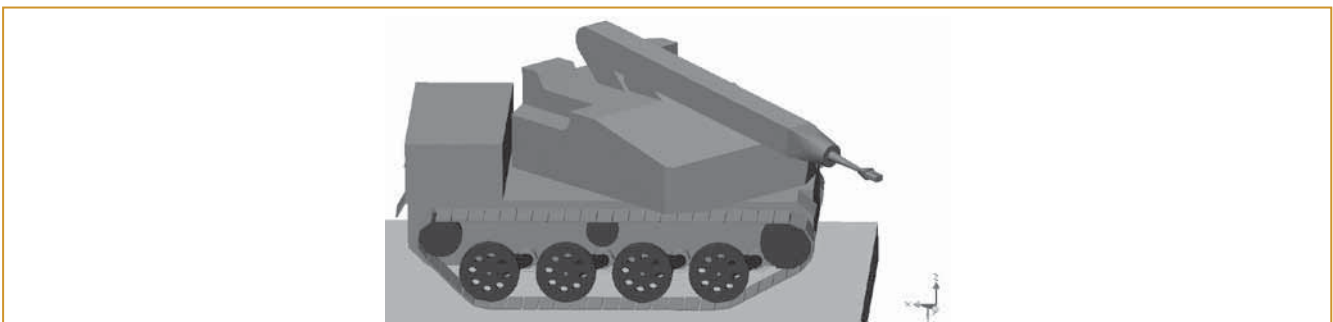


Рис. 7. Результаты моделирования: угол поворота 45°, коэффициенты упругости 1000 и демпфирования 10 одинаковы

метров подвески и ударного воздействия аналогичны предыдущему эксперименту.

В данном случае наблюдаем изменение направления смещения линии рабочего элемента гидромолота. Улучшение качества подрессоривания реализуется в дифференцированном изменении упругодемпфирующих характеристик подвесок левого и правого бортов.

Полученные в результате модельных исследований зависимости параметров настройки подвесок и углов отклонения линии воздействия рабочего элемента гидромолота используются, прежде всего, для обеспечения системы управления адаптивной подвеской набором предустановленных параметров настройки.

В процессе реальной эксплуатации, получая актуальные данные текущих показаний датчиков положения, углов и ускорений производится предварительная настройка параметров подвески и ее коррекция.

#### Заключение

Представлена модель, позволяющая получить соотношения упругодемпфирующих параметров настройки пневмогидроподвески и колебаний линии ударного воздействия рабочего элемента гидромолота беспилотного МРТК аварийно-спасательного назначения.

В результате модельных исследований получены зависимости изменения углового положения рабочего элемента гидромолота в процессе ударного воздействия с фиксированного положения с разными темпами уда-

ра, углами по вертикали и горизонтали, при различных настройках адаптивной пневмогидроподвески.

За счет применения адаптивной пневмогидроподвески исключено опрокидывание, снижена раскочка, тем самым реализовано повышение темпа ударного воздействия (производительность) МРТК.

#### Список литературы

1. Дядченко М.Г. Исследование влияния системы подрессоривания боевых гусеничных машин на работоспособность специального оборудования: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: МГТУ, 1997. 118 с.
2. Пузанов А.В. Тенденции развития систем подрессоривания и стабилизации вооружения беспилотной мобильной робототехники // Автоматизация в промышленности. 2020. №2. – С. 25-27.
3. Данилова А.И., Пузанов А.В. Анализ устойчивости шасси роботизированного комплекса аварийно-спасательного назначения // Инженерный вестник. 2019. №2. С. 1-8.
4. Робот для демонтажных работ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://robotatlant.ru>, свободный.
5. Жилейкин М.М., Котиев Г.О., Сарач Е.Б. Методика подбора характеристик управляемости подвески с двумя уровнями демпфирования многоосных колесных машин // Наука и образование. 2012. №2. С. 1-10.
6. Сарач Е.Б., Стадухин А.А. Математическая модель гусеничного обвода // Наука и образование. 2011. №10. С. 1-11.
7. Сарач Е.Б., Смирнов И.А., Ткачев Я.А. Обоснование требований, предъявляемых к подвескам безэкипажных транспортных машин // Известия МГТУ "МАМИ", №1(39), 2019, С. 53-59.

*Пузанов Андрей Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры приборостроения ФГБОУ ВО «Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева». Контактный телефон (49232) 6-96-00, доб.333, 332, 328. E-mail: [puzanov@dksta.ru](mailto:puzanov@dksta.ru)*

#### Модули безопасности расширяют возможности компактных ПЛК Mitsubishi Electric

Компания Mitsubishi Electric анонсировала расширение функциональных возможностей ПЛК серии MELSEC iQ-F с помощью двух новых модулей, составляющих основу компактной интегрированной системы безопасности. Новые модули легко подключаются к центральному процессору ПЛК FX5U или FX5UC без дополнительных проводных соединений и не требуют программирования, что упрощает машиностроителям и системным интеграторам задачу внедрения системы управления безопасностью.

При разработке новых модулей основное внимание было уделено простоте настройки функций безопасности. Возможность выбрать одну из девяти встроенных программ с помощью поворотного переключателя на передней панели модуля устраняет необходимость загрузки или разработки программ для управления безопасностью. Это значительно сокращает время настройки ПЛК по сравнению с обычной архитектурой. Принцип простоты распространяется и на визуализацию. Встроенный в ПЛК Web-сервер позволяет легко контролировать состояние как подсистемы стандартного управления, так и подсистемы безопасности.

Новые модули не только упрощают настройку функций безопасности, но и сокращают число человеко-часов на этапе разработки проекта. Модуль безопасности FS5 SF MU4T5 и модуль

расширения входов безопасности FX5-SF-8D14 подключаются непосредственно к ПЛК. Это позволяет обойтись без дополнительных проводных соединений, что невозможно при подключении традиционного контроллера безопасности или при создании системы на базе реле безопасности. Подключение к входам/выходам безопасности упростилось благодаря использованию в новых модулях клемм с пружинными контактными зажимами.

Также новые модули позволяют интегрировать функции безопасности непосредственно в компактный ПЛК без применения дополнительных средств коммуникации. При этом ПЛК FX5 с новыми модулями можно использовать как для общего управления, так и для контроля безопасности. Подключение к процессору ПЛК FX5 одного основного модуля безопасности обеспечивает четыре входа и четыре выхода безопасности. Для обеспечения до 20 входов безопасности при четырех выходах могут быть подключены два дополнительных модуля расширения.

Добавление новых модулей в ПЛК FX5 позволяет создать компактную систему безопасности, сертифицированную на соответствие требованиям категории 4 (уровень эффективности защиты PLе и уровень полноты безопасности SIL3), заявленным в международных стандартах безопасности.

*<http://MitsubishiElectric.com> и [MitsubishiElectric.ru](http://MitsubishiElectric.ru)*