



МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

УДК 629.3.023.1:007.52

Р.Ю. ДОБРЕЦОВ, д-р техн. наук, доц.

ведущий инженер¹

профессор²

E-mail: dr-idpo@yandex.ru

Д.С. ПОПОВ, канд. техн. наук

заместитель главного конструктора¹

E-mail: d.popov@rtc.ru

Я.Н. СМИРНОВ

аспирант²

E-mail: yarismir64@gmail.com

В.А. ВОЛКОВ

конструктор¹

E-mail: volkov.v@rtc.ru

¹Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Поступила в редакцию 02.12.2024.

ОЦЕНКА СОСТАВЛЯЮЩИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА МОБИЛЬНОГО РОБОТИЗИРОВАННОГО МОДУЛЯ ВНУТРИТРУБНОЙ ДИАГНОСТИКИ НА КОЛЕСНОМ ШАССИ

Рассмотрены принципы построения уравнения энергетического баланса мобильного роботизированного сочлененного колесного шасси с электромеханическим приводом транспортной системы. Шасси предназначено для размещения оборудования для внутритрубной диагностики или другого технологического оборудования. В основе подхода лежит анализ условий эксплуатации машины и особенностей конструкции шасси. В статье предложены расчетные зависимости для оперативного прогнозирования энергозатрат на передвижение шасси по трубопроводу с заданными характеристиками. Зависимости получены на основе методов и подходов теории движения колесных и гусеничных машин с учетом особенностей конструкции транспортной системы робота, схемы нагружения колес, характеристик полотна пути. Приведен пример расчета для трубопровода заданной конфигурации. Предложены организационные и технические решения, направленные на повышение безопасности эксплуатации рассматриваемого мобильного шасси в составе робототехнического комплекса за счет использования принципов дублирования и резервирования систем, отвечающих за передвижение, и введение в комплекс разведывательного мобильного модуля для оперативного построения профиля исследуемого трубопровода в случае отсутствия достоверной информации о его конфигурации и фактических параметрах. Приведены библиографические ссылки на источники, позволяющие получить детальное представление о современном состоянии вопроса технического обеспечения проведения внутритрубной диагностики.

Ключевые слова: мобильный робот, транспортная система, опорные реакции, качение колеса, внутритрубная диагностика

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-2-71-29-35>

Введение. Широкая распространенность трубопроводов и накопленный опыт их эксплуатации обосновывает практический интерес к созданию мобильных средств внутритрубной диагностики. В специальной литературе [1–4] (более обширный обзор первоисточников дан в библиографическом списке к статье [5]) проведен анализ как решений по обеспечению передвижения шасси, на котором устанавливается специальное оборудование, так и методов и средств неразрушающего контроля, применяемых на практике.

В работе [5] перечислены основные возможности, заложенные при проектировании колесного сочлененного полноприводного мобильного шасси робота (рисунок 1), создаваемого в ходе выполнения проекта «Разработка роботизированного диагностического комплекса для внутритрубного контроля трубопроводов», для ходового макета которого будут проводиться испытания на экспериментальном участке трубопровода.

В состав комплекса входят две машины на сочлененных колесных шасси, транспортные системы которых идентичны. Различие заключается в устанавливаемом оборудовании: на шасси может монтироваться блок для выполнения контактных технологических операций (например, шлифования), диагностический блок или другие устройства. Шасси каждой машины состоит из двух шарнирно-сочлененных секций. Расчеты по оценке энергозатрат далее будут проводиться для одной секции.

Мобильное шасси, в свою очередь, входит в роботизированный диагностический комплекс, структура и состав которого пояснены на рисунке 2.

Таким образом, целью данной части исследования является определение энергетических затрат мобильного шасси в составе роботизированного комплекса внутритрубной диагностики в рамках заданных заказчиком условий работы комплекса.

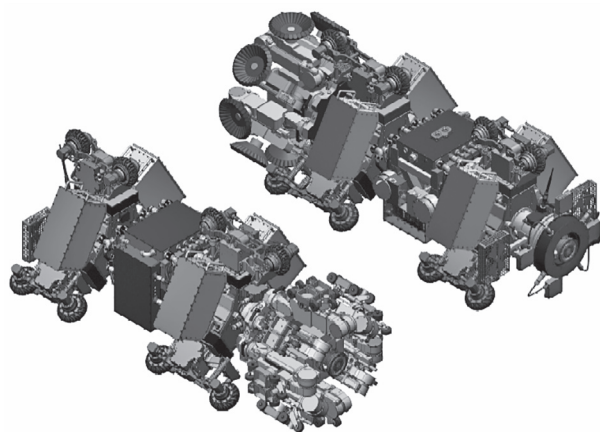


Рисунок 1 — 3D-модели робота с установленным технологическим оборудованием
Figure 1 — 3D models of the robot with installed technological equipment

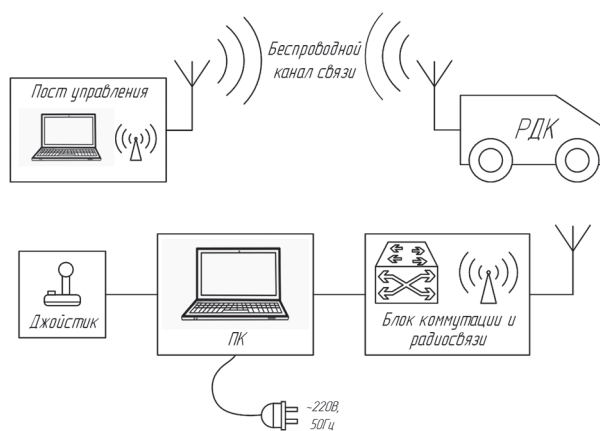


Рисунок 2 — Структурная схема роботизированного диагностического комплекса
Figure 2 — Structural diagram of the robotic diagnostic complex

Решаемые задачи:

- анализ условий работы транспортной системы робота;
- построение энергетического баланса мобильной платформы;
- расчетная оценка энергозатрат, связанных с передвижением машины;
- выработка рекомендаций по повышению энергоэффективности, надежности и безопасности комплекса.

При выполнении расчетов используются основные методы и подходы, принятые в теории движения колесных и гусеничных машин [6–11], и элементарные закономерности электротехники [12–16].

Составление и анализ уравнения энергетического баланса. Согласно данным, приведенным в статье [5], проектируемое мобильное шасси перемещается в трубопроводах с внутренним диаметром 1,0...1,4 м, имеет на борту источник энергии достаточной емкости и мощности, способно преодолевать сварные швы и местные неровности на внутренней поверхности трубы, участки смены диаметра трубы, отводы, тройники. Рабочая среда — воздух с остаточными газами. На поверхности движения допускается наличие жидкостей (в том числе поверхность может быть замасленной). Основной материал поверхности передвижения (полотна пути) — сталь. Скорость перемещения шасси — не менее 20 м/ч в рабочем режиме, от 600 м/ч (0,17 м/с) — в транспортном режиме. Помимо эффективного перемещения по горизонтальному участку трубопровода, шасси должно преодолевать участки с наклоном до 30°. Шасси загружается в трубу либо через свободный торец, либо через технологический вырез шириной 1,0 м и длиной от 1,5 м.

Продолжительность миссии до 6 ч, при этом робот может удаляться на расстояние до 3 км от пункта управления (таким образом суммарное расстояние, проходимое вдоль оси трубопровода своим ходом, — до 6 км).

Обе секции машины построены на базе трехлучевых распорных механизмов с мотор-колесами на независимой подвеске [17]. Такая конструкция позволяет располагать машины равноудаленно от точек опоры на трубопроводе (рисунок 3).

На основании рассмотренных условий эксплуатации и конструктивных особенностей при составлении уравнения энергетического баланса примем следующие основные допущения.

1. Контакт колеса (ролика) с опорной поверхностью точечный, режим работы близок к модели идеального качения (юз и буксование практически отсутствуют).

2. Сопротивление качению колеса и максимальная сила тяги по сцеплению прямо пропорциональны нормальной реакции, коэффициентами пропорциональности являются коэффициенты сопротивления качению $f = 0,08 \dots 0,12$ и сцепления с опорной поверхностью $\varphi = 0,6 \dots 0,8$.

3. Нормальные реакции колес распределяются поровну между бортами (суммарные реакции колес левого и правого бортов равны по величине).

4. Потери энергии, связанные с работой механических устройств трансмиссии и системы управления положением опорных роликов, приняты не зависящими от условий нагружения и учитываются с помощью КПД $\eta = 0,95 \dots 0,98$.

5. Движение робота рассматривается как равномерное. Затраты энергии при прохождении поворотов, тройников и стыков труб разного диаметра учитываются с помощью соответствующих поправочных коэффициентов.

6. Аэродинамическое сопротивление не учитывается.

7. Рекуперация энергии не учитывается.

8. Средняя скорость робота принята равной:

$$V = 0,6V_{\max} = 0,1 \text{ м/с},$$

где $V_{\max}$ — скорость движения шасси в транспортном режиме.

9. Затраты энергии на привод бортового оборудования принимаются по заявленным потенциальными поставщиками характеристикам.

10. При расчетах принимаем полную массу робота, равную 700 кг.

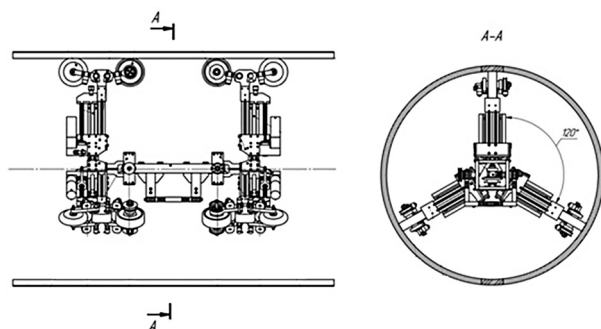


Рисунок 3 — Схема расположения машины в трубопроводе
Figure 3 — Layout of the machine in the pipeline

Составляющие энергетического баланса определяются конструктивными особенностями машины и заложенными функциональными возможностями.

В общем случае уравнение энергетического баланса имеет вид:

$$E_0 + \sum_{i=1}^n E_i = 0,$$

где E_0 — суммарная энергия, потребляемая от бортового источника; $n = 6$ — рассматриваются следующие виды энергозатрат: E_1 — на преодоление сопротивления полотна пути в прямолинейном движении; E_2 — на прохождение поворота; E_3 — при изменении диаметра трубопровода; E_4 — на привод бортовой аппаратуры управления; E_5 — на привод бортовой аппаратуры связи; E_6 — на привод технологического оборудования.

Учитывая принятые допущения, рассмотрим далее составляющие энергетического баланса, отвечающие за перемещение робота.

В общем случае колесный блок может быть произвольно ориентирован относительно линии действия вектора веса шасси. Для упрощения рассмотрим частный случай симметричного нагружения. Расчетная схема приведена на рисунке 4.

Тогда силы связаны уравнением

$$G + T_0 = 2T \cos(\pi/3).$$

Суммарное сопротивление качению роликов для секции будет пропорционально нормальной реакции:

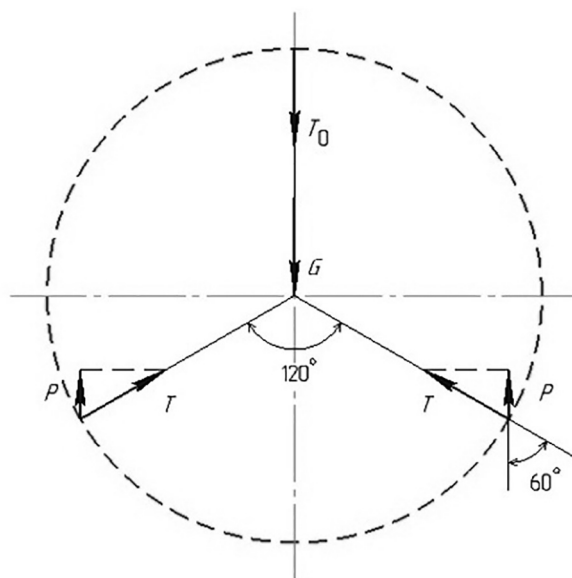


Рисунок 4 — Расчетная схема к оценке значений нормальных реакций под колесами при симметричном распределении нагрузок: G — вес секции; T и P — нормальные реакции на «опорных» колесах и их вертикальные составляющие; T_0 — нормальная реакция на «недогруженном» колесе

Figure 4 — Calculation scheme for estimation of normal reactions under wheels at symmetrical distribution of loads: G — weight of the section; T and P — normal reactions on “supporting” wheels and their vertical components; T_0 — normal reaction on “underloaded” wheel

$$X = f(2T + T_0),$$

где $f = 0,08 \dots 0,12$ — коэффициент сопротивления качению.

Если модуль движется по наклонному участку трубы (зададим угол наклона β), записанные выше уравнения примут вид:

$$G \cos \beta + T_0 = 2T \cos(\pi/3);$$

$$X = f(2T + T_0) \cos \beta \pm G \sin \beta.$$

Знак продольной составляющей веса положителен при движении на подъем и отрицателен при движении на спуск.

Поскольку выраженные режимы разгона и торможения не свойственны рассматриваемому шасси, прямолинейное движение можно считать в основном равномерным и оценить энергозатраты на пути S_1 по зависимости:

$$E_1 = \frac{[f(2T + T_0) \cos \beta \pm G \sin \beta] S_1}{\eta_1} \approx \frac{\psi(2T + T_0) S_1}{\eta_1}.$$

В этом выражении $\psi = f \cos \alpha \pm \sin \alpha$ — коэффициент сопротивления полотна пути с учетом значения угла наклона участка трубы β (путь S_1 при сложном профиле трубопровода придется разбивать на отдельные участки); T и T_0 — нормальные реакции под нижними и верхним роликами. Значение КПД для большинства компактных редукторов, используемых в приводах мотор-колес, составляет $\eta_1 = 0,80 \dots 0,95$. Подробный анализ условий работы колесного движителя диагностического модуля в транспортном режиме приведен в [18].

При прохождении поворота траектория движения задается радиусом кривизны трубы. Чтобы избежать юза и буксования колес и связанных с ними потерь энергии, целесообразно управлять тяговыми электродвигателями таким образом, чтобы обеспечить распределение сил тяги по аналогии со случаем бортового поворота машины [6–8]. Тогда при оценочных расчетах становится возможным использовать зависимость, связывающую мощности при бортовом повороте и прямолинейном движении (например, пояснения в источнике [8, с. 210], по аналогии с которыми строится зависимость, связывающая энергозатраты при криволинейном и прямолинейном движении):

$$E_2 = E_1 \frac{\rho + q_r}{\rho + q_m} = \frac{\psi(2T + T_0) S_2}{\eta_1} \frac{\rho + q_r}{\rho + q_m},$$

где $\rho = R/(D \sin(\pi/3))$ — относительный радиус поворота (R — абсолютный радиус поворота по оси трубы, D — внутренний диаметр трубы); q_m — относительное плечо выноса точки, сохраняющей при повороте скорость прямолинейного движения (значение зависит от стратегии управления пово-

ротом, выгодно, чтобы эта точка располагалась на оси машины и обеспечивалось $q_m = 0$);

$$q_3 = \frac{\mu}{2f} \frac{L}{D \sin(\pi/3)} \text{ — относительное плечо выноса}$$

са равнодействующей сопротивления повороту [6–8] (μ — коэффициент сопротивления повороту (в данном случае по физическому смыслу этот параметр близок к коэффициенту трения между колесом и опорной поверхностью в поперечном направлении); L — межосевое расстояние). Таким образом, для двухсекционной машины придется рассматривать поворот каждой секции, в общем случае имеющих разную массу и межосевые расстояния.

Приведенные обозначения и зависимости используются в теории движения гусеничных машин при рассмотрении бортового поворота односекционного шасси. Наиболее полная информация представлена в [8, с. 178–188, 203–206].

Теоретически можно обеспечить и равенство энергозатрат при повороте и прямолинейном движении, если обеспечить выполнение условия $q_m = q_r$. Однако после прохождения поворота в этом случае скорость центра масс машины снизится.

В случае преодоления участка, на котором изменяется диаметр трубы, энергозатраты будут связаны с сопротивлением полотна пути и работой поперечной составляющей силы T (рисунок 5) на перемещении $(D - d)$:

$$E_3 = \frac{\psi(2T + T_0) S_3}{\eta_1} + \frac{(2T + T_0)(D - d)}{\eta_3}.$$

Значение КПД механической части привода оценим из диапазона $\eta_3 = 0,70 \dots 0,80$.

Таким образом, для прогнозирования энергозатрат шасси весьма желательно иметь эскиз маршрута. Такой эскиз можно составить на основе технологической документации на трубопровод, а можно получить с помощью специального разведывательного модуля на колесном или гусеничном ходу. Основными требованиями к такому модулю будут более высокая подвижность, чем у основной мобильной платформы, способность

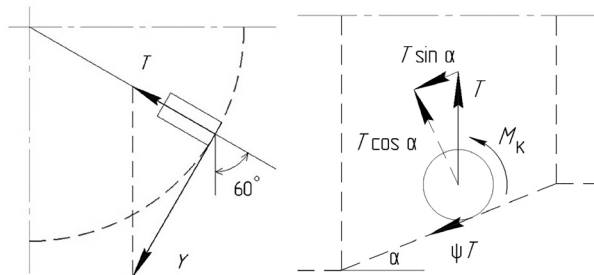


Рисунок 5 — К определению поперечной составляющей при нагружении колеса и схема сил при смене диаметра трубы
Figure 5 — To determination of the transverse component in wheel loading and force scheme at change of pipe diameter

нести необходимую для разведки и обеспечения связи с центром управления аппаратуру и источник питания достаточной емкости. Наличие разведывательного модуля повысит безопасность эксплуатации основной машины, несущей дорогостоящее оборудование.

Пример расчета. В качестве примера рассмотрим случай движения шасси по участку длиной $S_0 = 3$ км с одним местом сужения диаметра трубопровода от $D = 1,4$ м до $d = 1,0$ м. На данном участке располагается П-образный тепловой компенсатор (рисунок 6).

При расчетах для модуля массой 350 кг приняты следующие значения входных параметров: $\psi = f = 0,08$; $T = 3500$ Н; $T_0 = 20$ Н; $\eta_1 = 0,85$; $\rho = 1,5$; $q_m = 0$; $\mu = 0,6$; $q_r = 1,6(6)$; $\eta_3 = 0,7$.

Прямолинейная часть трассы складывается из шести участков:

$$S_1 = S_{11} + 2S_{12} + S_{13} + S_{14} + S_{15} = 2994 \text{ м.}$$

Сопутствующие расчетные энергозатраты:

$$E_1 = 1,98 \text{ МДж.}$$

Криволинейная часть трассы состоит из четырех участков:

$$S_2 = 4S_{21} = 5,5 \text{ м.}$$

Ожидаемые расчетные энергозатраты для двухсекционного модуля:

$$E_2 = 15,4 \text{ кДж.}$$

Смена диаметра происходит на участке длиной $S_3 = 0,5$ м.

Энергозатраты составят:

$$E_3 = 2,6 \text{ кДж.}$$

Суммарные энергозатраты на передвижение шасси по трубопроводу в соответствии со схемой по рисунку 6 составят:

$$E_0 = 2(E_1 + E_2 + E_3) \approx 4,0 \text{ МДж.}$$

Данный запас энергии может обеспечить аккумуляторная батарея емкостью около 92 А·ч при напряжении питания 12 В.

С использованием предложенного подхода представляется возможным оценить энергозатраты при прохождении трассы заданной конфигурации.

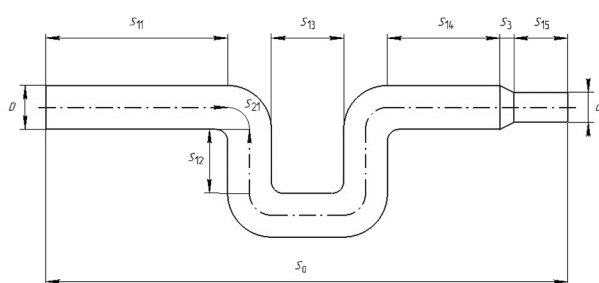


Рисунок 6 — Схема участка трубопровода
Figure 6 — Pipeline section diagram

Сопоставление с опытом транспортного машиностроения [12–16] позволяет рекомендовать к использованию в качестве источников энергии достаточно безопасные и относительно недорогие никель-марганец-кобальтовые аккумуляторы. При этом дополнительные преимущества в надежности и безопасности эксплуатации мобильного модуля можно получить, используя несколько (не менее двух) батарей и алгоритмы управления, позволяющие выборочно отключать потребителей и направлять энергию на транспортную систему для обеспечения эвакуации шасси при необходимости.

Заключение. На основании приведенных элементарных расчетов можно прогнозировать энергозатраты на маршруте, оценить целесообразность применения разрабатываемого диагностического модуля в конкретных условиях и снизить риски, связанные с потерей подвижности мобильного шасси.

Выводы. На основании изложенного можно сформулировать следующие основные выводы.

1. На борту транспортного средства целесообразно предусмотреть основной и резервный источники энергии, а также подсистему управления, позволяющую машине вернуться к точке старта в аварийном режиме.

2. При выборе точки входа в трубопровод и планировании программы работы важно предварительно расчетным путем оценить энергозатраты на пути. Для снижения рисков предварительную разведку пути полезно осуществить с помощью более дешевого и быстроходного легкого шасси.

3. Алгоритмы управления системами робота должны позволять оператору дистанционно выборочно отключать отдельных потребителей и обеспечивать возможность дублирования питания приводов транспортной системы роботизированного шасси.

Работа выполнена в рамках НИОКТР, проводимых ЦНИИ РТК при реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства «Разработка роботизированного диагностического комплекса для внутритрубного контроля трубопроводов» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение о предоставлении субсидии № 075-11-2022-035).

Список литературы

1. Егоров, И.Н. Применение мобильных роботов при внутритрубной диагностике трубопроводов с переменным поперечным сечением / И.Н. Егоров, Д.А. Кадхим // Нефтегазовое дело. — 2011. — № 3. — С. 73–83. — URL: <https://ogbus.ru/article/view/primenenie-mobilnyx-robotov-pri-vnutritrubnoj-diagnostike-trub> (дата обращения: 08.11.2024).
2. Мунасыпов, Р.А. Обзор конструкций внутритрубных радиографических и диагностических транспортных средств — кроулеров / Р.А. Мунасыпов, В.Е. Скворцов // Территория Нефтегаз. — 2016. — № 11. — С. 64–67.
3. Арискин, И.В. Анализ робототехнических устройств, предназначенных для внутритрубной диагностики /

- И.В. Арискин // Политехнический молодежный журнал. — 2019. — № 9(38). — DOI: <https://doi.org/10.18698/2541-8009-2019-9-523>.
4. Холоденко, В.Б. Внутритрубные диагностические роботизированные мобильные комплексы для труб различного диаметра / В.Б. Холоденко, А.П. Пахомов // Инновации. Наука. Образование. — 2022. — № 52. — С. 630–645.
5. Волков, В.А. Конструктивные особенности робототехнических комплексов внутритрубной диагностики / В.А. Волков, В.В. Варлашин // Робототехника и техническая кибернетика. — 2022. — Т. 10, № 4. — С. 309–320. — DOI: <https://doi.org/10.31776/RTCJ.10410>.
6. Павлов, В.В. Теория движения многоцелевых гусеничных и колесных машин: учеб. для вузов / В.В. Павлов, В.В. Кувшинов. — Чебоксары: Чебоксарская типография № 1, 2011. — 424 с.
7. Wong, J.Y. Theory of ground vehicles / J.Y. Wong. — 3rd ed. — John Wiley & Sons, 2001. — 528 p.
8. Забавников, Н.А. Основы теории транспортных гусеничных машин / Н.А. Забавников. — М.: Машиностроение, 1975. — 448 с.
9. Рокар, И. Неустойчивость в механике: Автомобили. Самолеты. Висячие мосты / И. Рокар, пер. с фр. В.К. Житомирского; под ред. А.Н. Обморшева. — М.: Изд-во иностр. лит., 1959. — 287 с.
10. Теория и конструкция танка: в 10 т. / под ред. П.П. Исакова. — М.: Машиностроение, 1985. — Т. 6. Вопросы проектирования ходовой части военных гусеничных машин. — 244 с.
11. Бойков, А.В. Физико-математическая модель процесса взаимодействия опорной ветви движителя транспортной гусеничной машины с недеформируемым основанием / А.В. Бойков, Р.Ю. Добрецов, А.И. Мазур // Вестник молодых ученых. — 1999. — № 1(2). — С. 14–25.
12. Ильюкевич, К.В. Перспективы применения литий-ионных аккумуляторных батарей в составе электрических трансмиссий / К.В. Ильюкевич, Р.В. Сибиряков // Разработка и использование электрических трансмиссий для образцов вооружения и военной техники: сб. ст. науч.-практ. конф., 20 окт. 2016 г. / ВНИИТрансмаш. — 2016. — С. 147–150.
13. Комбинированные накопители мощности и энергии нового поколения / М.А. Козлов [и др.] // Разработка и использование электрических трансмиссий для образцов вооружения и военной техники: сб. ст. науч.-практ. конф., 20 окт. 2016 г. / ВНИИТрансмаш. — 2016. — С. 140–146.
14. Энергоустановки автомобильного транспорта с тяговым электроприводом: / Л.Ю. Лежнев, Н.А. Хрипач, Ф.А. Шустров [и др.]. — Тамбов: Консалтинговая компания Юком, 2017. — 204 с.
15. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles. fundamentals, theory, and design / M. Ehsani, Y. Gao, S.E. Gay, A. Emadi. — Boca Raton: CRC Press, 2004. — 395 p. — DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420037739>.
16. Crowder, R. Electric drives and electromechanical systems / R. Crowder. — Elsevier, 2006. — 312 p.
17. Транспортный модуль внутритрубного диагностического робота / А.И. Прядко, Н.В. Павлов, Д.С. Попов [и др.] // Робототехника и техническая кибернетика. — 2023. — Т. 11, № 3. — С. 224–231. — DOI: <https://doi.org/10.31776/RTCJ.11308>.
18. Предварительный анализ условий работы колесного движителя внутритрубного диагностического модуля / Р.Ю. Добрецов, Д.С. Попов, В.А. Волков, А.В. Лопота // Робототехника и техническая кибернетика. — 2024. — Т. 12, № 4. — С. 315–320. — DOI: <https://doi.org/10.31776/RTCJ.12409>.

DOBRETsov Roman Yu., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.

Leading Engineer¹

Professor²

E-mail: dr-idpo@yandex.ru

POPOV Dmitrii S., Ph. D. in Eng.

Deputy Chief Designer¹

E-mail: d.popov@rtc.ru

SMIRNOV Yaroslav N.

Graduate Student²

E-mail: yarismir64@gmail.com

VOLKOV Vladislav A.

Designer¹

E-mail: volkov.v@rtc.ru

¹Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint Petersburg, Russian Federation

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation

Received December 2, 2024.

EVALUATION OF THE ENERGY BALANCE COMPONENTS OF A MOBILE ROBOTIC MODULE FOR IN-PIPE DIAGNOSTICS ON A WHEELED CHASSIS

The paper considers the principles of constructing an energy balance equation for a mobile robotic articulated wheeled chassis with an electromechanical drive of the transport system. The chassis is designed to accommodate in-pipe diagnostics equipment or other process equipment. The approach is based on the analysis of the machine operating conditions and the chassis design features. The article proposes calculation dependencies for the operational forecasting of energy costs for chassis movement along a pipeline with specified characteristics. The dependencies are obtained based on the methods and approaches

of the theory of wheeled and tracked vehicles motion, taking into account the design features of the robot transport system, wheel loading scheme, and track characteristics. An example of calculation for a pipeline of a given configuration is given. Organizational and technical solutions are proposed aimed at improving the safety of operation of the mobile chassis in question as part of a robotic using the principles of duplication and redundancy of systems responsible for movement, and the introduction of a mobile reconnaissance module into the complex for the operational construction of a profile of the pipeline under study in the absence of reliable information about its configuration and actual parameters. Bibliographic references to sources are provided that make it possible to obtain a detailed understanding of the current state of the issue of technical support for in-pipe diagnostics.

Keywords: mobile robot, transport system, support reactions, wheel rolling, in-pipe diagnostics

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-2-71-29-35>

References

- Egorov I.N., Kadhim D.A. Primenenie mobilnykh robotov pri vnutritrubnoy diagnostike truboprovodov s peremennym poperechnym secheniem [Applications mobile robots for diagnostic inside pipelines with variable cross-section]. *Oil and gas business*, 2011, no. 3, pp. 73–83. Available at: <https://ogbus.ru/article/view/primenenie-mobilnyx-robotov-pri-vnutritrubnoy-diagnostike-trub> (in Russ.) (accessed November 8, 2024).
- Munasyrov R.A., Skvortsov V.Ye. Obzor konstruktivnykh vnutritrubnykh radiograficheskikh i diagnosticheskikh transportnykh sredstv – kroulerov [Review of intratubal radiographic and diagnostic transportation means designs – crawlers]. *Territoriya Neftegaz*, 2016, no. 11, pp. 64–67 (in Russ.).
- Ariskin I.V. Analiz robototekhnicheskikh ustroystv, prednaznachennykh dlya vnutritrubnoy diagnostiki [Analysis of robotic devices intended for in-line inspection]. *Politechnical student journal*, 2019, no. 9(38). DOI: <https://doi.org/10.18698/2541-8009-2019-9-523> (in Russ.).
- Kholodenko V.B., Pakhomov A.P. Vnutritrubnye diagnosticheskie robotizirovannye mobilnye komplekсы dlya trub razlichnogo diametra [In-pipe diagnostic robotic mobile complexes for pipes of various diameters]. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie*, 2022, no. 52, pp. 630–645 (in Russ.).
- Volkov V.A., Varlashin V.V. Konstruktivnye osobennosti robototekhnicheskikh kompleksov vnutritrubnoy diagnostiki [Design features of the robotic complex for in-line pipeline diagnostics]. *Robotics and technical cybernetics*, 2022, vol. 10, no. 4, pp. 309–320. DOI: <https://doi.org/10.31776/RTCJ.10410> (in Russ.).
- Pavlov V.V., Kuvshinov V.V. Teoriya dvizheniya mnogotselevykh gusenichnykh i kolesnykh mashin [Theory of motion of multipurpose tracked and wheeled vehicles]. Cheboksary, Cheboksarskaya tipografiya No. 1 Publ., 2011. 424 p. (in Russ.).
- Wong J.Y. *Theory of ground vehicles*. John Wiley & Sons, 2001. 528 p.
- Zabavnikov N.A. *Osnovy teorii transportnykh gusenichnykh mashin* [Fundamentals of the theory of transport tracked vehicles]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 448 p. (in Russ.).
- Rocard Y. *L'instabilité en mécanique: Automobiles. Avions. Ponts suspendus*. Paris, Masson et Cie, 1954.
- Teoriya i konstruktsiya tanka. T. 6. Voprosy proektirovaniya hodovoy chasti voennykh gusenichnykh mashin* [Tank theory and design. Vol. 6. Design issues of the chassis of military tracked vehicles]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 244 p. (in Russ.).
- Boykov A.V., Dobretsov R.Yu., Mazur A.I. Fiziko-matematicheskaya model protsessa vzaimodeystviya opornoy vetvi dvizhitelya transportnoy gusenichnoy mashiny s nedeformiruemym osnovaniem [Physical and mathematical model of the interaction process of the support branch of the mover of a transport tracked vehicle with a non-deformable base]. *Vestnik molodykh uchenykh*, 1999, no. 1(2), pp. 14–25 (in Russ.).
- Ilyukovich K.V., Sibiryakov R.V. Perspektivy primeneniya lityi-ionnykh akkumulyatornykh batarey v sostave elektricheskikh transmissiy [Prospects for the use of lithium-ion batteries in electric transmissions]. *Nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Razrabotka i ispolzovanie elektricheskikh transmissiy dlya obraztsov vooruzheniya i voennoy tekhniki"* [Scientific and practical conference "Development and use of electric transmissions for weapons and military equipment"], 2016, pp. 147–150 (in Russ.).
- Kozlov M.A., et al. Kombinirovannye nakopiteli moshchnosti i energii novogo pokoleniya [Combined power and energy storage devices of the new generation]. *Nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Razrabotka i ispolzovanie elektricheskikh transmissiy dlya obraztsov vooruzheniya i voennoy tekhniki"* [Scientific and practical conference "Development and use of electric transmissions for weapons and military equipment"], 2016, pp. 140–146 (in Russ.).
- Lezhnev L.Yu., et al. *Energoustanovki avtomobilnogo transporta s tyagovym elektropivodom* [Power plants of automobile transport with electric traction drive]. Tambov, Konsaltingovaya kompaniya Yukom Publ., 2017. 204 p. (in Russ.).
- Ehsani M., Gao Y., Gay S.E., Emadi A. *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles. Fundamentals, theory, and design*. Boca Raton, CRC Press, 2004. 395 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420037739>.
- Crowder R. *Electric drives and electromechanical systems*. Elsevier, 2006. 312 p.
- Pryadko A.I., et al. Transportnyy modul vnutritrubnogo diagnosticheskogo robota [Transport modulus of in-pipe diagnostic robot]. *Robotics and technical cybernetics*, 2023, vol. 11, no. 3, pp. 224–231. DOI: <https://doi.org/10.31776/RTCJ.11308> (in Russ.).
- Dobretsov R.Yu., Popov D.S., Volkov V.A., Lopota A.V. Predvaritelnyy analiz usloviy raboty kolesnogo dvizhitelya vnutritrubnogo diagnosticheskogo modulya [Preliminary analysis of the operating conditions of the wheel drive of the in-pipe diagnostic module]. *Robotics and technical cybernetics*, 2024, vol. 12, no. 4, pp. 315–320. DOI: <https://doi.org/10.31776/RTCJ.12409> (in Russ.).