



№ 19, 2023

ISSN 2658-3305

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ: НАУКА И ПРОИЗВОДСТВО

Журнал публикует статьи, обзоры и краткие сообщения по результатам научно-исследовательских работ по следующим направлениям и научным специальностям:

1. Математика и механика:

- 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин;
- 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

2. Машиностроение:

- 2.5.2. Машиноведение;
- 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы;
- 2.5.21. Машины, агрегаты и технологические процессы.

3. Недропользование и горные науки:

- 2.8.2. Технология бурения и освоения скважин;
- 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика;
- 2.8.7. Теоретические основы проектирования горнотехнических систем;
- 2.8.8. Геотехнология, горные машины.

Научно-образовательный журнал.

Издается с 2018г.

Свидетельство о регистрации СМИ – ПИ № ФС 77 - 77557.

Периодичность – 6 номеров в год.

С 21.04.2022г. журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Учредитель, издатель и распространитель: Жукова Елена Валерьевна (ИП Жукова Е.В.,
ИНН 422802805198, ОГРНИП 318420500009778, г.Санкт-Петербург).

Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. –
Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2023. – № 19. – 195 с.

Целями журнала являются развитие фундаментальных и прикладных исследований в горно-геологических и технических науках, способствование продвижению их результатов в национальное и международное научное сообщество, повышение качества подготовки специалистов для горнодобывающей и машиностроительной отраслей промышленности, публикация докладов конференций профильной направленности.

Редакционная коллегия:

Жуков Иван Алексеевич – главный редактор, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет, директор Научно-исследовательского центра «МашиноСтроение», г.Санкт-Петербург;

Балакина Екатерина Викторовна – д.т.н., доцент, профессор кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей», Волгоградский государственный технический университет, г.Волгоград;

Болобов Виктор Иванович – д.т.н., старший научный сотрудник, профессор кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет, г.Санкт-Петербург;

Габараев Олег Знаурович – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Горное дело», Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), г.Владикавказ;

Еремьянц Виктор Эдуардович – д.т.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт машиноведения и автоматики Национальной академии наук Кыргызской Республики, г.Бишкек, Кыргызстан;

Лагунова Юлия Андреевна – д.т.н., профессор, профессор кафедры горных машин и комплексов, Уральский государственный горный университет, г.Екатеринбург;

Наумкин Николай Иванович – к.т.н., д.п.н., профессор, заведующий кафедрой основ конструирования механизмов и машин, Национальный исследовательский Мордовский государственный университета им. Н.П. Огарёва, г.Саранск;

Новичихин Алексей Викторович – д.т.н., доцент, заведующий кафедрой логистики и коммерческой работы, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г.Санкт-Петербург;

Сарбаев Владимир Иванович – д.т.н., профессор, профессор кафедры наземных транспортных средств, Московский политехнический университет, г.Москва;

Саруев Лев Алексеевич – д.т.н., профессор, профессор отделения нефтегазового дела, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г.Томск;

Степанов Юрий Александрович – д.т.н., доцент, профессор кафедры ЮНЕСКО по информационным вычислительным технологиям, Кемеровский государственный университет, г.Кемерово;

Унаспеков Берикбай Акибаевич – д.т.н., профессор, академик Национальной инженерной академии Республики Казахстан, профессор кафедры «Инженерные системы и сети», Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, г.Алматы, Казахстан;

Червов Владимир Васильевич – д.т.н., заведующий лабораторией механизации горных работ, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, г.Новосибирск;

Шадрин Анатолий Александрович – д.т.н., доцент, профессор кафедры технологии и оборудования лесопромышленного производства, Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), г.Москва;

Шигин Андрей Олегович – д.т.н., доцент, профессор кафедры «Горные машины и комплексы», Сибирский федеральный университет, г.Красноярск.



No. 19, 2023

ISSN 2658-3305

TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION ENGINEERING: SCIENCE AND PRODUCTION

Accepted for publication articles, abstracts, reviews and short communications on the results of scientific research in the following areas:

1. Mathematics and Mechanics:

Theoretical mechanics, dynamics of machines;
Mechanics of a deformable solid.

2. Mechanical engineering:

Machine science;
Ground transportation and technological facilities and complexes;
Machines, aggregates and technological processes.

3. Subsurface use and mining sciences:

Technology of drilling and development of wells;
Geomechanics, rock destruction, mining aerogasodynamics and mining thermophysics;
Theoretical foundations of mining engineering systems design;
Geotechnology, mining machines.

Scientific-Educational Journal.

Published since 2018.

Frequency – 6 issues per year.

Since 04/21/2022 journal has been included in the List of peer-reviewed scientific publications of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation, in which the main scientific results of dissertations for the degree of candidate of sciences, for the degree of doctor of sciences should be published.

Founder: Elena V. Zhukova.

Transport, mining and construction engineering: science and production. –
Saint-Petersburg: SRC MS, 2023. – No. 19. – 195 p.

The objectives of the journal are development of fundamental and applied research in geological and technical sciences, introduction of their results in national and international scientific community, improving the quality of training specialists for mining and engineering industries, publication of the reports of the conferences of professional orientation.

Editorial Board:

- Ivan Zhukov* – chief editor, doctor of technical sciences, associate professor, head of department of mechanical engineering, Saint-Petersburg mining university, Scientific Research Centre "MachineStructure", Saint-Petersburg, Russia;
- Ekaterina Balakina* – doctor of technical sciences, associate professor, professor of department of «Technical exploitation and repair of cars», Volgograd state technical university, Volgograd, Russia;
- Victor Bolobov* – doctor of technical sciences, senior researcher, professor of department of mechanical engineering, Saint-Petersburg mining university, Saint-Petersburg, Russia;
- Oleg Gabaraev* – doctor of technical sciences, professor, head of Mining department, North Caucasian institute of mining and metallurgy (state technological university), Vladikavkaz, Russia;
- Victor Eremyants* – doctor of technical sciences, professor, chief researcher, Institute of Machine Science and Automation of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan;
- Yulya Lagunova* – doctor of technical sciences, professor of department of mining machines and complexes, Ural state mining university, Ekaterinburg, Russia;
- Nikolay Naumkin* – doctor of pedagogical sciences, candidate of technical sciences, head of department of fundamentals of designing mechanisms and machines, N.P.Ogarev Mordovia state university, Saransk, Russia;
- Alexey Novichihin* – doctor of technical sciences, associate professor, head of department of logistics and commercial work, Emperor Alexander I Saint-Petersburg state transport university, Saint-Petersburg, Russia;
- Vladimir Sarbaev* – doctor of technical sciences, professor of department of motor vehicles, Moscow polytechnic university, Moscow, Russia;
- Lev Saruev* – doctor of technical sciences, professor of department of oil and gas business, National research Tomsk polytechnic university, Tomsk, Russia;
- Stepanov Yuri* – doctor of technical sciences, professor of department of informatics and computer engineering, Novokuznetsk Institute (branch) "Kemerovo state University", Novokuznetsk, Russia;
- Berikbay Unspecov* – doctor of technical sciences, academic of National engineering academy of Republic of Kazakhstan, professor of department "Engineering systems and networks", Kazakh national technical university, Almaty, Kazakhstan;
- Vladimir Chervov* – doctor of technical sciences, head of laboratory of mechanization of mining, Institute of mining Siberian branch of Russian academy of sciences, Novosibirsk, Russia;
- Anatoliy Shadrin* – doctor of technical sciences, associate professor, professor of department of technologies and equipment of timber industry, Mytishchi branch of Moscow state technical university named N.E. Bauman (national research university), Moscow state forest university, Moscow, Russia;
- Andrey Shigin* – doctor of technical Sciences, professor of department "Mining machines and complexes", Siberian federal university, Krasnoyarsk, Russia.

СОДЕРЖАНИЕ

Математика и механика

1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин

Энкин А.А., Чернопятава С.А. Алгоритм формирования опорных траекторий движения беспилотного летательного аппарата самолетного типа.....	9
Попов И.П., Самуйлов В.М., Каргапольцева Т.А., Харин В.В. Схема осуществления свободных колебаний трех грузов без упругих связей	18
Гарсия Р.Б., Меркурьев И.В., Сайпулаев Г.Р., Сайпулаев М.Р. Разработка алгоритмов управления активным экзоскелетом человека.....	23
Андреев А.И., Чанчиков В.А., Славин Б.М., Перекрестов А.П., Козлова И.А. Исследование динамики потенциальной энергии волчка Томпсона и его применение в потенциометрах	30

1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин; 2.8.8. Геотехнология, горные машины

Князев А.С., Адамович Н.О., Макаров А.В. К вопросу о динамике секции механизированной крепи.....	35
--	----

1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

Зеньков Е.В. Анализ точности и сходимости численного решения в задачах моделирования напряженно-деформированного состояния конструкций с U-образными концентраторами напряжений	44
---	----

Машиностроение

2.5.2. Машиноведение

Кабалдин Ю.Г., Башков А.А., Иванов С.В., Замураев И.Д. Нейронносетевое моделирование процессов трения при резании.....	52
--	----

2.5.2. Машиноведение; 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

Панов А.Н., Юдина О.Н., Мрочек Ж.А. Риск-ориентированное проектирование. Управление конструкторско-технологическими рисками несущих конструкций мобильных машин.....	59
--	----

2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

Летопольский А.Б., Мещеряков В.А., Тетерина И.А., Николаев Д.И. Моделирование перемещений рабочего оборудования одноковшового экскаватора	67
Халиуллин Ф.Х., Яхин С.М., Имамиев А.З., Макарова О.И., Егоров С.В. Силовой анализ навесного устройства трактора с регулируемыми характеристиками	73
Бао Л., Добрецов Р.Ю., Войнаш С.А., Ерыгин В.В., Пушков Ю.Л., Кривоногова А.С. О возможности повышения управляемости и устойчивости движения колесной машины путем применения управляемых дифференциалов	84

2.5.21. Машины, агрегаты и технологические процессы

Макарова Т.Г., Думлер Е.Б., Набиуллина Г.Р., Лощакова Э.У. Анализ результатов моделирования параметров внутрискважинной системы для дозирования химического реагента.....	92
Сидоров Д.Е., Колесов А.Г. Скоростное алмазное шлифование плоских керамических деталей электронных приборов.....	101
Алексеев А.Е., Петухов С.В., Баланцева Н.Б., Калинин О.А., Радюшин В.В., Бабкин И.М., Кришьянис М.В. Исследование возможности применения линейного асинхронного двигателя для привода пильного суппорта обрезающего станка	107
Сазонов С.Е., Ревенко Д.В. Оптимальное распределение ограниченных ресурсов для получения максимальной производительности параллельно работающих объектов автоматизированного производства	116

2.5.21. Машины, агрегаты и технологические процессы; 2.8.8. Геотехнология, горные машины

Макаров В.Н., Ахметов Р.Г., Макаров Н.В., Бельских А.М. Повышение экологической эффективности вертикальных шахтных печей сушки рудных материалов.....	122
--	-----

Недропользование и горные науки

2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Протосеня А.Г., Карасев М.А., Катеров А.М., Петрушин В.В. Анализ подходов к прогнозу напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола, пройденного в соляном массиве	129
---	-----

2.8.8. Геотехнология, горные машины

Иванов С.Л., Шешукова Е.И., Недашковская Е.С. Классификация средств разрушения негабарита при ведении открытых горных работ	138
Агафонов А.А., Васильева М.А., Талеров К.П. Актуальные направления модернизации шахтных подъемных установок горных предприятий	144
Альшанская А.А., Доронин С.В., Тюменцев В.А. Экспертное оценивание факторов повышения надежности механического оборудования карьерных экскаваторов	155
Теплякова А.В., Алиева Л., Жуков И.А. Компьютерное моделирование динамических процессов в элементах бурильных машин ударного действия	161
Кухарь М.Ю. Повышение эффективности восстановления зубчатых колес трансмиссий горных машин на основе автоматизации технологической подготовки ремонтного производства	172
Мартюшова А.А., Нгуен Тхэ Винь, Мнацаканян В.У. Проработка условий собираемости при автоматической установке ниппеля в корпус долота	180
Суан Хынг Нгуен, Новикова А.Д., Мнацаканян В.У. Повышение ресурса горного оборудования за счет применения защитных покрытий	185
Морин А.С., Ибрафимов Р.Г., Альшанская А.А. Установка для испытания шарнирных крепежных узлов ковшей горных элеваторов при высоких нагрузках	190

CONTENTS

Mathematics and Mechanics

Theoretical mechanics, dynamics of machines

- Enkin A.A., Chernopyatova S.A.** Algorithm for the formation of reference trajectories for the movement of an unmanned aerial vehicle of an aircraft type 9
- Popov I.P., Samuilov V.M., Kargapoltseva T.A., Kharin V.V.** Scheme for the implementation of free oscillations of three loads without elastic links 18
- Garcia R.B., Merkuriev I.V., Saypulaev G.R., Saypulaev M.R.** Development of control algorithms for the active human exoskeleton 23
- Andreev A.I., Chanchikov V.A., Slavin B.M., Perekrestov A.P., Kozlova I.A.** Investigation of the dynamics of the potential energy of the Thompson top and its application in potentiometers 30

Theoretical mechanics, dynamics of machines; Geotechnology, mining machines

- Knyazev A.S., Adamovich N.O., Makarov A.V.** About the dynamics of powered supports 35

Mechanics of a deformable solid

- Zenkov E.V.** Analysis of the accuracy and convergence of the numerical solution in simulation problems stress-strain state of structures with U-shaped stress concentrators 44

Mechanical engineering

Machine science

- Kabaldin Yu.G., Bashkov A.A., Ivanov S.V., Zamuraev I.D.** Neural network modeling of friction processes during cutting 52

Machine science; Ground transportation and technological facilities and complexes

- Panov A.N., Yudina O.N., Mrochek Zh.A.** Risk-oriented design. Management of design and technological risks of load-bearing structures of mobile machines 59

Ground transportation and technological facilities and complexes

- Letopolsky A.B., Meshcheryakov V.A., Teterina I.A., Nikolaev D.I.** Simulation of movement of working equipment single bucket excavator 67
- Khaliullin F.H., Yakhin S.M., Imamiyev A.Z., Makarova O.I., Egorov S.V.** Force analysis of a tractor linkage with adjustable characteristics 73
- Bao L., Dobretsov R.Yu., Voinash S.A., Erygin V.V., Pushkov Yu.L., Krivonogova A.S.** On the possibility of increasing the controllability and stability of the movement of a wheeled vehicle by using controlled differentials 84

Machines, aggregates and technological processes

- Makarova T.G., Dumler E.B., Nabiullina G.R., Loshchakova E.U.** Analysis of the results of modeling the parameters of the downhole system for chemical dosing 92
- Sidorov D.E., Kolesov A.G.** High-speed diamond grinding of flat ceramic parts of electronic devices 101
- Alekseev A.E., Petukhov S.V., Balantseva N.B., Kalinicheva O.A., Radyushin V.V., Babkin I.M., Krishjanis M.V.** Research of the possibility of using a linear asynchronous motor to drive the saw support of an edger 107
- Sazonov S.E., Revenko D.V.** Optimal allocation of limited resources to maximize the productivity of parallel automated production facilities..... 116

Machines, aggregates and technological processes; Geotechnology, mining machines

- Makarov V.N., Akhmetov R.G., Makarov N.V., Belskikh A.M.** Improving the environmental efficiency of vertical shaft furnaces for drying refractory and building materials..... 122

Subsurface use and mining sciences

Geomechanics, rock destruction, mining aerogasodynamics and mining thermophysics

- Protosenya A.G., Karasev M.A., Katerov A.M., Petrushin V.V.** Analysis of approaches to the prediction of the stress-strain state of the vertical shaft lining constructed in a salt massif..... 129

Geotechnology, mining machines

- Ivanov S.L., Sheshukova E.I., Nedashkovskaya E.S.** Classification of means of destruction of oversize during open-pit mining 138
- Agafonov A.A., Vasilieva M.A., Talerov K.P.** Actual directions of modernization of mine hoisting installations of mining enterprises 144
- Alshanskaya A.A., Doronin S.V., Tyumencev V.A.** Expert evaluation of the factors of increasing the reliability of the mechanical equipment of mining excavators 155
- Teplyakova A.V., Alieva L., Zhukov I.A.** Computer simulation of dynamic processes in elements of impact drilling machines 161
- Kukhar M.Yu.** Improving the efficiency of repairing gearwheels of mining machines transmissions based on automation of repair production preparation 172
- Martyushova A.A., Nguyen Thi Vinh, Mnatsakanyan V.U.** Working out the conditions of assembling during automatic installation of the nipple in the chisel body..... 180
- Xuan Hung Nguyen, Novikova A.D., Mnatsakanyan V.U.** Increasing the resource of mining equipment using protective coatings 185
- Morin A.S., Israfilov R.G., Alshanskaya A.A.** Installation for test of hinged fixing knots of ladles of mountain elevators at high loadings 190

К ВОПРОСУ О ДИНАМИКЕ СЕКЦИИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ КРЕПИ

Князев А.С., Адамович Н.О., Макаров А.В.

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк

Ключевые слова: секция крепи, механизированная крепь, динамика механизма крепи, кинематический анализ механизма крепи, замкнутый изменяемый контур.

Аннотация. В работе представлена кинематическая схема секции механизированной крепи, в состав которой входит замкнутый изменяемый контур. Описан принцип ее действия. Предложено сформулировать динамику секции механизированной крепи в виде уравнения Лагранжа второго рода. С целью упрощения расчетов и применения средств автоматизации, в том числе пакета MATHCAD, представлен численный метод кинематического анализа данного механизма. Для определения кинематических характеристик звеньев секции крепи с учетом движения привода в виде гидроцилиндра применен метод векторных контуров. Составлены уравнения для определения положений, угловых скоростей и ускорений звеньев, а также положений центров тяжести звеньев, скоростей и ускорений центров тяжести. Составлены уравнения кинетической энергии механизма и обобщенной силы с учетом кинематических характеристик гидроцилиндра.

ABOUT THE DYNAMICS OF POWERED SUPPORTS

Knyazev A.S., Adamovich N.O., Makarov A.V.

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk

Keywords: powered supports, support section, dynamics of the support mechanism, kinematic analysis of the support mechanism, closed variable contour.

Abstract. In this work, a kinematic chain of the mechanism of a powered roof support section was presented. This section includes a closed variable circuit. The principle of its action is described. It is proposed to formulate the dynamics of the powered roof support section in the form of the Lagrange equation of the second kind. In order to simplify the calculations and the use of automation tools, including the MATHCAD package, a numerical method for the kinematic analysis of this mechanism is presented. To determine the kinematic characteristics of the links of the support section, taking into account the movement of the drive in the form of a hydraulic cylinder, the method of vector contours was used. Equations have been compiled to determine the positions, angular velocities and accelerations of the links, as well as the positions of the centers of gravity of the links, the velocities and accelerations of the centers of gravity. The equations of the kinetic energy of the mechanism and the generalized force are compiled taking into account the kinematic characteristics of the hydraulic cylinder

Введение

Объем угледобычи в России составляет более четырехсот миллионов тонн в год. При постоянно развивающейся отрасли актуальными остаются вопросы безопасность добычи, экологичность, уменьшение затрат, повышение производительности.

Большая доля от объема добытого угля приходится на подземную добычу с применением комплексно-механизированного забоя, в состав которого входят механизированные клетки.

Предел вынимаемой мощности пластов определен не только производительностью техники для выемки пластов, но также требованиями безопасности к механизированным крепям. В связи с этим постоянно ведутся работы по усовершенствованию оборудования, в том числе и механизированных крепей.

Материал и методы исследования

Механизированная крепь – устройство, служащее для временного поддержания призабойной части очистного пространства и сохранения выработки в безопасном состоянии. Механизированная крепь состоит из системы секций, установленных вдоль забоя. Секция крепи включает основание, верхнее перекрытие, поддерживающее породы кровли; ограждающей части, защищающей рабочее пространство от обрушенной породы и

гидравлические цилиндры, необходимые для передвижения устройства, а также для выдвижения и прижатия перекрытий. Функцией секции крепи является распор гидростоек, поддержание пород кровли, снятие распора, передвижение секции. Гидростойка является основным опорным элементом, воспринимающим давление горных пород [1]/

Одним из вариантов совершенствования секций механизированных крепей является использование в кинематической цепи замкнутого изменяемого контура. На рисунке 1 показана схема секции с четырехугольным замкнутым контуром [2]. Применение такого контура способствует повышению жесткости конструкции и более эффективному распределению энергетических потоков [3].

В подпоршневую полость гидродомкрата 1 поступает рабочая жидкость, которая, перемещая шток 2, приводит в движение звено поддержки 3. Под воздействием звена 3 и силы сопротивления кровли меняет положение шатун 4. В силу закрепления коромысла 6 на шатуне 4 и на звене ограждения 5, опираясь на опору через второе коромысло 7, секция механизированной крепи приводится в рабочее состояние.

Величина приведенной массы секции достаточно велика, что приводит к появлению динамических нагрузок и возникновению колебательных возмущений в гидроцилиндре и гидромагистралях. Динамические напряжения в звеньях приводят к снижению надежности всей машины. Возможные гидравлические удары снижают долговечность гидроаппаратуры и могут привести к выходу оборудования из строя.

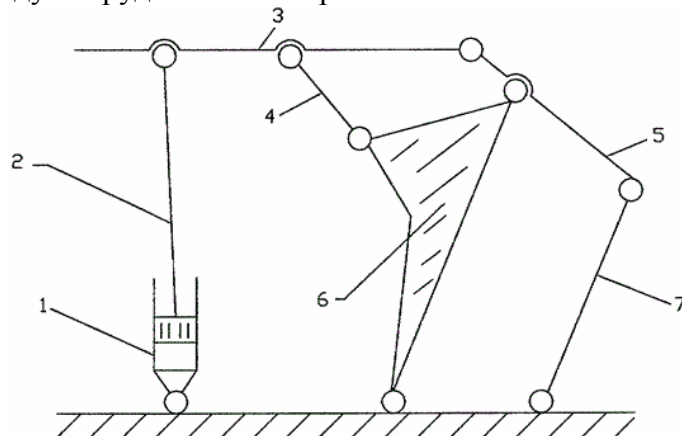


Рис. 1. Кинематическая схема крепи

Целью работы является исследование динамики секции механизированной крепи с подвижным изменяемым контуром.

Для рассмотрения динамики составляется уравнение движения механизма клетки с гидроприводом, имеющего одну степень подвижности. Жидкость в гидроцилиндре принимается несжимаемой, все звенья жесткими. Уравнение движения представляется в форме уравнения Лагранжа второго рода [4, стр. 145]:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial T}{\partial q} = Q, \quad (1)$$

где q – обобщенная координата, определяющая положение входного звена, T – кинетическая энергия, Q – обобщенная сила.

Для определения кинетической энергии и обобщенной силы необходимо определить положение, скорости и ускорения звеньев механизма и характерных его точек, т.е. провести кинематический анализ.

Результаты

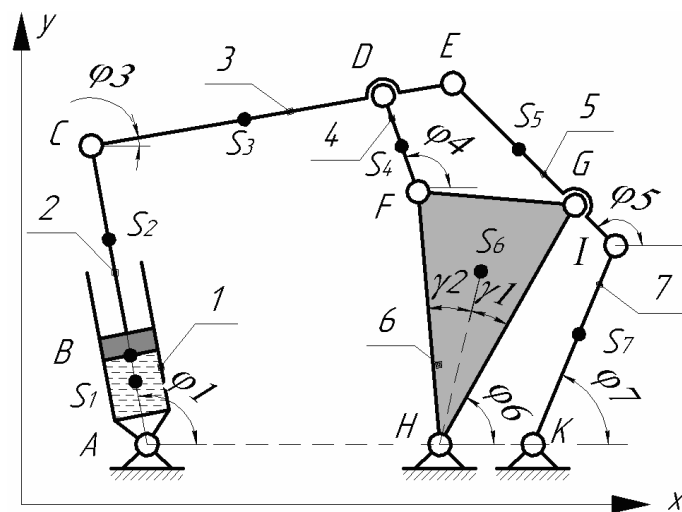
Ведущим звеном механизма является гидроцилиндр, перемещение штока которого определяет положение всех звеньев. Соответственно скорости всех точек и угловые скорости всех звеньев определяются относительной скоростью штока в гидроцилиндре.

Относительная скорость поршня в гидроцилиндре V_{21} определяется по формуле:

где Q – количество подаваемой жидкости в единицу времени, A – площадь поперечного сечения поршня.

Примем в качестве обобщенной координаты перемещение штока S , соответственно обобщенной скоростью $\dot{q}$ является скорость штока V_{21} . В системе с одной степенью свободы перемещения всех точек могут быть представлены как функции от обобщенной координаты q : $V_i = \frac{dr}{dq} \dot{q}$.

Вариантом решения задачи является применение метода векторных контуров [7, стр. 113].

$$\begin{cases} \overline{AC} + \overline{CD} + \overline{DF} + \overline{FH} = \overline{AH}, \\ \overline{HF} + \overline{FD} + \overline{DE} + \overline{EI} + \overline{IK} = \overline{HK}, \\ \overline{AC} + \overline{CE} + \overline{EI} + \overline{IK} = \overline{AK}. \end{cases}$$

$$\begin{cases} (l_{AB} + l_{BC}) \cdot \cos(\varphi_1) + l_{CD} \cdot \cos(\varphi_3) - l_{DF} \cdot \cos(\varphi_4) - l_{FH} \cdot \cos(\varphi_6 + \gamma_1 + \gamma_2) = l_{AH}, \\ (l_{AB} + l_{BC}) \cdot \sin(\varphi_1) + l_{CD} \cdot \sin(\varphi_3) - l_{DF} \cdot \sin(\varphi_4) - l_{FH} \cdot \sin(\varphi_6 + \gamma_1 + \gamma_2) = 0, \\ l_{HF} \cdot \cos(\varphi_6 + \gamma_1 + \gamma_2) + l_{DF} \cdot \cos(\varphi_4) + l_{DE} \cdot \cos(\varphi_3) - l_{EI} \cdot \cos(\varphi_5) - l_{IK} \cdot \cos(\varphi_7) = l_{HK}, \\ l_{HF} \cdot \sin(\varphi_6 + \gamma_1 + \gamma_2) + l_{DF} \cdot \sin(\varphi_4) + l_{DE} \cdot \sin(\varphi_3) - l_{EI} \cdot \sin(\varphi_5) - l_{IK} \cdot \sin(\varphi_7) = 0, \\ (l_{AB} + l_{BC}) \cdot \cos(\varphi_1) + l_{CE} \cdot \cos(\varphi_3) - l_{EI} \cdot \cos(\varphi_5) - l_{IK} \cdot \cos(\varphi_7) = l_{AK}, \\ (l_{AB} + l_{BC}) \cdot \sin(\varphi_1) + l_{CE} \cdot \sin(\varphi_3) - l_{EI} \cdot \sin(\varphi_5) - l_{IK} \cdot \sin(\varphi_7) = 0. \end{cases} \quad (1)$$
$$\begin{aligned} x_{S1} &= l_{AS1} \cdot \cos(\varphi_1); & y_{S1} &= l_{AS1} \cdot \sin(\varphi_1); \\ x_{S2} &= (l_{AB} + l_{BS2}) \cdot \cos(\varphi_1); & y_{S2} &= (l_{AB} + l_{BS2}) \cdot \sin(\varphi_1); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
x_{S3} &= (l_{AB} + l_{BC}) \cdot \cos(\varphi_1) + l_{CS3} \cdot \cos(\varphi_3); & y_{S3} &= (l_{AB} + l_{BC}) \cdot \sin(\varphi_1) + l_{CS3} \cdot \sin(\varphi_3); \\
x_{S4} &= l_{AH} + l_{FH} \cdot \cos(\varphi_6 + \gamma_1 + \gamma_2) + l_{FS4} \cdot \cos(\varphi_4); \\
y_{S4} &= l_{FH} \cdot \sin(\varphi_6 + \gamma_1 + \gamma_2) + l_{FS4} \cdot \sin(\varphi_4); \\
x_{S5} &= l_{AK} + l_{IK} \cdot \cos(\varphi_7) + l_{IS5} \cdot \cos(\varphi_5); & y_{S5} &= l_{IK} \cdot \sin(\varphi_7) + l_{IS5} \cdot \sin(\varphi_5); \\
x_{S6} &= l_{AH} + l_{HS6} \cdot \cos(\varphi_6 + \gamma_1); & y_{S6} &= l_{IK} \cdot \sin(\varphi_7) + l_{IS5} \cdot \sin(\varphi_5); \\
y_{S6} &= l_{HS6} \cdot \sin(\varphi_6 + \gamma_1); & x_{S7} &= l_{AK} + l_{KS7} \cdot \cos(\varphi_7); & y_{S7} &= l_{KS7} \cdot \sin(\varphi_7).
\end{aligned}$$

Производная по времени системы уравнений (1) приводит к системе уравнений, определяющих угловые скорости звеньев с учетом скорости ведущего звена (штока в гидроцилиндре) V_{21}

$$\left\{ \begin{aligned}
& -l_{AB} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1 + V_{21} \cdot \cos(\varphi_1) - l_{BC} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1 - l_{CD} \cdot \sin(\varphi_3) \cdot \dot{\varphi}_3 + \\
& \quad + l_{DF} \cdot \sin(\varphi_4) \cdot \dot{\varphi}_4 + l_{FH} \cdot \sin(\varphi_6 + \gamma_1 + \gamma_2) \cdot \dot{\varphi}_6 = 0, \\
& l_{AB} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1 + V_{21} \cdot \sin(\varphi_1) + l_{BC} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1 + l_{CD} \cdot \cos(\varphi_3) \cdot \dot{\varphi}_3 - \\
& \quad - l_{DF} \cdot \cos(\varphi_4) \cdot \dot{\varphi}_4 - l_{FH} \cdot \cos(\varphi_6 + \gamma_1 + \gamma_2) \cdot \dot{\varphi}_6 = 0, \\
& -l_{HF} \cdot \sin(\varphi_6 + \gamma_1 + \gamma_2) \cdot \dot{\varphi}_6 - l_{DF} \cdot \sin(\varphi_4) \cdot \dot{\varphi}_4 - l_{DE} \cdot \sin(\varphi_3) \cdot \dot{\varphi}_3 + \\
& \quad + l_{EI} \cdot \sin(\varphi_5) \cdot \dot{\varphi}_5 + l_{IK} \cdot \sin(\varphi_7) \cdot \dot{\varphi}_7 = 0, \\
& l_{HF} \cdot \cos(\varphi_6 + \gamma_1 + \gamma_2) \cdot \dot{\varphi}_6 + l_{DF} \cdot \cos(\varphi_4) \cdot \dot{\varphi}_4 + l_{DE} \cdot \cos(\varphi_3) \cdot \dot{\varphi}_3 - \\
& \quad - l_{EI} \cdot \cos(\varphi_5) \cdot \dot{\varphi}_5 - l_{IK} \cdot \cos(\varphi_7) \cdot \dot{\varphi}_7 = 0, \\
& -l_{AB} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1 + V_{21} \cdot \cos(\varphi_1) - l_{AB} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1 - l_{CE} \cdot \sin(\varphi_3) \cdot \dot{\varphi}_3 + \\
& \quad + l_{EI} \cdot \sin(\varphi_5) \cdot \dot{\varphi}_5 + l_{IK} \cdot \sin(\varphi_7) \cdot \dot{\varphi}_7 = 0, \\
& l_{AB} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1 + V_{21} \cdot \sin(\varphi_1) + l_{BC} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1 + l_{CE} \cdot \cos(\varphi_3) \cdot \dot{\varphi}_3 - \\
& \quad - l_{EI} \cdot \cos(\varphi_5) \cdot \dot{\varphi}_5 - l_{IK} \cdot \cos(\varphi_7) \cdot \dot{\varphi}_7 = 0.
\end{aligned} \right. \quad (2)$$

Производная уравнений координат центров масс звеньев по времени определит уравнения проекций скоростей центров масс звеньев:

$$\begin{aligned}
V_{xS1} &= -l_{AS1} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1; & V_{yS1} &= l_{AS1} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1; \\
V_{xS2} &= -l_{AB} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1 + v_{21} \cdot \cos(\varphi_1) - l_{BS2} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1; \\
V_{yS2} &= l_{AB} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1 + v_{21} \cdot \sin(\varphi_1) + l_{BC} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1; \\
V_{xS3} &= -l_{AB} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1 + v_{21} \cdot \cos(\varphi_1) - l_{BC} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1 - l_{CS3} \cdot \sin(\varphi_3) \cdot \dot{\varphi}_3; \\
V_{yS3} &= l_{AB} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1 + v_{21} \cdot \sin(\varphi_1) + l_{BC} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1 + l_{CS3} \cdot \cos(\varphi_3) \cdot \dot{\varphi}_3; \\
V_{xS4} &= -l_{FH} \cdot \sin(\varphi_6 + \gamma_1 + \gamma_2) \cdot \dot{\varphi}_6 - l_{FS4} \cdot \sin(\varphi_4) \cdot \dot{\varphi}_4; \\
V_{yS4} &= l_{FH} \cdot \cos(\varphi_6 + \gamma_1 + \gamma_2) \cdot \dot{\varphi}_6 + l_{FS4} \cdot \cos(\varphi_4) \cdot \dot{\varphi}_4; \\
V_{xS5} &= -l_{IK} \cdot \sin(\varphi_7) \cdot \dot{\varphi}_7 + l_{IS5} \cdot \sin(\varphi_5) \cdot \dot{\varphi}_5; & V_{yS5} &= l_{IK} \cdot \cos(\varphi_7) \cdot \dot{\varphi}_7 + l_{IS5} \cdot \cos(\varphi_5) \cdot \dot{\varphi}_5; \\
V_{xS6} &= -l_{HS6} \cdot \sin(\varphi_6 + \gamma_1) \cdot \dot{\varphi}_6; & V_{yS6} &= l_{HS6} \cdot \cos(\varphi_6 + \gamma_1) \cdot \dot{\varphi}_6; \\
V_{xS7} &= -l_{KS7} \cdot \sin(\varphi_7) \cdot \dot{\varphi}_7; & \varphi_{7yS7} &= l_{KS7} \cdot \cos(\varphi_7) \cdot \dot{\varphi}_7.
\end{aligned}$$

Вторая производная по времени системы уравнений (1) позволит определить систему уравнений, определяющих угловые ускорения звеньев с учетом скорости и ускорения ведущего звена (V_{21} и a_{21}):

$$\begin{aligned}
& -l_{AB} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1^2 - l_{AB} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \ddot{\varphi}_1 + a_{21} \cdot \cos(\varphi_1) - V_{21} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1 - V_{21} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1 - \\
& \quad - l_{BC} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1^2 - l_{BC} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \ddot{\varphi}_1 - l_{CD} \cdot \cos(\varphi_3) \cdot \dot{\varphi}_3^2 - l_{CD} \cdot \sin(\varphi_3) \cdot \dot{\varphi}_3 + \\
& \quad + l_{DF} \cdot \cos(\varphi_4) \cdot \dot{\varphi}_4^2 + l_{DF} \cdot \sin(\varphi_4) \cdot \ddot{\varphi}_4 + l_{FH} \cdot \cos(\varphi_6 + \gamma_1 + \gamma_2) \cdot \dot{\varphi}_6^2 + \\
& \quad + l_{FH} \cdot \sin(\varphi_6 + \gamma_1 + \gamma_2) \cdot \ddot{\varphi}_6 = 0,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -l_{AB} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1^2 + l_{AB} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \ddot{\varphi}_1 + a_{21} \cdot \sin(\varphi_1) - v_{21} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1 + v_{21} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1 - \\
& -l_{BC} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1^2 + l_{BC} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \ddot{\varphi}_1 - l_{CD} \cdot \sin(\varphi_3) \cdot \dot{\varphi}_3^2 + l_{CD} \cdot \cos(\varphi_3) \cdot \ddot{\varphi}_3 + \\
& + l_{DF} \cdot \sin(\varphi_4) \cdot \dot{\varphi}_4^2 - l_{DF} \cdot \cos(\varphi_4) \cdot \ddot{\varphi}_4 + l_{FH} \cdot \sin(\varphi_6 + \gamma_1 + \gamma_2) \cdot \dot{\varphi}_6^2 - \\
& - l_{FH} \cdot \cos(\varphi_6 + \gamma_1 + \gamma_2) \cdot \ddot{\varphi}_6 = 0, \\
& -l_{HF} \cdot \cos(\varphi_6 + \gamma_1 + \gamma_2) \cdot \dot{\varphi}_6^2 - l_{HF} \cdot \sin(\varphi_6 + \gamma_1 + \gamma_2) \cdot \ddot{\varphi}_6 - l_{DF} \cdot \cos(\varphi_4) \cdot \dot{\varphi}_4^2 - \\
& - l_{DF} \cdot \sin(\varphi_4) \cdot \ddot{\varphi}_4 - l_{DE} \cdot \cos(\varphi_3) \cdot \dot{\varphi}_3^2 - l_{DE} \cdot \sin(\varphi_3) \cdot \ddot{\varphi}_3 + l_{EI} \cdot \cos(\varphi_5) \cdot \dot{\varphi}_5^2 + \\
& + l_{EI} \cdot \sin(\varphi_5) \cdot \ddot{\varphi}_5 + l_{IK} \cdot \cos(\varphi_7) \cdot \dot{\varphi}_7^2 + l_{IK} \cdot \sin(\varphi_7) \cdot \ddot{\varphi}_7 = 0, \\
& -l_{HF} \cdot \sin(\varphi_6 + \gamma_1 + \gamma_2) \cdot \dot{\varphi}_6^2 + l_{HF} \cdot \cos(\varphi_6 + \gamma_1 + \gamma_2) \cdot \ddot{\varphi}_6 - l_{DF} \cdot \sin(\varphi_4) \cdot \dot{\varphi}_4^2 + \\
& + l_{DF} \cdot \cos(\varphi_4) \cdot \ddot{\varphi}_4 - l_{DE} \cdot \sin(\varphi_3) \cdot \dot{\varphi}_3^2 + l_{DE} \cdot \cos(\varphi_3) \cdot \ddot{\varphi}_3 + l_{EI} \cdot \sin(\varphi_5) \cdot \dot{\varphi}_5^2 - \\
& - l_{EI} \cdot \cos(\varphi_5) \cdot \ddot{\varphi}_5 + l_{IK} \cdot \sin(\varphi_7) \cdot \dot{\varphi}_7^2 - l_{IK} \cdot \cos(\varphi_7) \cdot \ddot{\varphi}_7 = 0, \\
& -l_{AB} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1^2 - l_{AB} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \ddot{\varphi}_1 + a_{21} \cdot \cos(\varphi_1) - v_{21} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1^2 - \\
& - l_{BC} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \ddot{\varphi}_1 - l_{CE} \cdot \cos(\varphi_3) \cdot \dot{\varphi}_3^2 - l_{CE} \cdot \sin(\varphi_3) \cdot \ddot{\varphi}_3 + l_{EI} \cdot \cos(\varphi_5) \cdot \dot{\varphi}_5^2 \\
& + l_{EI} \cdot \sin(\varphi_5) \cdot \ddot{\varphi}_5 + l_{IK} \cdot \cos(\varphi_7) \cdot \dot{\varphi}_7^2 + l_{IK} \cdot \sin(\varphi_7) \cdot \ddot{\varphi}_7 = 0, \\
& -l_{AB} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1^2 + l_{AB} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \ddot{\varphi}_1 + a_{21} \cdot \sin(\varphi_1) + V_{21} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1 + V_{21} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1 - \\
& - l_{BC} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1^2 + l_{BC} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \ddot{\varphi}_1 - l_{CE} \cdot \sin(\varphi_3) \cdot \dot{\varphi}_3^2 + l_{CE} \cdot \cos(\varphi_3) \cdot \ddot{\varphi}_3 + \\
& + l_{EI} \cdot \sin(\varphi_5) \cdot \dot{\varphi}_5^2 - l_{EI} \cdot \cos(\varphi_5) \cdot \ddot{\varphi}_5 + l_{IK} \cdot \sin(\varphi_7) \cdot \dot{\varphi}_7^2 - l_{IK} \cdot \cos(\varphi_7) \cdot \ddot{\varphi}_7 = 0.
\end{aligned} \tag{3}$$

Уравнения ускорений центров масс как результат дифференцирование по времени уравнений проекций скоростей:

$$\begin{aligned}
a_{xS1} &= -l_{AS1} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1^2 - l_{AS1} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \ddot{\varphi}_1; \\
a_{yS1} &= -l_{AS1} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1^2 + l_{AS1} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \ddot{\varphi}_1; \\
a_{xS2} &= -l_{AB} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1^2 - l_{AB} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \ddot{\varphi}_1 + a_{21} \cdot \cos(\varphi_1) - v_{21} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1 - l_{BS2} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \ddot{\varphi}_1; \\
a_{yS2} &= -l_{AB} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1^2 + l_{AB} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \ddot{\varphi}_1 + a_{21} \cdot \sin(\varphi_1) + v_{21} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1 - \\
& - l_{BS2} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1^2 + l_{BS2} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \ddot{\varphi}_1; \\
a_{xS3} &= -l_{AB} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1^2 - l_{AB} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \ddot{\varphi}_1 + a_{21} \cdot \cos(\varphi_1) - v_{21} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1 - \\
& - l_{BC} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \ddot{\varphi}_1 - l_{CS3} \cdot \cos(\varphi_3) \cdot \dot{\varphi}_3^2 - l_{CS3} \cdot \sin(\varphi_3) \cdot \ddot{\varphi}_3; \\
a_{yS3} &= -l_{AB} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1^2 + l_{AB} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \ddot{\varphi}_1 + a_{21} \cdot \sin(\varphi_1) + v_{21} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1 - \\
& - l_{BC} \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1^2 + l_{BC} \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \ddot{\varphi}_1 - l_{CS3} \cdot \sin(\varphi_3) \cdot \dot{\varphi}_3^2 + l_{CS3} \cdot \cos(\varphi_3) \cdot \ddot{\varphi}_3; \\
a_{xS4} &= -l_{FH} \cdot \cos(\varphi_6 + \gamma_1 + \gamma_2) \cdot \dot{\varphi}_6^2 - l_{FH} \cdot \sin(\varphi_6 + \gamma_1 + \gamma_2) \cdot \ddot{\varphi}_6 - \\
& - l_{FS4} \cdot \cos(\varphi_4) \cdot \dot{\varphi}_4^2 - l_{FS4} \cdot \sin(\varphi_4) \cdot \ddot{\varphi}_4, \\
a_{yS4} &= -l_{FH} \cdot \sin(\varphi_6 + \gamma_1 + \gamma_2) \cdot \dot{\varphi}_6^2 + l_{FH} \cdot \cos(\varphi_6 + \gamma_1 + \gamma_2) \cdot \ddot{\varphi}_6 - \\
& - l_{FS4} \cdot \sin(\varphi_4) \cdot \dot{\varphi}_4^2 + l_{FS4} \cdot \cos(\varphi_4) \cdot \ddot{\varphi}_4, \\
a_{xS5} &= -l_{IK} \cdot \cos(\varphi_7) \cdot \dot{\varphi}_7^2 - l_{IK} \cdot \sin(\varphi_7) \cdot \ddot{\varphi}_7 + l_{IS5} \cdot \cos(\varphi_5) \cdot \dot{\varphi}_5^2 + l_{IS5} \cdot \sin(\varphi_5) \cdot \ddot{\varphi}_5; \\
a_{yS5} &= -l_{IK} \cdot \sin(\varphi_7) \cdot \dot{\varphi}_7^2 + l_{IK} \cdot \cos(\varphi_7) \cdot \ddot{\varphi}_7 - l_{IS5} \cdot \sin(\varphi_5) \cdot \dot{\varphi}_5^2 + l_{IS5} \cdot \cos(\varphi_5) \cdot \ddot{\varphi}_5; \\
a_{xS6} &= -l_{HS6} \cdot \sin(\varphi_6 + \gamma_1) \cdot \dot{\varphi}_6^2 - l_{HS6} \cdot \sin(\varphi_6 + \gamma_1) \cdot \ddot{\varphi}_6; \\
a_{yS6} &= -l_{HS6} \cdot \sin(\varphi_6 + \gamma_1) \cdot \dot{\varphi}_6^2 + l_{HS6} \cdot \cos(\varphi_6 + \gamma_1) \cdot \ddot{\varphi}_6;
\end{aligned}$$

$$a_{xS7} = -l_{KS7} \cdot \cos(\varphi_7) \cdot \ddot{\varphi}_7 - l_{KS7} \cdot \sin(\varphi_7) \cdot \ddot{\varphi}_7;$$

$$a_{yS7} = -l_{KS7} \cdot \sin(\varphi_7) \cdot \ddot{\varphi}_7 + l_{KS7} \cdot \cos(\varphi_7) \cdot \ddot{\varphi}_7.$$

Одним из методов решения систем уравнений (1)-(3) для определения значений углов, угловых скоростей и ускорений является численный метод, а именно метод последовательных приближений [8].

Данный метод используется при решении нелинейных систем уравнений в программе MATHCAD, когда для заданных значений длин звеньев, положений ведущего звена, положения опор задаются начальные приближенные значения искомых характеристик. Решение системы нелинейных уравнений осуществляется с помощью процедуры Given-Find. [9, 10].

Определим кинетическую энергию механизма крепи (рис. 2) как сумму кинетических энергий его звеньев, учитывая, что $\omega_2 = \omega_1$:

$$T = \sum T_i = \frac{m_1 V_{S1}^2}{2} + \frac{I_{S1} \omega_1^2}{2} + \frac{m_2 V_{S2}^2}{2} + \frac{I_{S2} \omega_1^2}{2} + \frac{m_3 V_{S3}^2}{2} + \frac{I_{S3} \omega_3^2}{2} + \frac{m_4 V_{S4}^2}{2} + \frac{I_{S4} \omega_4^2}{2} + \frac{m_5 V_{S5}^2}{2} + \frac{I_{S5} \omega_5^2}{2} + \frac{m_6 V_{S6}^2}{2} + \frac{I_{S6} \omega_6^2}{2} + \frac{m_7 V_{S7}^2}{2} + \frac{I_{S7} \omega_7^2}{2}.$$

Поскольку

$$V_{S1}^2 = \left[\left(\frac{dx_{S1}}{dq} \right)^2 + \left(\frac{dy_{S1}}{dq} \right)^2 \right] \dot{q}^2 = \left(\frac{dr_{S1}}{dS} \right)^2 V_{21}^2; \quad \omega_i^2 = \dot{\varphi}_i^2 = \left(\frac{d\varphi_i}{dq} \right)^2 \dot{q}^2 = \left(\frac{d\varphi_i}{dS} \right)^2 V_{21}^2,$$

то для определения кинетической энергии механизма получим выражение:

$$\begin{aligned} T = \frac{1}{2} V_{21}^2 & \left[m_1 \left(\frac{dr_{S1}}{dS} \right)^2 + I_{S1} \left(\frac{d\varphi_1}{dS} \right)^2 + m_2 \left(\frac{dr_{S2}}{dS} \right)^2 + I_{S2} \left(\frac{d\varphi_1}{dS} \right)^2 + m_3 \left(\frac{dr_{S3}}{dS} \right)^2 + \right. \\ & + I_{S3} \left(\frac{d\varphi_3}{dS} \right)^2 + m_4 \left(\frac{dr_{S4}}{dS} \right)^2 + I_{S4} \left(\frac{d\varphi_4}{dS} \right)^2 + m_5 \left(\frac{dr_{S5}}{dS} \right)^2 + I_{S5} \left(\frac{d\varphi_5}{dS} \right)^2 + m_6 \left(\frac{dr_{S6}}{dS} \right)^2 + I_{S6} \left(\frac{d\varphi_6}{dS} \right)^2 + \\ & + m_7 \left(\frac{dr_{S7}}{dS} \right)^2 + I_{S7} \left(\frac{d\varphi_7}{dS} \right)^2 \left. \right] = \frac{1}{2} V_{21}^2 \left[m_1 \left(\frac{dx_{S1}}{dS} \right)^2 + m_1 \left(\frac{dy_{S1}}{dS} \right)^2 + I_{S1} \left(\frac{d\varphi_1}{dS} \right)^2 + m_2 \left(\frac{dx_{S2}}{dS} \right)^2 + \right. \\ & + m_2 \left(\frac{dy_{S2}}{dS} \right)^2 + I_{S2} \left(\frac{d\varphi_1}{dS} \right)^2 + m_3 \left(\frac{dx_{S3}}{dS} \right)^2 + m_1 \left(\frac{dy_{S3}}{dS} \right)^2 + I_{S3} \left(\frac{d\varphi_3}{dS} \right)^2 + m_4 \left(\frac{dx_{S4}}{dS} \right)^2 + m_4 \left(\frac{dy_{S4}}{dS} \right)^2 + \\ & + I_{S4} \left(\frac{d\varphi_4}{dS} \right)^2 + m_5 \left(\frac{dx_{S5}}{dS} \right)^2 + m_5 \left(\frac{dy_{S5}}{dS} \right)^2 + I_{S5} \left(\frac{d\varphi_5}{dS} \right)^2 + m_6 \left(\frac{dx_{S6}}{dS} \right)^2 + m_6 \left(\frac{dy_{S6}}{dS} \right)^2 + I_{S6} \left(\frac{d\varphi_6}{dS} \right)^2 + \\ & + m_7 \left(\frac{dx_{S7}}{dS} \right)^2 + m_7 \left(\frac{dy_{S7}}{dS} \right)^2 + I_{S7} \left(\frac{d\varphi_7}{dS} \right)^2 \left. \right] = \frac{1}{2} V_{21}^2 m_n(S). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Или} \quad T = \frac{1}{2} V_{21}^2 & \left[m_1 \left(\frac{V_{xS1}}{V_{21}} \right)^2 + m_1 \left(\frac{V_{yS1}}{V_{21}} \right)^2 + I_{S1} \left(\frac{\dot{\varphi}_1}{V_{21}} \right)^2 + m_2 \left(\frac{V_{xS2}}{V_{21}} \right)^2 + m_2 \left(\frac{V_{yS2}}{V_{21}} \right)^2 + \right. \\ & + I_{S2} \left(\frac{\dot{\varphi}_1}{V_{21}} \right)^2 + m_3 \left(\frac{V_{xS3}}{V_{21}} \right)^2 + m_3 \left(\frac{V_{yS3}}{V_{21}} \right)^2 + I_{S3} \left(\frac{\dot{\varphi}_3}{V_{21}} \right)^2 + m_4 \left(\frac{V_{xS4}}{V_{21}} \right)^2 + m_4 \left(\frac{V_{yS4}}{V_{21}} \right)^2 + \\ & + I_{S4} \left(\frac{\dot{\varphi}_4}{V_{21}} \right)^2 + m_5 \left(\frac{V_{xS5}}{V_{21}} \right)^2 + m_5 \left(\frac{V_{yS5}}{V_{21}} \right)^2 + I_{S5} \left(\frac{\dot{\varphi}_5}{V_{21}} \right)^2 + m_6 \left(\frac{V_{xS6}}{V_{21}} \right)^2 + m_6 \left(\frac{V_{yS6}}{V_{21}} \right)^2 + \\ & + I_{S6} \left(\frac{\dot{\varphi}_6}{V_{21}} \right)^2 + m_7 \left(\frac{V_{xS7}}{V_{21}} \right)^2 + m_7 \left(\frac{V_{yS7}}{V_{21}} \right)^2 + I_{S7} \left(\frac{\dot{\varphi}_7}{V_{21}} \right)^2 \left. \right] = \frac{1}{2} V_{21}^2 \cdot m_n(S). \end{aligned}$$

Приведенная масса m_n зависит от положения механизма, т.е. является функцией перемещения штока цилиндра S , и не зависит от скоростей точек механизма, поскольку увеличение скоростей точек и угловых скоростей звеньев пропорционально увеличению скорости штока.

Частные производные кинетической энергии по обобщенной координате (4) и обобщенной скорости (5):

$$\frac{\partial T}{\partial q} = \frac{1}{2} V_{21}^2 \cdot \frac{dm_n(S)}{dS}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} = m_n(S) \cdot V_{21}. \quad (5)$$

Дифференцирование по времени выражения (4) определяет первую составляющую часть уравнения Лагранжа (5)

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}} = m_n(S) \cdot a_{21}.$$

Так как приведенная масса является функцией перемещения $m_n(S)$, то и ее производная $\frac{dm_n(S)}{dS}$ так же является функцией перемещения $\frac{dm_n(S)}{dS}(S)$.

Рассмотрим определение функции $\frac{dm_n(S)}{dS}(S)$ по найденным аналитическим зависимостям. Пусть обобщенная скорость – скорость штока $V_{21} = 1$ м/с, тогда

$$\frac{dm_n}{dS} = \frac{dm_n}{dt} \frac{1}{V_{21}} = \frac{dm_n}{dt}.$$

Продифференцируем выражение m_n по времени

$$\begin{aligned} \frac{dm_n}{dS} &= 2m_1 \left(V_{xS1} \frac{dV_{xS1}}{dt} + V_{yS1} \frac{dV_{yS1}}{dt} \right) + 2I_{S1} \omega_1 \frac{d\omega_1}{dt} + 2m_2 \left(V_{xS2} \frac{dV_{xS2}}{dt} + V_{yS2} \frac{dV_{yS2}}{dt} \right) + \\ &+ 2I_{S2} \omega_1 \frac{d\omega_1}{dt} + 2m_3 \left(V_{xS3} \frac{dV_{xS3}}{dt} + V_{yS3} \frac{dV_{yS3}}{dt} \right) + 2I_{S3} \omega_3 \frac{d\omega_3}{dt} + 2m_4 \left(V_{xS4} \frac{dV_{xS4}}{dt} + \right. \\ &\left. + V_{yS4} \frac{dV_{yS4}}{dt} \right) + 2I_{S4} \omega_4 \frac{d\omega_4}{dt} + 2m_5 \left(V_{xS5} \frac{dV_{xS5}}{dt} + V_{yS5} \frac{dV_{yS5}}{dt} \right) + 2I_{S5} \omega_5 \frac{d\omega_5}{dt} + \\ &+ 2m_6 \left(V_{xS6} \frac{dV_{xS6}}{dt} + V_{yS6} \frac{dV_{yS6}}{dt} \right) + 2I_{S6} \omega_6 \frac{d\omega_6}{dt} + 2m_7 \left(V_{xS7} \frac{dV_{xS7}}{dt} + V_{yS7} \frac{dV_{yS7}}{dt} \right) + 2I_{S7} \omega_7 \frac{d\omega_7}{dt} = \\ &= 2m_1 (V_{xS1} a_{xS1} + V_{yS1} a_{yS1}) + 2I_{S1} \omega_1 \varepsilon_1 + 2m_2 (V_{xS1} a_{xS1} + V_{yS1} a_{yS1}) + 2I_{S2} \omega_1 \varepsilon_1 + \\ &+ 2m_3 (V_{xS3} a_{xS3} + V_{yS3} a_{yS3}) + 2I_{S3} \omega_3 \varepsilon_3 + 2m_4 (V_{xS4} a_{xS4} + V_{yS4} a_{yS4}) + 2I_{S4} \omega_4 \varepsilon_4 + \\ &+ 2m_5 (V_{xS5} a_{xS5} + V_{yS5} a_{yS5}) + 2I_{S5} \omega_5 \varepsilon_5 + 2m_6 (V_{xS6} a_{xS6} + V_{yS6} a_{yS6}) + 2I_{S6} \omega_6 \varepsilon_6 + \\ &+ 2m_7 (V_{xS7} a_{xS7} + V_{yS7} a_{yS7}) + 2I_{S7} \omega_7 \varepsilon_7. \end{aligned}$$

Для составления уравнения движения в форме уравнения Лагранжа второго рода необходимо определить обобщенную силу Q , соответствующую всем активным силам. К активным силам, действующим в механизме, относятся: движущие силы, силы полезного сопротивления, силы тяжести звеньев. Силой полезного сопротивления для крепи является распределенная по площади звена 3 нагрузка от удерживаемой горной породы, которую мы заменим сосредоточенной силой F_C . Движущая сила – сила $F_{цил}$, создаваемая на штоке гидроцилиндра. Силами инерции пренебрегаем.

Работа всех активных сил (рис. 3) на возможном перемещении механической системы из заданного положения:

$$\delta A = \sum F_i \cdot \delta r_i = \sum \left(F_i \frac{dr_i}{dq} \right) \cdot \delta q.$$

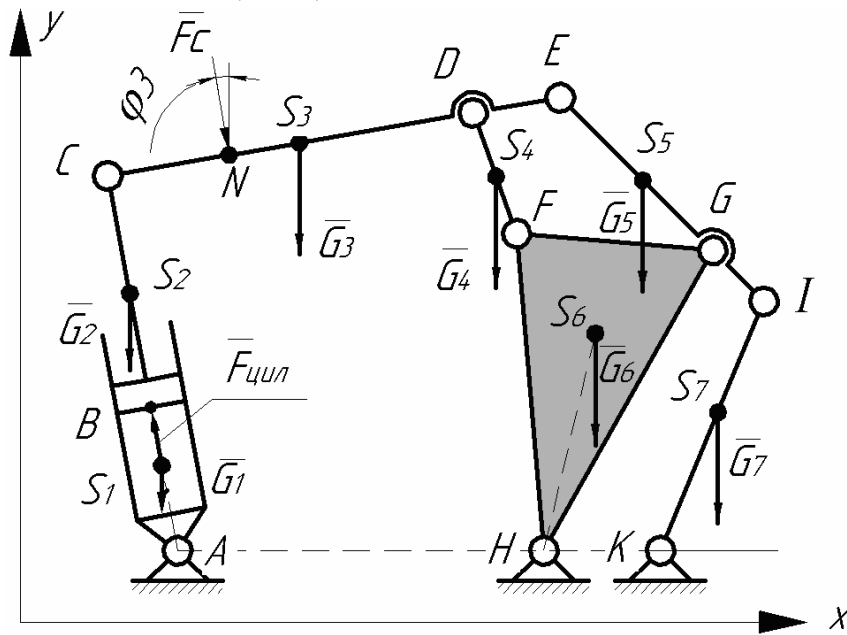


Рис. 3. Схема для определения обобщенной силы

Следовательно, обобщенная сила

$$Q = \frac{\delta A}{\delta q} = \sum F_i \frac{dr_i}{dq} = \sum \left(F_{ix} \frac{dx_i}{dq} + F_{iy} \frac{dy_i}{dq} \right).$$

Для рассматриваемого механизма крeпи обобщенная сила

$$Q = \frac{1}{\dot{q}} \sum (-G_i \dot{y}_{si} - F_{cx} \dot{x}_N - F_{cy} \dot{y}_N + F_{цпл} \cdot \dot{q}),$$

где $\dot{y}_{si}$ – проекции на ось Y скоростей центров тяжести звеньев; $\dot{x}_N$ и $\dot{y}_N$ – проекции на соответствующие оси скорости точек N – точки приложения силы сопротивления.

Используя рассмотренный метод кинематического анализа, определим величину проекций скоростей точек приложения активных сил на оси X и Y . В результате обобщенная сила механизма крeпи будет определена следующим образом:

$$Q = -F_{цпл} + \frac{1}{V_{21}} (-G_1 V_{ys1} - G_2 V_{ys2} - G_3 V_{ys3} - G_4 V_{ys4} - G_5 V_{ys5} - G_6 V_{ys6} - G_7 V_{ys7} + F_{xc} V_{xN} + F_{yc} V_{yN}).$$

Учитываем статическую характеристику, пренебрегая инерционностью, определяемой сжимаемостью рабочей жидкости. В этом случае $F_{цпл} = f(U)$, где U – входной параметр цилиндра (положение золотника) и обобщенная сила является функцией q и $\dot{q}$: $Q = Q(q; \dot{q})$.

Подставив выражения для кинетической энергии и обобщенной силы в уравнение (1), получим уравнение движения механизма. Применение матричного преобразования позволит получить удобную для решения форму уравнения движения, в том числе с использованием автоматизированной системы MATHCAD.

Заключение

В работе представлен способ проведения кинематического анализа сложной конструкции секции механизированной крeпи с изменяемым замкнутым контуром. Оценка динамики основывается на применении уравнения Лагранжа второго рода. Для формирования уравнения Лагранжа составлены уравнения кинетической энергии всего механизма, приведенной массы и обобщенной силы с учетом кинематических характеристик приводного звена – гидроцилиндра. Таким образом, авторами работы решен вопрос формирования дифференциального уравнения движения механической системы.

Список литературы

1. Хорин В.Н. Расчет и конструирование механизированных крепей. – М.: Недра, 1988. – 255 с.
2. Патент №2303699 РФ. Секция механизированной крепи / Дворников Л.Т., Князев А.С., Стариков С.П. – Заявка №2005141748 от 30.12.2005; опубл. 27.07.2007, Бюл. №21.
3. Воробьев Н.С. Механизмы с замкнутым энергетическим потоком. – Львов: Вища школа, 1983. – 144 с.
4. Левитский Н.И. Теория механизмов и машин. – М.: Наука, 1979. – 576с.
5. Адамович Н.О., Куклин С.А., Купцов Н.В. К вопросу о кинематическом исследовании секции механизированной крепи // Наукосфера. – 2021. – №4(1). – С.132-137.
6. Князев А.С., Дворников Л.Т. Исследование кинематики секций шахтных механизированных крепей // МашиноСтроение. – 2008. – №18. – С. 139-148.
7. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин: Учеб, для втузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1988. – 640 с.
8. Волков Е.А. Численные методы: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
9. Теория механизмов и машин. Курсовое проектирование: учеб. пособие / Под ред. Г.А. Тимофеева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – 169 с.
10. Бертяев В. Теоретическая механика на базе Mathcad. Практикум. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 752 с.

References

1. Khorin V.N. Calculation and design of mechanized supports. – M.: Nedra, 1988. – 255 p.
2. Patent No. 2303699 RU. Section of powered support / L.T. Dvornikov, A.S. Knyazev, S.P. Starikov. – Appl. No. 2005141748 from 30.12.2005; publ. 27.07.2007, Bull. No. 21.
3. Vorobyov N.S. Mechanisms with a closed energy flow. – Lvov: Higher school, 1983. –144 p.
4. Levitsky N.I. Theory of mechanisms and machines. – M.: Science, 1979.- 576 p.
5. Adamovich N.O., Kuklin S.A., Kuptsov N.V. To the question of the kinematic study of the powered roof support section // Naukosphere. 2021, vol. 1, no. 4, pp. 132-137.
6. Knyazev A.S., Dvornikov L.T. Study of the kinematics of sections of mine powered roof supports // Mechanical Engineering. 2008, no. 18, pp. 139-148.
7. Artobolevsky I.I. Theory of mechanisms and machines: Textbook. – 4th ed., revised and additional. – M.: Science, 1988. – 640 p.
8. Volkov E.A. Numerical Methods: Textbook. – 2nd ed., revised and additional. – M.: Science, 1987. – 248 p.
9. Theory of mechanisms and machines. Course design: textbook / Edited by G.A. Timofeev. – 2nd ed., revised and additional. – M.: Publ. house of MSTU n.a. N.E. Bauman, 2012. – 169 p.
10. Bertyaev V. Theoretical mechanics based on Mathcad. Workshop. – SPb.: BHV-Petersburg, 2005. – 752 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Князев Антон Сергеевич – старший преподаватель	Knyazev Anton Sergeevich – senior lecturer
Адамович Наталья Олеговна – кандидат технических наук, доцент, доцент	Adamovich Natalya Olegovna – candidate of technical sciences, associate professor
Макаров Алексей Владимирович – кандидат технических наук, доцент	Makarov Aleksey Vladimirovich – candidate of technical sciences, associate professor
alex_vlad_makarov@mail.ru	

Получена 07.04.2023

Научно-образовательный журнал

ISSN 2658-3305

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ: НАУКА И ПРОИЗВОДСТВО

№ 19

Подписано в печать 28.04.23г.

Формат бумаги 60x84/8. Бумага офисная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 22,67. Тираж 300 экз. Заказ №23-07. Свободная цена.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор):

Свидетельство о регистрации СМИ – ПИ № ФС 77 – 77557 от 31.12.2019.

Подписной индекс по каталогу «Почта России»: ПМ179.

Учредитель, издатель и распространитель: Жукова Елена Валерьевна
(ИП Жукова Е.В., ИНН 422802805198, ОГРНИП 318420500009778,
г. Санкт-Петербург).

Главный редактор: Жуков Иван Алексеевич.

Редакция: Научно-исследовательский центр «МашиноСтроение».
197372, г. Санкт-Петербург, пр. Комендантский, д. 28, корп. 2, оф. 117.

<http://srcms.ru/tgism.html>

E-mail: spbf@srcms.ru