

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет  
Кафедра «Мехатроники и роботостроения»

И.Ю. Даляев, И.В. Шардыко

Космические тросовые системы

Учебно-методическое пособие для проведения лабораторных работ на стенде  
(составлено по материалам НИР)

Санкт-Петербург 2012

УДК 621.865.8

ББК 30.2

Даляев И.Ю., Шардыко В.В.

Космические тросовые системы. Учебно-методическое пособие для проведения лабораторных работ на стенде (составлено по материалам НИР). СПб.: 2012. – 44 с.

Настоящее пособие разработано в целях развития технологий создания космической тросовой системы, предназначенной для задач дистанционного зондирования орбитальных объектов, обеспечения микрогравитации на космических аппаратах, проведения межорбитальных маневров без расхода топлива и получения электроэнергии за счет магнитного поля Земли. Пособие предназначено для информации и «вовлечению» в инженерно-научную работу студентов и аспирантов, содержит в себе немного вводного теоретического материала и несколько лабораторных работ для отработки на стенде. Пособие служит дополнительной информацией к комплексу знаний.

## СОДЕРЖАНИЕ

Содержание .....	3
Предисловие.....	4
1. Введение .....	5
2. Тенденции и направления развития космических тросовых систем.....	6
3. Алгоритмы поведения ктс.....	14
3.1. Общая схема выпуска и развертывания КТС в пассивном и активном режимах .....	14
3.2. Вопросы и критерии оптимизации процесса выпуска УКП .....	16
3.3. Принципы управления движением УКП и способы его наблюдения.....	18
3.4. Обзор нештатных ситуаций при развертывании и эксплуатации КТС.....	21
3.5. Выводы по разделу.....	22
4. Макеты узлов управляемой тросовой лебёдки для экспериментальных работ.....	23
5. Описание лабораторного стенда .....	30
Лабораторная работа №1. Знакомство со стендом. проверка работоспособности. ....	38
Лабораторная работа №2. отработка режима малого натяжения троса.....	40
Лабораторная работа №3. отработка режима поддержания заданой скорости выпуска троса.....	42
Лабораторная работа №4. отработка режима штатного торможения.....	43
Лабораторная работа №5. отработка режимов внештатных ситуаций.....	44

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее пособие составлено по материалам технического задания и отчетов по научно-исследовательской работе Федерального государственного автономного научного учреждения «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики», выполненной по госконтракту № 14.740.11.0151 с Минобрнауки России.

Целью НИР являлась разработка технологий создания космической тросовой системы (КТС), предназначенной для задач дистанционного зондирования орбитальных объектов, обеспечения микрогравитации на космических аппаратах (КА), проведения межорбитальных маневров без расхода топлива и получения электроэнергии за счет магнитного поля Земли.

Пособие содержит в себе небольшую часть теоретического материала по КТС в качестве дополнительной информации к комплексу знаний и предназначено для выполнения лабораторных работ на стенде. Конечной целью выполнения работ является «вовлечение» в инженерно-научную работу студентов и аспирантов.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема создания космических тросовых систем (КТС) была сформулирована еще в конце XIX века К.Э.Циолковским. Но проекты, направленные на практическое создание и применение КТС, стали появляться только с середины 70-х годов прошлого столетия. Интерес к данной проблеме вызван тем, что КТС считаются перспективными космическими системами, позволяющими реализовывать разнообразные новые функции на разных этапах космического полета и, в частности, в режиме орбитального полета. Теоретически доказано, что КТС помогут решить задачи дистанционного зондирования орбитальных объектов, обеспечения микрогравитации на космических аппаратах, проведения межорбитальных маневров без расхода топлива и получения электроэнергии за счет магнитного поля Земли.

Некоторые из проектов были доведены до стадии проведения космических экспериментов. Однако из около 20 проведенных к настоящему времени экспериментов с КТС только около 60% прошли лишь относительно успешно, а 40% - своих целей вообще не достигли из-за высокой гибкости КТС, когда в процессе ее развертывания и полета возникали различные нештатные ситуации типа запутывания или обрыва троса. Это указывает на то, что базовые принципы конструкции, построения и управления КТС и их узлов требуют уточнения, а их технические характеристики – обоснования на основе теоретических и экспериментальных исследований.

Кроме того, управляемое развертывание КТС с помощью концевых лебедок требует точной настройки регулирования сил натяжения троса и скорости работы лебедки во избежание перегрева ее узлов, обрыва или запутывания троса. Поэтому до реального создания КТС и проведения соответствующих космических экспериментов необходимо теоретически исследовать поведение КТС, провести компьютерное моделирование и макетирование, как отдельных узлов, так и системы в целом.

## 2. ТЕНДЕНЦИИ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ КОСМИЧЕСКИХ ТРОСОВЫХ СИСТЕМ

Анализ научно-технических и патентных источников позволяет констатировать, что в настоящее время развитие КТС в ведущих промышленных державах мира находится в фазе экспериментальной натурной отработки, а также определить основные тенденции и направления их развития. Ряд направлений базируется на хорошо известных проектах. К ним относятся следующие направления:

- создание искусственной силы тяжести, как путем вращения КТС, так и за счет микрогравитации, возникающей в концевых телах;
- исследования магнитного, электрического и гравитационного полей Земли зондированием ее атмосферы на высотах порядка 100–120 км с помощью радиально стабилизированных и вращающихся КТС, а также путем проведения экспериментов с КТС;
- испытания различных типов летательных аппаратов, подвешенных на тросе;
- получение электроэнергии в космосе за счет использования части кинетической энергии орбитального движения радиально ориентированных и вращающихся КТС, а также передача ее по тросу между разнесенными КА;
- обеспечение космической радиосвязи в низкочастотных диапазонах;
- спуск и подъем грузов с орбиты на поверхность Земли путем использования «космического лифта»;
- вывод КА на орбиты при использовании КТС вместо последней ступени ракеты-носителя;
- спуск и подъем грузов с поверхности Луны, в том числе путем использования «космического лифта»;
- спуск грузов на поверхность Марса, в том числе путем использования «космического лифта»;
- межорбитальные и локальные маневры, проводимые как за счет непрерывного действия реакции троса на концевые объекты КТС, так и за счет расцепления связки;
- транспортные операции в космосе, реализуемые за счет вращения КТС.

Так, в частности, возможность создавать протяженные КТС может обеспечивать более сильные взаимодействия с гравитационными полями Земли и других планет по сравнению с обычными КА. Это связано с тем, что момент гравитационных сил, действующих на КТС, зависит от квадрата ее длины, что позволяет создать

высокоустойчивую радиальную конфигурацию КТС. При этом на концевых телах системы возникает искусственная сила тяжести, величина которой прямо пропорциональна длине КТС. Это же обеспечивает способность КТС к аккумуляции больших величин кинетического момента. При этом если трос представляет собой проводник, то при движении КТС по орбите в результате взаимодействия с магнитным полем в нем возникает электродвижущая сила (ЭДС), пропорциональная длине троса, что обеспечивает возможность функционирования КТС в генераторном, двигательном, электропередающем и излучательном режимах. В свою очередь, гибко изменяемая конфигурация КТС, возможность изменения длины тросов путем их выпуска и втягивания, позволяет регулировать взаимное положение и ориентацию аппаратов, присоединять и отцеплять другие объекты от тросов, передвигать по ним грузы.

Если элементы системы соединены электропроводящим тросом, то такие тросовые системы называются электродинамическими (ЭдКТС). Высокая устойчивость радиальной тросовой системы позволила предложить ее использование в качестве основного несущего элемента для различных вариантов солнечных космических электростанций, а также орбитального интерферометра с базой в несколько километров. Большая база и, следовательно, большая разрешающая способность позволяют проводить тонкие радиоисследования Солнца и планет, в частности, на тех длинах волн, которые не пропускает земная ионосфера.

Ряд проектов связан с применением радиальных систем на обитаемых станциях. Благодаря их использованию, за пределы станции может быть вынесен резервуар с топливом, что повышает безопасность и работоспособность станции в аварийных ситуациях. Вынос узла для стыковки космических кораблей позволит существенно уменьшить толчок, который испытывает станция, а также достигнуть заметной экономии топлива.

Искусственная тяжесть, возникающая на концевых телах радиальной системы, составляет малые доли. Тем не менее, даже микрогравитация позволяет существенно улучшить условия жизни на орбите: избавиться от «плавающих» предметов, облегчить обращение с водой, упростить перекачку топлива и т.д. Микрогравитация также необходима для проведения ряда научных экспериментов и технологических процессов.

Одним из проектов будущего является использование вращающихся тросовых систем для создания искусственной силы тяжести в длительных космических экспедициях. Существует проект, в котором для поддержания на космическом корабле ускорения, равного ускорению свободного падения на Земле использована 640-метровая тросовая система, вращающаяся со скоростью 2 оборота в минуту.

Использование проводящих тросов, активно взаимодействующих с магнитным полем и ионосферой Земли, открывает перед создателями тросовых систем новые возможности.

Предполагается, что ЭдКТС за счет использования части кинетической энергии орбитального движения смогут вырабатывать электроэнергию мощностью до 1 МВт. С другой стороны, электроэнергией, получаемой от бортового генератора, можно поддерживать или медленно повышать высоту орбиты тросовой системы без затрат топлива. Используя некоторые электродинамические эффекты, возможно с минимальными потерями передавать электроэнергию по длинному тросу между разнесенными космическими аппаратами.

Большинство проектов по созданию ЭдКТС базируются на использовании радиальных систем. Однако для этой цели можно использовать и вращающиеся системы. Так, вращающаяся в магнитном поле тросовая система, подобная диполу Герца, может позволить генерировать переменный ток в отдельном проводнике. Таким образом, открылась бы возможность создания электродинамической КТС в вакууме, без создания замкнутого контура тока в ионосфере и необходимой для этого аппаратуры, а также на более высоких орбитах.

Тросовые системы могут быть использованы для выполнения транспортных операций в космосе. Здесь использование вращающихся относительно орбиты систем имеет преимущества перед радиальными, поскольку значительно увеличивается аккумуляция системой кинетической энергии и кинетического момента.

В частности, КТС могут использоваться для перевода космических аппаратов с низких орбиты на высокие, например, на геостационарную орбиту. Реализация таких проектов позволит снизить стоимость вывода грузов, т.к. при использовании КТС нет необходимости расходовать топливо. Тросовые системы позволяют накапливать кинетический момент и перераспределять количество движения между концевыми массами системы. Вращение тросовых систем используется для придания необходимого приращения скорости при переносе полезной нагрузки на более высокие орбиты. Энергию и кинетический момент, затраченные на перевод полезной нагрузки, система может пополнить, используя взаимодействие протекающего по тросу тока с магнитным полем Земли.

Использование вращающихся КТС возможно и при транспортировке грузов с низких орбит на поверхность Луны. Поскольку на Луне практически отсутствует атмосфера, подъем грузов с поверхности Луны может осуществляться с помощью вращающихся КТС. Вращательное и орбитальное движения системы подбираются так,



чтобы один из спутников подходил к поверхности Луны с нулевой относительной скоростью и захватывал груз. Затем груз отделяется от КТС и выводится на окололунную орбиту. Существуют также проекты, в которых предлагается использовать тросовые системы для доставки грузов на Марс и другие планеты.

Создание углеродных нанотрубок — качественно нового материала, прочность которого на два порядка превосходит прочность стали, а удельный вес в 5 раз меньше — открывает возможности реализации проектов космических тросовых систем еще недавно казавшихся фантастическими. В первую очередь это относится к идее «космического лифта» — проекта, реализация которого сулит открытие качественно нового этапа освоения космического пространства.

Идея космического лифта основывается на существовании устойчивого радиального положения равновесия троса, один конец которого находится на поверхности Земли, а другой — на расстоянии около 100 тысяч км в космосе. Поднимая полезную нагрузку по такой тросовой башне как по лифту, мы тем самым выводим ее в космос. Для геостационарных орбит для этого достаточно просто отсоединить нагрузку от конструкции лифта, для вывода на более низкие орбиты необходимо небольшая добавочная энергия для увеличения трансверсальной скорости полезной нагрузки, а для вывода на гиперболические орбиты достаточно отсоединить полезную нагрузку от несущей конструкции на дальнем от Земли конце лифта.

Проведенные ранее исследования возможности создания космического лифта ограничивались предварительными расчетами, поскольку уже они показывали, что для существовавших на то время материалов создание лифта было нереальной задачей. С появлением углеродных нанотрубок идея космического лифта может быть переведена из области научной фантастики в область перспективных технических концепций. Использование космического лифта позволит на порядки снизить стоимость вывода полезной нагрузки в космос и откроет возможность вывода на орбиту качественно новых космических конструкций, а также полетов на Луну, Марс, Венеру и Юпитер без ракетно-стартовых ускорений и соответствующих затрат и рисков. В будущем, космический лифт может позволить существенно увеличить присутствие человека в космосе, включая геосинхронную станцию и снижение риска и стоимости колонизации Марса. Широкие исследования проблем создания и функционирования космического лифта и других сверхпротяженных тросовых систем еще только начинаются. Многие аспекты этого проекта изучены недостаточно. Исследование динамики сверхпротяженных тросовых систем связано с созданием новых моделей и методов их исследования. Простые оценочные модели, использовавшиеся на ранних этапах работ здесь уже не применимы,

поскольку такие системы имеют уже истинно космическую протяженность, совпадающую по порядку с расстоянием от Земли до Луны.

Помимо космического лифта, появление сверхпрочных материалов позволяет рассматривать и другие проекты сверхпротяженных тросовых систем. В частности, это проекты построения космических лифтов на тех участках космоса, где нет атмосферы: лунный лифт, орбитальный лифт (т.е. лифт, нижний конец которого находится не на поверхности Земли, а в верхних слоях атмосферы).

В настоящее время четко обозначились некоторые новые направления развития КТС. К ним, в первую очередь, относится их применение для решения задач понижения уровня загрязнения околоземного космического пространства (ОКП). Один из подходов к ее решению базируется на электродинамическом торможении КТС, обеспечивающим возможность снижения ее орбиты за более короткий срок, чем для КА других типов, что позволяет осуществлять увод с орбиты отработавших КА и последних ступеней ракет-носителей. На отработку способов увода с орбиты был направлен проект «ProSEDS», работы над которым координировались центром им. Маршалла НАСА. По этому проекту последняя ступень ракеты - носителя «Delta-II» должна была быть соединенной с привязным телом тросом, состоящим из 10-километрового непроводящего и 5-километрового проводящего отрезков. Система успешно прошла наземные испытания, однако запуск ее был отменен. Тем не менее, работы в этом направлении продолжаются, а один из основных разработчиков «ProSEDS», американская компания Tether Unlimited создала проект малой КТС «Terminator Tether», предназначенной для увода отработавших объектов с низких околоземных орбит. Работы над сходным проектом под названием «EDOARD» ведутся в Италии.

Создание малых КТС является самостоятельным направлением, базирующемся на применении микротехнологий в современной космонавтике. Так, в частности, совместное использование малых КТС и малых КА предполагается в проекте «MAST», имеющем цель исследовать влияние космического пространства на материал троса. По этому проекту два микроспутника типа «CubeSat» должны быть соединены километровым тросом, вдоль которого перемещается третий «CubeSat» («Инспектор»), обеспечивающий фотографирование троса и передачу соответствующей информации на Землю. В другом, канадском проекте «VICEPS» малую вращающуюся КТС предполагается использовать для исследования космической плазмы и характеристик атмосферы и магнитосферы. Она же может служить эталоном длины для калибровки и измерений характеристик бортовых и наземных оптических и радиолокационных систем.

Еще одним направлением использования КТС является применение их в качестве элементов КА и их систем. Так, в частности, в последнее десятилетие появился новый класс систем гравитационной стабилизации углового движения КА, в которых вместо традиционных жестких штанг используются гибкие связи (тросы, ленты). Это позволяет снизить стоимость и уменьшить массу системы стабилизации, а также значительно увеличить расстояние между КА и стабилизирующим грузом, что повышает характеристики системы и позволяет использовать ее на малых КА. Возможные применения тросовой системы не ограничиваются пассивной стабилизацией.

Интенсивное использование ОКП как в гражданских, так и в военных целях, значительное возрастание вероятности столкновения КА с опасными объектами техногенного и природного происхождения, повышение угрозы столкновения Земли с какими-либо небесными телами, обеспечение безопасности космической деятельности, включая охрану окружающей среды, и ряд других причин делают в настоящее время актуальным поиск решения проблемы мониторинга обстановки в ОКП и инспекции орбитальных объектов. Особую значимость приобретает указанная проблема в связи с загрязненностью ОКП «радиоактивным мусором», являющегося следствием выведения на орбиту КА с ядерными энергоустановками и радиоизотопными термоэлектрическими генераторами.

Проделанный анализ показывает, что к орбитальным объектам инспекции на нынешнем этапе могут быть отнесены следующие:

- активно функционирующие и пассивные иностранные КА;
- отечественные функционирующие и аварийные КА военного и гражданского назначения;
- орбитальные объекты техногенного происхождения (нефункционирующие КА, элементы конструкции ракет-носителей и КА и т.п.);
- орбитальные объекты природного происхождения (метеоры, кометы, астероиды и т.п.);
- области ОКП (радиационные пояса, магнитные аномалии и т.п.).

Очевидно, что для решения проблемы инспекции орбитальных объектов должны потребоваться робототехнические средства, позволяющие как доставлять измерительные средства к этим объектам на требуемые расстояния, так манипулировать ими, обеспечивая необходимый состав аппаратуры дистанционного зондирования (ДЗ). При этом предварительные исследования показывают, что эффективное решение задач инспекции с использованием таких средств может быть осуществлено только в составе космической системы, как структурированной совокупности орбитальной группировки таких

робототехнических средств - КА-инспекторов (КАИ), осуществляющих облет орбитальных объектов, и наземного комплекса управления ими.

Аппаратура ДЗ может располагаться, как на КАИ, так и на выносных элементах его конструкции. В обоих случаях, когда расстояние от аппаратуры ДЗ до корпуса КАИ незначительно (до нескольких сот метров), требуется обеспечить доставку КАИ в непосредственную окрестность орбитального объекта. Это предъявляет очень высокие требования к его системе управления движением и связано с риском воздействия орбитального объекта на КАИ. В этой связи целесообразным является либо выбрасывание зонда с аппаратурой ДЗ по направлению к орбитальному объекту, что в общем случае связано с его последующей утратой, либо доставка его к орбитальному объекту и возврат на КАИ с помощью КТС.

Из проделанного анализа видно, что задача инспекции совокупности орбитальных объектов с использованием КТС до настоящего времени не рассматривалась, а соответствующие робототехнические средства не создавались. Ее существенной спецификой является необходимость облета орбитальных объектов, движущихся в различных плоскостях и по различным траекториям. Это приводит к необходимости проведения маневров КАИ с целью доставки в определенные разнесенные на значительные расстояния области, связанные с орбитальными объектами, аппаратуры ДЗ и применение ее на требуемых дальностях. Таким образом, КАИ должен быть оснащен помимо тросовой системы, обеспечивающей доставку аппаратуры ДЗ непосредственно к орбитальному объекту, еще и двигательной системой для его доставки в область применения. Особенностью КТС является ее многократное развертывание в ходе применения КАИ.

Аппаратура ДЗ КАИ с целью комплексного решения задач инспекции должна быть различного целевого предназначения и располагаться как на борту КАИ непосредственно, так в отделяемой системе ДЗ, доставляемой к месту применения с помощью тросовой системы. При этом следует иметь в виду, что изменение состава задач и орбитальных объектов в ходе применения КАИ может потребовать изменения состава аппаратуры ДЗ, располагающейся в отделяемой системе, что должно осуществляться с использованием соответствующего робототехнического манипуляционного средства. Более того, отделяемую систему ДЗ целесообразно рассматривать и создавать как малый КА с соответствующими комплексами и системами. Другие комплексы и системы КАИ являются типовыми для искусственных спутников Земли (ИСЗ).

К основным достоинствам применения тросовых систем на КАИ следует отнести:

- повышение точности ДЗ орбитальных объектов;

- повышение точности доставки аппаратуры ДЗ к орбитальным объектам;
- снижение энергозатрат КАИ на облет орбитальных объектов;
- повышение безопасности инспекции орбитальных объектов.

В связи с тем, что инспекция орбитальных объектов должна решаться в значительной по размерам области ОКП, простирающейся от высоты атмосферы до высоты геостационарной орбиты, в пределах которых функционирует подавляющее большинство ИСЗ, а в отдельных случаях даже выше, применением одиночного КАИ она осуществлена быть не может. Это требует согласованного применения их совокупности в составе космической системы инспекции (КСИ), состоящей из однотипных КАИ. При этом следует иметь в виду, что применение КАИ путем их непосредственного запуска к заданным орбитальным объектам имеет ограниченные возможности. Вследствие этого, развертывание КСИ должно быть осуществлено загодя, а КАИ, входящие в нее, до их применения двигаться по некоторым дежурным орбитам.

В связи с тем, что работы по созданию КСИ орбитальных объектов как у нас в стране, так и за рубежом практически не ведутся, при этом практически отсутствуют не только инженерные решения, но и концептуально-методологические подходы, формирование ее облика и определение основных тактико-технических характеристик является актуальным для настоящего времени проектом. Это, в свою очередь, делает необходимым разработку методологического аппарата и подготовки данных для формирования технических предложений по созданию КСИ орбитальных объектов.

Обеспечение создания КТС по рассмотренным направлениям сопряжено с решением ряда научных и технологических проблем, основными из которых являются следующие:

- обеспечения надежности тросовых соединений;
- создание высокопрочных материалов, пригодных для создания сверхпротяженных тросовых систем;
- разработка средств и способов демпфирования колебаний КТС;
- исследование условий устойчивости КТС на орбите при взаимодействии с магнитным полем Земли;
- разработка средств и способов захвата объектов КТС.

### 3. АЛГОРИТМЫ ПОВЕДЕНИЯ КТС

#### *3.1. Общая схема выпуска и развертывания КТС в пассивном и активном режимах*

Выпуск и развертывание КТС являются одной из самых сложных операций на орбите. Эта сложность обусловлена тем, что в состав КТС входит тонкий трос весьма большой длины, поведение которого в свободном (ненатянута) состоянии крайне трудно предсказуемо. Поэтому целесообразно с самого начала отделить механику свободного троса с пассивной концевой нагрузкой на базе универсальной космической платформы (УКП) от механики такого же троса при использовании активной УКП с тягой.

В первом случае операция выпуска троса с УКП из корпуса транспортного грузового корабля (ТГК) должна состоять из отталкивания (или отстреливания) УКП с прикрепленным к ней тросом (этап I), после чего начинается режим пассивного удаления УКП от ТГК по некоторой заранее рассчитанной траектории (этап II). Завершающим является этап III, когда трос уже выпущен почти полностью и начинается его торможение посредством лебедки, установленной на ТГК. Несмотря на кажущуюся простоту, каждый из этих этапов содержит в себе целый ряд тонких моментов, существенно влияющих на динамику и на успешное завершение всего процесса развертывания.

Рассмотрим подробнее I этап – этап выпуска УКП с тросом. Разгонное устройство, установленное на ТГК (несущем аппарате), должно быть сориентировано в аппарате так, чтобы его осевая линия (направление отстрела) проходила через центр масс ТГК, иначе после выталкивания УКП несущий аппарат придет во вращение. Важное значение имеет направление «выстрела» в орбитальных осях, связанных с точкой отстрела. При «выстреле» строго вниз по местной вертикали, УКП, двигаясь вниз и сохраняя скорость орбитального вращения, будет отставать от носителя, т.е. его траектория спуска окажется выпуклой назад и для ее выведения на желаемую местную вертикаль потребуется использовать дополнительное управляющее воздействие. Поэтому ось отстрела целесообразно направлять несколько вперед, чтобы траектория спуска в конце этапа II вышла на местную вертикаль. Для определения величины требуемого угла упреждения необходима постановка и решение соответствующей динамической задачи.

Большое внимание следует уделить и схеме крепления троса к УКП для обеспечения минимальной передачи вращательного импульса от УКП к тросу и наоборот. Только так можно избежать петлеобразования в тросе и его запутывания, особенно на начальном этапе отделения УКП от ТГК. Вообще проблема петлеобразования – это главная проблема при создании КТС, и для ее решения необходимо проведение целого

ряда полунатурных и компьютерных модельных экспериментов в земных условиях, хотя окончательные выводы могут быть получены только в космических экспериментах. Цель таких исследований состоит также в том, чтобы для тросов различных конструкций выявить их характерные собственные изгибы (или извивы) и скручивания по мере уменьшения силы натяжения, а также провести их классификацию. Кроме того, необходимо учесть влияние конструкции самой лебедки и режима предварительной намотки троса на ее барабан на поведение троса после его схода с барабана.

Что касается вопросов пассивного управления процессом развертывания КТС, то на этапе I они сводятся к выбору режима движения УКП в разгонном устройстве при выпуске троса, а на этапах II и III – к выбору режима торможения выпускаемого из лебедки троса для обеспечения заданного закона изменения скорости выпуска троса либо силы натяжения.

На последнем этапе развертывания КТС на передний план, очевидно, выходит проблема вывода УКП на местную вертикаль, при условии эффективного гашения возникающих маятниковых и струнных колебаний КТС. Для этого можно использовать управление продольным движением троса посредством двух лебедок, установленных на ТГК и на УКП. Разумеется, для конкретного синтеза законов управления работой лебедок необходимо также проведение специальных теоретических и экспериментальных исследований, однако определенные перспективы здесь имеются.

И, наконец, наиболее гибкий и эффективный путь управления развертыванием КТС связан с использованием активного модуля УКП, когда на его борту устанавливается специальная система стабилизации и ориентации, а также малогабаритный реактивный двигатель той или иной конструкции (твердо- или жидко-топливный, газореактивный, ионный и т. д.). Здесь вполне возможен выбор и реализация самых различных траекторий движения УКП. Конечно, разработка такого активного модуля требует определенных усилий и времени, однако его универсальность и операционные возможности представляют большую ценность в самых разнообразных штатных и нештатных ситуациях, и в первую очередь для построения и обслуживания крупногабаритных орбитальных комплексов различного назначения.

Завершая на этом общее обсуждение алгоритма выпуска одиночной УКП, закрепленной на тросе, отметим его отдельные недостатки, роль которых трудно оценить заранее, но и забывать о них тоже нельзя. Они в основном обусловлены механическим воздействием разгонного движения УКП (при выпуске с углом упреждения) на корпус носителя и сводятся к передаче на него как количества движения УКП, так и момента количества движения. Из-за этого корпус несущего аппарата начинает медленное

вращение вокруг своего центра масс, а сам центр масс, строго говоря, несколько изменяет свою орбиту. Во избежание таких последствий, представляется возможным создать и применить систему парного выпуска двух модулей, когда вместо выброса в пространство только одного модуля (УКП) производится выброс симметричной пары модулей в противоположные стороны с помощью парного разгонного устройства.

Если, например, оба модуля имеют одинаковые массы и разгоняются в разные стороны в одном стартовом желобе (или трубе), то, при одновременном отделении их от носителя, они в сумме не окажут никакого динамического воздействия и начнут двигаться в прямо противоположных направлениях. В результате такой динамической компенсации сам носитель (ТГК) будет строго сохранять свою ориентацию, и продолжать движение по прежней орбите. Некоторую сложность здесь представит разработка конструкции, например, лебедки с двумя барабанами (если оба таких модуля будут выбрасываться на своих тросах) и способов управления ею. Что касается самих модулей, то из них либо оба могут быть модулями на базе УКП, либо лишь один из них будет основным, созданным на базе УКП, а второй будет просто инерционной «болванкой». Удобство такой системы парного выпуска состоит в том, что носитель со своим разгонным устройством может развернуть на орбите целую серию парных связок различной величины и массы, которые затем можно объединять в более сложные и протяженные орбитальные тросовые конструкции.

### ***Вопросы и критерии оптимизации процесса выпуска УКП***

Операция выпуска УКП (тросового модуля) может осуществляться различными способами: электроприводным, электромагнитным, гидравлическим, пневматическим, пружинным и т. д. Естественно, что каждому из названных способов свойственна разная динамика и кинематика, что приводит и к разным критериям оптимизации. Наиболее гибкой и универсальной является электроприводная система разгона, позволяющая осуществлять разгон модуля по любому требуемому закону – с постоянным ускорением, с переменным ускорением и т.д. Прочие же способы разгона не обладают подобной универсальностью, и их оптимизация может быть достигнута только за счет оптимального подбора их параметров – жесткости пружин, начального давления газа или жидкости, длины пути разгона и т. д.

Что касается критерия оптимизации, то наиболее очевидным является критерий по величине конечной скорости. Однако, выбор данного критерия далеко неоднозначен, т.к. он определяется целым рядом факторов, таких как требуемая продолжительность развертывания КТС, планируемая длина троса в конечной конфигурации, возможности системы контроля и управления на этапе II и т.д. Ориентировочно, конечная скорость



УКП при ее выходе из разгонного устройства должна составлять лишь несколько метров в секунду, т.к. при больших ее значениях отдача на корпус ТГК будет слишком сильной.

Таким образом, выбор оптимальной скорости выпуска УКП требует проведения серьезного расчета всего процесса развертывания, и он определенно зависит от того, в каком направлении происходит выпуск. Выбор этого направления также требует определенной оптимизации, так как он непосредственно влияет на форму и характер траектории движения УКП относительно ТГК и на условия выхода ее в конце III этапа на местную вертикаль, проходящую через ТГК.

Критерием оптимизации угла выброса может в этом случае служить максимально достижимая степень «прямызны» траектории УКП на этапе II и минимальная амплитуда маятниковых колебаний КТС на этапе III. Естественно, что конкретный выбор оптимального угла бросания также зависит от целого ряда факторов и требует проведения тщательного расчета. Наиболее серьезным из этих факторов является сопротивление остаточной атмосферы, активно влияющей на форму траектории и повышающей опасность петлеобразований на длинном тресе. Во избежание таких ситуаций, при которых возможно образование петель, следует продумать и структуру боковой поверхности троса с целью плавного его обтекания воздушным потоком. В частности, стоит испробовать спиральную обмотку троса, которая, как известно, нередко используется в линиях электропередач для снижения их ветровых вибраций. В этом случае еще одним оптимизационным параметром становится угол навивки спирали, а также ее глубина. Определенную роль здесь может играть и погонная плотность троса, так как при возникновении поперечных струнных волн их длина может резонировать с шагом навивки и тем самым определять либо нарастание, либо демпфирование этих волн.

Наконец, еще одним важным оптимизирующим эффектом может обладать режим активного управления движением УКП с тягой. Здесь, очевидно, необходимо посредством тяги поддерживать определенный уровень натяжения троса, хотя для конкретного выбора этого уровня требуется серьезное теоретическое исследование. Побочным эффектом такого способа управления неизбежно будет дополнительное силовое воздействие на корпус ТГК, которое будет влиять на его ориентацию и искажать его околоземную орбиту.

Более щадящим способом разгона УКП на этапе I представляется использование системы парного выпуска, когда наряду с рабочим модулем (модулем УКП) осуществляется отбрасывание в противоположную сторону имитационной болванки, компенсирующей действие динамических нагрузок на ТГК. После завершения I этапа эта болванка может быть втянута обратно на борт ТГК для повторного применения, если оно

потребуется. Данный способ представляет собой гибкий и удобный инструмент раскрытия гравитационных тросовых «диполей» любого размера и на любом расстоянии друг от друга (в пределах одной околоземной орбиты).

Помимо системы парного выпуска, в целях динамической компенсации выброса полезной нагрузки с тросом возможно также применение противоположно направленного компенсирующего реактивного импульса, с помощью специального малого двигателя, устанавливаемого для таких целей на основном носителе (ТГК) в паре с устройством выпуска. Такой способ можно назвать способом реактивного компенсирующего импульса. Оба упомянутых здесь способа динамической компенсации могут оказаться весьма полезными для снижения нежелательного воздействия выброса УКП на ТГК, но, вообще говоря, их проработка и реализация может потребовать весьма серьезных исследований.

### ***Принципы управления движением УКП и способы его наблюдения***

Как хорошо известно, для осуществления эффективного управления любым динамическим объектом необходимо решение трех проблем:

1. Используя систему датчиков и индикаторов, обеспечить постоянный или периодический съем текущих измерительных данных с датчиков и обеспечить требуемую точность этих данных.

2. Произвести оптимальную обработку собранной информации, не допуская потери ее точности и своевременности.

3. Учитывая динамические и статические свойства управляемого объекта и его системы управления, сформировать из обработанной информации рациональные законы управления, позволяющие оптимальным путем достичь желаемого конечного состояния системы.

Рассмотрим эти проблемы по порядку для случая рассматриваемой КТС. Ясно, что на этапе I единственным существенным параметром режима выпуска является величина скорости УКП при выходе ее из разгонного устройства. Измерение скорости с высокой точностью особых трудностей не представляет. Однако большое значение имеет ее «эксцентриситет» - отклонение вектора скорости от направления на центр масс ТГК, так как чем больше такой эксцентриситет, тем больший вращательный импульс передается корпусу ТГК от выталкиваемого УКП.

Гораздо более широкий объем измерений и наблюдений необходим для контроля движения УКП и троса на этапе II. Сравнительно несложно построить систему измерений текущего положения УКП относительно ТГК. Для этого необходим бортовой дальномер, определяющий текущее расстояние до УКП (здесь имеется ряд различных способов), а также бортовое угломерное устройство. Значительно сложнее определять текущую

пространственную форму троса между УКП и ТКК и степень ее безопасности. Наиболее опасными конфигурациями соединительного троса будут, очевидно, те, которые приближают возможность петлеобразования на тросе или его самопересечение. Чтобы выявить подобные конфигурации, необходимо проведение предварительных теоретических исследований склонности тросов различных конструкций к samozакручиванию и извиванию, а также проведение полунатурных экспериментов в бассейнах.

В реальных условиях космического пространства, контроль поведения троса требует установки на нем цепочки светодиодов (или иных сигнализаторов-отражателей) с шагом в десятки или сотни метров. Для обработки сигналов, поступающих от этих светодиодов, необходима разработка специальной программы распознавания, предупреждающей о приближении опасной конфигурации троса. Эта же программа должна формировать комплекс мер и управлений, ликвидирующих опасную конфигурацию посредством целенаправленных движений активной УКП, снабженной реактивной тягой. Однако отметим, что здесь особое внимание следует уделить и вопросу влияния нежелательной динамики корпуса УКП на движение соединительного троса, т.к. сам корпус и узел крепления троса на нем по существу являются динамическими отражателями и могут стать возбудителями продольно-поперечных волн в тросе.

Если же УКП является пассивной системой без тяги, то можно воспользоваться возможностью управления тросом непосредственно с борта ТКК. Для этого существует два режима управления – управление продольной скоростью выхода троса и управление путем образования на нем поперечных (струнных) бегущих волн. Именно такой путь управления «гибким элементом» предложен в патентной заявке № 94040320/11, где представлен и соответствующий механический возбудитель (вибратор). Разумеется, можно использовать и комбинацию этих двух способов, причем при этом открывается возможность оптимизации этих двух воздействий с целью наиболее эффективного изменения конфигурации троса и приближения его к местной вертикали. Этот же способ управления целесообразно использовать на этапе III, если УКП не имеет реактивной тяги. Но если тяга имеется, то процедура прихода УКП в конечную точку решается традиционными методами теории управления.

Хорошо известен факт, что успешное функционирование любого достаточно сложного технического объекта возможно лишь при его адекватном контрольно-измерительном (т.е. информационном) оснащении. В первую очередь это относится к разного рода космическим системам, особенно, крупногабаритным. Поэтому параллельно

с разработкой и проектированием КТС необходимо планировать и ее информационное обеспечение, которое в свою очередь можно разделить на две части:

1. Датчики и измерительные устройства, входящие в состав штатной аппаратуры систем автоматического управления, обеспечивающих нормальное функционирование исполнительных устройств на всех трех этапах развертывания КТС.

2. Система датчиков аварийного или нештатного контроля, отслеживающих и фиксирующих различные неожиданные ситуации или чрезмерное отклонение переменных параметров КТС.

Подчеркнем здесь значимость второй группы датчиков, которая наиболее полно отражает специфику разрабатываемой конструкции КТС, и вместе с тем должна быть тесно увязана с сигнальными выходами датчиков первой группы. Эти выходы должны в первую очередь содержать достаточно точные данные как об угловой ориентации ТК и УКП, так и об их положении.

### **3.2. Влияние погонной массы троса и сил аэродинамического сопротивления на процесс развертывания КТС**

Несмотря на то, что масса троса составляет лишь небольшую часть массы УКП, ее роль в динамике развертывания КТС весьма существенна, так как определяет склонность троса к петлеобразованию, запутыванию и внутренним ударам при внезапном выпрямлении троса, из-за которых могут происходить даже обрывы троса. Учет массы троса, на первый взгляд, позволяет путем интегрирования динамических уравнений полностью описать его движение при любых распределенных и концевых нагрузках. Однако стандартные динамические уравнения обычно не позволяют учесть начальные (остаточные) напряжения в элементах троса, заложенные при его заводском изготовлении либо при намотке на лебедочный барабан. Чтобы увидеть воздействие этих напряжений на статическую форму троса, нужно поместить его в «свободное плавание» в космическом пространстве, что вряд ли возможно имитировать в наземных условиях. Частично наблюдать эти эффекты можно в условиях свободного плавания троса на поверхности жидкости.

В качестве меры борьбы с этими неопределенностями в космическом пространстве, можно использовать способ динамического нагружения троса путем создания поперечных вибраций на одном из его концов. Возбуждаемые таким способом бегущие волны стремятся сгладить остаточные искажения его формы, приближая ее к прямолинейному виду и тем самым препятствуя петлеобразованию и запутыванию троса. Вопрос разработки и применения такого метода управления формой слабо натянутого или ненапрянутого троса требует отдельного серьезного исследования.

Обратимся теперь к обсуждению влияния сил аэродинамического сопротивления на механику движения КТС и соединительного троса. Большую роль в общем балансе сил, действующих на элементы троса, с учетом влияния атмосферы Земли, играет поверхностная структура оболочки троса. В частности, как уже упоминалось, для снижения или стабилизации поперечных вибраций троса можно использовать шнуровую спиральную навивку на поверхность троса, что также будет способствовать его спрямлению и уходу от опасных конфигураций. Важное значение здесь приобретает и квазистатический прогиб троса под действием сил давления со стороны набегающего потока, который увеличивает силу натяжения в тросе и этим препятствует петлеобразованию. Наличие такого квазистатического микронатяжения в большой степени сглаживает влияние остаточных напряжений на форму троса и позволяет находить эту форму путем интегрирования статических уравнений его равновесия. Поэтому аэродинамическое воздействие на трос, при его грамотном использовании, следует считать скорее положительным фактором, чем отрицательным.

### ***Обзор нештатных ситуаций при разворачивании и эксплуатации КТС***

Ни одна из механических систем, созданных человеком, не может функционировать достаточно долгое время без появления каких-либо нештатных или аварийных ситуаций. Рассмотрим основные типы подобных ситуаций для изучаемой КТС, а также то, как можно найти из них выход.

На этапе I разворачивания КТС, такой нештатной ситуацией может оказаться либо неполный разгон УКП в стартовом устройстве, либо неточная фиксация угла выброса. Ясно, что если скорость выхода не слишком отличается от расчетной по величине или направлению, то эту ситуацию можно скорректировать, слегка изменив процесс выпуска троса из барабана лебедки. Однако необходимо оценить те пределы, в которых такая коррекция возможна.

Гораздо более серьезной проблемой является нештатное поведение троса на этапе II, т.е. после его выпуска. Здесь возможен целый ряд различных сценариев его дальнейшего поведения, самые опасные из которых – петлеобразование, запутывание и обрыв. Для коррекции подобных явлений следует разработать методику дистанционного управления тросом с борта ТГК и определить предельные возможности такого управления.

Наконец, на этапе III процесс вывода УКП на местную вертикаль может резко осложниться из-за непредсказуемого собственного вращения УКП, вызванного резким ростом силы натяжения троса. Это вращение сравнительно несложно подавить, если у

УКП есть реактивная тяга, но без нее остается полагаться лишь на диссипативные свойства системы трос – УКП.

Разумеется, перечисленные аварийные ситуации далеко не исчерпывают всех возможных сбоев в функционировании КТС, однако показывают желательность и даже необходимость их предварительного изучения и теоретического анализа.

### ***Выводы по разделу***

Проведенное обсуждение основных этапов развертывания КТС на околоземной орбите показывает важность их теоретического исследования для построения оценок параметров и выбора рабочих режимов планируемых операций. Большое место в этих исследованиях должно отводиться вопросам оптимизации, что вообще характерно для большинства задач механики и управления космическими системами. Решение подобных задач существенно осложняется тем обстоятельством, что динамика космических объектов, как правило, описывается нелинейными уравнениями, допускающими неоднозначные решения. И в первую очередь эти трудности свойственны различным тросовым конструкциям, которые отличаются огромными размерами, крайне слабым взаимодействием своих элементов, высокой «склонностью» к неустойчивости и т.д. Однако именно эти особенности со временем будут приобретать всё большую важность и распространенность, так как отсутствие сил веса в космических конструкциях принципиально меняет их статическое и динамическое поведение, что приводит к необходимости решения самых разных задач оптимизации и рационализации.

И первым шагом в этот мир новой техники – мир орбитальных тросовых конструкций – является создание тросовой связки двух тел, которую можно назвать «гравитационным диполем». Именно подобные диполи, по-видимому, станут несущей механической основой для построения будущих разветвленных и многослойных космических поселений, обеспечивающих возможность длительного пребывания людей в космическом пространстве, за счет создания в жилых модулях силы микрогравитации. Поэтому рассматриваемая проблема развертывания на орбите КТС, как одиночного «гравитационного диполя», приобретает большую значимость для прогресса космической техники и технологии.

#### **4. МАКЕТЫ УЗЛОВ УПРАВЛЯЕМОЙ ТРОСОВОЙ ЛЕБЁДКИ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ**

В ЦНИИ РТК были изготовлены макеты узлов управляемой тросовой лебёдки. Выпуск троса обеспечивается шестью направляющими роликами, связанными между собой зубчатыми колесами. Вокруг первого и последнего ролика трос совершает один оборот, а вокруг остальных трос совершает 1,25 оборота. Проходя по шести роликам, трос в общей сложности совершает семь оборотов, что обеспечивает эффект самоторможения, то есть при неподвижных роликах невозможно протянуть трос, прикладывая сколь угодно большое усилие. Выпуск троса обеспечивается при вращении направляющих роликов без проскальзывания троса по поверхности роликов, что исключает выделение тепла и нагрев деталей тормозного устройства в процессе торможения. Кроме того, каждый направляющий ролик оборудован прижимным роликом, исключающим самопроизвольное движение троса вне направляющих роликов. В начале выпуска троса его натяжение недостаточно для самопроизвольного разматывания троса и вращения системы направляющих роликов. Для обеспечения принудительного выпуска троса необходим двигатель, обеспечивающий вращение роликов по заданному алгоритму.

Таким образом, устройство управляемого выпуска троса УТЛ должно включать в себя следующие элементы:

- электродвигатель (один или несколько), обеспечивающий разматывание и торможение троса;
- датчики силы слабого и сильного натяжения троса, обеспечивающие измерение соответственно силы слабого и сильного натяжения троса и выдачу измерительной информации в СУ УТЛ;
- датчик длины и скорости выпуска троса, обеспечивающий измерение длины выпущенной части троса и скорости выпуска троса, а также выдачу измерительной информации в СУ УТЛ.

Разработанная конструкция обеспечивает работу управляемой тросовой лебёдки (УТЛ) в трех режимах: при малом натяжении троса, при отключенных электродвигателях и при торможении.

На первом этапе исследований устройство для управляемого выпуска троса оборудовано одним приводом, и величина выбега троса определяется величиной тормозного момента, установленного на нем двигателя.

В дальнейшем, после обработки полученной в результате исследований информации, устройство должно быть оснащено двумя, тремя или четырьмя приводами, чтобы получить информацию об изменении динамики торможения устройства с использованием нескольких двигателей, работающих параллельно. В результате должно быть выбрано оптимальное число приводов в устройстве и тип электродвигателя, но не менее двух в соответствии с условием дублирования наиболее важных элементов устройства.

Далее на рисунках 1 – 5 приведены модели стенда с УТЛ.

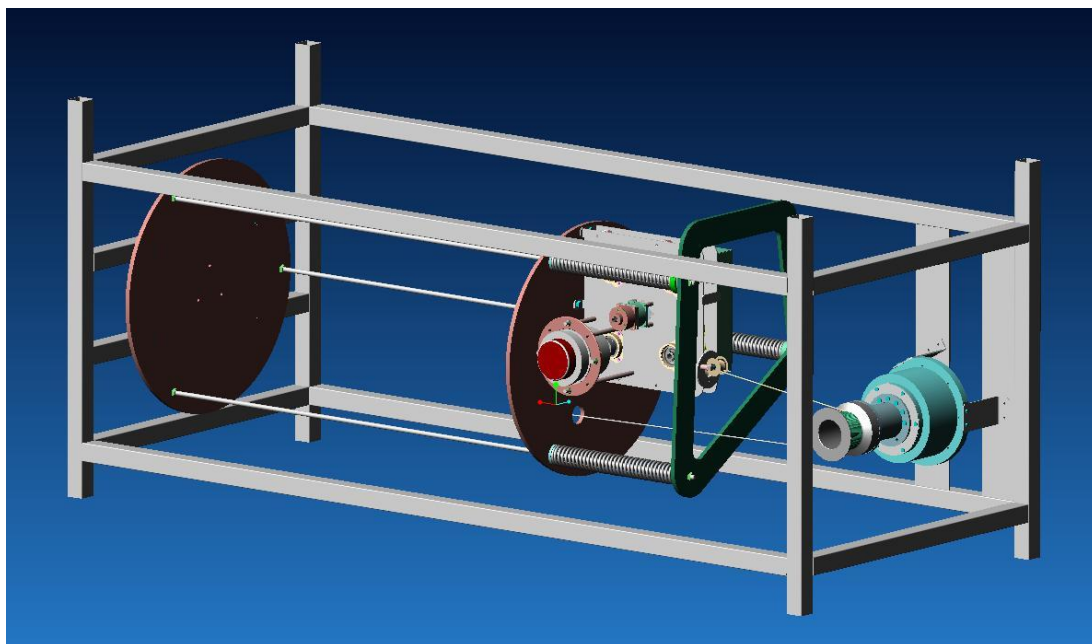


Рисунок 1 — Трехмерная компьютерная модель стенда (выход троса из УТЛ)



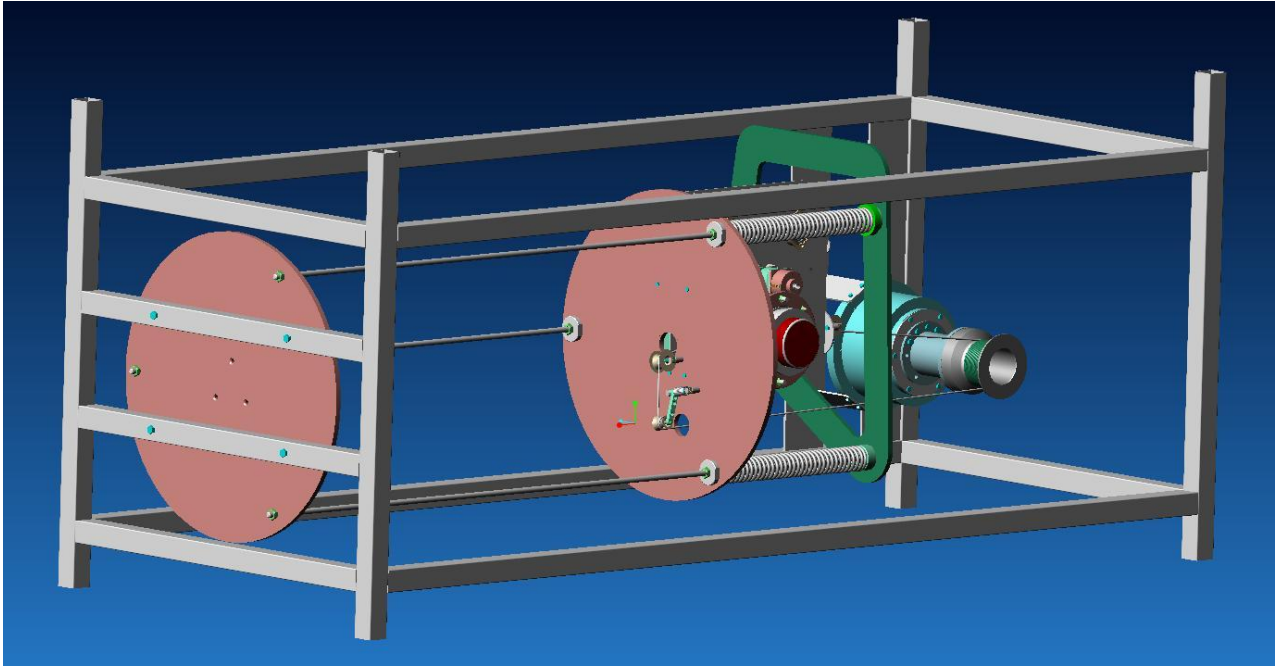


Рисунок 2 — Трехмерная компьютерная модель станда (вход троса в виде замкнутой петли в УТЛ)

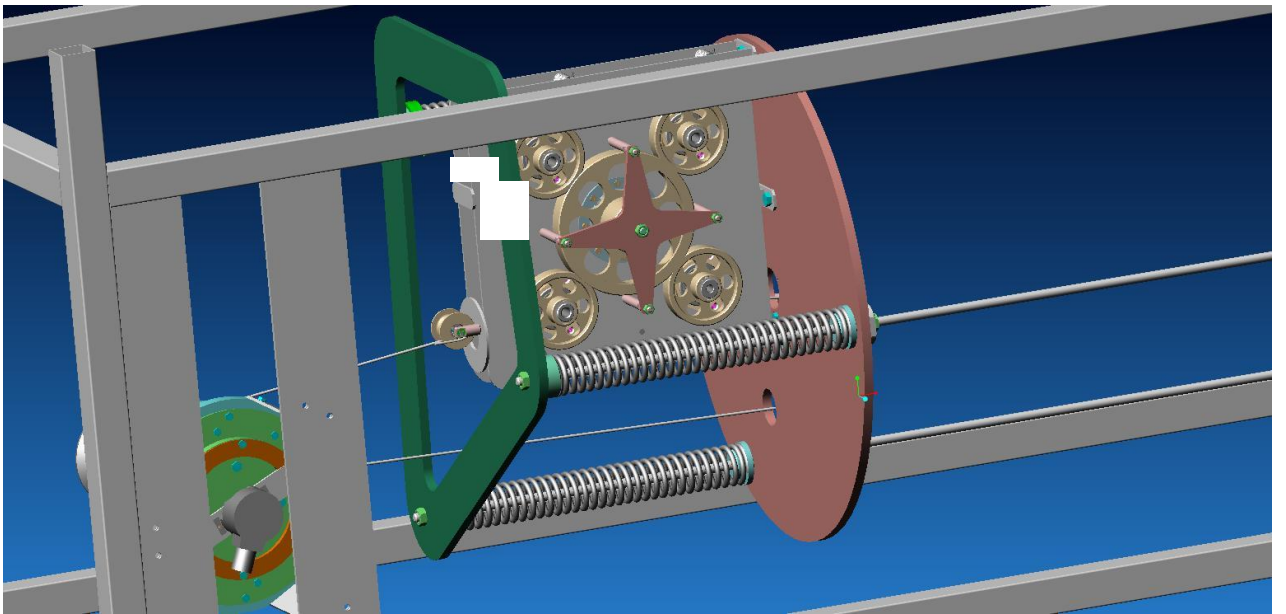


Рисунок 3 — Трехмерная компьютерная модель станда (подпружиненная подвижная платформа УТЛ)

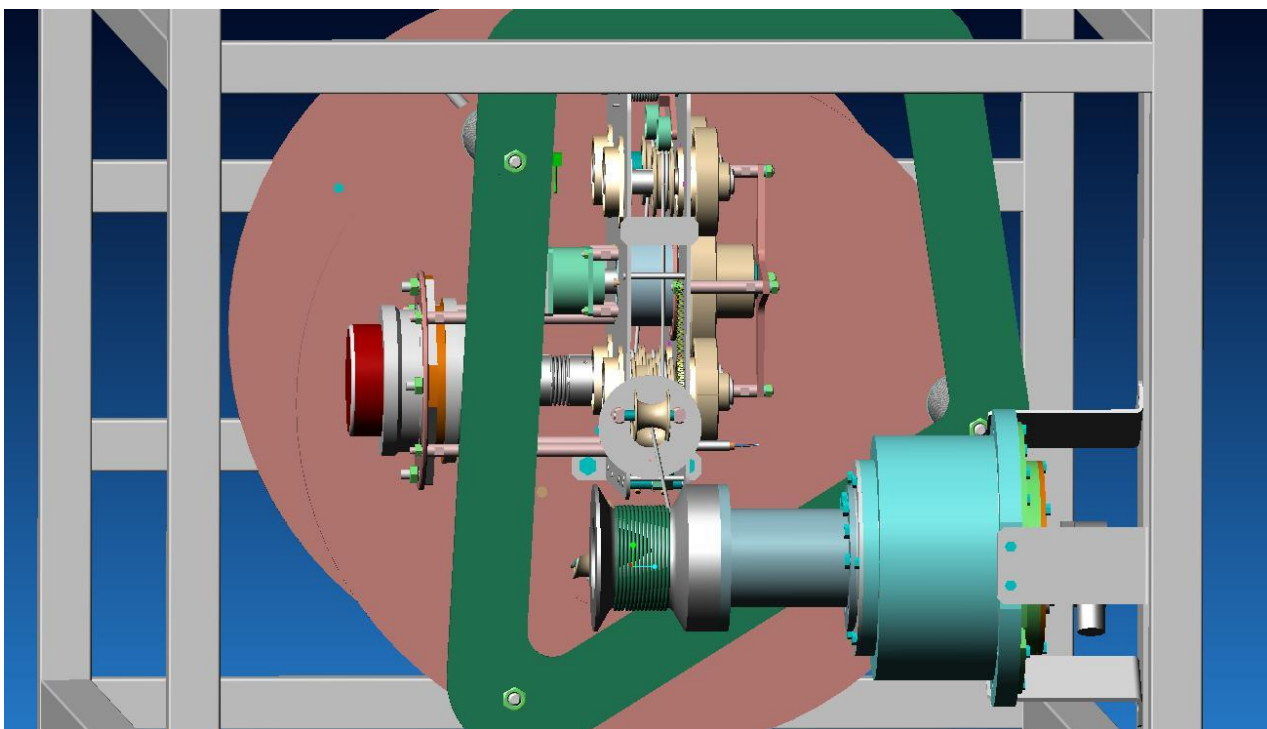


Рисунок 4 — Внешний привод стенда

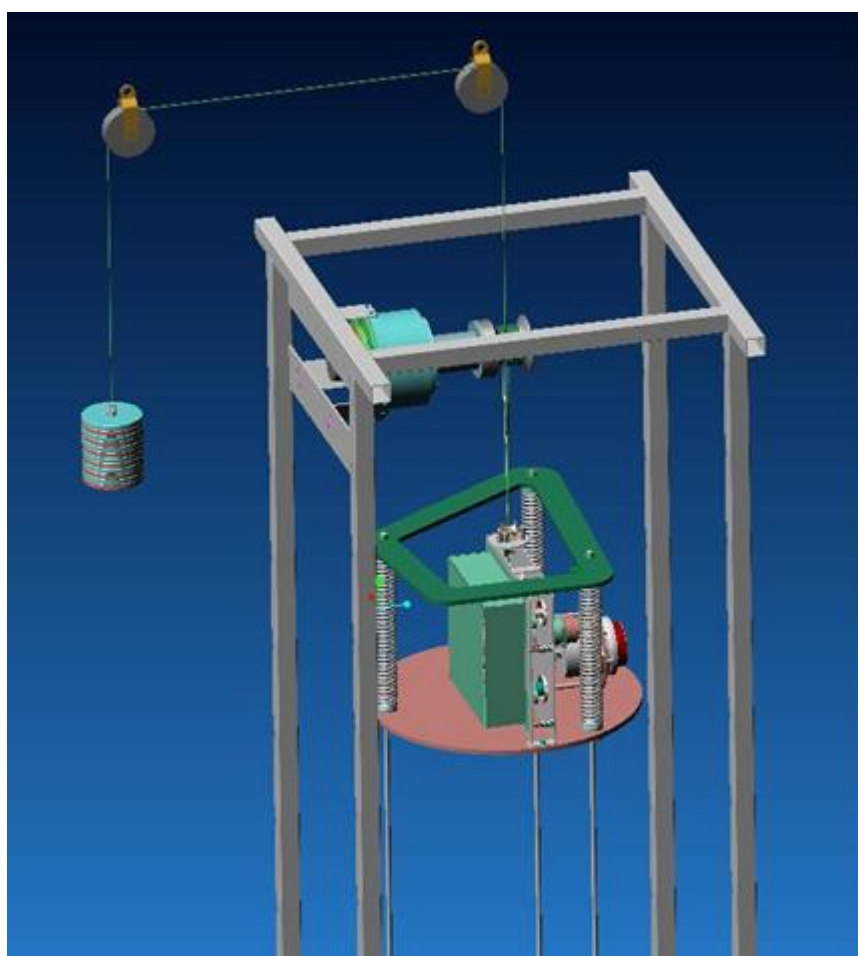
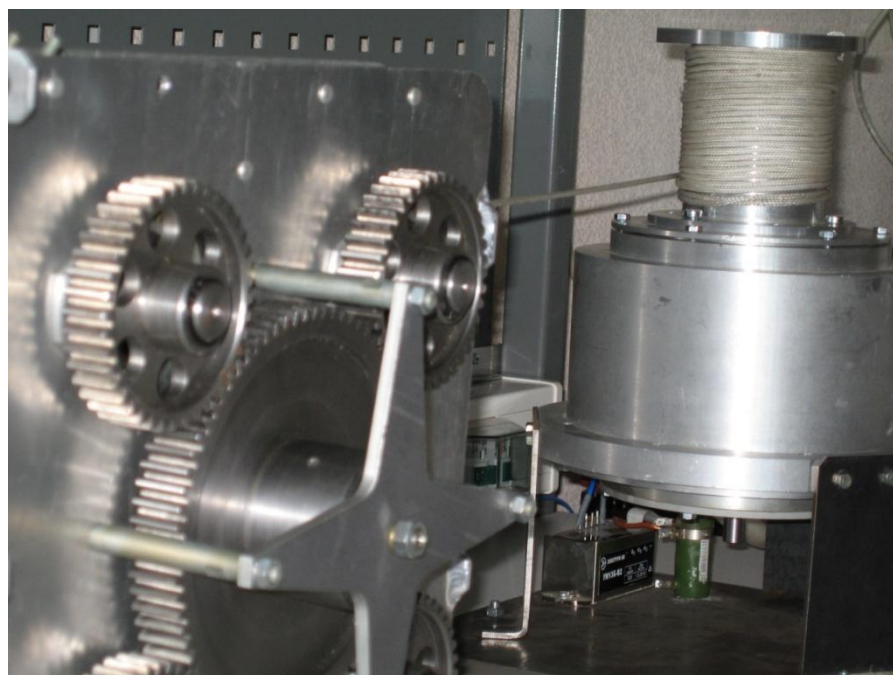
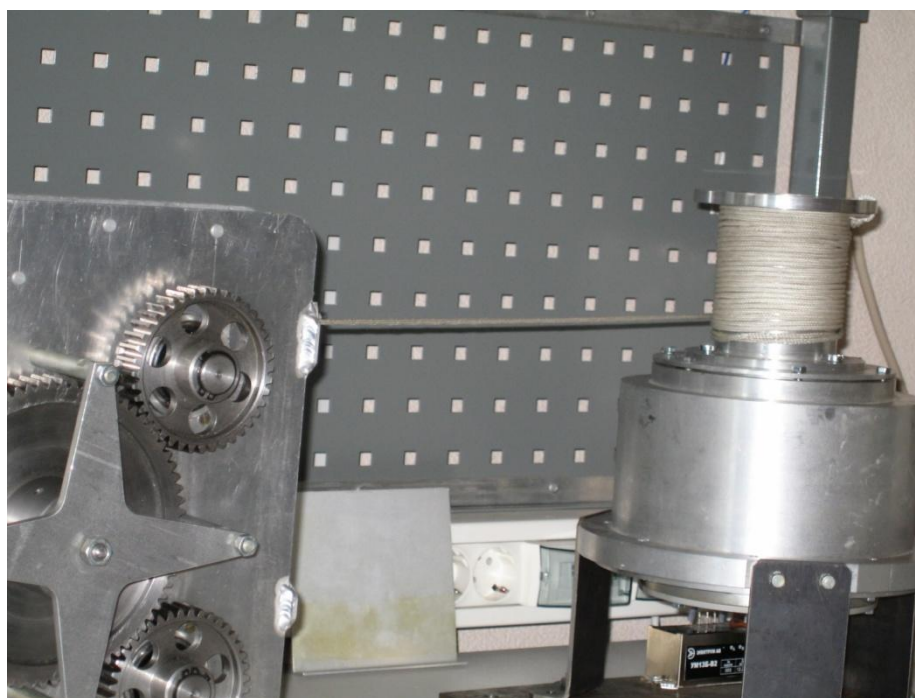


Рисунок 5 — Стенд в вертикальном положении

Фотографии изготовленных макетов узлов КТС приведены на рисунках 6 – 9.



а



б

Рисунок 6 — Макет УТЛ и внешний привод станда

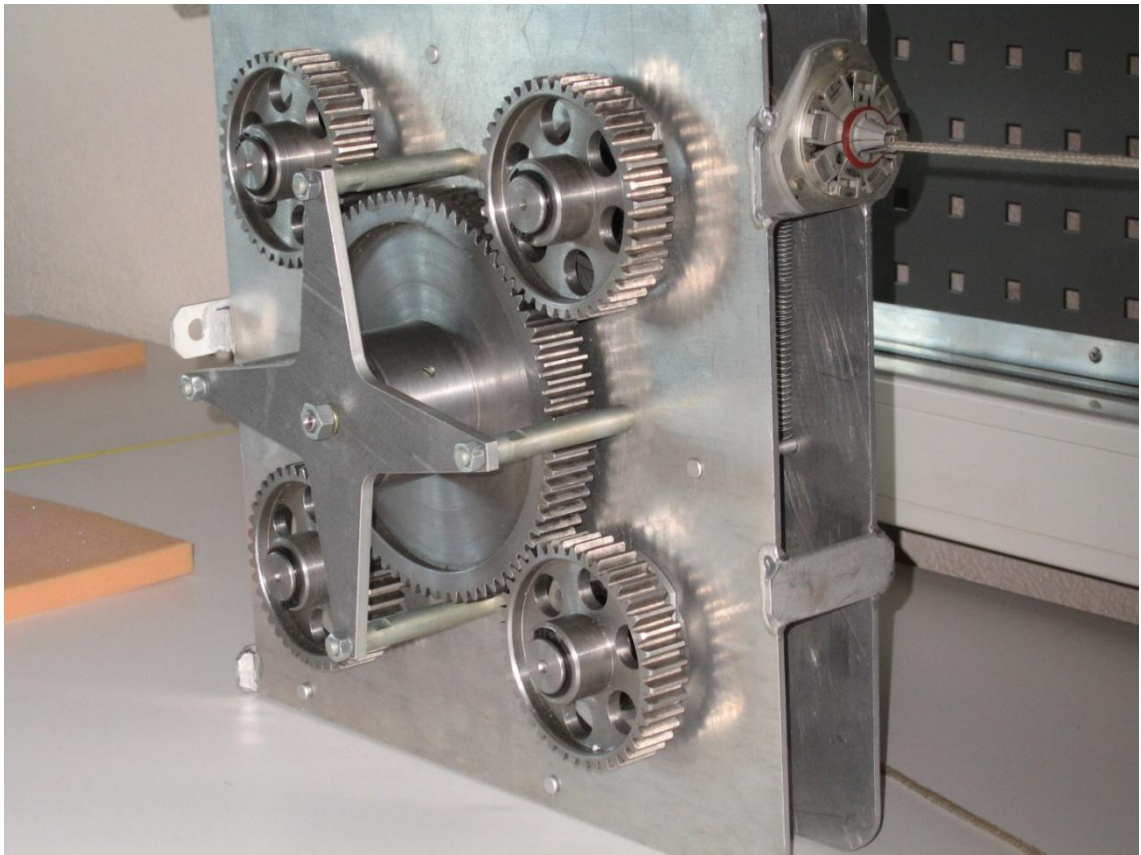


Рисунок 7 — Макет УТЛ

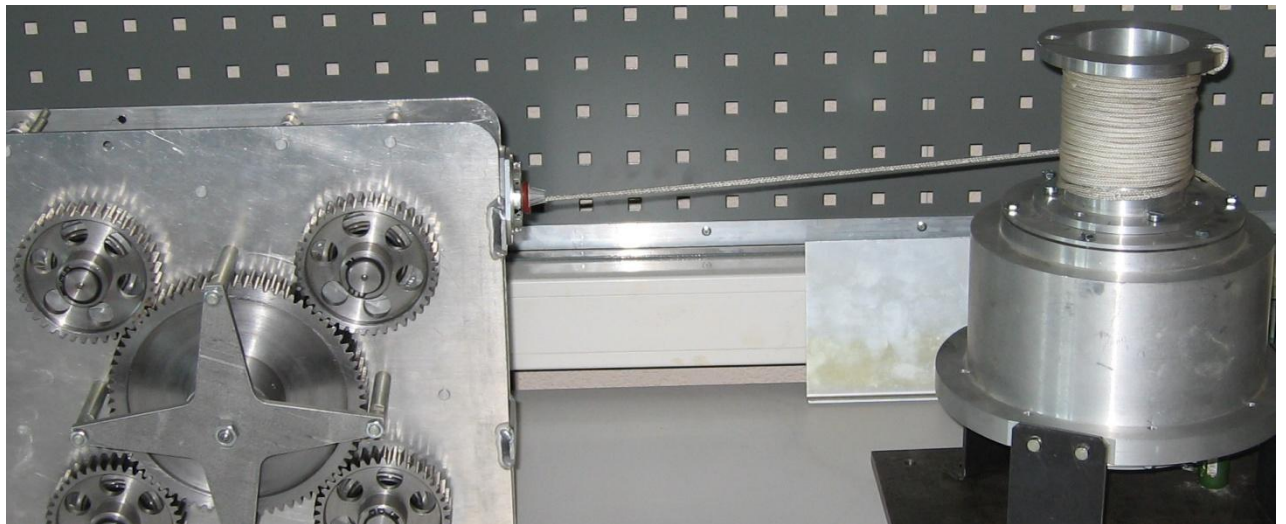


Рисунок 8 — Протягивание троса с помощью внешнего привода

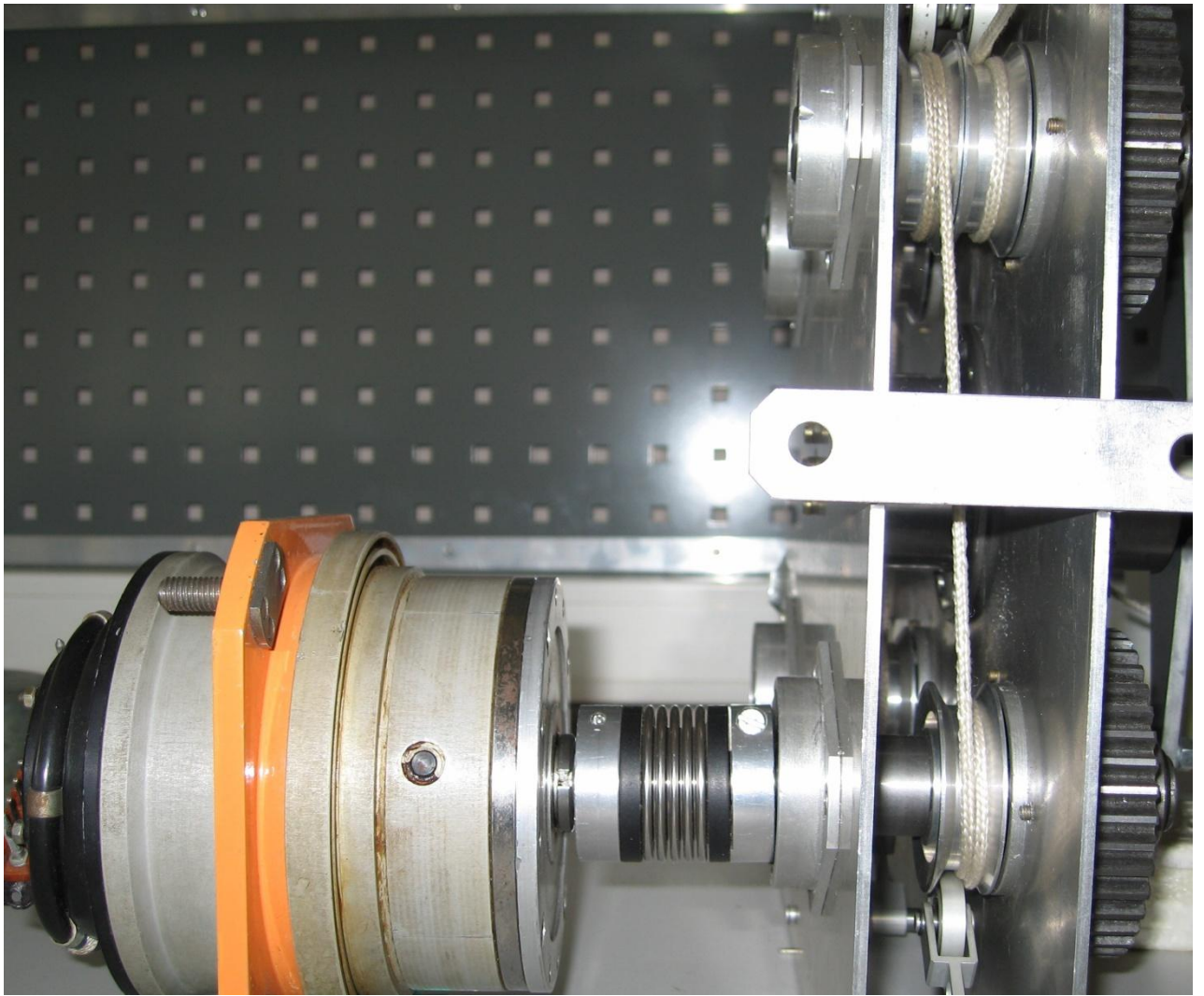


Рисунок 9 — Траектория движения троса внутри УТЛ

## 5. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Общая компоновка лабораторного стенда представлена на рисунках 10 – 13.

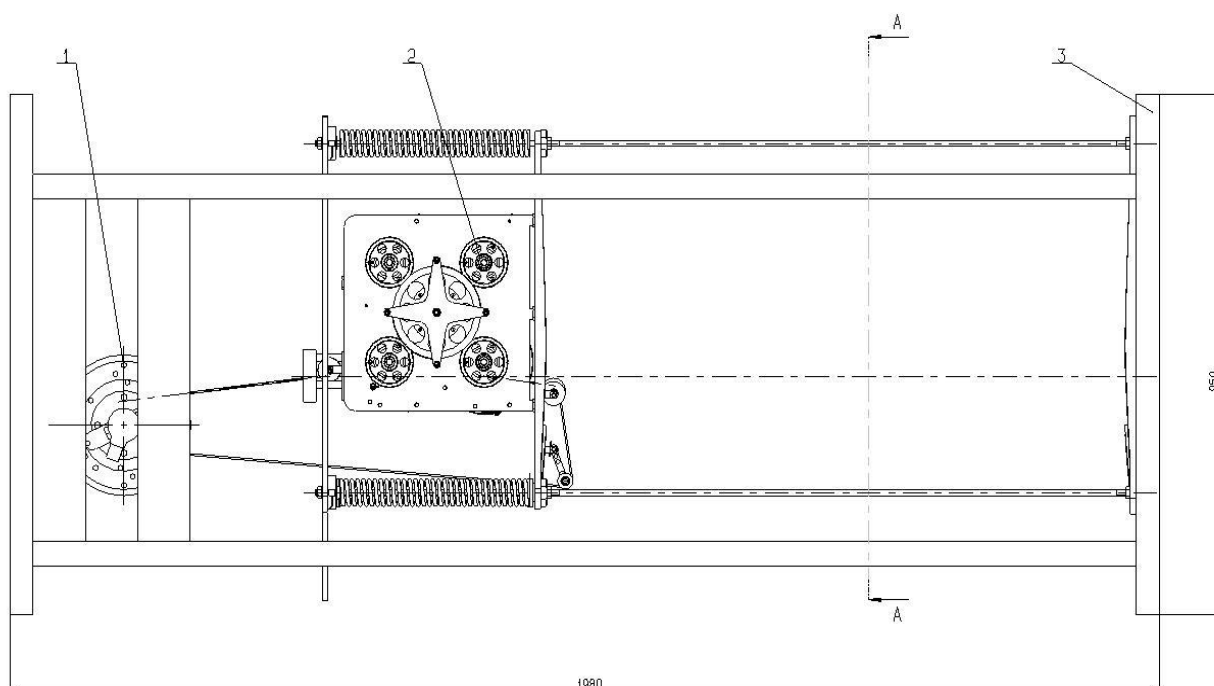


Рисунок 10 — Общая компоновка лабораторного стенда

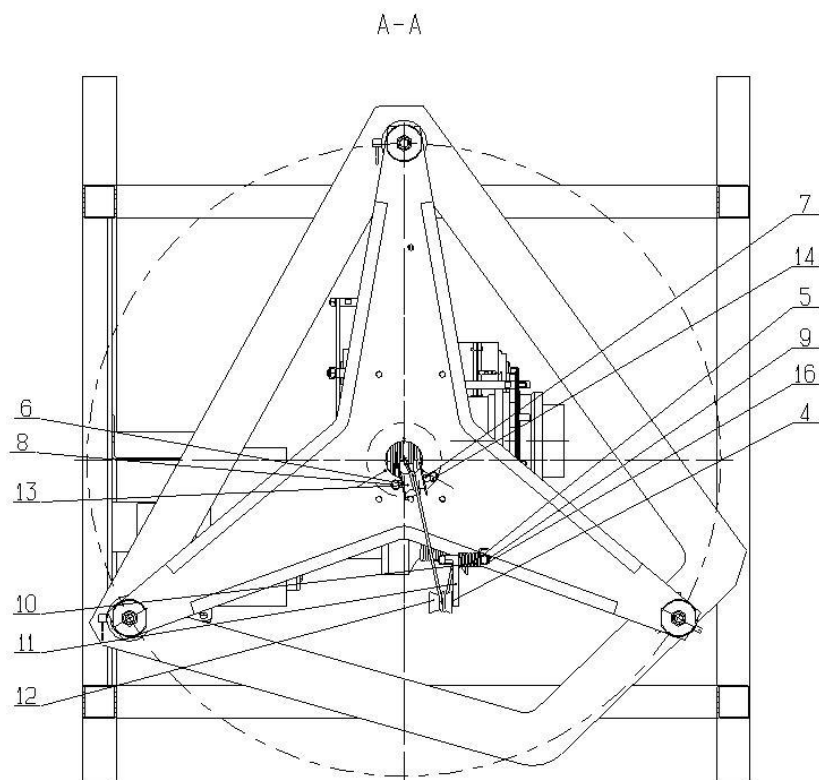


Рисунок 11 — Общая компоновка лабораторного стенда (разрез А – А)

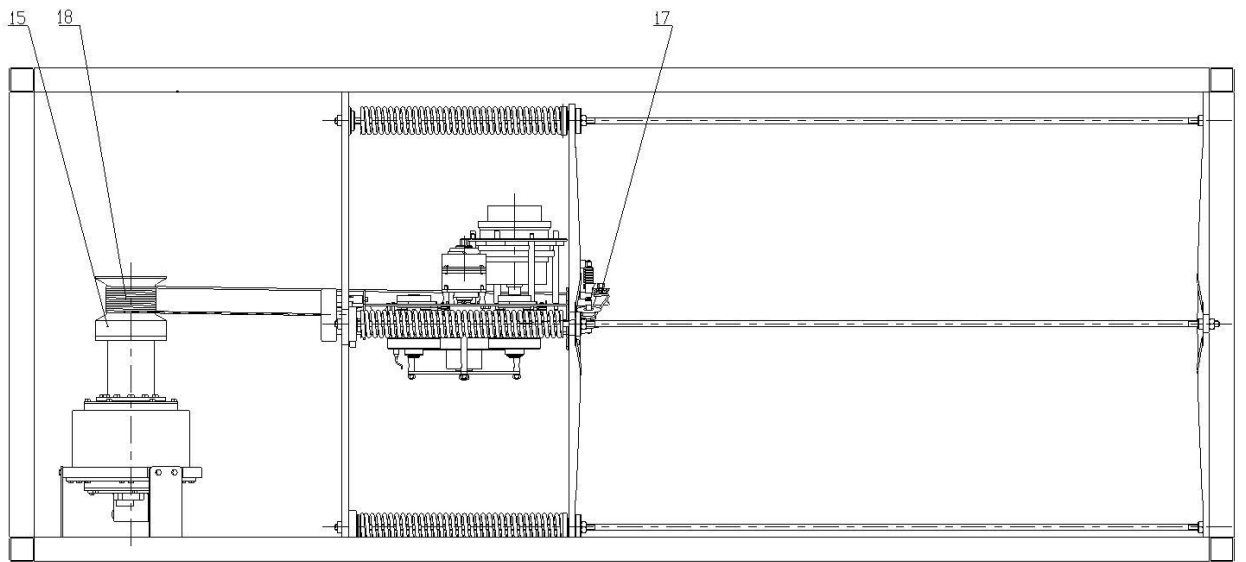


Рисунок 12 — Общая компоновка лабораторного стенда (вид сверху)

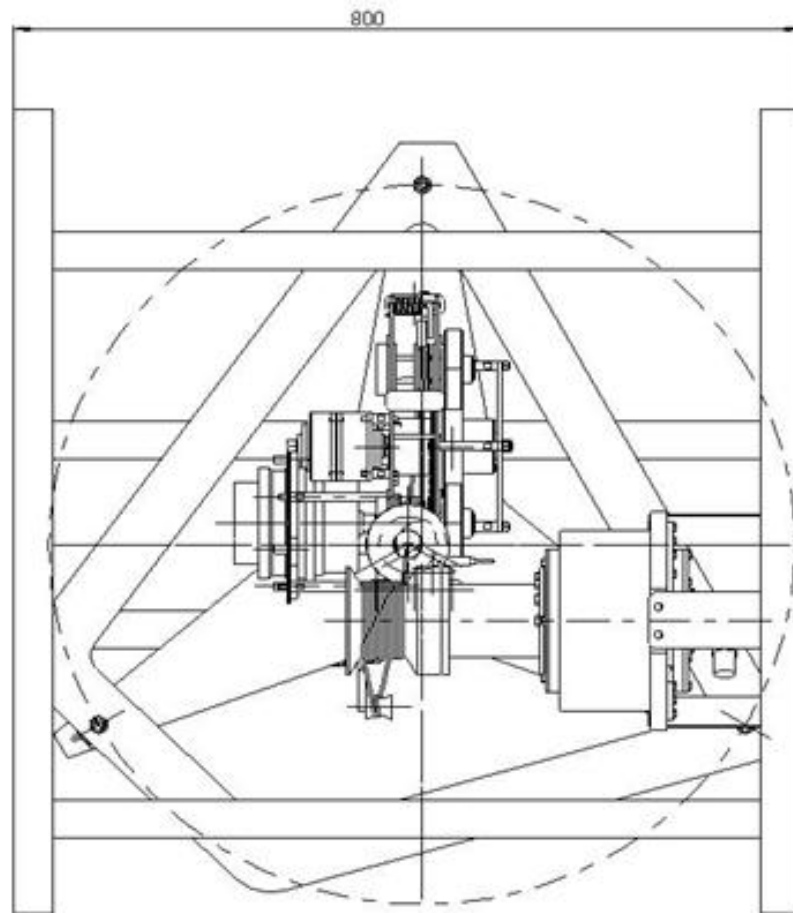


Рисунок 13 — Общая компоновка лабораторного стенда (вид слева)

Лабораторный стенд для отработки и исследования режимов работы управляемой тросовой лебедки состоит из внешнего привода поз. 1, макета устройства для управляемого выпуска троса поз. 2 и рамы поз. 3, на которой они закреплены. В состав внешнего привода входят:

- вентильный двигатель MST160A-0050-FT;
- кодовый датчик положения GDM02.1-2048;
- силовая секция HCS02.1E-W0012-A;
- секция управления СН-01.1С;
- ПК с программным обеспечением IndraWorksEngineeing и встроенным цифровым осциллографом.

Т а б л и ц а 1 —Характеристики двигателя MST160A-0050

Параметр	Единица измерения	Значение
Максимальный (пусковой) момент	Н·м	90
Номинальный момент	Н·м	35
Число пар полюсов	шт.	15
Число фаз	шт.	3
Максимальное напряжение питания	В	540
Максимальная частота вращения	рад/с	52
Номинальный ток	А	6,5
Номинальная мощность	Вт	1300
Потребляемая мощность	Вт	1800
Масса двигателя	кг	8
Момент инерции ротора	кг·м <sup>2</sup>	0,006
Внешний диаметр статора	мм	180
Активная длина пакета статора	мм	95
Диаметр ротора	мм	115,7
Диаметр внутренней втулки ротора	мм	80



Внешний привод обеспечивает протягивание троса в виде замкнутой петли, с различными режимами натяжения и скорости выпуска троса.

Протягивание троса поз. 18 на рисунке 12 осуществляется по принципу яхтенной лебедки. На барабан поз. 15 рисунка 12 наматывается такое число витков троса, которое обеспечивает эффект самоторможения. Число витков зависит от коэффициента трения пары трос – барабан.

После барабана трос проходит через подпружиненный ролик поз. 12, направляющий ролик поз. 13 и возвращается на вход устройства для управляемого выпуска троса.

Для управляемого выпуска троса макет устройства оборудован управляемым приводом на базе бесколлекторного электродвигателя ДБ–100, который развивает крутящий момент 5 Н·м и с частотой вращения до 500 об/мин.

При отработке режимов малого натяжения троса внешний привод начинает вращение барабана по различным законам изменения ускорения. Это может быть равноускоренное вращение с различными по величине максимальными скоростями. При этом привод лебедки, получив сигнал от датчика малого натяжения, должен начать ускоренное вращение, поддерживая минимально допустимое натяжение троса, исключая провисание троса. При уменьшении силы натяжения троса меньше допустимой величины, о чем в систему управления поступает информация от датчика малого натяжения, скорость вращения привода лебедки должна начать снижаться до тех пор, пока сила натяжения не увеличится до минимально допустимого значения. При этом привод лебедки вновь начинает ускоренное вращение, и цикл управления выпуском троса повторяется.

Для моделирования внештатных ситуаций можно запрограммировать резкие изменения величины ускорения внешнего привода. При этом проверяется работа устройства при появлении непредвиденных рывков или резком уменьшении силы натяжения троса, а именно – реакция устройства на скачкообразные изменения силы натяжения троса, способность устройства поглощать (демпфировать) резкие рывки троса. В процессе этих испытаний должна определиться оптимальная величина жесткости пружин подвески устройства, а также характер затухающих колебаний системы в зависимости от силы натяжения троса.

В режиме резкого снижения силы натяжения троса проверяется инерционность системы. При этом, установив стенд в вертикальном положении, можно моделировать частичное обезвешивание устройства. В процессе экспериментов необходимо определить

величину и характер (место образования) петли троса и способность системы к самовосстановлению при появлении силы натяжения троса.

Для более детального изучения инерционности системы можно преобразовать стенд таким образом, чтобы трос проходил через блок, установленный под потолком помещения, а на конце троса закрепить груз. Изменяя массу груза можно устанавливать различные силы натяжения троса в процессе его выпуска. При столкновении груза с землей происходит резкое изменение силы натяжения троса до нуля. Таким способом можно более точно исследовать инерционность системы выпуска троса, исключив влияние инерции внешнего привода стенда. На первом этапе устройство для управляемого выпуска троса оборудовано одним приводом, поэтому величина выбега троса будет зависеть от тормозного момента, развиваемого установленным на нем двигателем. В дальнейшем, при необходимости, можно оснастить устройство двумя, тремя или четырьмя приводами, чтобы получить информацию об изменении динамики торможения устройства с использованием нескольких двигателей, работающих параллельно. В результате должно быть выбрано оптимальное число приводов в устройстве и тип электродвигателя.

Для отработки режима поддержания заданной скорости выпуска троса внешний привод необходимо вывести на скорость вращения, превышающую заданную. При этом привод устройства переходит в режим динамического торможения и, преодолевая крутящий момент внешнего привода, должен обеспечить поддержание заданной скорости выпуска троса. В процессе исследования необходимо изучить тепловыделение на обмотках двигателя и внешнего реостата, через который будет проходить ток. В этом режиме стенд должен работать несколько часов подряд, что позволит изучить процесс выхода устройства на установившуюся температуру и стабильность работы в этом режиме.

Режим штатного торможения (в промежуточных точках выпуска троса и в конце выпуска) обеспечивается включением привода устройства в режим динамического торможения по заранее заданному закону увеличения тормозного момента. В процессе исследования необходимо проверить различные законы торможения, обеспечить контроль длины троса на участке торможения и подобрать оптимальные режимы.

Длина и скорость выпуска троса контролируется по информации с вращающегося трансформатора, установленного в приводе лебедки. Сила натяжения троса контролируется по информации с тензодатчика лебедки.

## Оборудование

Перечень оборудования, используемого для проведения лабораторных работ, представлен в таблице 2.

Таблица 2

Наименование	Краткие технические характеристики СИ	Параметры измеряемых физических величин, допуск (погрешность) на их отклонение	Обозначение в схеме
Рулетка ГОСТ 7502-98	Шкала рулетки до 5 м, ц.д. 1мм	Длина от 900 до 3000 мм с точностью $\pm 2$ мм	
Секундомер ручной «Агат» СОСпр-26-000 4295В ГОСТ 5072-79	Емкость шкалы: -секундной -60 ц.д. 0,2 с; - минутной – 60 мин, ц.д. 1 мин, погрешность $\pm 0.8$ с, кл. точности 3	Точность хода: не хуже 1 с/мин  не хуже 1 мин/ч	
Вольтамперметр М2015 ТУ 25-04-2436-74	Постоянный ток до 30 А класс точности 0,2	Постоянный ток до 10 А	РА1, РА2
Источник питания Б5-47 3.233.220 ТУ	Напряжение от 0,1 до 30 В; ток от 0 до 3 А; нестабильность $U \pm 0,01$ %	Напряжение от 20 В до 25 В; ток до 3 А	G1
Источник питания STATRON 3254.1	Напряжение от 0 до 36 В; ток от 0 до 22 А	Напряжение от 20 В до 25 В; ток до 20 А	G2

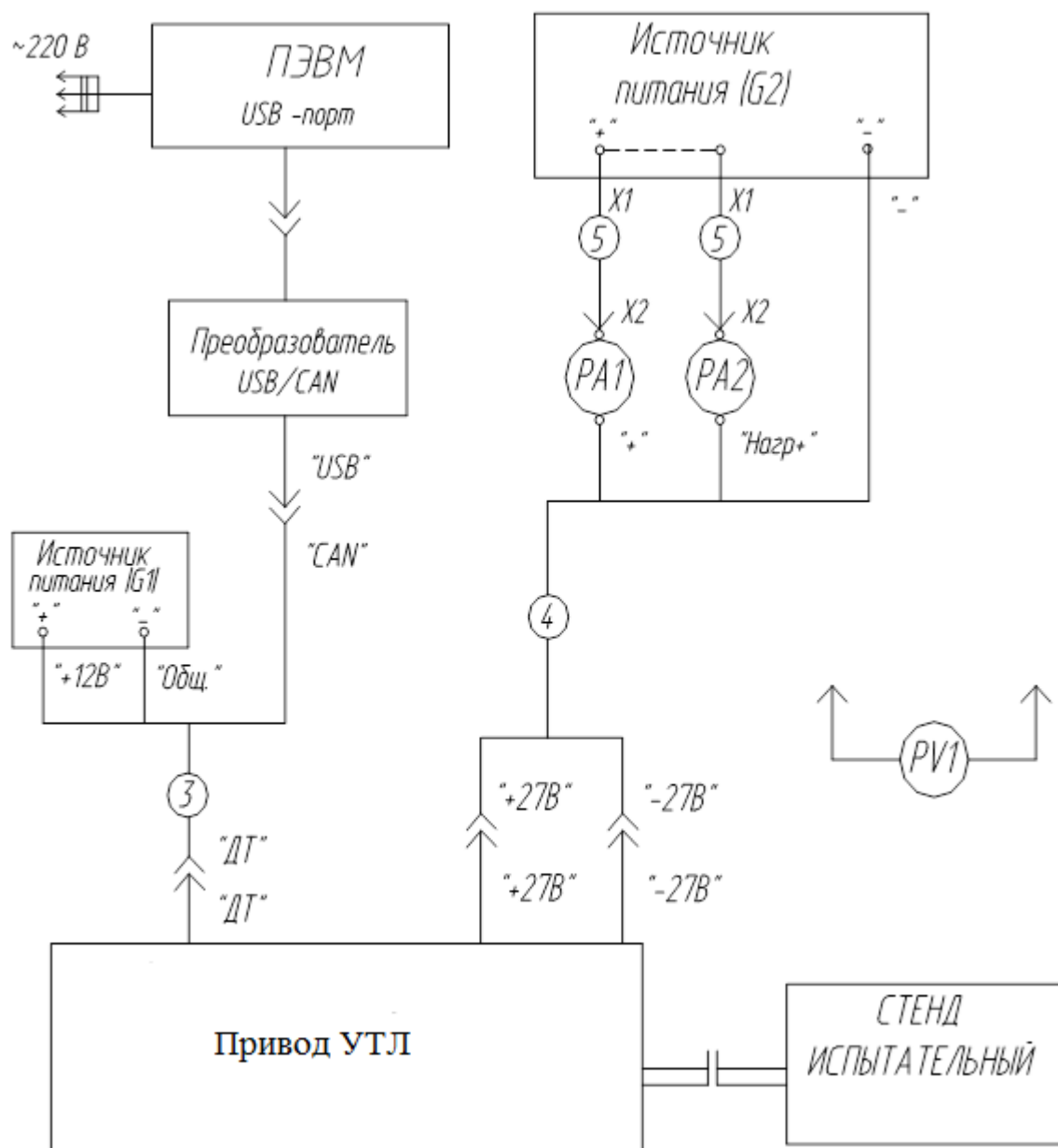


Рисунок 14 — Схема электрическая для проверки работоспособности УТЛ

## *Правила техники безопасности*

- Лабораторные работы проводятся под наблюдением преподавателя или лаборанта. Начинать работу можно только после ознакомления с методикой ее проведения. Включать установки в сеть, проводить исследования связанные с работой на установках под руководством учебно-вспомогательного персонала или преподавателя. Студентам запрещается самостоятельно включать и выключать машины, проводить какие-либо операции на них и оставлять их без наблюдения в процессе работы.
- К выполнению лабораторных работ студенты допускаются только после прослушивания инструктажа по технике безопасности и противопожарным мерам. После инструктажа каждый студент расписывается в специальном журнале.
- При проведении лабораторных испытаний нельзя находиться в непосредственной близости от движущихся частей машины.
- Перед включением установок необходимо проверить заземление и положение тумблеров на «выкл.».
- При работе на машинах и установках нельзя прикасаться к токоведущим частям, а также к электрощитам и электрорубильникам.
- Во избежание ожогов не прикасаться тросу. Не трогать вращающиеся детали установок. Запрещается работать неисправным инструментом. Прежде чем начать какие-либо действия, убедитесь, что они не принесут вреда окружающим.
- Запрещается проводить ремонтные мероприятия, устранять неисправности электрооборудования и чистить машины и установки во время работы или когда они находятся под напряжением.
- После завершения работы студенты обязаны собрать измерительные инструменты, методические пособия и сдать их учебному лаборанту. В случае потери пособий, порчи инструментов или испытательных приборов студенты несут материальную ответственность за них.
- При нарушении требований техники безопасности студент отстраняется от дальнейшего выполнения лабораторной работы. Если действия студента не привели к серьезным последствиям, то он может быть вновь допущен к лабораторным занятиям после повторного инструктажа.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. ЗНАКОМСТВО СО СТЕНДОМ. ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ.

## Цель работы

Ознакомиться с лабораторным стендом, проверить работоспособность его элементов.

## Порядок выполнения

### 1. Проверка работоспособности:

1.1. Включите источник питания G2. Установите с помощью вольтметра PV1 на выходе источника питания напряжение  $(24,0 \pm 0,5)$  В. Выключите источник питания G2. Включите источник питания G1. Установите с помощью вольтметра PV1 на выходе источника питания напряжение  $(12,0 \pm 0,5)$  В. Выключите источник питания G1.

1.2. Соберите схему в соответствии с рисунком 24. К «+» источника питания G2 подключите вольтамперметр PA1.

1.3. Включите питание ПЭВМ. Включите источники питания G1 и G2.

1.4. Подайте на привод полное напряжение питания (24В), тем самым задав скорость вращения вала двигателя 500 об/мин. Визуально убедитесь, что двигатель начал совершать движение. Дождитесь, пока лебёдка совершит один полный оборот. Затем отключите двигатель от управления.

1.5. Выключите источники питания G1 и G2, выключите ПЭВМ.

1.6. Результаты испытания считаются положительными, если лебёдка вращается, и это движение происходит плавно.

### 2. Проверка потребляемой мощности:

2.1. Повторите п.п. 1.1 – 1.5.

2.2. Отключите PA1 от источника питания, подключите к «+» источника питания G2 вольтамперметр PA2, включите G2 и замерьте ток.

2.3. Вычислите мощность нагревателей по формуле

$$P = UI, \quad (1)$$

где  $U$  – напряжение на выходе источника питания  $G2$ ,  $I$  – величина тока, замеренная вольтамперметром PA2.

2.4. Выключите источник питания  $G2$ .

3. Проверка частоты вращения в номинальном режиме:

3.1. Перед началом испытания трос должен быть размотан так, чтобы длина его свободной части составляла 50м.

3.2. Повторите п.п. 1.1 – 1.3.

3.3. Промаркируйте трос цветной краской в месте выхода его с УТЛ.

3.4. Одновременно запустите привод УТЛ в номинальном режиме и секундомер.

3.5. Остановите привод через 30с.

3.6. Повторите п. 3.3.

3.7. Выключите источники питания  $G1$  и  $G2$ , выключите ПЭВМ.

3.8. Измерьте длину троса между двумя отметками с помощью рулетки.

3.9. Вычислите частоту вращения лебёдки в об/мин по формуле:

$$\Omega = \frac{30 \cdot l \cdot R}{\pi \cdot t}, \quad (2)$$

где  $l$  – измеренная длина троса,  $R$  – радиус лебёдки,  $t$  – промежуток времени, в течение которого происходило вращение лебёдки,  $t = 30$ с.

### **Требования к содержанию отчета**

Отчет составляется индивидуально каждым студентом. Для составления отчета и проведения лабораторной работы необходимо завести журнал, в котором по каждому виду исследований фиксируются конкретные величины параметров, полученных во время работы.

Провести анализ результатов исследований, сделать выводы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. ОТРАБОТКА РЕЖИМА МАЛОГО НАТЯЖЕНИЯ ТРОСА.

### Цель работы

Отработать режим малого натяжения троса на лабораторном стенде.

### Порядок выполнения

Для отработки режимов малого натяжения троса внешний привод должен обеспечивать протягивание троса по различным законам ускорения:

- При движении с равноускоренным вращением внешнего привода скорость выпуска троса должна увеличиваться от 0 м/с до 2,5 м/с, а ускорение должно обеспечиваться от  $0,05 \text{ м/с}^2$  до  $2,5 \text{ м/с}^2$ .
- При движении с равнозамедленным вращением внешнего привода скорость выпуска троса должна уменьшаться от 2,5 м/с до 0 м/с, а ускорение должно обеспечиваться от  $-0,05 \text{ м/с}^2$  до  $-2,5 \text{ м/с}^2$ .

1. Включите источник питания G2. Установите с помощью вольтметра PV1 на выходе источника питания напряжение  $(24,0 \pm 0,5) \text{ В}$ . Выключите источник питания G2. Включите источник питания G1. Установите с помощью вольтметра PV1 на выходе источника питания напряжение  $(12,0 \pm 0,5) \text{ В}$ . Выключите источник питания G1.

2. Соберите схему в соответствии с рисунком 24. К «+» источника питания G2 подключите вольтамперметр PA1.

3. Включите питание ПЭВМ. Включите источники питания G1 и G2.

4. С помощью ПЭВМ, подавать на привод напряжение питания таким образом, чтобы ускорение выпуска троса плавно менялось от  $0,05 \text{ м/с}^2$  до  $2,5 \text{ м/с}^2$ . Остановить систему при достижении скорости выпуска троса до значения 2,5 м/с.

5. С помощью ПЭВМ, Подать на привод напряжение питания таким образом, чтобы скорость выпуска троса была равна 2,5 м/с. Затем изменить характер управления приводом, подавая напряжение питания таким образом, чтобы ускорение выпуска троса плавно менялось от  $-0,05 \text{ м/с}^2$  до  $-2,5 \text{ м/с}^2$ . Дождаться остановки.

6. Выключите источники питания G1 и G2, выключите ПЭВМ.



### **Требования к содержанию отчета**

Отчет составляется индивидуально каждым студентом. Составить графики зависимости натяжения троса от ускорения и скорости выпуска троса.

Провести анализ результатов исследований, сделать выводы.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. ОТРАБОТКА РЕЖИМА ПОДДЕРЖАНИЯ ЗАДАНОЙ СКОРОСТИ ВЫПУСКА ТРОСА.**

### **Цель работы**

Отработать режим поддержания заданной скорости выпуска троса на лабораторном стенде. Исследовать температурный режим работы.

### **Порядок выполнения**

Для отработки режима поддержания заданной скорости выпуска троса внешний привод должен обеспечивать протягивание троса со скоростями выпуска троса от 0,5 м/с до 3 м/с. В режиме поддержания заданной скорости выпуска троса внешний привод стенда должен работать не менее 8 часов подряд. Для простоты проведения лабораторной работы система заранее нагревается до установившихся температур.

1. Измерить показания датчика температуры УТЛ.
2. Включить дополнительные нагреватели и разогреть систему выше допустимой температуры. Зафиксировать факт экстренной остановки системы при перегреве.
3. Выключите источники питания G1 и G2, выключите ПЭВМ.

### **Требования к содержанию отчета**

Отчет составляется индивидуально каждым студентом. Провести анализ результатов исследований, сделать выводы.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. ОТРАБОТКА РЕЖИМА ШТАТНОГО ТОРМОЖЕНИЯ.**

### **Цель работы**

Отработать режим штатного торможения на лабораторном стенде.

### **Порядок выполнения**

Для отработки режима штатного торможения выпуска троса внешний привод должен обеспечивать протягивание троса со следующими параметрами:

- скорость выпуска троса должна уменьшаться от 2,5 м/с до 0м/с;
- должно обеспечиваться ускорение от  $-0,05\text{ м/с}^2$  до  $-2,5\text{ м/с}^2$ ;
- крутящий момент на приводах в этом режиме не менее 5 Н·м.

1. Включите источник питания G2. Установите с помощью вольтметра PV1 на выходе источника питания напряжение  $(24,0 \pm 0,5)$  В. Выключите источник питания G2. Включите источник питания G1. Установите с помощью вольтметра PV1 на выходе источника питания напряжение  $(12,0 \pm 0,5)$  В. Выключите источник питания G1.

2. Соберите схему в соответствии с рисунком 24. К «+» источника питания G2 подключите вольтамперметр PA1.

3. Включите питание ПЭВМ. Включите источники питания G1 и G2.

4. С помощью ПЭВМ, подавать на привод напряжение питания таким образом, чтобы ускорение выпуска троса плавно менялось от  $-0,05\text{ м/с}^2$  до  $-2,5\text{ м/с}^2$ . Контролировать крутящий момент в период работы системы. Дождаться остановки.

5. Выключите источники питания G1 и G2, выключите ПЭВМ.

### **Требования к содержанию отчета**

Отчет составляется индивидуально каждым студентом. Провести анализ результатов исследований, сделать выводы.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5. ОТРАБОТКА РЕЖИМОВ ВНЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ.**

### **Цель работы**

Отработать режимы внештатных ситуаций.

### **Порядок выполнения**

При работе в режиме с периодически повторяющимися рывками сила натяжения троса должна быть от 5 Н до 150 Н, стенд должен обеспечивать увеличение силы натяжения до 450 Н в течение 0,5 с.

При работе в режиме резкого снижения силы натяжения троса сила натяжения троса должна быть от 5 Н до 150 Н, стенд должен обеспечивать уменьшение силы натяжения троса до 0 Н в течение 0,3 с.

1. Включите источник питания G2. Установите с помощью вольтметра PV1 на выходе источника питания напряжение  $(24,0 \pm 0,5)$  В. Выключите источник питания G2. Включите источник питания G1. Установите с помощью вольтметра PV1 на выходе источника питания напряжение  $(12,0 \pm 0,5)$  В. Выключите источник питания G1.

2. Соберите схему в соответствии с рисунком 24. К «+» источника питания G2 подключите вольтамперметр PA1.

3. Включите питание ПЭВМ. Включите источники питания G1 и G2.

4. Во время штатной работы системы, создать условия внештатной ситуации, увеличив силу натяжения троса до 450 Н или уменьшив ее до 0 Н. По факту отработки внештатной ситуации сделать выводы.

5. Выключите источники питания G1 и G2, выключите ПЭВМ.

### **Требования к содержанию отчета**

Отчет составляется индивидуально каждым студентом. Провести анализ результатов исследований, сделать выводы.