

УДК 681.5

ББК 39.53

DOI 10.51955/2312-1327_2025_2_6

ГИДРОПРИВОД КВАДРОКОПТЕРА КАК ОБЪЕКТ РЕГУЛИРОВАНИЯ

*Владимир Александрович Целищев,
orcid.org/0009-0002-1329-0732,
доктор технических наук, профессор
Уфимский университет науки и технологий,
ул. Заки Валиди, д. 32
Уфа, 450076, Россия
pgl.ugatu@mail.ru*

Аннотация. Приведены особенности развития отечественных беспилотных летательных аппаратов. Выявлены основные проблемы технологической эволюции грузовых квадрокоптеров. Представлена концепция развития беспилотных грузовых многоцелевых многовинтовых летательных аппаратов, отражающая систему использования гидравлической трансмиссии на примере квадрокоптера. Рассматриваются вопросы точности, устойчивости, управляемости системы автоматического управления и регулирования гидравлической трансмиссии грузового квадрокоптера. Представлено возможное описание гидропривода несущих винтов квадрокоптера как объекта регулирования. Определены силы, действующие на квадрокоптер в полете. Выявлены и описаны управляющие, возмущающие и корректирующие воздействия на систему автоматического управления и регулирования гидравлической трансмиссии квадрокоптера. Выполнен анализ возможности использования авиационных поршневых двигателей для привода трансмиссии грузового квадрокоптера, объемных аксиально-плунжерных насосов и гидромоторов. Показаны новые схемные решения гидромеханических устройств коррекции статических и динамических характеристик. Представлены схемные решения регуляторов гидравлической трансмиссии: регулятор давления, регулятор динамического давления, регулятор скорости, регулятор мощности, LS-регулятор. Описаны преимущества использования регуляторов. Предлагаемый гидромеханический регулятор с LS-регулированием позволяет улучшить устойчивость полета и энергетическую эффективность многовинтового летательного аппарата.

Ключевые слова: грузовой квадрокоптер, гидравлическая трансмиссия, система управления трансмиссией, гидромеханические регуляторы характеристик.

QUADCOPTER HYDRAULIC DRIVE AS AN OBJECT OF REGULATION

*Vladimir A. Tselishchev,
orcid.org/0009-0002-1329-0732,
Doctor of Technical Sciences, Professor
Ufa University of Science and Technology,
32, Zaki Validi street
Ufa, 450076, Russia
pgl.ugatu@mail.ru*

Abstract. The features of the development of domestic unmanned aerial vehicles are given. The main problems of the technological evolution of cargo quadcopters have been revealed. The concept of the development of unmanned cargo multi-purpose multi-propeller flying aircraft is presented, reflecting the system of using a hydraulic transmission using the example of a quadcopter. The issues of accuracy, stability, controllability of the automatic control system and regulation of the

hydraulic transmission of a cargo quadcopter are considered. A possible description of the hydraulic drive of the quadcopter rotors as an object of regulation is presented. The forces acting on the quadcopter in flight have been determined. The controlling, disturbing and corrective effects on the automatic control and regulation system of the hydraulic transmission of the quadcopter are identified and described. The analysis of the possibility of using aircraft piston engines to drive the transmission of a cargo quadcopter, volumetric axial plunger pumps and hydraulic motors has been performed. New circuit solutions for hydromechanical devices for correcting static and dynamic characteristics are shown. Schematic solutions of hydraulic transmission regulators are presented: pressure regulator, dynamic pressure regulator, speed regulator, power regulator, LS regulator. The advantages of using regulators are described. The proposed hydro-mechanical controller with LS-regulation makes it possible to improve flight stability and energy efficiency of a multi-rotor aircraft.

Keywords: cargo quadcopter, hydraulic transmission, transmission control system, hydromechanical regulators of characteristics.

Введение

В последние годы число отечественных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) значительно выросло, а к 2025 г. прогнозируется 20-кратное увеличение по отношению к 2017 г. В настоящее время в России насчитывается более 70 разработчиков и компаний-производителей БПЛА, однако доля их продаж на отечественном рынке составляет не более 15% от общего объема. К числу ключевых отечественных производителей БПЛА с наибольшим количеством коммерческих моделей следует отнести: АО «Вертолеты России», АО НПП «Радар ммс», ООО «Аэромакс», ООО «Геоскан», ООО «Аэрокон», ГК «Кронштадт», КБ «Русь», Zala Aero Group и др. [Викулов, 2023].

В связи с большими территориями РФ особое внимание уделяется развитию тяжелых и средних БПЛА. Наша страна имеет обширную территорию с многочисленными районами, добраться до которых можно только по воздуху. К концу 2022 г. флот российского оператора беспилотных систем составлял 6 ед. тяжелых и средних беспилотников, а к 2030 г. должен уже превысить 1 тыс. ед.

На текущий момент в России не существует беспилотного летательного аппарата, который мог бы выполнять грузовые перевозки весом от 100 до 500 кг при дальности полета без дозаправки более 300 км. Исследование спроса и развития рынка квадрокоптеров с большой грузоподъемностью показывает вдохновляющие прогнозы, полагая, что к 2025-2027 гг. каждый четвертый транспорт будет беспилотным.

Сложности эксплуатации грузовых БПЛА определяются техническими проблемами обеспечения безопасности и длительности полета, в том числе: обеспечение безопасности сохранения груза созданием сложности отслеживания местонахождения БПЛА; обеспечение большой длительности полета со значительным весом груза; требования высокой надежности БПЛА на всем протяжении полета и обеспечения несложного обслуживания для обратного полета; желательное применение при любых погодных условиях, включая обильные осадки и сильный ветер. Таким образом, в грузовых БПЛА особые требования предъявляются к мощности приводного двигателя, способности его работать длительное время с возможностью дозаправки, повышенные требования к трансмиссии привода вращения винтов.

Следует упомянуть о развитии в последнее время существенного интереса к гидравлическим трансмиссиям многовинтовых летательных аппаратов ведущими зарубежными компаниями Flowcopter, Urban Aeronautics Cormorant.

Концепция развития беспилотных грузовых многоцелевых многовинтовых летательных аппаратов, отражающая систему использования гидравлической трансмиссии на примере квадрокоптера, предложена в данной статье.

Материалы и методы

Гидравлический привод несущих винтов квадрокоптера

Анализ научно-технической литературы и, главное, результатов экспериментальной отработки показывает, что наиболее предпочтительной схемой привода несущих винтов грузового квадрокоптера является схема с одним приводным двигателем и установленным в противовес на конструкции объемным насосом [Викулов, 2023; Система управления..., 2014]. Рациональная гидросистема управления полетом, взлетом и посадкой грузового квадрокоптера содержит четыре гидромотора привода несущих винтов, работу и управление которых обеспечивают насосная станция с блоком ее управления, системы управления гидромоторами и блок системы безопасности гидропривода в целом (рис. 1).

Энергетическую часть грузового квадрокоптера как источника мощности привода несущих винтов предполагается оснастить авиационным двигателем внутреннего сгорания, предназначенного для организации работы объемного аксиально-поршневого насоса.

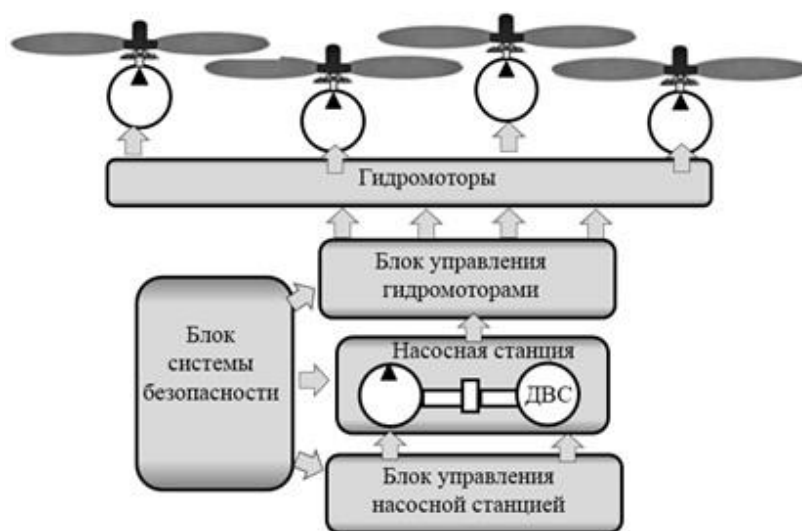


Рисунок 1 – Схема гидравлической трансмиссии квадрокоптера

Наиболее перспективными решениями для гидравлической трансмиссии квадрокоптера выглядят двигатели Hirth H30 ES (Германия), Jabiru 3300 Aero Engine (Австралия), Lycoming IO390-X (США), М-9Ф (Россия), Rotax 914 UL DCDI, Rotax 916 iS (Австрия), RED A03 (Германия), Austro Engine AE300 (Австрия), Centurion 4.0 (Германия), SMA SR-305 E (Франция). Эти двигатели

могут быть как бензиновые, так и дизельные (рис. 2). Двигатели способны выдавать мощность от 100 до 500 л.с. при массе 50-200 кг, обороты вала от 2200 до 6500 об/мин, вырабатывая ресурс до 2000 часов, как правило имеющие электрический стартер и электронную систему управления EMS.

Следует упомянуть, что гидравлические агрегаты трансмиссии для обеспечения минимальных массогабаритных характеристик желательно выбирать авиационной направленности. Так, в качестве насосов производства Российской Федерации можно рекомендовать линейку аксиально-поршневых насосов НП-25, НП-89, НП-72, НП-34, НП-112, НП-70, НП-26, НП-103-2, НП-96, НП-128, НП-160, НП-115, НП-108, НП-113, НП-123 (рис. 3). Насосы имеют производительность от 17 до 250 л/мин, выдают давление порядка 210 и более атмосфер, имеют скорость вращения вала от 2200 до 5700 об/мин при весе от 4,4 до 21 кг. Все насосы способны работать при низких температурах и имеют многолетний опыт применения в гидросистемах летательных аппаратов.



Рисунок 2 – Авиационные поршневые двигатели для привода трансмиссии грузового квадрокоптера

Для привода несущих винтов квадрокоптера можно использовать гидромоторы типа ГМ-48 и ГМ-54 (Авиационная корпорация «Рубин»), ГМ-36/1 ПМ, Серия 303, регулируемый (ОАО «Пневмостроймашина»).



Рисунок 3 – Насосы и гидромоторы для гидросистемы квадрокоптера

В гидросистемах летательных аппаратов с целью уменьшения массогабаритных характеристик агрегатов традиционно используют давление 21 МПа, что целесообразно применить и в гидравлической трансмиссии квадрокоптера.

Остальные гидравлические агрегаты и бак для хранения рабочей жидкости подбираются из опыта использования гидросистем управления полетом летательных аппаратов. В качестве базового варианта компоновки гидравлической трансмиссии квадрокоптера может быть использована предложенная автором статьи [Патент на полезную..., 2021] схема привода с простым пропорциональным регулированием объемных гидромашин (рис. 4).

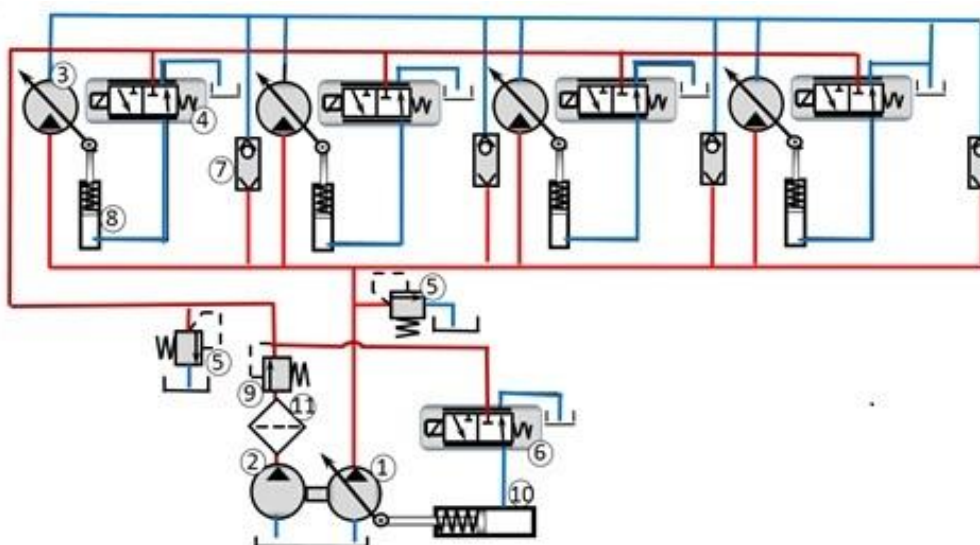


Рисунок 4 – Схема квадрокоптера с гидравлической трансмиссией

Насосная станция квадрокоптера содержит основной насос 1 и вспомогательный насос 2, приводимые в работу авиационным двигателем

внутреннего сгорания. Основной насос 1 регулируемой производительности обеспечивает управляемую оператором или блоком управления подачу рабочей жидкости к гидромоторам 3 привода несущих винтов квадрокоптера, обеспечивая управляемую скорость полета или подъема/опускания летательного аппарата. Пропорциональное управление характерным рабочим объемом насоса 1 обеспечивается многопозиционным электрогидрораспределителем 6 с помощью цилиндра управления 10. Направление полета квадрокоптера определяется частотой вращения определенных несущих винтов, которую задают гидромоторы 3. Регулирование частоты вращения гидромоторов 3 осуществляется подачей определенного управляющего сигнала на многопозиционные электрогидрораспределители 4. Вспомогательный насос 2 с помощью редукционного клапана 9 поддерживает в системе командного давления величину 3-5 МПа. Это командное давление подается к гидрораспределителям 6 и 4 управления характерным рабочим объемом насоса 1 и гидромоторов 3.

Разомкнутая система циркуляции рабочей жидкости в гидроприводе и система регулирования насоса позволят решить вопросы тепломассообмена и оптимизации энергетических характеристик насосной станции. Систему безопасности гидропривода и фильтрации рабочей жидкости представляют предохранительные клапаны 5 и фильтр тонкой очистки 11, установленный в нагнетательной магистрали насоса. Использование объемного способа регулирования подачи насосной станции обеспечивает высокий КПД гидросистемы и низкие тепловые потери, позволяющие избегать применения теплообменника. Использование дроссельного способа регулирования характерных рабочих объемов насоса и гидромоторов позволяет обеспечить высокую точность управления.

Дискуссия

На текущий момент в России не существует беспилотного летательного аппарата, который мог бы выполнять грузовые перевозки весом от 100 до 500 кг на расстоянии более 100 км. Подобная техника востребована как на гражданском рынке, так и для военного назначения. Причём в последнем случае она была бы по-настоящему бесценной. Следует отметить, что в последние годы за рубежом существенно активизировались разработки в этих направлениях.

Грузовой тяжёлый беспилотник вертикального взлета компании Braeron, который разрабатывался для перевозки грузов, может быть использован для пассажирских перевозок. Дрон Braeron позволяет переносить одного взрослого человека на расстояние до 40 км, при этом оператор беспилотника может находиться на удалении, вне опасной зоны. Беспилотник грузоподъемностью до 200 кг может преодолевать до 200 км. Заявлено, что дрон способен работать при температуре от -40 до +40, а двигатели используют обычный автомобильный бензин АИ-95.

Примером частичного использования гидравлических систем в грузовых БЛА может служить Cormorant. Urban Aeronautics Cormorant – израильский шестиметровый беспилотный «летающий автомобиль» с вертикальным взлетом

и посадкой. При весе в 1,5 т Cormorant способен нести до 500 кг (или до 635 кг) полезной нагрузки и развивать скорость до 185 км/ч. По некоторым данным, он может находиться в воздухе до 5 ч. Поднимается в воздух благодаря двум роторам в кольцевых обтекателях. Автономная система управления позволяет машине самостоятельно взлетать, перемещаться по составленному маршруту, выбирать место для посадки и приземляться. Особенностью работы системы управления лопастями является использование двухканальной гидравлической системы управления шагом ротора двигателя.

Многовинтовые летательные аппараты с гидравлической трансмиссией рассматриваются в технической литературе исключительно в качестве альтернативы при создании грузовых аппаратов. Техническая реализация грузовых квадрокоптеров с гидравлической трансмиссией представлена компанией FlowCopter. Успешные испытания FS10 FlowCopter продемонстрировали высокую энергоэффективность квадрокоптера с гидравлической трансмиссией и успешность концепции развития грузовых многовинтовых летательных аппаратов

Несмотря на преимущества энергомассового совершенства, дальности полета, гидравлические трансмиссии многовинтовых грузовых летательных аппаратов с трудом завоевывают рынок. Прежде всего это поясняется большим давлением со стороны ведущих электротехнических компаний попытками электрификации летательных аппаратов.

Исследование возможностей и перспектив развития гидравлической трансмиссии грузовых многовинтовых летательных аппаратов на примере квадрокоптера с использованием различных электрогидравлических систем управления и регулирования полетом с компенсацией внешних воздействий является актуальной темой и подлежит детальному изучению.

Результаты

Грузовой квадрокоптер с гидравлическим приводом как объект регулирования

На рис. 4 была приведена схема гидропривода квадрокоптера с пропорциональным управлением. Эту схему предлагается здесь взять за базовый вариант при разработке направлений совершенствования. Конечно, можно избежать использования вспомогательного насоса, осуществив питание линии командного давления за счет основного насоса при использовании редукционного клапана. Можно рассмотреть вариант размещения фильтра в сливной магистрали, использование бака закрытого типа с поддавливанием. Рассмотреть вариант модернизации схемы на предмет обеспечения запуска в работу гидросистемы в условиях холодного климата и т.д. и т.п. Но базовая часть с пропорциональным командным дистанционным управлением производительностью насоса и оборотами гидромоторов останется в качестве основного варианта. Функциональная схема системы управления гидравлической трансмиссией квадрокоптера показана на рис. 5. Дистанционно контролируемый блок управления квадрокоптера осуществляет на определенном режиме полета (обеспечивается величиной подачи насоса) подачу

командных сигналов на электрогидравлические усилители (многопозиционные электрогидрораспределители). Те, в свою очередь, формируют управляющие воздействия на гидромоторы привода несущих винтов, изменяя по команде частоту вращения и определяя направление полета квадрокоптера. Обратная связь, определяющая исполнение команды управления, передается на блок управления, внося, при необходимости, корректирующее воздействие.



Рисунок 5 – Функциональная схема системы управления квадрокоптера

Безусловно, на начальной стадии освоения грузовых квадрокоптеров с гидравлической трансмиссией прямое и непосредственное управление гидромоторами привода несущих винтов может оказаться приемлемым. Но, по мере накопления опыта эксплуатации, следует сформулировать и направления совершенствования трансмиссии.

Следует отметить следующие основные проблемы технологической эволюции грузовых квадрокоптеров: повышение удельной мощности приводного двигателя; обеспечение трансмиссии регуляторами адаптации к действующим нагрузкам; обеспечение работоспособности квадрокоптера в аварийных условиях, резервирование привода; обеспечение точности, устойчивости, управляемости гидравлической системы привода несущих винтов.

В грузовом квадрокоптере с относительно большой инерцией подвижных частей трансмиссии возникают дополнительные требования к точности, устойчивости и управляемости. Анализ схемных решений реализации квадрокоптера с гидравлической трансмиссией позволяет определить направления их совершенствования в части использования объемных гидромашин, аналогичные [Высокооборотный..., 2024]: повышение удельной мощности насосной станции за счет использования приводного двигателя внутреннего сгорания большой мощности и, соответственно, насоса;

обеспечение гидропривода квадрокоптера системой автоматического регулирования с регуляторами адаптации к реальным действующим нагрузкам; обеспечение работоспособности квадрокоптера в сложных климатических и аварийных условиях; обеспечение точности, устойчивости, управляемости систем автоматического управления и регулирования, динамической точности в области малых входных управляющих сигналов.

На рис. 6 представлена достаточно универсальная схема гидравлической трансмиссии квадрокоптера. Схема изображена на базе основных агрегатов квадрокоптера: приводного двигателя внутреннего сгорания, насоса и гидромоторов привода несущих винтов. Агрегаты безопасности и компенсации утечек при анализе работы гидравлической трансмиссии квадрокоптера на первом этапе исследования предполагается не учитывать.

Системы автоматического управления (САУ) и регулирования (САР) квадрокоптера в первом приближении допустимо разделить на управляющие воздействия, возмущающие воздействия, регулирующие воздействия и датчики информации о параметрах системы [Габуев и др., 2018; Berger et al., 2021; Kava, 2016; Saetti et al., 2022; Saetti et al., 2024; Scaramal et al., 2021; Shastry et al., 2020].

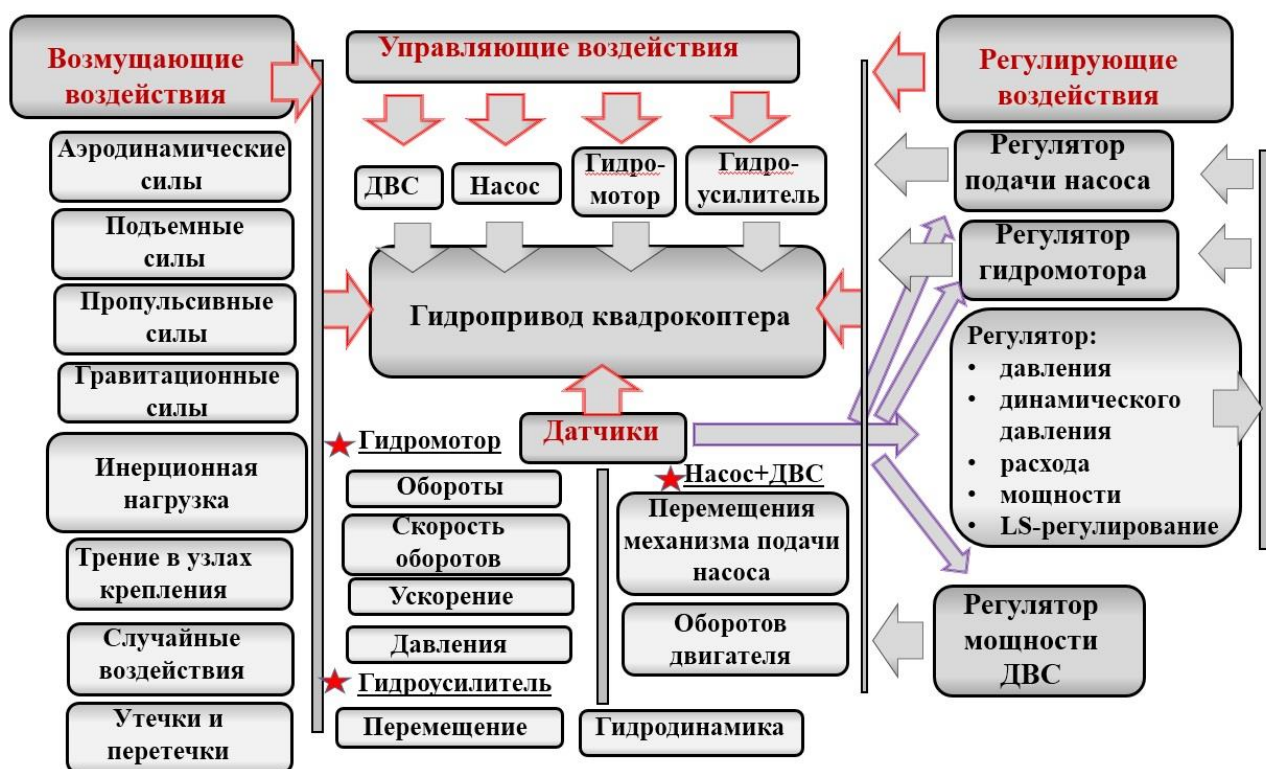


Рисунок 6 – Гидропривод квадрокоптера как объект регулирования

Управляющий контроллер (на рис. 6 не показан) вырабатывает сигналы на основе адаптации управляющих команд со стороны оператора, сбора информации с датчиков обратной связи, анализа и сигналы компенсации ошибок. Контроллер может формировать *управляющие воздействия* на приводной двигатель (изменяя его обороты за счет регулирования подачи топлива в камеру сгорания), на насос (изменяя производительность насоса за счет изменения характерного рабочего объема), на гидромоторы (изменяя

обороты выходного вала, а значит и несущих винтов, за счет изменения характерного рабочего объема), на гидроусилители (за счет изменения электрического сигнала на электромагниты распределителя и, тем самым, изменяя величину подачи рабочей жидкости от насоса к гидромотору). Обеспечение управления полетом, взлетом и посадкой квадрокоптера осуществляется в основном управляющими командами на электрогидравлические усилители. А скорость вращения несущих винтов (мощность квадрокоптера) определяется зачастую изменением производительности насоса.

Возмущающие воздействия по своей природе являются, как правило, негативными факторами. Представленный на рис. 6 перечень возмущающих воздействий не является окончательным и не определяет одновременное влияние на квадрокоптер. Энергетическая мощность гидравлической трансмиссии квадрокоптера, комплекс и величина возмущающих воздействий определяют управляемость и устойчивость системы на переходных режимах.

Возмущающие воздействия можно классифицировать по физической природе возникновения (аэродинамические, инерционные, силы тяготения, прочие внешние климатические и др. воздействия), по характеру приложения (поверхностные, массовые и смешанные), по длительности воздействия (статические и динамические), подъемные и пропульсивные (толкающие вперед) силы.

Безусловно, в качестве основной нагрузки на квадрокоптере выступает позиционная нагрузка, определяемая газодинамическим воздействием набегающего на винт квадрокоптера воздушного потока при совершении маневра (аэродинамические, пропульсивные и подъемные силы).

Взятая за основу анализа схема грузового квадрокоптера значительной мощности предполагает использование сравнительно больших массогабаритных несущих винтов, инерционная нагрузка которых способна оказывать существенное влияние на силы трения в узлах крепления механизмов шарнирных опор. Агрегаты гидросистемы также могут оказывать различные воздействия, включая зависимость утечек в гидромашинах от величины давления (нагрузок) на гидродвигателях.

Работа системы автоматического управления и регулирования грузового квадрокоптера основана на использовании информации с датчиков гидромоторов привода винтов (оборотов вала, его скорости и ускорения, перепада давлений), электрогидравлических усилителей управления гидромоторами (перемещение золотника), насоса и ДВС (перемещения механизма изменения рабочего объема насоса, оборотов приводного двигателя), гидравлической части трансмиссии. Информация о действительной нагрузке на гидромоторы привода винтов, выраженная величиной перепада давлений, способна передаваться на гидромеханические регуляторы (давления, динамического давления, мощности, расхода, чувствительности к нагрузке LS) и корректировать при необходимости подачу насоса или обороты гидромотора [Поляков и др., 2021].

Регуляторы САР трансмиссии квадрокоптера

Гидромеханические регуляторы гидравлической трансмиссии квадрокоптера обладают повышенной надежностью и не зависят от внешнего электромагнитного воздействия. Допустимо различать регуляторы давления и динамического давления, расхода, мощности и LS-регулирования.

Регулятор давления предназначен для поддержания насосом постоянного давления в гидравлической трансмиссии квадрокоптера независимо от нагрузок, действующих через несущие винта на гидромоторы их привода. Основанием для использования регулятора давления в гидравлической трансмиссии многовинтового летательного аппарата на примере квадрокоптера является: неустойчивая работа многодвигательного гидропривода на переходных режимах; значительное потребление мощности при работе на малых режимах; статическая ошибка, обусловленная взаимным влиянием контуров друг на друга при различной нагрузке на исполнительных гидромоторах. Принципиальная схема гидропривода квадрокоптера с регулятором давления работает следующим образом (рис. 7, а). При отсутствии сигналов управления на электрогидрораспределители 4 насос выходит на минимальную производительность, контролируя с помощью гидроцилиндра 6 минимальный характерный рабочий объем насоса. Поршень цилиндра 7 при этом смещается в крайнее левое положение. Давление в системе поддерживается постоянным, на номинальном значении. При подаче сигналов управления на электрогидрораспределители 4 валы гидромоторов начинают вращать винты летательного аппарата. Потребление рабочей жидкости от насоса возрастает. Для компенсации падения давления начинает работать регулятор давления, подключенный к гидромоторам клапанами «или» 11. Пружина многопозиционного гидрораспределителя 5 смещает золотник на величину, пропорциональную падению давления. При этом через гидрораспределитель 5 в поршневую полость гидроцилиндра 7 подается давление, что приводит к изменению характерного рабочего объема насоса, увеличивая его подачу и компенсируя падение давления, доведя значение до номинального давления. Регулятор выставляет давление питания, достаточное для преодоления внешней нагрузки и обеспечивающее наилучшие энергетические и динамические характеристики. График на рис. 7, б представляет результаты предварительных расчетов настройки давления в насосной станции квадрокоптера в диапазоне от 150 до 250 атм с учетом объемного КПД насоса и нежесткости характеристики клапана давления.

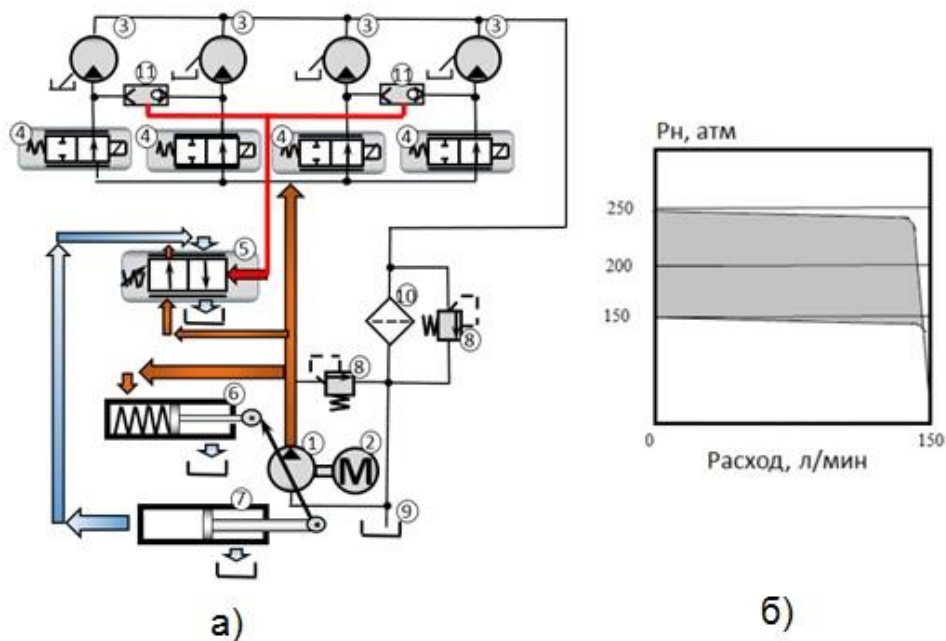


Рисунок 7 – Гидропривод квадрокоптера с регулятором давления: а) схема гидропривода квадрокоптера с регулятором давления; б) расчетная характеристика насосной станции с регулятором давления

Схема гидропривода квадрокоптера с регулятором давления позволяет улучшить устойчивость полета и энергетическую эффективность многовинтового летательного аппарата за счет поддержания в многодвигательном гидроприводе постоянного давления, исключающего неустойчивую работу на переходных режимах, минимальное потребление мощности при работе на малых режимах, статическую ошибку, обусловленную взаимным влиянием контуров друг на друга при различной нагрузке на исполнительных гидродвигателях.

Регулятор динамического давления. Внешнее воздействие случайного характера, типа порыва ветра или резкая смена режима полета многовинтового летательного аппарата могут привести к неустойчивой работе при изменении нагрузки на гидромоторах привода несущих винтов квадрокоптера, а также рассогласование сигналов командного управления на электрогидрораспределителях и значений действительной потребности энергии за насосом в ситуации случайной нагрузки на гидропривод.

Повышение устойчивости и точности работы многовинтового летательного аппарата с гидравлическим приводом обеспечивается за счет дополнительной гидромеханической обратной связи по динамическому давлению (по производной от перепада давлений) гидромоторов привода несущих винтов, которая изменяет рабочий объем насоса в зависимости от действительной величины колебаний давления перед гидромоторами под нагрузкой переменного или случайного характера.

На рис. 8 представлена схема гидропривода многовинтового летательного аппарата с гидромеханической обратной связью по производной давления. Гидромеханическое устройство дополнительной обратной связи по

динамическому давлению начинает работать при возникновении колебаний давления в полостях гидромоторов 3 привода несущих винтов под нагрузкой переменного или случайного характера. При возникновении колебаний давления в полостях гидромоторов 3 информационный сигнал в виде динамического давления через клапана 5 поступает на гидромеханическое устройство дополнительной обратной связи, содержащее в себе дроссель 11, соединенный с подпружиненным плунжером 12 и толкателями 7 и 13, оснащенными настраиваемыми пружинами. Под действием возникшего перепада давления в полостях толкателей 7 и 13, которое равно по своему значению перепаду давления на гидромоторах 3, происходит перемещение коромысла 8, которое в свою очередь приводит к смещению многопозиционного трехлинейного распределителя 9, находящегося в поршне 10. Перемещение поршня 10, который механически связан с насосом 1, приводит к изменению характерного рабочего объема насоса 1, а значит и подачи насоса 1 в соответствии с корректирующим сигналом гидромеханического устройства обратной связи.

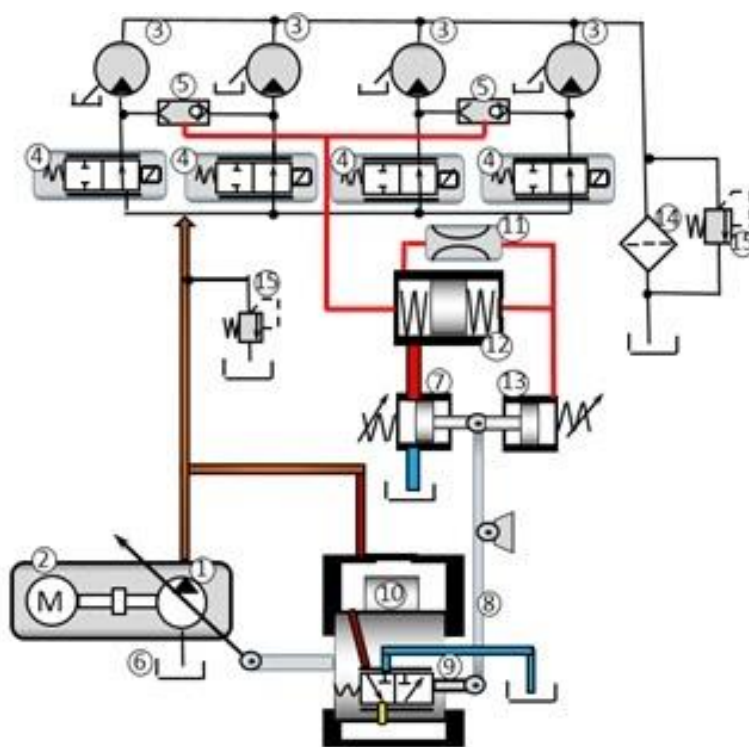


Рисунок 8 – Схема гидропривода квадрокоптера с регулятором по производной давления

Представленная схема гидропривода многовинтового летательного аппарата позволяет расширить функциональные возможности, повышение надежности и устойчивости работы гидропривода многовинтового летательного аппарата, обеспечить стабильные выходные характеристики и оптимальное потребление мощности насоса в зависимости от действующих действительных нагрузок на гидромоторах привода несущих винтов.

Регулятор скорости. В процессе полета многовинтового летательного аппарата под действием внешних газодинамических и климатических нагрузок, наличием зон нечувствительности в системе управления электрогидравлического следящего привода с дроссельным регулированием могут накапливаться установившиеся ошибки, наблюдаться рассогласование внешней характеристики многодвигательного гидропривода с управляющей командой.

Для уменьшения установившихся ошибок в системе управления беспилотного многовинтового летательного аппарата и лучшего согласования внешней статической характеристики можно ввести обратную связь по скорости исполнительных гидродвигателей. Эта обратная связь может быть использована и для корректировки динамических характеристик всего привода. На рис. 9 представлена схема гидропривода винтового летательного аппарата с гидромеханической обратной связью по скорости гидромоторов.

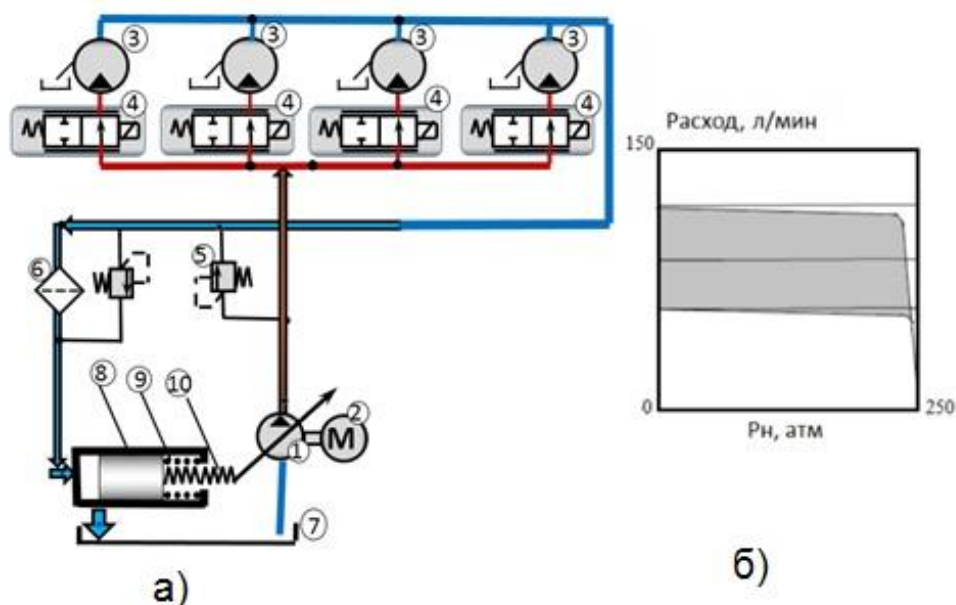


Рисунок 9 – Гидропривод многовинтового летательного аппарата с обратной связью по скорости: а) схема гидропривода квадрокоптера с регулятором скорости; б) расчетная характеристика насосной станции с регулятором скорости

Работа гидромеханического датчика скорости дополнительной обратной связи заключается в следующем. При смещении электрогидравлического распределителя 4 из нейтрального положения начинает работать соответствующий гидромотор 3, клапан 8 перемещается под действием давления жидкости, направляемой из гидромотора 3 на слив, в результате увеличивается сжатие опирающейся на клапан 8 пружины 10, соединяющейся механически с насосом 1, тем самым изменяя характерный рабочий объем насоса 1. Чем больше будет расход жидкости, поступающей на слив, тем больше будет момент,

прикладываемый пружиной 10 на насос 1. Пружина 9 в клапане 8 размещена для уравнивания силы давления, действующей на клапан 8.

Предложенное решение позволяет улучшить устойчивость полета и энергетическую эффективность многовинтового летательного аппарата за счет обеспечения в многодвигательном гидроприводе согласования выходных характеристик при действующих на гидромоторы привода несущих винтов нагрузках постоянного или позиционного характера, что приводит к повышению надежности и устойчивости гидропривода винтового летательного аппарата.

Регулятор мощности. В качестве недостатков типовой гидравлической схемы трансмиссии квадрокоптера может являться неустойчивая работа многодвигательного гидропривода на переходных режимах из-за потребления мощности насосной установки, не соответствующей управляющим командам, нагрузкам нестационарного или случайного характера, действующим на исполнительные гидродвигатели привода винтов квадрокоптера при его работе, значительное потребление мощности при работе на малых режимах.

Одним из технических решений, способствующих устранению этого недостатка, является схема гидропривода многовинтового летательного аппарата с регулятором мощности (рис. 10).

Регулятор мощности работает следующим образом. При отсутствии сигналов управления на электрогидрораспределители 4 насос выходит на минимальную производительность, контролируя с помощью гидроцилиндра 6 минимальный характерный рабочий объем насоса. Поршень цилиндра 7 при этом смещается в крайнее левое положение. Давление в системе поддерживается постоянным, на номинальном значении. При подаче сигналов управления на электрогидрораспределители 4 валы гидромоторов начинают вращать винты летательного аппарата. Потребление рабочей жидкости от насоса возрастает. Оптимальное потребление мощности обеспечивается по гиперболической зависимости.

Регулирование мощности насоса 1 осуществляется бесступенчатым изменением его производительности пропорционально давлению нагрузки случайного или нестационарного характера на исполнительных гидродвигателях 3, подаваемого к гидроцилиндрам 6 и 7 механизма управления характерным рабочим объемом насоса. Рабочее давление, соответствующее действительным нагрузкам на гидромоторы 3, передается через клапаны «или» 11, дроссель 15 и гидроцилиндр 12 на коромысло 6 и на насос 1. Противодействующей силой пружины многопозиционного гидрораспределителя 5, настраиваемой извне, задается уровень мощности. Если сила действия давления превышает силу пружины, то поршень гидроцилиндра 12 плавно смещается в сторону уменьшения рабочего объема насоса. При этом увеличивается действующая длина рычага на коромысло 6, способствующее перемещению многопозиционного распределителя 5 и соединению поршневой полости гидроцилиндра 13 с линией слива. Это в свою очередь позволяет бесступенчато изменять рабочий объем насоса пропорционально давлению нагрузки случайного или нестационарного характера на исполнительных гидродвигателях 3, контролируя произведение величин давления за насосом и характерного

объема насоса величиной постоянной, что позволяет регулятору обеспечивать постоянство потребляемого момента и потребляемой мощности.

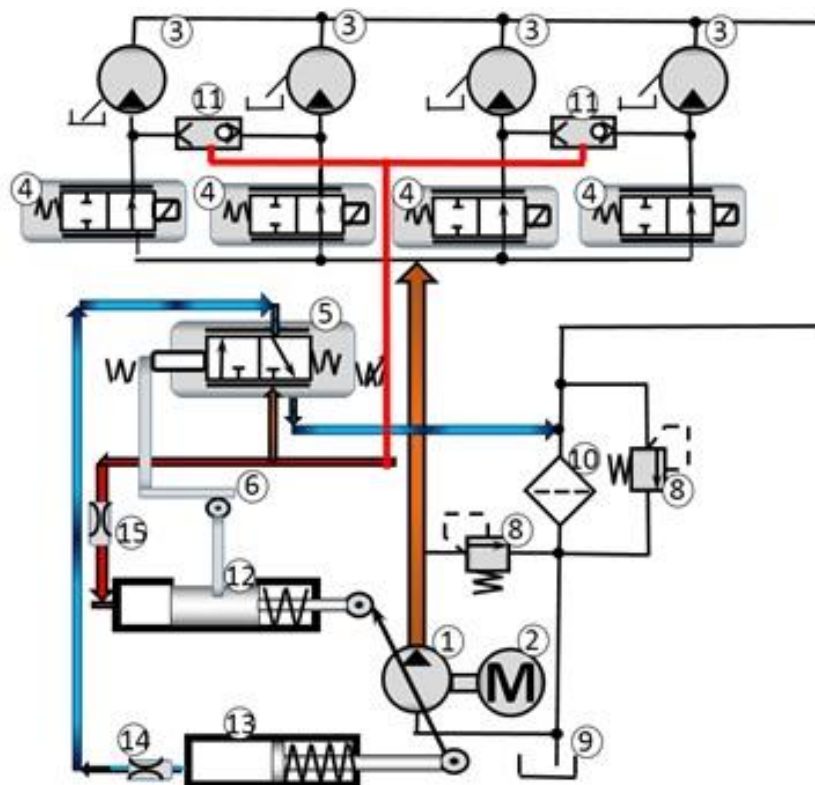


Рисунок 10 – Схема гидропривода квадрокоптера с регулятором мощности

Решение позволяет улучшить устойчивость полета и энергетическую эффективность многовинтового летательного аппарата за счет обеспечения в многодвигательном гидроприводе оптимального потребления мощности насоса в зависимости от требуемых действительных нагрузок на исполнительных гидродвигателях.

Регулятор LS. Использование в гидравлических трансмиссиях насосов, работающих на принципе «чувствительный к нагрузке» (LS-Load Sensing), позволяет во многом выполнить требования, предъявляемые к гидросистемам летательных аппаратов, что было рассмотрено автором в [Поляков и др., 2021]. Особенностью систем с LS-регулированием является то, что скорость нескольких гидромоторов квадрокоптера, действующих одновременно, сохраняется постоянной независимо от изменения давления (противодействия нагрузок) в гидросистеме. Давление насоса поддерживается равным давлению нагрузки наиболее нагруженного гидромотора плюс постоянное управляющее давление. Эта особенность LS-систем является основополагающим фактором в процессе работы, поскольку время, затрачиваемое на работу машины, существенно сокращается. [Целищев, 2022, Чжу, 2022]. В целом использование системы с управлением LS взамен обычной повышает динамику всех гидромоторов привода несущих винтов квадрокоптера, существенно увеличивает общий КПД системы, что ведет к снижению экономических затрат, ускоряет рабочий процесс, а также упрощает его.

Гидропривод многовинтового летательного аппарата может обладать следующими недостатками: появление статической ошибки, обусловленной взаимным влиянием контуров привода несущих винтов друг на друга при различной нагрузке на исполнительных гидродвигателях, которая может возникнуть вследствие неточности изготовления комплектующих, изменения геометрии или шага винтов при эксплуатации, а также при воздействии внешних возмущающих воздействий.

Для обеспечения нечувствительности к нагрузке многовинтового летательного аппарата автором предложена коррекция путём внедрения в гидропривод чувствительной к нагрузке системы регулирования насоса (рис. 11) [Патент № 2808657..., 2023].

Регулятор чувствительности по нагрузке (LS-регулятор) способен корректировать работу гидромоторов в зависимости от нагрузки. В начальный момент времени, при отсутствии сигналов управления, пружины дросселирующих золотников 14 выставляют золотники в нейтральное положение. Но так как проходные сечения золотников закрыты, то связанное с этим повышение давления посредством воздействия на поршень управляющего цилиндра 14 насоса 1 выводит насос на минимальную производительность, а гидромоторы 4 не вращаются. При подаче управляющего сигнала на электромагниты дросселирующих золотников 14 их золотники перемещаются пропорционально входящему сигналу, и рабочая жидкость поступает на вход гидромоторов 4. Давление после дросселирующих золотников 14 определяется действующими на вал гидромотора (несущий винт квадрокоптера) нагрузками. Клапан постоянного перепада давления 9 фиксирует это изменение давления и открывается, пропуская расход и создавая давление, достаточное для преодоления внешней нагрузки. В результате открытия клапана давление до него падает и поршень управляющего цилиндра регулятора 14 основного насоса 1 перемещается под действием пружины, рабочий объём насоса 1 увеличивается. Это приводит к увеличению перепада давлений на гидромоторе и, соответственно, к увеличению частоты вращения гидромоторов, что соответствует управляющему сигналу согласно программе управления. Номинальное давление в системе регулирования устанавливается в соответствии с текущей нагрузкой, для чего с помощью клапанов «или» 10 отбирается давление из наиболее нагруженного контура и сообщается на распределитель 12 регулятора насоса 1. Клапан компенсации давления 11 встроен в LS-систему управления. Когда давление на выходе насоса достигает значения, установленного компенсатором давления 11, происходит уменьшение подачи насоса для ограничения давления в системе. Регулятор выставляет давление питания гидромоторов, достаточное для преодоления внешней нагрузки и обеспечивающее наилучшие энергетические характеристики.

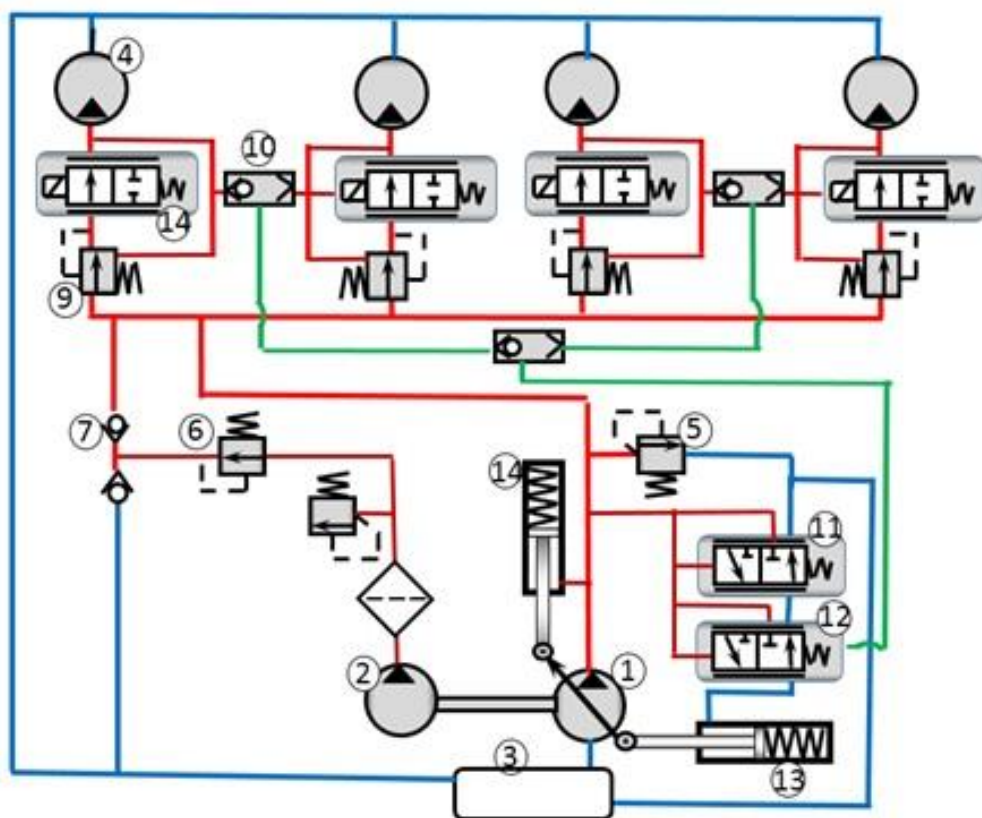


Рисунок 11 – Схема гидропривода многовинтового летательного аппарата с LS-регулированием

Таким образом, предлагаемый гидромеханический регулятор с LS-регулированием позволяет улучшить устойчивость полета и энергетическую эффективность многовинтового летательного аппарата за счет исключения взаимного влияния гидравлических контуров друг на друга, путем использования в гидроприводе чувствительной к нагрузке системы регулирования. Это позволяет обеспечить независимость работы привода при изменении нагрузки на выходных валах гидромоторов и необходимый индивидуальный расход и давление на каждый гидромотор.

Заключение

Совершенствование трансмиссий грузовых квадрокоптеров целесообразно направлять в развитие электрогидравлических систем управления приводом несущих винтов. Для повышения точности, устойчивости, управляемости системы автоматического управления и регулирования грузового квадрокоптера желательно использовать гидромеханические регуляторы. В качестве гидромеханических регуляторов, обладающих высокой надежностью и полностью автоматизированной работой, можно предложить регулятор давления, регулятор динамического давления, регулятор скорости, регулятор мощности и LS-регулятор.

Библиографический список

- Викулов О. В.* Перспективные беспилотные летательные аппараты вертолетного типа отечественного производства // *Инноватика и экспертиза: научные труды.* 2023. № 1(35). С. 70-82. EDN EVPBAX
- Высокооборотный блок передачи мощности с гидромеханическим регулированием / Д. А. Кудерко, Н. А. Поляков, Г. К. Фролов, В. А. Целищев // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника.* 2024. № 76. С. 30-40. DOI 10.15593/2224-9982/2024.76.03. EDN ILEGMW.
- Габуев К. О.* Система автоматического управления беспилотного летательного аппарата / К. О. Габуев, Н. А. Кучеренко, А. И. Шипко // *Automation Technological and Business Processes.* 2018. № 10(4), DOI 10.15673/atbp.v10i4.821.
- Патент № 2808657 С1 Российская Федерация, МПК В64D 35/04, В64С 27/12. Гидропривод многовинтового летательного аппарата : № 2023110764 : заявл. 26.04.2023 : опубл. 30.11.2023 / В. А. Целищев, Д. В. Целищев, И. С. Хакимов ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уфимский университет науки и технологий". EDN MEGDZF.
- Патент на полезную модель № 205086 U1 Российская Федерация, МПК В64С 27/12, В64D 35/04. Гидропривод винтового летательного аппарата : № 2021103965 : заявл. 16.02.2021 : опубл. 28.06.2021 / В. А. Целищев, И. С. Хакимов ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уфимский государственный авиационный технический университет". EDN GIQWAM.
- Поляков Н. А.* Концепция развития блоков передачи мощности в гидросистеме гражданского самолета / Н. А. Поляков, А. А. Соловьева, В. А. Целищев // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника.* 2021. № 67. С. 5-15. DOI 10.15593/2224-9982/2021.67.01. EDN OFROEX.
- Система управления беспилотным летательным аппаратом, оснащенный робототехническим манипулятором / А. А. Маргун, К. А. Зименко, Д. Н. Базылев [и др.] // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики.* 2014. № 6(94). С. 54-62. EDN TBDGQJ.
- Целищев В. А.* Расчет и проектирование объемного гидравлического привода. Уфа : УГАТУ, 2022. 216 с.
- Чжу Ю.* Модель системы управления беспилотного летательного аппарата (квадрокоптера) // *Информатика, телекоммуникации и управление.* 2022. Т. 15, № 3. С. 49-61. DOI 10.18721/JCSTCS.15304. EDN IJDYUZ.
- Berger T.* High-Speed Rotorcraft Pitch Axis Response Type Investigation / T. Berger, M. B. Tischler, J. F. Horn // *VFS International 77th Annual Forum & Technology Display.* West Palm Beach, Florida, 2021. DOI 10.4050/F-0077-2021-16793.
- Kava S. A.* Dynamics and Control of a Multi-Rotor Aircraft // *20th Australasian Fluid Mechanics Conference Perth, Australia 5-8 December 2016.*
- Saetti U.* Flight Dynamics and Control of an eVTOL Concept Aircraft with Propeller-Driven Rotor / U. Saetti, J. F. Horn // *Journal of the American Helicopter Society.* 2022. № 67. Pp. 032012. DOI 10.4050/JAHS.67.03201226.
- Saetti U.* Interactional Aerodynamics Modeling and Flight Control Design of Multi-Rotor Aircraft / U. Saetti, F. Guner // *February 2024. Conference: 6th Decennial VFS Aeromechanics Specialists' Conference At: Santa Clara, CA.*
- Scaramal M.* Load Alleviation Control using Dynamic inversion with DirectLoad Feedback / M. Scaramal, J. F. Horn, U. Saetti // *VFS International 77th Annual Forum & Technology Display.* West Palm Beach, Florida, 2021.
- Shastri A.* Predicting Wake and Structural Loads in RPM Controlled Multirotor Aircraft / A. Shastri, A. Datta, A. Gessow // *Conference: TVF 2020At: San Jose, California.* 2020. Pp. 575-590.

References

- Berger T., Tischler M. B., Horn J. F. (2012). High-Speed Rotorcraft Pitch Axis Response Type Investigation. *VFS International 77th Annual Forum & Technology Display*. West Palm Beach, Florida. DOI 10.4050/F-0077-2021-16793
- Gabuev K. O., Kucherenko N. A., Shipko A. I. (2018). The automatic control system of an unmanned aerial vehicle. *Automation Technological and Business Processes*. 10(4). DOI 10.15673/atbp.v10i4.821. (In Russian)
- Kava S. A. (2016). Dynamics and Control of a Multi-Rotor Aircraft. *20th Australasian Fluid Mechanics Conference Perth, Australia 5-8 December*.
- Kuderko D. A., Polyakov N. A., Frolov G. K., Tselishchev V. A. (2024). High-speed power transmission unit with hydromechanical control. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace engineering*. 76: 30-40. DOI 10.15593/2224-9982/2024.76.03. (In Russian)
- Margun A. A., Zimenko K. A., Bazylev D. N. (2014). A control system for an unmanned aerial vehicle equipped with a robotic arm. *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 6(94): 54-62. (In Russian)
- Patent No. 205086 U1 Russian Federation, IPC B64C 27/12, B64D 35/04. Hydraulic drive of a screw aircraft : No. 2021103965 : application 02/16/2021 : published 06/28/2021 / V. A. Tselishchev, I. S. Khakimov ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ufa State Aviation Technical University. EDN GIQWAM.
- Patent No. 2808657 C1 Russian Federation, IPC B64D 35/04, B64C 27/12. Hydraulic drive of a multi-rotor aircraft: No. 2023110764 : application 04/26/2023 : published 11.30.2023 / V. A. Tselishchev, D. V. Tselishchev, I. S. Khakimov ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ufa University of Science and Technology. Utility Model
- Polyakov N. A., Solovyova A. A., Tselishchev V. A. (2021). The concept of the development of power transmission units in the hydraulic system of a civil aircraft. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace engineering*. 67: 5-15. DOI 10.15593/2224-9982/2021.67.01. (In Russian)
- Saetti U., Guner F. (2024). Interactional Aerodynamics Modeling and Flight Control Design of Multi-Rotor Aircraft. *February 2024. Conference: 6th Decennial VFS Aeromechanics Specialists' Conference At: Santa Clara, CA*.
- Saetti U., Horn J. F. (2022). Flight Dynamics and Control of an eVTOL Concept Aircraft with Propeller-Driven Rotor. *Journal of the American Helicopter Society*. 67. DOI 10.4050/JAHS.67.03201226.
- Scaramal M., Horn J. F., Saetti U. (2021). Load Alleviation Control using Dynamic inversion with DirectLoad Feedback. *VFS International 77th Annual Forum & Technology Display*. West Palm Beach, Florida.
- Shastry A., Gessow A. (2020). Predicting Wake and Structural Loads in RPM Controlled Multicopter Aircraft. *Conference: TVF F/2020At: San Jose, California*. 575-590.
- Tselishchev V. A. (2022). Calculation and design of a volumetric hydraulic drive. Ufa : UGATU. 2022. 216. (In Russian)
- Vikulov O. V. (2023). Promising helicopter-type unmanned aerial vehicles of domestic production. *Innovation and expertise: scientific papers*. 1(35): 70-82. (In Russian)
- Zhu Yu. (2022). A model of an unmanned aerial vehicle (quadcopter) control system. *Computer Science, telecommunications and management*. 15(3): 49-61. DOI 10.18721/JCSTCS.15304.