

*Мазитов Камиль Рифатович
Меньшикова Наталья Андреевна
студенты, ЛЭГВС 24–02, 2 курс
Файбышенко Леонид Александрович
Доцент кафедры №13
«Системы автоматизированного управления»
ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова*

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ РУЛЕНИЕ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Аннотация: В статье рассматриваются современные технологии электрического руления воздушных судов на аэродроме. Особое внимание уделяется принципу работы системы электрического руления WheelTug, позволяющей осуществлять перемещение самолёта по территории аэропорта без использования тяги маршевых двигателей и наземных буксировочных средств. Проведён анализ конструкции системы, её основных компонентов и принципа функционирования. Также рассмотрены преимущества внедрения электрического руления, включая снижение расхода топлива, уменьшение выбросов вредных веществ и повышение эффективности наземной эксплуатации воздушных судов, а также выявлены основные ограничения и перспективы дальнейшего развития данной технологии.

Ключевые слова: электрическое руление, WheelTug, воздушное судно, аэродромное обслуживание, энергосбережение, авиационные технологии.

Electric taxiing

Abstract: The article discusses modern technologies of electric taxiing of aircraft on the airfield. Special attention is paid to the operating principle of the WheelTug electric taxi system, which allows an aircraft to move around the airport without using the thrust of the main engines or ground towing vehicles. The design of the system, its main components and operating principles are analyzed. The advantages of implementing electric taxiing systems are also considered, including reduced fuel consumption, lower emissions in airport areas and improved efficiency of ground operations, as well as the main limitations and prospects for further development of this technology.

Key words: electric taxiing, WheelTug, aircraft, airport ground operations, energy efficiency, aviation technologies..

Руление на ведущей стойке шасси

Изначально под проектом «Green taxi» подразумевалась вполне конкретная система, разрабатывавшаяся совместными усилиями компаний Honeywell и Safran (EGTS International) примерно с 2011 года. Она предполагала установку электродвигателей в ступицы основных колес шасси. Питание они должны были получать от APU (вспомогательной силовой установки воздушного судна). Пилот в кабине управлял бы движением вперед и назад с помощью простого интерфейса, полностью контролируя скорость и направление.

Рассмотрим предлагаемые бонусы:

- **Экономия топлива:** основные двигатели очень неэффективны на земле. Их отключение во время руления сулило экономию до 4% топлива за полетный цикл и около \$200 000 на одно воздушное судно в год.
- **Экология:** снижение выбросов CO₂ и других парниковых газов в зоне аэропорта, а также уменьшение шума.
- **Независимость:** отказ от необходимости использовать тягачи для буксировки, что экономит время и деньги, а также снижает риск повреждений.

- **Безопасность:** меньше техники на перроне — меньше риска инцидентов.

Система активно тестировалась, в том числе на Boeing 737–800 авиакомпании TUIfly в 2012 году, и планировалась к выпуску к 2016 году. Но почему первоначальный проект не взлетел? Несмотря на всю технологическую красоту, у проекта EGTS оказалось два серьезных врага: вес и цена.

Система добавляла к массе самолета около 300–450 кг. Эти килограммы нужно было возить постоянно, даже если руление было коротким. Главным ударом стало резкое падение цен на нефть в 2014–2016 годах. Когда топливо подешевело, окупаемость дорогой и тяжелой системы стала для авиакомпаний не такой очевидной. В итоге в 2016 году Honeywell вышла из совместного предприятия, и проект в его первоначальном виде был заморожен. Однако сама концепция оказалась слишком хороша, чтобы от нее отказаться полностью. Boeing и другие игроки пошли другим путем.

Вместо установки сложного и тяжелого оборудования, Boeing в своей программе ecoDemonstrator (начиная с 2024 года) активно тестирует и внедряет другой подход. Пилоты выключают один из двигателей сразу после посадки или используют только один для руления к полосе. Чтобы это было безопасно и эффективно, Boeing тестирует различные цифровые решения.

Как результат, это позволяет добиться экономии топлива и снижения выбросов прямо сейчас, не требуя дорогостоящей модернизации самолетов.

Safran, после ухода Honeywell, не забросила технологию. Компания сделала работу над ошибками и к 2022 году представила новое видение – облегченную интегрированную систему.

Главное отличие: если раньше EGTS предлагалась как опция для уже существующих самолетов, то новая система Safran изначально проектируется для установки на новые типы воздушных судов. Это позволяет инженерам закладывать её в конструкцию с нуля, оптимизируя вес и не создавая лишних проблем с сертификацией.

WheelTug — это инновационная бортовая система электрического руления (E-taxi) для коммерческих самолетов. Она позволяет воздушным судам перемещаться по территории аэропорта без запуска основных (маршевых) двигателей и без помощи наземных буксиров-тягачей.

Система состоит из трех ключевых элементов:

1. **Электродвигатели в шасси:** основным элементом системы являются два высокомоментных электрических двигателя, встроенных в ступицы колес носовой стойки.

Характерные особенности:

- установка непосредственно в обод колеса (in-wheel motor)
- высокий крутящий момент на малых скоростях
- возможность вращения в обе стороны
- независимое управление каждым колесом

В большинстве конфигураций применяется редукторный привод, встроенный в ступицу колеса.

Подсистема силовой электроники включает:

1. Инверторы
2. контроллеры двигателей
3. силовые преобразователи
4. блок распределения энергии

2. **Источник питания:** Система не требует установки на борт тяжелых аккумуляторов. Двигатели получают электроэнергию напрямую от вспомогательной силовой установки (ВСУ /

APU) — небольшого газотурбинного генератора, который расположен в хвостовой части самолета и всегда работает во время стоянки для обеспечения борта электричеством и кондиционированием. APU вращает генератор, который питает электродвигатели колес и силовую электронику системы.

3. Система управления: В кабине пилотов, а также в отсеке электроники (для инверторов), устанавливается соответствующее оборудование. Пилот контролирует скорость (вперед и назад) и направление движения прямо со своего рабочего места с помощью специальной панели.

Традиционно, чтобы отъехать от пассажирского терминала (гейта), самолету нужен специальный тягач, который выталкивает его хвостом вперед — эта процедура называется pushback.

С системой WheelTug пилот просто включает электромоторы на передней стойке и самостоятельно сдает назад, разворачивается и едет к взлетно-посадочной полосе. Маршевые реактивные двигатели запускаются всего за несколько минут до самого взлета. После посадки самолет также выключает двигатели, съехав с полосы, и доезжает до гейта на электротяге.

Разработчики также предлагают нестандартные маневры:

- Twirl (Вращение): разворот практически на месте благодаря независимому управлению колесами носовой стойки.

- Twist (Параллельная парковка): самолет может подъехать к терминалу не перпендикулярно, а совершить резкий поворот и встать к терминалу боком (параллельно). Это позволяет аэропортам стыковать сразу два телетрапа (в носу и в хвосте), кардинально ускоряя посадку и высадку пассажиров.

Главные преимущества системы

- Колоссальная экономия топлива: на земле самолеты тратят много топлива просто для того, чтобы сдвинуться с места. Руление на электротяге позволяет сэкономить сотни килограммов керосина за каждый рейс.

- Автономность и экономия времени: пилотам больше не нужно ждать, пока освободится наземный буксир или наземный персонал. Это позволяет сократить время разворота рейса (turnaround time) на 10–20 минут, что критически важно для лоукостеров.

- Снижение износа: маршевые двигатели меньше работают на земле, что снижает их износ и риск засасывания посторонних предметов (FOD) с бетона. Также существенно экономятся ресурсы тормозных механизмов, так как электродвигатели могут притормаживать самолет.

- Экологичность и акустический комфорт: работа от ВСУ гораздо тише и сопровождается значительно меньшими выбросами вредных веществ в зоне терминалов по сравнению с работающими турбинами.

В первую очередь система WheelTug спроектирована для самых массовых узкофюзеляжных самолетов — семейств Boeing 737 и Airbus A320, так как именно они совершают много коротких рейсов в день и чаще других нуждаются в буксировке. Установка системы продумана так, что не требует серьезной модификации планера самолета и может быть произведена всего за пару ночей во время стандартного технического обслуживания.

Прямой наследник EGTS, скорее всего, мы увидим не на нынешних Boeing 737, а на самолетах нового поколения, которые появятся в 2030-х годах. А пока авиакомпании будут осваивать более простые, но эффективные методы, такие как руление на одном двигателе с цифровой поддержкой.

Причина таких долгих задержек и скепсиса со стороны многих авиакомпаний кроется в серьезных недостатках самой концепции бортового электрического руления. Вот главные из них:

1. Лишний вес – самый главный технический минус. Установка двух мощных электродвигателей и необходимого оборудования в носовую стойку добавляет самолету примерно 120–150 кг веса.

В авиации действует жесткое правило: чтобы везти лишний вес, нужно сжигать больше топлива. Если самолет совершает короткие рейсы (по 1–2 часа), экономия керосина на рулении перекрывает затраты на перевозку моторов в воздухе. Но если этот же самолет летит на 5–6 часов, топливо, сожженное в полете из-за этих 150 кг, полностью сводит на нет всю выгоду от экологичного руления на земле.

2. Слишком низкая скорость руления: обычный самолет, используя тягу реактивных двигателей, может рулить по прямым участкам аэропорта со скоростью около 30 узлов (около 55 км/ч).

Система WheelTug из-за ограничений мощности электромоторов способна разогнать самолет максимум до 8–15 узлов (15–28 км/ч). Для крупных загруженных аэропортов (таких как Хитроу, Франкфурт или Схипхол) это катастрофа: медленно ползущие на электротяге самолеты будут создавать заторы на рулежных дорожках, замедляя работу всего аэропорта.

3. Огромная нагрузка на носовую стойку шасси. Носовая стойка самолета изначально спроектирована так, чтобы выдерживать вертикальные нагрузки при посадке и управлять направлением движения. Она не предназначена для того, чтобы тянуть за собой 70–80 тонн веса всего самолета (особенно при трогании с места или подъеме в горку). Электромоторы создают колоссальный крутящий момент, что ведет к риску ускоренного износа или усталости металла стойки шасси. Именно поэтому WheelTug пока разрабатывается только для относительно легких узкофюзеляжных самолетов (Boeing 737, Airbus A320), а не для тяжелых лайнеров.

Наземная автоматизированная навигация спецтехники на территории перрона аэродрома с использованием ИИ.

Цель: рассмотреть передовые технологии в области навигации наземной спецтехники под управлением ИИ в беспилотном режиме, предложить дополнительные методы определения местоположения и выбрать оптимальное решение с точки зрения эффективности и надежности, электромагнитной совместимости, физической и информационной безопасности. Учесть перспективу развития и интеграцию в общую ERP (АСУ) систему аэропорта.

Основными задачами для обеспечения автоматизированного и безопасного режима работы всех наземных служб аэропорта в беспилотном режиме под управлением ИИ, безусловно, является:

- Сверхточное определение местоположения и навигация на территории аэродрома всей техники.
- Единая система управления
- Обеспечение межмашинного взаимодействия М2М* между всеми транспортными средствами и инфраструктурой, в том числе с учетом строгого соблюдения информационной безопасности. (*М2М – англ. *Machine-to-Machine*,) — общее название технологий, которые позволяют машинам обмениваться информацией друг с другом и передавать её в АСУ.

Рассмотрим технические решения на примере автоматизации передвижения буксировщиков (тягачей), машин перевозки багажа, а также машин, указывающих путь в беспилотном режиме под управлением единой системы ИИ.

1. Определение местоположения на территории аэродрома происходит с помощью комплексных систем позиционирования, сочетающих спутниковые, радиочастотные и локальные технологии. Рассмотрим основные применяемые методы.

2. Месторасположение стационарной базовой станции известно точно. Мобильный приёмник (Rover), которому нужно знать своё расположение, должен быть довольно близко к фиксированному, чтобы эти два приёмника могли сравнивать сигналы с одних и тех же GPS-спутников.

Базовая станция сравнивает GPS-сигналы, полученные ей самой, и мобильным приёмником. Поскольку неподвижный приёмник уже знает свое месторасположение, он может уловить ошибку в сигнале и отправить коррекцию на мобильный приёмник.

4. 4.1. Камеры с компьютерным (машинным) зрением:

- распознавание разметки, знаков, оборудования, людей, ВС;
- дополненная навигация для водителя.

4.2. Технология LiDAR (Light Detection and Ranging) позволяет измерять коэффициент отражения объектов, что позволяет анализировать свойства поверхностей, например, определять, от чего именно отражается лазерный импульс, и использовать данные для классификации объектов.

3D-сканирование окружения, построение карт и обход препятствий.

Точность до 5–10 см.

Лидар-системы используются в разных задачах, например:

Распознавание дорожной разметки — лидар «умеет» читать разметку, так как она отражает ИК-лучи иначе, чем асфальт. Современные лидарные системы используют вращающиеся шестиугольные зеркала, которые разделяют лазерный луч: три верхних луча используются для определения транспортного средства и препятствий впереди, а нижние — для определения разметки полосы движения и особенностей дороги.

На точность измерения коэффициента отражения с помощью LiDAR влияют, например, такие факторы:

- Атмосферные условия. Туман, дождь, снег и пыль могут мешать сигналам LiDAR, рассеивая или поглощая их. Это приводит к неточным показаниям или даже полной потере сигнала.
- Солнечный свет. Он создаёт помехи для сигналов LiDAR из-за своей интенсивности и длины волны. Это особенно актуально для коротковолновых систем.
- Другие сигналы. Радиочастотные сигналы из других источников могут мешать сигналам LiDAR, если они работают в одном и том же частотном диапазоне или достаточно близко к нему.
- Структуры. Здания, деревья и другие объекты могут блокировать или отражать сигналы LiDAR, что приводит к неточным показаниям или полной потере сигнала в зависимости от размера объекта, блокирующего путь лазерного луча.

Определим ключевые требования к перспективным системам навигации:

- Надежность: безотказная работа в условиях помех (спуфинг, РЭБ) Высокая электромагнитная совместимость и защищенность.
- Скорость обновления: не реже 1 Гц (каждую секунду).
- Интеграция с АСУ аэропорта: данные в реальном времени для диспетчеров.
- Автономность: возможность работы без орбитальных GPS систем
- Энергоэффективность: длительное время работы без подзарядки.
- Устойчивость к погоде: работа при дожде, снеге, тумане.

- Информационная безопасность: защита каналов связи, криптостойкие алгоритмы передачи данных по протоколу TCP/IP.
- Высокая точность позиционирования исполнительных механизмов: управление процессом сцепки тягача с ВС, погрузки/выгрузки багажа и т.п.

5. Радиочастотные системы (RFID, UWB)

RTLS (система позиционирования в режиме реального времени) предоставляет возможность определять местоположение объектов или людей в реальном времени в пределах заданной области. Основные задачи RTLS заключаются в точном определении местоположения объектов, а также в отслеживании перемещения активов и техники в режиме реального времени и обеспечение функций контроля и управления доступом (СКУД).

UWB – это сверхширокополосная технология, которая активно применяется для реализации промышленных сценариев. Ее использование позволяет точно отслеживать местоположение объектов, обеспечивать надежную защиту данных и поддерживать высокую скорость передачи информации. Ultra-Wideband обладает широким потенциалом и является одной из наиболее востребованных технологий для RTLS-решений.

Принцип действия UWB строится на передаче высокочастотных сигналов (2,85–10,6 ГГц) на небольшие расстояния. Ключевым механизмом - измерение времени пролета сигнала (ToF), часто в двухстороннем обмене (TWR) или через разность времен прихода (TDoA) в сети якорей (миниатюрные базовые станции). При использовании технологии для RTLS применяют специальные метки, которые рассылают сигналы на частотах до нескольких гигагерц.

К характерным особенностям UWB относятся:

- высокая точность позиционирования 10–30 см;
- широкий радиус действия и низкий уровень помех;
- работа в широкой полосе, но с очень низкой мощностью "на мегагерц", чтобы меньше мешать другим системам. Широкая полоса позволяет минимизировать ошибку по времени, а значит и по расстоянию. Ведь даже крохотное отклонение по времени получения сигнала резко увеличивает погрешность позиционирования.
- Совместимость с устройствами, использующими радиочастотный спектр.

Благодаря высокой точности определения местоположения Ultra-Wideband с 2025 года широко используется в промышленности, логистике, строительстве. Технологию применяют для отслеживания активов (оборудования, транспорта), обеспечения безопасности сотрудников, своевременной эвакуации в случае ЧП.

Технология радиочастотной идентификации помогает отслеживать мобильность объектов. Для определения местоположения и мониторинга активов применяются транспондеры (RFID-метки), которые функционируют в тандеме со считывающими устройствами.

Чтобы распознать информацию, которая заложена в метке, считыватель отправляет сигналы, а транспондер отвечает ему радиочастотным излучением с зашифрованными данными.

При использовании RFID можно идентифицировать до 1 000 тегов за 1 секунду. Точность определения местоположения зависит от радиочастоты, наличия антенн, а также качества считывателей и типа меток.

В зависимости от источника питания RFID-метки могут быть пассивными или активными. Первые не имеют собственного аккумулятора и читаются на небольших расстояниях до 10 м.

Вторые оснащаются батареей и могут воспроизводить более качественные сигналы на дистанцию до 300 м.

Особая точность позиционирования требуется в ходе выполнения технологических действий при максимальном сближении объектов.

Рассмотрим сцепку тягача с самолётом в автоматизированном режиме с помощью современных технологий, которые исключают участие человека в процессе фиксации и управления. Основные подходы связаны с использованием безводильных тягачей (без использования сцепной штанги) с автоматизированным захватом передней стойки шасси самолёта манипулятором, приподнимают её и фиксируют на подъёмной платформе. Это позволяет обойтись без традиционного буксировочного водила — жёсткой сцепки, которая требует подбора устройства под конкретный тип самолёта.

Преимущества беспилотных систем:

- Универсальность: подходят для разных типов самолётов, что сокращает необходимость в запасе различных водил.
- Повышение скорости обслуживания: не требуется время на замену или присоединение водила.
- Повышение безопасности: уменьшается риск травм персонала при сцепке.
- Снижение продольного дергания за счёт частичной погрузки самолёта на тягач. За счёт переноса веса ВС с передней стойки шасси на тягач достигается значительный рост тягово-сцепных характеристик, что позволяет значительно уменьшить вес тягача при производстве и соответственно уменьшить расход ГСМ в ходе эксплуатации.

Безводильные аэродромные тягачи выполняют сцепку в автоматическом режиме под управлением бортового компьютера. В их конструкцию входит подсистема сопряжения — сцепное устройство (СУ), которое управляется блоком управления (БУ). Датчики (одометры, дальнометры, лидары, GPS) определяют положение тягача и самолёта, а оптоэлектронная микросхема (ОМ) фиксирует отклонения от заданной траектории. При отклонении БУ корректирует работу СУ, обеспечивая точное захватывание передней стойки шасси.

RFID системы можно сравнить с известным давно работающим на магнитных маяках способом (индукционные системы)

Принцип работы

- В покрытие перрона встраивают кабельные контуры с переменным током (1–10 кГц).
- Вокруг кабеля возникает электромагнитное поле, повторяющее трассу.
- На технике устанавливают индукционные датчики (катушки), которые:
 - фиксируют напряжённость поля;
 - определяют боковое смещение от оси кабеля;
 - передают данные в систему управления для коррекции курса.

Характеристики

- Точность: единицы сантиметров.
- Дальность: строго по трассе кабеля.

Плюсы

- Не зависит от погоды и видимости. Работает в тумане, ночью, при снегопаде.
- Устойчив к радиопомехам.
- Минимальное обслуживание после укладки.

Минусы

- Жёсткая привязка к проложенным контурам (нет гибкости).
- Нет передачи дополнительных информационных сигналов
- Сложность строительства и высокие затраты на укладку кабеля.
- Риск повреждения при ремонтных работах.
- Невозможно изменить маршрут без перекладки кабеля.
- Низкий срок полезного использования, нарушение изоляции кабеля приводит к повреждению системы.

Плита перрона аэропорта со встроенным волоконно-оптическим распределенным датчиком (кабель): принцип работы и применение для навигации.

Это интеллектуальная инфраструктура, где бетонное/асфальтобетонное покрытие перрона оснащено распределёнными волоконно-оптическими сенсорами. Система превращает статическую плиту в «чувствительную поверхность», способную регистрировать движение объектов, их тип и определять их местоположение.

На данный момент системы на основе оптического кабеля используются для периметральной защиты аэропорта с функцией обнаружения физической активности (приближение техники, работа шансовым инструментом и т.п.).

Разберем как устроена система. Волоконно-оптический кабель укладывается в тело плиты при заливке, либо в канавки с последующей герметизацией. Расположение: сетка с шагом 1–5 м (зависит от требуемой точности). Тип волокна: одномодовое, диаметр сердцевины 8–9 мкм (центральная часть, через которую проходит свет). Строительная длина кабеля 3–5 км.

При проезде ВС/техники плита деформируется, вызывая:

- микроизгибы волокна;
- изменение фазы и интенсивности рассеянного света (эффект Рэлея);
- приемник фиксирует сдвиги длины волны отражения, вызванные внешними воздействиями (температурой, деформацией, вибрацией).

Система определяет:

- координаты воздействия (по времени задержки сигнала);
- интенсивность деформации (по амплитуде отклика);
- направление движения (по последовательности срабатывания сенсоров).

Обработка данных

Алгоритм:

- сопоставление сигналов с картой расположения волокон;
- идентификация объекта по «акустическому портрету» (характер вибрации колёс);
- передача координат в систему управления.
- контроль давление в зоне приземления, можно понять, как приземлился и

Контроль состояния поверхности ВПП за счет анализа распределения давления