

Оглавление

Введение	6
Глава 1. Основы теории структурного построения систем контроля и управления БПЛА	9
1.1. Историческая парадигма создания и классификация БПЛА	9
1.2. Система контроля и управления БПЛА как сложная техническая система	16
1.3. Общие сведения о дискретных устройствах	24
1.4. Методы преобразования функций алгебры логики	44
1.4.1. Способы минимизации логических функций	49
1.4.2. Решение задач по преобразованию функций алгебры логики с помощью метода Карно — Вейча	52
1.5. Логический анализ работы дискретных устройств	57
1.5.1. Способы представления условий работы дискретных устройств	58
1.5.2. Задачи анализа дискретных устройств	60
1.6. Структурный синтез дискретных устройств	65
1.6.1. Структурный синтез одноктактных дискретных устройств	65
1.6.2. Структурный синтез многотактных дискретных устройств	71
1.7. Структурная оптимизация систем контроля и управления	85
Глава 2. Методология представления, измерения и обработки различных видов неопределенности значений контролируемых параметров	102
2.1. Особенности применения теории нечетких множеств и интервального анализа для описания различных видов неопределенности значений контролируемых параметров	102
2.2. Методы представления, измерения и обработки нечеткой информации	108
2.3. Методы построения функций принадлежности	112
2.4. Методика формирования и выбора соответствующей измерительной шкалы для разнородных критериев качества систем контроля и управления	121
2.4.1. Измерительные шкалы критериев оптимальности	125
2.4.2. Сравнительная характеристика измерительных шкал критериев оптимальности	135

Глава 3. Методология структурной оптимизации перспективных систем контроля и управления	139
3.1. Выбор и обоснование показателей качества вариантов структурного построения систем контроля и управления	139
3.2. Метод нормализации разнородных технико-эксплуатационных показателей качества систем контроля и управления	145
3.3. Метод нормализации разнородных интервальных показателей качества, технических характеристик, контролируемых параметров	154
3.3.1. Теоремы о свойствах нижних и верхних границ бинарных разностей двух вещественных интервалов	157
3.3.2. Построение интервальных отношений предпочтения на множестве показателей качества систем контроля и управления	161
3.4. Метод выбора оптимального структурного построения перспективной системы контроля и управления по векторному разнородному показателю качества (метод векторного предпочтения)	169
3.5. Методика построения векторного отношения предпочтения на множестве вариантов структурного построения систем контроля и управления	174
Глава 4. Принципы построения функциональных блоков систем контроля и управления	180
4.1. Датчики и нормализаторы	185
4.1.1. Назначение и классификация датчиков	186
4.1.2. Назначение и классификация нормализаторов	189
4.2. Преобразователи информации	192
4.2.1. Назначение, классификация и принципы построения преобразователей информации код-аналог	194
4.2.2. Назначение, классификация и принципы построения преобразователей информации аналог-код	203
4.3. Назначение и классификация устройств оценки информации	222
4.3.1. Принципы построения аналоговых устройств оценки информации	225
4.3.2. Принципы построения цифровых устройств оценки информации	229
4.4. Принципы построения устройств управления и коммутации	232
4.4.1. Назначение и классификация коммутаторов	232
4.4.2. Назначение и классификация устройств управления	239
4.5. Системы контроля неэлектрических и электрических параметров	256
4.5.1. Системы контроля неэлектрических параметров	256
4.5.2. Системы контроля электрических параметров	266

4.5.3. Системы контроля напряжения допусковым методом	274
4.5.4. Системы контроля напряжения с количественной оценкой	277
4.6. Системы контроля технического состояния двигателей на твердом топливе	282
Глава 5. Разработка и конструирование систем контроля и управления	303
5.1. Основные этапы разработки аппаратуры	303
5.2. Технические требования к аппаратуре систем контроля и управления	308
5.3. Задачи конструирования СКУ	312
5.4. Анализ объекта контроля	319
5.4.1. Выделение функциональных групп в объекте контроля	319
5.4.2. Определение основных параметров	322
5.5. Алгоритмизация процесса контроля и управления	330
5.5.1. Формы задания алгоритмов	330
5.5.2. Синтез структурной схемы СКУ с помощью логической схемы алгоритмов	341
5.5.3. Преобразование форм записи алгоритмов	344
5.6. Объединение алгоритмов	348
5.7. Разработка структурных и функциональных схем на основе алгоритма функционирования СКУ	352
Заключение	360
Список литературы	362

В горах ближайший путь —
от вершины к вершине.

Ф. Ницше

Введение

Важнейшая роль при решении задач круглосуточного наблюдения за местностью в режиме сканирования или получения детальных снимков, селекции движущихся объектов с определением их координат, передачи кодированной информации по коммерческим каналам (включая глобальные линии спутниковой связи), оценки противопожарной обстановки, а также задач военного назначения по разведке, патрулированию приграничных районов, дальнего радиолокационного обнаружения и т. д. отводится беспилотным летательным аппаратам (БПЛА). Распределение мирового потребительского спроса на гражданские БПЛА в период с 2015 по 2020 г. выглядит следующим образом: 45 % — правительственные структуры, 25 % — пожарные, 13 % — сельское хозяйство и лесничество, 10 % — энергетика, 6 % — обзор земной поверхности, 1 % — связь и вещание. В 2016 г. китайская компания «Ихан», основанная в городе Гуанчжоу, впервые в мире представила первый беспилотный летательный аппарат для транспортировки пассажиров и небольшого грузового багажа. Презентация прошла на выставке потребительской электроники CES-2016 в американском Лас-Вегасе.

Согласно Правилам использования воздушного пространства Российской Федерации беспилотный летательный аппарат (БПЛА, в разговорной речи также «беспилотник» или «дрон», от англ. drone — трутень) определяется как «летательный аппарат, выполняющий полет без пилота (экипажа) на борту и управляемый в полете автоматически, оператором с пункта управления или сочетанием указанных способов». Международная организация гражданской авиации (ИКАО) разделяет радиоуправляемые модели и БПЛА, указывая, что первые предназначены прежде всего для развлечения и должны регулироваться местными, а не международными правилами использования воздушного пространства [26].

Любой БПЛА не способен эффективно выполнять возложенные на него функции без наличия в составе бортовой аппаратуры управления и средств наземного обеспечения полета, формируемых на основе мобильных пунктов управления, систем контроля и управления (СКУ), которые отвечают за предполетную подготовку, взлет, правильное функционирование БПЛА во время нахождения на траектории полета и выявление технических неисправностей [26]. В ближайшей перспективе СКУ будет отведена особая роль при выходе на мировой рынок БПЛА, предназначенных для перевозки пассажиров.

Системы контроля и управления (СКУ) БПЛА целесообразно рассматривать как совокупность взаимосвязанных систем контроля и систем управления отдельными параметрами, разделенными в зависимости от функционального назначения. Они состоят из большого числа взаимодействующих между собой подсистем и элементов, способны выполнять широкий спектр возложенных на них задач, имеют многоуровневую структуру, что позволяет отнести их к сложным техническим системам (СТС).

Высокие технические характеристики СКУ БПЛА закладываются на стадии жизненного цикла «Исследование и обоснование разработки» и подтверждаются на этапах проектирования, производства, дальнейшей эксплуатации. При решении задач оптимального структурного построения СКУ БПЛА наряду с общими требованиями, предъявляемыми к сложным техническим системам особого назначения, существует определенная специфика, обусловленная высокой стоимостью опытных образцов, неопределенностью исходной информации об условиях функционирования (применения по назначению), областях допустимости и эффективности технического состояния перспективных изделий.

К настоящему времени плеядой отечественных ученых, а именно В. П. Балашовым, Е. Ю. Барзиловичем, Н. А. Бородачевым, Е. А. Бурлаковым, Б. А. Вигманом, Д. В. Гаскаровым, Г. М. Гнедовым, И. С. Гусинским, А. К. Дмитриевым, Г. М. Загрудниновым, В. П. Калявиным, К. Б. Карандеевым, В. Ю. Корниловым, П. И. Кузнецовым, И. В. Кузьминым, Л. А. Мартыщенко, П. В. Новицким, П. П. Пархоменко, Н. Н. Пономаревым, Л. А. Пчелинцевым, В. В. Сафроновым, И. М. Синдеевым, Э. П. Спириным, В. Г. Старосельцем, А. Е. Филюстиным и многими другими, накоплен большой опыт в области создания систем контроля и управления. Разработаны методы решения, основанные на достижениях в области системного анализа, исследования операций, теории принятия решений, технического контроля, диагностирования, наукоемких технологий и т. д.

Тенденции сегодняшнего дня определили направления создания качественно нового поколения БПЛА, обусловили необходимость расширения условий их функционального применения и сформировали современные требования по повышению оперативности их предполетной подготовки. Важнейшими задачами процесса эксплуатации БПЛА становятся сокращение времени предполетной подготовки и увеличение времени полета за счет дифференцирования функций контроля и управления. «Ахиллесовой пятой» БПЛА являются уязвимость каналов связи (сигналы ГЛОНАСС/GPS-навигаторов, как и любые сигналы, принимаемые и отсылаемые летательным аппаратом, можно глушить, перехватывать и подменять), оценки информационных потоков, циркулирующих в контурах контроля и управления, выявление «нужной» (полезной) в конкретный момент времени информации, предназначенной для передачи, в условиях экономии пропускной способности канала спутниковой связи, определение требований к этой информации, ее унификации и нормализации на всех уровнях управления, выявление технических неисправностей. Кроме того, в настоящий момент при принятии решения на взлет или отмену взлета средних и тяжелых БПЛА (в случае выявления неисправности, в разговорной речи «отказа») требуется учет большого количества факторов, связанных с конкретной практической ситуацией.

Теоретические положения, освещенные в учебном пособии, позволяют понять математический аппарат, принципы разработки и построения, устройство и конструкцию как существующих, так и перспективных¹ систем, комплексов контроля и управления БПЛА. Качественное изучение изложенного материала позволит в дальнейшем грамотно эксплуатировать авиационную технику, находить правильные решения в нестандартных ситуациях и будет способствовать формированию необходимых профессиональных качеств будущих специалистов.

¹ Слово *перспективный* происходит от существительного «перспектива» [лат. *perspectiva* (ars) — смотреть, осматривать, проникать взором]. В русский язык слово пришло при Петре I (народ. «перспектива») и заимствовано из немецкого *Perspektive* или французского *perspective*, что означает «рассчитанный на будущее». Именно в таком понимании это слово употребляется в предлагаемой работе.

Науки юношей питают,
Отраду старцам подают,
В счастливой жизни украшают,
В несчастный случай берегут...

М. В. Ломоносов

Глава 1

ОСНОВЫ ТЕОРИИ СТРУКТУРНОГО ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ БПЛА

1.1. Историческая парадигма создания и классификация БПЛА

Летающие модели (уменьшенные копии летательных аппаратов) сыграли и играют важнейшую роль в развитии авиации. На них проверяли и проверяют идеи и технические новинки, ведут научные исследования. Сконструированная еще в 1754 г. великим русским ученым М. В. Ломоносовым летающая модель для подъема метеорологических приборов явилась прототипом современного вертолета. Опыты с летающими моделями оказали большую помощь А. Ф. Можайскому в создании первого самолета. На моделях он проверял теорию и правильность предположений, лежащих в основе проекта первого летательного аппарата.

В настоящее время создана теория, которая позволяет использовать результаты опытов, проводимых с моделями в аэродинамических трубах, при определении сил, действующих на самолеты и вертолеты, ракеты и космические корабли при их полете. Появление и развитие аэродинамических труб теснейшим образом связано с развитием авиации. Первые аэродинамические трубы были построены в 1871 г. В. А. Пашкевичем в России и Ф. Уэнхемом в Великобритании, а в последующие годы К. Э. Циолковским

и Н. Е. Жуковским в России, Л. Прандтлем в Германии, братьями У. и О. Райт в США, А. Г. Эйфелем во Франции. Принцип действия аэродинамической трубы основан на принципе относительности Галилея: вместо движения тела в неподвижной среде изучается обтекание неподвижного тела потоком газа.

Дата рождения отечественного авиамоделизма — 2 января 1910 г. В этот день состоялись первые состязания летающих моделей. Самый дальний полет составил 17 м. Одним из организаторов этих состязаний был «отец русской авиации» Николай Егорович Жуковский, русский ученый, основоположник современной гидроаэродинамики. Содействовал распространению авиамоделизма и К. Э. Циолковский, строивший и запускавший со своими учениками тепловые шары и воздушные змеи.

Именно летающие модели стали прообразом современных беспилотных летательных аппаратов.

Беспилотные летательные аппараты принято делить по таким взаимосвязанным параметрам, как масса, время, дальность и высота полета. Выделяют следующие классы аппаратов [118]:

- «микро» (условное название) — массой до 10 кг, временем полета около 1 ч и высотой до 1 км;
- «мини» — массой до 30 кг, временем полета несколько часов и высотой до 3–5 км;
- средние («миди») — до 1000 кг, временем 10–12 ч и высотой до 9–10 км;
- тяжелые — с высотой полета до 20 км и временем полета 24 ч и более.

В СССР в 1930–1940 гг. авиаконструктор В. В. Никитин разрабатывал торпедоносец-планер специального назначения (ПСН-1 и ПСН-2) типа «летающее крыло» в двух вариантах: пилотируемый, тренировочно-пристрелочный и беспилотный с полной автоматикой. К началу 1940 г. был представлен проект беспилотной летающей торпеды с дальностью полета от 100 км и выше (при скорости полета 700 км/ч). Однако этим разработкам не было суждено воплотиться в реальные конструкции. В 1941 г. были удачные применения тяжелых бомбардировщиков ТБ-3 в качестве БПЛА для уничтожения мостов.

23 сентября 1957 г. КБ Туполева получило госзаказ на разработку мобильной ядерной сверхзвуковой крылатой ракеты среднего радиуса действия. Первый взлет модели Ту-121 был осуществлен 25 августа 1960 г., но программа была закрыта в пользу баллистических ракет КБ Королева. Созданная модель все же нашла применение в качестве мишени, а также при создании беспилотных самолетов-разведчиков Ту-123 «Ястреб», Ту-143 «Рейс» и Ту-141

«Стриж», стоявших на вооружении ВВС СССР с 1964 по 1979 г. СССР в 70–80-е годы стал лидером по производству БПЛА, только Ту-143 было выпущено около 950.

Сегодня в России гражданская область применения БПЛА весьма обширна: от сельского хозяйства и строительства до нефтегазового сектора и сектора безопасности. БПЛА гражданского назначения могут использоваться в работе служб по чрезвычайным ситуациям (контроль пожарной безопасности), полиции (патрулирование зон), предприятий сельского хозяйства (наблюдение за посевами), лесничества и рыболовства (лесоохрана и контроль рыбного промысла); компаний, занимающихся геодезией (картографирование), институтов географии и геологии, компаний нефтегазового сектора (мониторинг нефтегазовых объектов), строительных предприятий (инспектирование строек), средств массовой информации (аэрофото- и видеосъемка) и др. В ближайшей перспективе БПЛА будут способны перевозить пассажиров (беспилотное аэротакси), выполнять служебные задания по поиску и спасению людей.

Рассмотрим классификацию БПЛА по прототипам [118].

БПЛА типа «дирижабль» (рис. 1.1). Дирижабль — это аэростат (аппарат легче воздуха), оснащенный двигательной установкой.

В настоящее время беспилотные дирижабли и привязные беспилотные аэростаты используются для высотного видеонаблюдения. В состав оснащения входят бортовые камеры, которые позволяют производить круглосуточный мониторинг территорий. Одним из очевидных преимуществ дирижабля БПЛА является отсутствие тенденции к немедленному падению на землю в случае возникновения технических неисправностей. Небольшие радиоуправляемые дирижабли также используются в качестве летающих рекламных реплик различных предметов.



Рис. 1.1. БПЛА типа «дирижабль»



Рис. 1.2. БПЛА типа «вертолет»

БПЛА типа «вертолет (хеликоптер)» (рис. 1.2). Один из основных видов БПЛА. Очевидными преимуществами БПЛА вертолетного типа являются способность зависания в точке и высокая маневренность, поэтому их часто используют в качестве воздушных роботов. К недостаткам следует отнести увеличенные габариты за счет хвостовой балки и потерю мощности на привод рулевого винта (до 10 % от мощности двигателя), уязвимость и опасность повреждения рулевого винта при полете у земли.

БПЛА типа «самолет» (рис. 1.3). Этот тип аппаратов известен так же, как БПЛА с жестким крылом (англ. fixed-wing UAV). Подъемная сила у этих аппаратов создается аэродинамическим способом за счет напора воздуха, набегающего на неподвижное крыло.

Аппараты такого типа, как правило, отличаются большой длительностью полета, большой максимальной высотой полета и высокой скоростью. Существует большое разнообразие подтипов БПЛА



Рис. 1.3. БПЛА типа «самолет»



Рис. 1.4. БПЛА типа «ракета»

самолетного типа, различающихся по форме крыла, фюзеляжа и двигателя. Практически все схемы компоновки самолета и типы фюзеляжей, которые встречаются в пилотируемой авиации, применимы и в беспилотной. Взлеты и посадки традиционных БПЛА самолетного типа трудоемкие и затратные, требующие наличия специальных вспомогательных средств (ВПП, устройств запуска и посадки), поэтому разработчики новой техники все чаще обращаются к нетрадиционным схемам запуска самолетных БПЛА, позволяющим создать безаэродромные беспилотные авиационные системы (БАС). Речь идет, прежде всего, о БПЛА, запускаемых с земли с использованием реактивных ускорителей на твердом топливе.

БПЛА типа «ракета» с реактивным двигателем (рис. 1.4). Это ударный тип БПЛА, в гражданской сфере неприменимый.

БПЛА типа «автожир (гирокоптер)» (рис. 1.5). Очень интересный тип летательных аппаратов, которые похожи на самолеты



Рис. 1.5. БПЛА типа «автожир»

а)



б)



Рис. 1.6. БПЛА: а — квадрокоптер; б — мультикоптер

и вертолеты одновременно. Вместо самолетного крыла у них роторный винт. Имеют передний винт, как у винтомоторного самолета, и несущий винт (сверху), как у вертолета.

БПЛА типа «квадрокоптер или мультикоптер» (рис. 1.6). Квадрокоптер (рис. 1.6, а) — летательный аппарат с четырьмя несущими винтами. Очень интересная и перспективная конструкция, которая уже себя отлично зарекомендовала. У мультикоптера шесть и более винтов.

На рис. 1.6, б представлен 18-роторный мультикоптер Volocopter 2X, предназначенный для перевозки пассажиров.

БПЛА типа «летающая тарелка» (рис. 1.7). Это вид БПЛА с жестким зонтообразным крылом, основанный на эффекте Коанды.

В последние годы ряд исследователей и фирм провели удачные эксперименты по реализации эффекта Коанды применительно



Рис. 1.7. БПЛА типа «летающая тарелка»

к построению БПЛА. Так, в Великобритании фирмой AESIR испытан экспериментальный аппарат *Embler*, демонстрирующий возможности использования эффекта. Аппарат выполнен из углепластикового корпуса. Привод вентилятора — электромотор. Аппарат может находиться в воздухе до 10 мин. Управление направлением движения в этом БПЛА осуществляется с помощью управляемых заслонок в выходной щели вентиляторного канала (управление рысканьем), а также с помощью четырех закрылков у кромки зонтообразной поверхности (управление креном и тангажом). В 1932 г. румынский ученый Анри Коанда обнаружил, что поток жидкости или газа стремится отклониться по направлению к стенке тела с криволинейной поверхностью и при определенных условиях прилипает к ней, вместо того чтобы продолжать движение в начальном направлении. Действие эффекта Коанды проявляется тогда, когда подача слоя воздуха на поверхность производится через узкую щель. Этот тонкий скоростной слой захватывает окружающий воздух. В итоге создается так называемая настилаящая струя — полуограниченная струя, которая всегда развивается только вдоль поверхности ограждения. Дальность распространения настилаящей струи увеличивается приблизительно в 1,2 раза по сравнению со стесненной струей (т. е. струей, ограниченной со всех сторон, как в трубе). Таким образом, струя, которая настиляется на поверхность, имеет большую дальность при остальных одинаковых условиях, чем струя ненастилаящая.

Летательный аппарат на эффекте Коанды устроен довольно просто: над зонтообразной поверхностью установлен вентилятор или реактивный двигатель, создающий поток воздуха, выходящий через узкую щель и настилаящий криволинейную поверхность. Результаты моделирования скорости потока показаны на рис. 1.8.

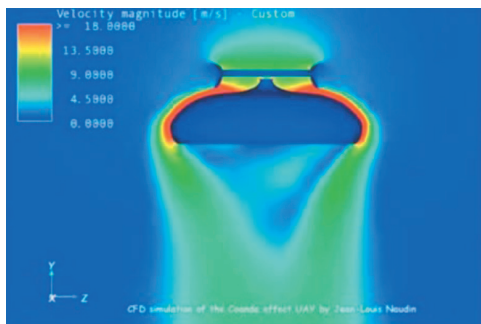


Рис. 1.8. Результаты моделирования скорости воздушного потока вдоль зонтообразной поверхности (по материалам исследований Jean-Louis Naudin, 2006)

Приведенная справочная информация по классификации прототипов БПЛА, конечно, не является полной. К разработкам беспилотной авиационной техники подключается все большее количество стран и фирм. Ситуация в этой области быстро меняется. Текущую информацию по состоянию дел в этой области можно найти, например, на специализированных сайтах российской (RUVSA — Russian Unmanned Vehicle Systems Association) и международной (AUVSI — Association for Unmanned Vehicle Systems International) ассоциаций беспилотных систем.

1.2. Система контроля и управления БПЛА как сложная техническая система

В беспилотных авиационных комплексах, для эффективного выполнения возложенных на них функций, требуется наличие систем контроля и управления, которые отвечают за предполетную подготовку, взлет, правильное функционирование во время движения по траектории полета, поддержание надежности БПЛА на каждом из перечисленных этапов и выявление технических неисправностей. Согласно статистике, приведенной в докладе Исследовательской службы Конгресса США, на сегодняшний день БПЛА имеют в 100 раз большую вероятность разбиться, чем обычные пилотируемые машины.

На поддержание надежности БПЛА оказывают влияние:

- полнота и достоверность контроля параметров восстанавливаемых систем БПЛА, надежность которых меняется в ходе эксплуатации (для этого применяются средства технической диагностики, использующие алгоритмы поиска неисправных элементов);
- периодичность контрольных проверок и регламентов, которая зависит от надежности контролируемых систем;
- время снятия с эксплуатации для проведения контрольных проверок и регламентов, которое включает время проведения собственно контрольных и регламентных операций и время восстановления при необходимости работоспособного состояния систем БПЛА (для снижения этого времени применяют средства встроенного контроля, а также легкоъемные блоки, обеспечивающие быструю замену неисправных элементов и снижение тем самым времени восстановления).

На этапе эксплуатации БПЛА могут проводиться меры по повышению надежности путем замены отдельных систем их улучшенными вариантами. Эффективному контролю и поддержанию