

ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Пилотажные стенды и тренажеры за рубежом:
состояние и перспективы развития

УДК 629.7.018.3

ПИЛОТАЖНЫЕ СТЕНДЫ И ТРЕНАЖЕРЫ ЗА РУБЕЖОМ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Моделирование полетов не является новым направлением исследований в авиации. Еще в 1910 г. возникла идея создать устройство более дешевое и безопасное, чем самолет, для тренировки начинающих летчиков. В английском авиационном журнале «Флайт» от 10 декабря 1910 г. давалось описание одного из первых тренажеров. Тренажер был установлен на платформе, обеспечивающей свободу движения по тангажу, крену и рысканию [1].

Дальнейшее развитие авиации привело к необходимости создания более сложных тренажеров. В 1927 г. Линк построил макет самолета, закрепленного на универсальном шарнире и управляемого посредством пневмоприводов. Эта работа явилась важным научно-техническим достижением, подготовившим почву для создания многих аналогичных устройств, некоторые из которых используются и в настоящее время. Производство тренажеров все расширяется и выходит за рамки моделирования условий полета самолетов. Так, например, ВВС США используют стенды для обучения расчетов пусковых комплексов стратегических ракет. Созданы стенды для обучения управлению танками, электропоездами, ядерными силовыми установками, нефтеочистительными заводами. Начиная со второй мировой войны тренажер Линка стал интенсивно использоваться в военной и гражданской авиации. В конце 1940-х годов ряд механических устройств на тренажере Линка был успешно заменен электронными системами. Авиационные тренажеры с аналоговыми вычислителями получили широкое развитие в 1950-е годы и использовались до существенных достижений в цифровой технике. В течение этого периода были созданы тренажеры для обучения экипажей самолетов А-4Д, F-4 и С-130.

В начале 1960-х годов началось использование ЭВМ для моделирования полета в реальном масштабе времени. Первыми такими стендами были системы для моделирования полета на самолетах С-141 и F-111. Использование моделей местности и телевизионной аппаратуры для создания у обучающегося иллюзии окружающей обстановки явилось другим важным достижением в технике моделирования. В этих тренажерах телевизионная камера двигалась над трехмерной моделью аэродро-

ма в соответствии с сигналами от органов управления в кабине оператора. Изменяющаяся картина местности проектировалась на экран перед кабиной, обеспечивая иллюзию полета. Коммерческие авиакомпании быстро использовали эти возможности для повышения эффективности наземных тренировок летчиков.

Второе поколение систем цифрового моделирования появилось в начале 1970-х годов. На тренажерах этого периода изображение внешней обстановки генерировалось ЭВМ и обеспечивалась подвижность кабины по шести степеням свободы: трем угловым (тангажу, крену, рысканию) и трем линейным (в вертикальном, поперечном и продольном направлениях).

Гражданские авиакомпании первыми стали интенсивно использовать тренажеры, причем в международном масштабе и с организацией соответствующих служб.

Современные тренировочные программы подготовки летного состава американских авиакомпаний с использованием тренажеров требуют всего 1,2 ч летного времени для обучения опытного летчика полету на незнакомом самолете [2].

В 1979 г. стоимость продукции фирм, выпускающих тренажеры, достигла ~400 млн. ф. ст. Авиакомпании получили примерно 20 тренажеров (~1/7 оборота), остальная продукция пошла военным заказчикам.

Стоимость современного тренажера меняется в широких пределах. Тренажер большого транспортного самолета стоит ~7 млн. долл., а цена простого процедурного тренажера для отработки навыков работы с приборным оборудованием составляет ~3000 долл.

Годовая наработка тренажера авиакомпаний может достигать 7000 ч при эксплуатационных расходах 300—400 долл./ч.

Стоимость современной системы визуализации с изображением, генерируемым ЭВМ, составляет 0,5—1,5 млн. долл. Простые варианты системы визуализации имеют один экран ЭЛТ, а сложные — оснащаются тремя экранами на пульте каждого пилота для обеспечения бокового обзора [3].

В 1978 г. стоимость тренажеров, которыми располагали авиакомпании, составляла ~500 млн. ф. ст. [2].

В октябре 1978 г. федеральное управление гражданской авиации США (FAA) выпустило циркуляр 121-14В, в котором учитывается расширение использования моделирующих установок и предлагается в будущем проводить переподготовку пилотов на новый самолет только с использованием тренажера [4].

FAA разработало план поэтапного перехода на тренажеры при подготовке пилотов. Современные тренажеры (в частности, тренажер А-300, выпускаемый во Франции) отвечают требованиям первого этапа. Этапы II и III предусматривают полный переход на тренажеры при обучении пилотированию нового самолета или «знакомстве» с неизвестным аэропортом [5].

Указанное предложение FAA стимулировало спрос на тренажеры для авиакомпаний. Если ранее в год продавалось 10—15 тренажеров, то с 1979 г. авиакомпании стали покупать 15—20 тренажеров в год. Стоимость одного тренажера для подготовки пилотов авиакомпаний составляет 5—7 млн. долл., таким образом стоимость продаж превышает 100 млн. долл. По оценкам фирмы Редифон (США), сбыт тренажеров будет возрастать на 10% ежегодно, т. е. быстрее объема авиаперевозок [4].

В разработке и производстве тренажеров участвуют как специализированные фирмы, так и фирмы, выпускающие авиакосмическую продукцию и руководящие программой создания тренажера для своего самолета или космического аппарата.

Крупнейшими зарубежными фирмами, выпускающими пилотажные стенды, тренажеры и системы визуализации, являются транснациональная фирма Зингер (имеющая отделение Линк в США и Линк-Майлз в Англии), английская Редифон, канадская САЕ Электроникс, французская Томсон-CSF (отделение LMT). В отдельных программах участвуют также американские фирмы Джeneral Электрик, Макдоннелл-Дуглас, Боинг, Грумман и Эванс-Сатерлэнд, Эткин-Мерилл и Рефлектон.

Фирма Зингер является крупнейшим производителем моделирующих установок военного назначения. Тренажеры для вооруженных сил США и NASA (включая сложный тренажер, моделирующий работу многоцветного воздушно-космического аппарата «Спейс Шаттл») выпускает фирма Зингер-Линк. Английское отделение Зингер-Линк-Майлз производит тренажеры для английских вооруженных сил. Совместно с фирмой Редифон выпускает тренажеры для экипажей истребителя-бомбардировщика «Торнадо». Значительную часть продукции составляют тренажеры для авиакомпаний, эксплуатирующих самолеты Боинг 747, L-1011, DC-9 и т. д.

Фирма Редифон не может получать заказы на тренажеры для экипажей американских боевых самолетов, поскольку характеристики последних не могут быть выданы иностранной фирме. Однако эта английская фирма поставляет на американский рынок больше моделирующих установок, чем любая другая иностранная компания, и на равных конкурирует с другими фирмами в сбыте систем визуализации.

Фирма Редифон была субподрядчиком фирмы Боинг в разработке тренажера для экипажа са-

молета Боинг Е-3А AWACS, поставленного ВВС США в 1976 г., и снова в качестве субподрядчика американской фирмы участвует в создании тренажера В-52/КС-135 и будет поставлять 60% его компонентов. Недавно она поставила фирме Боинг тренажер В-52 с телевизионной системой визуализации «Дьювью» для реалистического моделирования заправки топливом в полете.

Фирма Редифон имеет свой филиал в США — фирму Редифон Симьюлейшн — и заключила соглашение с американской фирмой Эванс Сатерлэнд о разработке и сбыте систем визуализации с генерированием изображения с помощью ЭВМ.

Для английских вооруженных сил фирма Редифон изготовляла тренажеры для экипажей вертолета «Линкс» и самолетов «Торнадо» (в кооперации с фирмой Зингер-Линк-Майлз) и «Хоук» [6].

В 1970-е годы фирма Редифон разработала ряд систем визуализации с генерированием изображений с помощью ЭВМ, в том числе систему «Нововью» SR1 — одну из лучших систем типа ночь — сумерки, широко используемую на тренажерах.

В 1980 г. планировалось ввести в эксплуатацию систему «Нововью» SP2 — первую систему визуализации типа день [7].

В 1978 г. фирма Редифон по заказу ВМС США построила демонстрационную модель лазерной системы визуализации.

Фирма САЕ Электроникс поставляет тренажеры для канадских ВВС и стран НАТО и разрабатывает тренажер для экипажа противолодочного самолета «Аврора».

Фирма Макдоннелл-Дуглас разрабатывала стенды для моделирования полета высокоманевренных самолетов. Эти стенды имеют купол, на внутреннюю поверхность которого проецируется вид из кабины самолета. В куполе можно устанавливать кабины самолетов AV-8В, F-4, F-15, F-18. Фирма по контракту ВВС США изготовила семь тренажеров F-15 (совместно с фирмой Гудъир).

Для флота США фирма изготовила один из самых совершенных стендов для моделирования воздушного боя, который с 1979 г. функционирует на базе Осеана.

Фирма серийно выпускает системы визуализации типа «Вайтл» с генерированием изображений с помощью ЭВМ, непрерывно совершенствуя их.

Отделение LMT фирмы Томсон-CSF традиционно поставляет тренажеры для ВВС Франции (для подготовки экипажей самолетов «Ягуар», «Этапдар», «Трансаль», «Альфа Джет» и «Мираж») и авиакомпаний (для экипажей транспортных самолетов «Каравелла», А-300, «Конкорд», «Меркюр» и т. д.).

Фирма Джeneral Электрик выпускает только системы визуализации. Аналогичную продукцию выпускает фирма Маркони.

Фирма Рефлектон (США) известна как поставщик вертолетных тренажеров. Она имеет контракт на изготовление для ВВС США 14 тренажеров А-10 с ограниченной подвижностью (только для воспроизведения бафтинга).

Фирма Грумман выпускает тренажеры для подготовки экипажей самолетов флота США А-6Е [6].

Хотя пилотажные стенды и тренажеры указанных фирм во многом различны, их программы исследований имеют ряд общих направлений:

усовершенствованный пульт инструктора в тренажере. Практически все программы моделирования требуют участия инструктора. В связи с этим необходимо расширение возможностей инструктора в отношении анализа и контроля обстановки, обеспечение эффективного вмешательства в процесс благодаря дисплеям, более совершенным средствам управления, расположению места инструктора возможно ближе к кабине экипажа;

усовершенствованные системы визуализации с цифровой генерацией изображения. Использование мини-ЭВМ с быстрой выборкой нужных данных обеспечивает создание реалистичной цветной картины окружающей обстановки в ночное, вечернее и дневное время суток. Современные дисплеи дают возможность воспроизводить затенение, перекрытие огней и зданий другими зданиями или возвышенностями местности, яркость красок горизонта, посадочные огни, воздушное движение и руление самолетов, звезды, различные погодные условия;

более совершенные системы перемещений кабин стенов за счет использования гидростатических приводов и ультразвуковых датчиков линейных перемещений;

системы загрузки органов управления с использованием гибридной электроники и гидростатических силовых цилиндров, обеспечивающие близость динамических и силовых характеристик стенов и имитируемого самолета;

системы воспроизведения звуковых эффектов (для моделирования запуска двигателей на земле, работы двигателей при рулежке, раскрытия створок шасси при посадке, выпуска закрылков, шума турбин, работы гидравлических насосов), способствующих сближению условий моделирования и реального полета [8].

В 1978 г. самым крупным парком тренажеров располагала американская фирма Флайт Сейфти Интернэшнл (FSI), имеющая штаб-квартиру в нью-йоркском аэропорту Ла Гардиа и 18 центров обучения в США и Франции. К концу 1978 г. число ее тренажеров возросло с 29 до 37, были закуплены тренажеры для обучения экипажей новых самолетов «Конкорд», А-300 и DC-10.

Самолетостроительные фирмы обычно включают расходы по переучиванию одного или нескольких экипажей в закупочную стоимость нового самолета. Однако большинство фирм хотело бы, чтобы этот процесс осуществлялся какими-либо внешними организациями. Для каждого типа самолета фирма FSI организует учебный центр, имеющий несколько тренажеров и располагающийся недалеко от завода, на котором выпускается или ремонтируется этот самолет. Основной деятельностью центров обучения являются периодические тренировки экипажей по контракту с авиатранспортными компаниями (в 1978 г. фирма FSI имела договора почти с тысячей авиакомпаний). Специалисты фирмы считают необходимым, чтобы каждый экипаж раз в полгода два или три дня уделял работе на тренажерах, поскольку при нормальной каждодневной эксплуатации самолета летчики начинают забывать о технической сложности современных самолетов и о том, как им действовать в критической ситуации. Фирма FSI использует тренажеры фирм Зингер-Линк, Редифон, Эткин-Мерилл и САЕ Электроникс.

Большее половины тренажеров оснащены цифровыми ЭВМ и системами визуализации, которыми планируется в ближайшее время оборудовать остальные тренажеры. Применяемые системы визуализации позволяют отображать окружающую обстановку на высотах ниже ~75 м, с помощью ЭВМ можно имитировать различного рода отказы, например уменьшение давления масла и т. д. Библиотека программ системы визуализации позволяет воспроизводить обстановку, соответствующую 150 аэропортам в различных странах. Имитируется изображение местности только в ночное время, поскольку считается, что если летчик сможет решить возникающие перед ним проблемы в ночное время, то он тем более справится с ними днем [9].

Недавно фирма Боинг объявила о строительстве в Сиэтле нового тренировочного центра стоимостью 12 млн. долл. Конечной целью работы центра фирма считает полный переход на тренажеры при переподготовке пилотов на другой самолет. Эту цель преследуют и фирмы, разрабатывающие новые тренажеры для подготовки летчиков самолетов Боинг 757 и 767.

Фирма Редифон разрабатывает усовершенствованные системы для тренировочного центра и включает в состав оборудования тренажеров многопроцессорную ЭВМ Системс 32 и модульный пульт с графическим дисплеем для инструктора.

Первый усовершенствованный тренажер предполагалось ввести в эксплуатацию в 1980 г., всего будет выпущено более 20 тренажеров для подготовки летчиков самолетов Боинг 727, 737, 757 и 767 [7].

В 1978 г. ВВС США планировали в ближайшие 5 лет только на закупку тренажеров для экипажей самолетов Боинг В-52 и KC-135 затратить 630 млн. долл. и выделить 92 млн. долл. на исследования в этой области. За десять лет (начиная с 1978 г.) на закупку тренажеров военного назначения намечалось израсходовать 8 млрд. долл.

Вооруженные силы США за период 1978 г. по 1980 г. осуществляли программы разработки и закупок тренажеров для экипажей вертолетов СН-47, АН-1, УН-60, СН-53 и самолетов А-6, Е-2, F-14, F-18, P-3, S-3, А-10, С-130, F-15, F-16, В-52 и KC-135.

Расходы родов войск США на тренажеры представлены в табл. 1 и 2, а полученная экономия от их использования показана в табл. 3 [6].

До 1973 г. ВВС США довольно медленно следовали примеру авиакомпаний в отношении использования тренажеров. Например, в 1967 г. ни на одной из шести проинспектированных тренировочных баз ВВС не использовались тренажеры с системой визуализации, хотя таковые там имелись. Однако в последующие годы ВВС в значительной степени компенсировали это отставание. Уже к началу 1978 г. было затрачено около 35 млн. долл. на исследовательские работы в области моделирующих стенов и тренажеров и ~385 млн. долл. на их производство. Один из руководителей отдела моделирования штаба тактического авиационного командования ВВС США подчеркивал, что создание широкой стеновой базы позволит значительно повысить боевую готовность экипажей: каждый летчик будет лучше подготовлен к перво-

Таблица 1
Расходы на закупки
тренажеров и пилотажных
стендов (млн. долл.)

	Годы			
	1977	1978	1979	1980
Армия	14,5	0	29,8	62,2
ВМС	77,0	129,9	128,2	120,8
ВВС	209,3	87,1	137,6	330,4
Всего	300,8	217,0	295,6	513,4

Таблица 2
Расходы на НИОКР по
моделирующим установкам
для вооруженных сил США

	Годы			
	1977	1978	1979	1980
Армия	6,2	6,7	5,0	18,3
ВМС	6,0	7,1	9,5	8,1
ВВС	19,6	31,8	21,9	24,1
Всего	31,8	45,6	36,4	50,5

Таблица 3
Экономия налета и соот-
ветствующих расходов во-
енной авиации США благо-
даря использованию
тренажеров

	1977 г.		1979 г.	
	ч	млн. долл.	ч	млн. долл.
Армия	115 997	274 804	86,9	
ВМС	144 054	152 129	168,4	
ВВС	249 391	297 054	465,1	
Всего	509 442	723 987	720,4	

му боевому вылету, который будет для него критическим, поскольку в будущих военных конфликтах нельзя рассчитывать на время для обучения, а соображения безопасности не позволяют отрабатывать в полете целый ряд ситуаций [10].

В 1973 г. министерство обороны США задалось целью уменьшить к 1980 г. налет на 25% за счет широкого использования тренажеров. Одновременно с целью экономии топлива были резко сокращены полеты.

В 1978 г. месячный налет летчика ВВС США в среднем составлял 20 ч по сравнению с 50 ч в прошлые годы.

По некоторым данным, 2 ч обучения на тренажере по результатам эквивалентны часу реального тренировочного полета, по другим данным это соотношение изменяется на обратное; инструкторы считают, что при отработке отдельных операций обучение на тренажере происходит быстрее. Однако основное преимущество использования тренажеров заключается в том, что их эксплуатация обходится на порядок дешевле, чем самолетов. Опытные военные летчики, признавая этот факт, высказывают, однако, замечания, что часть программы обучения не может быть перенесена на тренажеры. В 1978 г. в связи с участвовавшими летными происшествиями с истребителями-бомбардировщиками F-111 и другими самолетами внимательно изучался вопрос, не является ли их причиной слишком большое сокращение тренировочных полетов.

За последние годы возможности тренажеров военного назначения значительно возросли в соответствии со сложными проблемами обучения и тренировок военных летчиков. Авиакомпании, как правило, организуют тренировку пилотов, имеющих большой опыт полетов на различных типах самолетов. К тому же пилоты авиакомпаний в среднем проводят в воздухе в четыре раза больше времени, чем военные летчики. В противоположность этому ВВС часто имеет дело с новичками, многие из которых никогда не летали на самолетах. Кроме того, летчики ВВС должны быть способны управлять высокоманевренными самолетами, выполняя при этом сложный комплекс боевых задач, связанных с ведением огня. Типичный летчик ВВС США имеет в среднем налет порядка 1500 ч по сравнению с 15 000 ч налета пилота авиакомпании. Высказывается мнение о несоборности сравнения ряда аспектов обучения военных и гражданских летчиков. Однако это не означает, что ВВС не могут использовать тренажеры

для повышения квалификации экипажей. Применение тренажеров обеспечивает программе обучения следующие преимущества.

Имитация боевой обстановки. Для отработки встречающихся на практике тактических элементов воздушного боя может моделироваться ПВО потенциального противника.

Безопасность. Число летных происшествий уменьшается, если экипаж заранее знает, как вести себя в критических ситуациях. Существует также целый ряд маневров, безопасное выполнение которых требует большой практики. К числу последних, например, относится маневр ухода от огня противника и действия при неполадках двигателя. Подобного рода маневры могут моделироваться на стенде без риска для самолета и летчика.

Время. Из-за существующей перегруженности воздушной зоны аэродромов зона полетов обычно находится на значительном расстоянии от них. Моделирование исключает затраты времени на полет в зону и обратно.

Повторяемость. На тренажере можно многократно имитировать маневры, например заход на посадку, до тех пор пока обучаемый не добьется удовлетворительных результатов.

Погода. Умение летать по приборам в условиях плохой видимости необходимо для летчиков высокой квалификации. Тренажеры обеспечивают моделирование полета на различных высотах нижней кромки облаков и различной степени видимости.

Типичным аргументом в пользу использования тренажеров является тот факт, что моделирование дешевле и безопаснее. Однако моделирование в ряде случаев может быть «богаче» реального полета. Например, когда летчик выполняет контрольный полет, он, как правило, заранее знает, какие задачи может предложить ему инструктор. Он также знает, что имитация определенного рода отказов или ошибок будет проводиться лишь при достаточно хорошей погоде и т. д. На тренажере можно моделировать серию критических отказов. Например, пожар двигателя с последующими отказами электропроводки при плохих погодных условиях во время посадки на влажную ВПП.

Вопросами создания тренажеров в ВВС США занимается лаборатория комплектования и подготовки кадров (Human Resources Laboratory) командования авиационных систем и отдел программ моделирующих систем. Некоторые отделы (например, руководящие программы самолетов F-15 и

AWACS) создают свои собственные моделирующие комплексы и стенды.

Использование ЭВМ в системах визуализации и управления движением делает моделирование полетов в настоящее время более реалистичным, чем ранее. Последние достижения в электронике привели к созданию в ВВС США тренажеров нового поколения, настолько полно моделирующих реальный полет, что некоторые энтузиасты утверждают, что на них можно обучать летчиков быстрее и лучше, чем на самолете. Уменьшение времени тренировок летчиков ВВС уже привело к тому, что курсанты последнего года обучения летают сейчас на 40 ч меньше, чем раньше. ВВС планировали также сократить налет экипажей бомбардировщиков В-52 и топливозаправщиков КС-135. Несмотря на то, что достижения в технике моделирования общепризнаны, в министерстве обороны США и конгрессе существуют разногласия относительно того, смогут ли летчики ВВС получать достаточную квалификацию при уменьшении реального налета. Многие опытные летчики сомневаются в целесообразности дальнейшего уменьшения налета по мере ввода в строй новых тренажеров. Некоторые считают, что реальный налет и так уже снижен до критического уровня.

Другой темой для дискуссий являются вопросы экономии топлива и ресурса самолетов и поддержание высокого уровня подготовки летных экипажей (ВВС США ежедневно расходуют $\sim 4 \cdot 10^7$ л реактивного топлива, в случае войны расход может превысить $\sim 16 \cdot 10^7$ л в день) [2].

Топливный кризис 1973 г. привел к резкому расширению использования тренажеров. Стоимость 1 ч полета самолета Т-38 составляет ~ 500 долл. (из которых значительная часть приходится на топливо), в то время как стоимость 1 ч работы тренажера составляет $\sim 65-75$ долл.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРЕНАЖЕРОВ В ВВС США

Повышенное внимание ВВС США к использованию стендового моделирования привело к значительным изменениям в процессе закупки тренажеров. Раньше обычно они приобретались через самолетостроительные фирмы. Эта практика была нарушена, и в настоящее время в большинстве случаев закупка тренажеров осуществляется непосредственно по контрактам с фирмами-изготовителями. Последние обеспечиваются всеми данными по самолету и его оборудованию, необходимыми для точной имитации характеристик самолета на заказанном тренажере.

В случае разработки нового самолета, когда эти данные недостаточно полны, ВВС выдают расчетную информацию в помощь фирме, проектирующей тренажер.

Тренажеры для подготовки курсантов

Наиболее важные программы тренировочного авиационного командования (АТС) — подготовка курсантов-летчиков и штурманов — явились объектом особого внимания с целью повышения эффективности и безопасности обучения и снижения его стоимости.

Приемка в марте 1976 г. тренировочного комплекса Т-45 явилась кульминационным моментом

совместных работ АТС, командования авиационных систем и командования материально-технического обеспечения ВВС.

Объединенная рабочая группа из представителей указанных командований ВВС обеспечила АТС системой штурманской подготовки курсантов. Тренировочный самолет Т-43 (переоборудованный Боинг 737-200), по-новому используемый реактивный тренировочный самолет Т-37 и тренажерный комплекс Т-45 составляют вместе высокоэффективную систему подготовки штурманов для ВВС, ВМС и службы береговой охраны. Тренажер Т-45 дополняет возможности самолета Т-43 благодаря более точному моделированию работы бортового электронного оборудования и реалистическому воспроизведению окружающей обстановки. Тренажер перекрывает рабочие показатели самолета Т-43, позволяя имитировать полет с числами М до 2,0 на высотах от уровня моря до 21,3 км в пространстве практически всего северного полушария. Комплекс Т-45 включает в себя 52 тренажера, объединенных в 13 групп, которые дублируют задачу основного тренажера. Эти тренажеры обеспечивают возможность каждому курсанту управлять своим «собственным» самолетом независимо от других. Возможности тренажера позволяют моделировать задачи различного профиля для существующих самолетов и новых самолетов, например бомбардировщика Рокуэлл В-1. Каждый курсант может «пользоваться» всей сетью обзорных РЛС, зона действия которых охватывает всю континентальную территорию США. Топографические и аэронавигационные карты, географические данные и другая аналогичная информация хранятся на магнитных дисках в управляющем центре комплекса Т-45. Эти данные с разрешением 75 м или 450 м в зависимости от выбранной курсантом дальности действия РЛС обеспечивают имитацию радиолокационного обзора трассы полета.

Отработка методики ориентации по звездам производится на аэронавигационном комплексе AN/AVN-1, который позволяет воспроизводить 41 необходимую для навигации звезду, три планеты, Солнце и Полярную звезду в зависимости от времени суток, положения самолета, высоты полета и т. д. Имитация относительного движения небесных тел и самолета в этой подсистеме позволяет использовать стандартные навигационные таблицы. Наряду с основным приборным оборудованием, включающим индикаторы приборной скорости, высоты, температуры, курса, на тренажере имеются ЭВМ, обеспечивающие счисление пути, инерциальная навигационная система, доплеровская система и радиовысотомер. Управление тренажером в каждой группе осуществляется с пульта инструктора и оператора. Оператор может изменять параметры движения самолета, выполнять функции наземного контроля, диспетчерской службы и т. д. Инструктор имеет возможность воспроизводить отказы электронного оборудования, «заморозить» ситуацию для выдачи курсанту инструкций, вернуть «самолет» в любую точку северного полушария. Инструктор и оператор могут контролировать качество выполнения задания, используя индикацию на ЭЛТ. Получение всех данных, необходимых для разбора полета, осуществляется не позднее чем через 10 мин после окончания моделирования.

Пилотажные стенды для отработки полетов по приборам курсантами летных училищ UPT-IFS (Undergraduate Pilot Training-Instrument Flight Simulators), созданные по заданию ТАС, явились примером усовершенствованных тренажеров нового поколения. Каждый стенд включает в себя кабину самолета Т-37 или Т-38, вычислительную аппаратуру, систему перемещений кабины и систему визуализации с ограниченным обзором. В масштабе 1:2000 воспроизводится изображение окружающей аэропорт местности в радиусе от 10 до 19 км [11].

Использование тренажера UPT-IFS позволит сократить существующую 210-часовую программу обучения полетам по приборам до 170 летных часов. Запланирована установка 88 тренажеров этого типа на шести тренировочных базах ВВС США [11, 12].

Будущие операторы службы воздушного движения тренируются в обстановке, имитирующей условия аэропорта. Имитатор оборудования диспетчерского поста для управления движением самолетов по правилам визуальных полетов AN/GPN-T3 VFR CTS (Air Navigation/Ground Position Navigation Visual Flight Rules Control Tower Simulator) позволит обучать операторов военной диспетчерской службы. Вычислительные программы тренажера, устройства для звуковых эффектов и панорамный экран обеспечивают воспроизведение обстановки в зоне аэродрома в дневное и темное время суток с участием различного числа самолетов (от одного до двенадцати). В вычислительные программы тренажера VFR CTS заложены данные о скорости, радиусах разворотов и параметрах набора высоты существующих и создаваемых военных самолетов. Он также может быть приспособлен для обучения диспетчеров гражданских аэродромов.

При эксплуатации мобильного тренажера AN/GPN-T4 RSS (Radar Signal Simulator) ис-

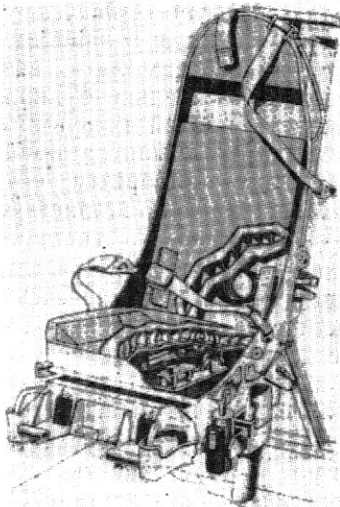


Рис. 1. Кресло летчика с устройствами для воспроизведения эффектов тряски и имитации перегрузок с помощью высотного компенсирующего костюма

пользуются реальные данные о движении самолетов в зоне аэродрома от подключенной наземной РЛС. На индикаторе отображаются радиолокационные данные о самолетах, погодная обстановка, местные помехи, сигналы радиосвязи. В тренировках можно одновременно отслеживать движение до 40 самолетов. Запрограммированные упражнения могут быть сложны даже для очень опытных операторов службы управления воздушным движением. Летные характеристики любого современного самолета могут быть запрограммированы, и тренажер может функционировать с любой комбинацией аэродромных РЛС. Просматривается воздушная зона с радиусом до 370 км и высотой до 9150 м.

Дальнейшие усилия в совершенствовании методики моделирования направлены на создание улучшенных систем визуализации и перемещений. Использование голографических устройств в перспективных тренажерах для обучения летчиков ASPT (Advanced Simulator for Pilot Training) может уменьшить стоимость и вес систем визуализации на 75%. Цветной проектор большой яркости и высокой разрешающей способности на усилителях света с жидкими кристаллами будет использоваться в качестве источника изображения для мозаичных дисплеев. Работы по имитации движения самолета и перегрузок будут направлены в основном на создание систем, основанных на более глубоких знаниях о поле ускорений, воздействующих на летчика в полете, и его ощущениях, используемых в качестве информации для управления самолетом [12]. На рис. 1 показано кресло тренажера, позволяющее имитировать воздействующие на летчика перегрузки.

Специализированные тренажеры ВВС США

Большинство тренажеров тактического авиационного командования (ТАС) предназначено для обучения летчиков полетам по приборам, работе с радиолокационным оборудованием, заходам на посадку и не имеют систем визуального изображения внекабинного пространства. Исследовательские стенды ТАС обычно имеют системы визуализации, предназначенные для имитации условий применения летчиком оружия воздух—воздух и земля—воздух [10].

ВВС в 1970 г. заключили с фирмой Зингер контракт на создание усовершенствованного тренажера для обучения летчиков. Главная задача этого тренажера с двумя кабинами, размещенного на авиабазе ВВС Уильямс (шт. Аризона), заключалась в изучении методики моделирования, однако он мог использоваться и для обучения летчиков полетам на самолете А-10. Этот стенд имеет системы перемещений, визуализации и имитации действующих на летчика перегрузок. Другими особенностями систем являются:

автоматическая запись и воспроизведение выполняемых маневров; возможность включения (отключения) инструктором приборов, систем визуализации и перемещений; обеспечение тренировки в отсутствии инструктора;

возможность «замораживания» процесса моделирования, показаний приборов и визуальной картины. Это позволяет инструктору обратить внимание обучаемого на специфические моменты пило-

тирования, а последнему уловить особенности их выполнения;

возможность повторно «проиграть» маневры в замедленном или ускоренном темпе.

Усовершенствованный стенд имеет две кабины летчиков с шестью степенями свободы. Каждая кабина окружена экраном системы визуализации, которая обеспечивает поле обзора 300° по горизонтали и 110° по вертикали. Визуализация воспроизводит картину окружающей авиабазу ВВС Монтан (шт. Аризона) местности и вид самой базы. ЭВМ обеспечивает моделирование изменения ц. т. самолета по мере выработки топлива. При полете в строю обучаемый чувствует на «своем самолете» эффекты спутной струи летящего впереди самолета, слышит раскаты грома и удары града при полетах в соответствующих погодных условиях.

Этот стенд, обычно используемый в исследовательских целях, стал применяться и для тренировки летчиков самолетов А-10. Каждый летчик обучался на стенде 10 ч, из которых 5 ч отводилось для переучивания полетам на самолете А-10 (взлет, посадка, типовые полеты) и 5 ч для обучения боевым операциям воздух—земля. Первоначальные результаты оказались обнадеживающими. Прицельное сбрасывание бомб оценивалось количественно. В первой же попытке четверо обучаемых не имели промахов и двое из них превзошли своих инструкторов.

Другим стендом, предназначенным для решения задач воздушного боя, является стенд фирмы Зингер-Линк. Стенд находится на авиабазе ВВС Льюк (шт. Аризона). Стенд стоимостью ~13,5 млн. долл. предназначен для исследовательских целей и тренировок летчиков. Две кабины истребителя F-4 смонтированы на подвижной основе с шестью независимыми гидравлическими телескопическими цилиндрами, которые обеспечивают изменение высоты кабины над полом от 2,5 до 4 м. Подвижные одноместные кабины летчика располагаются внутри куполообразного сооружения с восемью пятиугольными экранами ЭЛТ, на которых с помощью ЭВМ генерируются окружающая

обстановка и самолет противника. Земля воспроизводится генератором картины местности в виде шахматной доски со стороны квадрата, соответствующей 1,6 км. По мере уменьшения высоты полета размеры квадратов увеличиваются; что позволяет летчику оценивать высоту полета самолета. Изображение самолета противника (рис. 2) обеспечивается с помощью обычной телевизионной камеры и модели самолета в кардановом подвесе, управляемом летчиком из другой кабины. Высокая разрешающая способность ЭЛТ (1200 строк) позволяет летчику видеть самолет противника на расстоянии, соответствующем 5 км; на расстоянии 1,6 км летчик на стенде может определить скорость, направление полета и угловую ориентацию самолета противника. При имитации воздушного боя применение оружия сопровождается соответствующими звуковыми сигналами, а ЭВМ обеспечивает воспроизведение на экране траекторий полета ракет и пушечных снарядов. Фиксируется информация о скорости перехватываемого самолета, дальности до него (в момент применения оружия) и о причинах промаха (например, слишком большое расстояние, защитный маневр противника и т. д.). Воздушный бой может быть записан и «проигран» снова при разборе полетов. Инструктор имеет возможность наблюдать за воздушным боем на экране ЭЛТ, расположенной на пульте оператора, где также выводятся данные о траекториях, скоростях и угловом положении самолетов. На стенде воспроизводятся эффекты вибрации и аэродинамической тряски, наблюдаемые при выполнении различных маневров, а также установившиеся перегрузки, имитируемые посредством использования противоперегрузочного костюма и подвижного кресла летчика. Временная слепота при больших перегрузках имитируется посредством уменьшения яркости света в поле зрения летчика.

По заданию ТАС осуществляется конкурсная программа разработки усовершенствованных систем визуализации тренажеров для подготовки летчиков истребителя F-16 и штурмовика А-10. Стоимость этой программы оценивается в 40 млн. долл., постройка серийного образца системы обойдется в 6 млн. долл. Намечен выпуск 19 систем визуализации для двухкабинных тренажеров стоимостью по 6 млн. долл.

Фирме Зингер-Линк был выдан контракт стоимостью 15 млн. долл. на создание опытного образца тренажера F-16. Поставки тренажеров предусматривалось начать в 1980 г. Было заказано семь тренажеров для ВВС США, пять — для ВВС западноевропейских участников программы самолета F-16, пять — для других стран, потенциальных покупателей самолета F-16. Тренажер F-16 включает макет кабины самолета, пульт инструктора, ЭВМ и интерфейсное оборудование.

Контракт стоимостью 7 млн. долл. на постройку двух тренажеров А-10 получила фирма Рефлектон, поставки предполагалось завершить в 1979 г. Контракт также предусматривал возможность закупки еще четырех стендов для исследования опытных образцов систем визуализации. Тренажер А-10 позволит моделировать работу приборного оборудования, системы управления полетом, связанного оборудования, индикаторов, средств

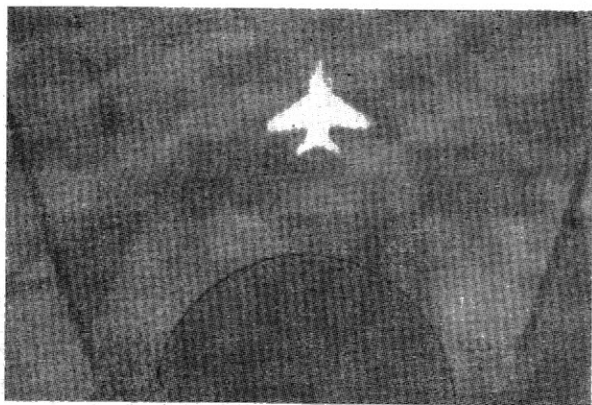


Рис. 2. Телевизионное изображение модели, имитирующей самолет противника и установленной на карданном подвесе и управляемой из второй кабины стенда (масштаб модели 1:72)

РПД, систем бомбометания и пуска ракет. Летчики смогут отрабатывать все этапы полета по приборам, включая взлет, навигацию на маршруте, атаку с малой высоты, а также действия в аварийных ситуациях, запрограммированных заранее, либо задаваемых по команде инструктора.

На тренажере можно имитировать более 200 отказов, среди них полный или частичный отказ работы силовой установки, отказ системы подачи масла, частичные и полные отказы систем управления.

В дополнение к этому на тренажере будут моделироваться изменения в аэродинамических характеристиках самолета в результате турбулентности, порывов ветра вблизи земли, отклонения закрылков и воздушных тормозов. Эффекты бафтинга воспроизводятся по мере наступления срывов потока, соответствующие звуковые сигналы сопровождают режим срыва потока, стрельбу из пушек, пуск ракет и посадку.

Первые два тренажера А-10 имеют систему визуализации с ограниченными возможностями. На них отображается цветная визуальная картина местности в ночное время. Эта система, выпускаемая фирмой Макдоннелл-Дуглас, обеспечивает моделирование взлета, посадки и воздушного боя; тренировки в применении оружия ограничиваются моделированием конечного этапа захода на цель. Остальные тренажеры должны быть оснащены более совершенной системой визуализации.

Первый из семи тренажеров для подготовки экипажа истребителя F-15 (рис. 3), заказанных фирме Гудьир, был поставлен на авиабазу ВВС Луке в декабре 1976 г. Тренажер F-15 обеспечивает моделирование работы различных бортовых систем (системы РПД, обзорно-прицельной системы, индикатора на лобовом стекле и т. д.). Системы визуализации отсутствуют, но имеется система подвижности с шестью степенями свободы. Пульт инструктора имеет три панели с ЭЛТ для контроля системы индикации в кабине летчика. Предусмотрена возможность печати информации, индицируемой на ЭЛТ пульта инструктора [10].

Программа предусматривала поставки авиационному военно-транспортному командованию тренажера для летчиков самолета С-130. Плани-

ровалось также создание стендов для отработки действий экипажа самолетов С-5, С-130, С-141.

Поставки для стратегического авиационного командования тренажеров WST (Weapon System Trainers) должны обеспечить проведение отдельных и совместных тренировок членов экипажа самолетов KC-135 и В-52. Было предусмотрено производство 18 моделирующих комплексов В-52/KC-135 и 11 тренажеров WST KC-135 [12].

Тренажеры играют всевозрастающую роль в процессе переучивания экипажей с одного самолета на другой. Военно-транспортное командование (МАС) еще в начале 1950-х годов занялось вопросом создания таких стендов для переподготовки экипажей на самолеты С-97 и С-124. Одним из самых совершенных тренажеров МАС является тренажер для подготовки летчиков военно-транспортного самолета С-5 (рис. 4). Использование моделирующих комплексов позволяет уменьшить время начальной летной подготовки каждого летчика на пять летных часов. Использование современных генераторов изображения на основе ЭВМ позволит экипажам тренироваться в выполнении различных задач, включая визуальный взлет, посадку, заход на посадку по кругу, заправку самолета в воздухе (рис. 5). МАС планирует обеспечить подобными системами свои тренажеры. Намечалось закупить 10 тренажеров для экипажей самолетов С-130, двух процедурных тренажеров С-130 и визуальных систем для вертолетных стендов [11].

Экипажи самолета системы раннего радиолокационного обнаружения и управления Боинг Е-3А AWACS (Airborne Warning and Control System) используют два типа тренажеров, созданных фирмой Боинг: один — для летных экипажей и другой — для операторов систем [12]. Пилотажный тренажер Е-3А включает в себя полноразмерный макет кабины самолета Боинг 707 с пультами управления самолета-заправщика KC-135 и телевизионную систему визуализации, отображающую картину внешней обстановки на экран перед остеклением. Тренажер в форме секции фюзеляжа для операторов (длина ~13 м, вес ~20 тс) позволяет имитировать ситуации, близкие к условиям реаль-

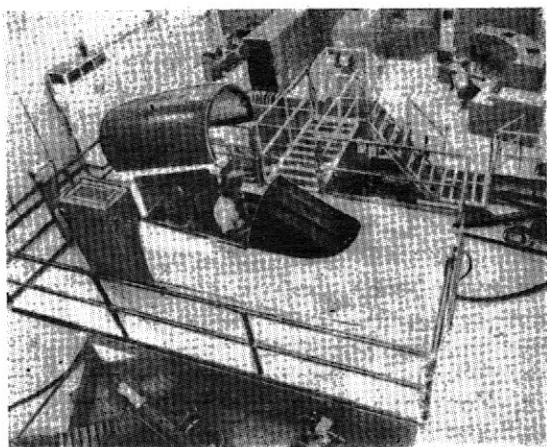


Рис. 3. Стенд для моделирования движения самолета Макдоннелл-Дуглас F-15

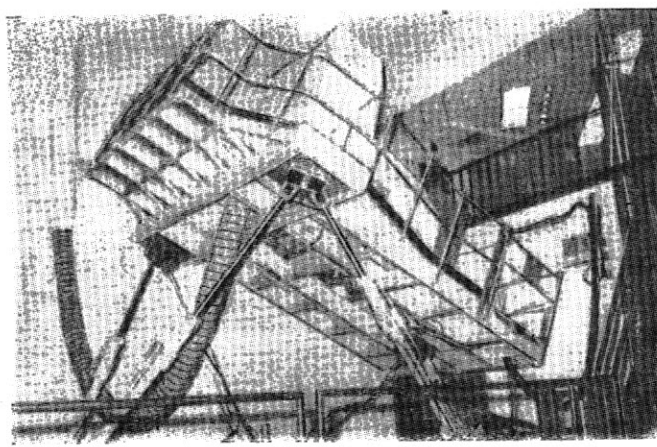


Рис. 4. Пилотажный стенд с тремя степенями свободы для обучения полету по приборам

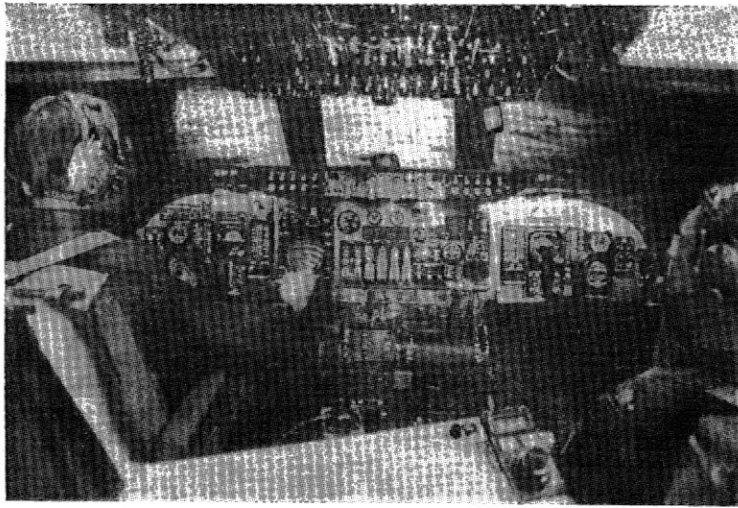


Рис. 5. Обзор из кабины тренажера С-5 при имитации захода на посадку

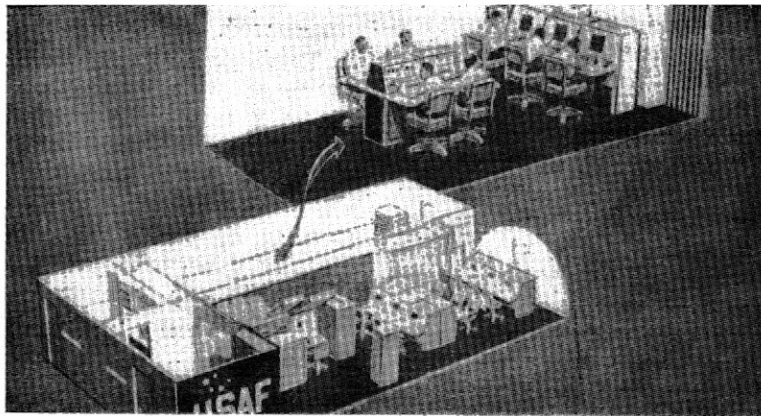


Рис. 6. Тренажер для операторов системы раннего предупреждения и оповещения AWACS

ной военной обстановки. Моделируются обнаружение и слежение за различными типами самолетов («своих» и «чужих»). Имеющееся оборудование дает возможность воспроизводить эффекты средств РПД противника. Тренажер состоит из двух основных секций (рис. 6). В первой находятся панель с девятью специальными дисплеями (рис. 7)

и блок обработки данных, идентичные с аналогичными пультами в системе AWACS, во второй секции находится пульт для инструкторов, который позволяет им контролировать любые действия обучающихся и вручную изменять условия эксперимента. Действия операторов регистрируются на магнитной ленте.

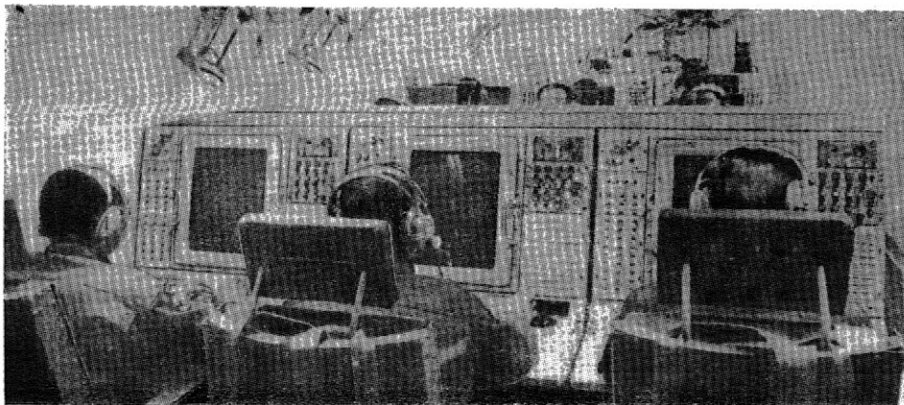


Рис. 7. Пульты управления тренажера AWACS

Тренажеры AWACS были установлены на авиабазе ВВС Тинкер (шт. Оклахома) в 1976 г.

Пульты операторов, ЭВМ, система внутренних коммуникаций, даже оборудование кабины летчиков полностью идентичны соответствующему оборудованию системы AWACS.

Символы, обозначающие на индикаторах наблюдаемые самолеты, стробы, карта местности и тысячи слов информации — все это закладывается в память ЭВМ фирмы IBM, реагирующей на команды экипажа под контролем персонала тренажера.

В память ЭВМ может быть заложена информация о любой потенциально возможной военной ситуации с соответствующими картами, данными об авиабазах и располагаемых ресурсах. Информация о внешних факторах, гражданских или военных самолетах вводится в ЭВМ с магнитных лент. Инструкции могут изменять эту информацию для повышения степени сложности тренировки и уровня стрессовой нагрузки, действующей на членов экипажа.

Обработка команд, массива данных, информации от РЛС и системы опознавания производится программой, почти идентичной той, что используется в реальной системе AWACS. Отличия заключаются в том, что информация от РЛС и системы опознавания создается на тренажере специальной моделирующей подпрограммой и замещает реальную электронную информацию, поступающую от антенны, вращающейся в обтекателе над фюзеляжем самолета Е-3А.

Системы тренажера позволяют формировать большой набор сценариев для тренировки экипажей, обеспечивающий имитацию почти любой возможной ситуации. Взаимодействие между ЭВМ и обучающимся экипажем непрерывно находится под контролем штата инструкторов, записываются все радиопереговоры и входные сигналы ЭВМ. Это позволяет провести в дальнейшем разбор и анализ упражнений для того, чтобы выделить положительные моменты, идентифицировать ошибки и дать общую оценку учебной операции. Вычислительные программы, используемые в тренировках или при исследовательском моделировании, сами по себе не являются новыми. Однако уникальной особенностью системы AWACS является возможность внутреннего моделирования, заложенная в саму

структуру программ. Это позволяет при тренировках обходиться без дополнительных ЭВМ. Модифицированная реальная программа MSCP (Mission Simulator Computer Program) использует эту возможность внутреннего моделирования для выработки входной информации: навигационных данных, информации от РЛС и датчиков системы опознавания, цифровых радиосвязных сообщений и т. д.

Помимо использования этого моделирующего комплекса по его прямому назначению как тренировочного средства, часть его рабочего времени используется для проверки материального обеспечения. Непрерывное развитие и улучшение базовой системы программ требует проверки новых программ перед использованием их на борту действующего самолета. Моделирующий комплекс, состоящий из штатных электронных устройств, идеально подходит для проведения этих окончательных проверок. Таким образом, один моделирующий комплекс выполняет функции тренажера, испытательного стенда и лаборатории. Уже в 1977 г. загрузка комплекса составляла 98% возможностей.

Тренажер для операторов системы AWACS состоит из двух отдельных секций, установленных рядом в новом вычислительном и тренировочном комплексе Е-3А авиабазы Тинкер. На «борту» тренажера заняты девять обучающихся и оператор ЭВМ. В секции для инструкторов находятся дисплеи, средства коммуникации, системы электропитания и регистрирующее оборудование.

Тренировка летных экипажей является важной частью процедуры ввода нового самолета в эксплуатацию. Затраты, связанные с расходом летного времени на получение летчиком требуемой квалификации, значительны. Для минимизации затрат на подготовку летчиков для самолета ВВС США Е-3А по контракту фирмы Боинг английской фирмой Редифон был изготовлен специальный тренажер, позволяющий моделировать и процесс заправки топливом в полете. Этот тренажер эффективно использовался для подготовки летчиков и бортинженеров самолета Е-3А. Обучающиеся высоко оценили возможности тренажера. Экипажи, освоившие самолет, констатировали, что моделирование на тренажере очень реалистично.

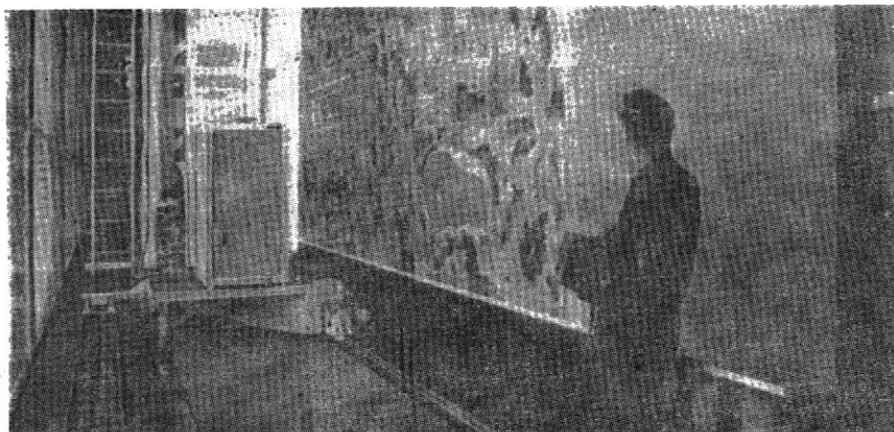


Рис. 8. Смонтированная на рельсовой тележке телекамера системы визуализации тренажера Е-3А

В результате некоторые летчики провели контрольные полеты с меньшим, чем обычно требуется, числом контактов с самолетом-заправщиком, а уровень подготовки летчиков, которые уже имели опыт в осуществлении заправки в полете значительно повысился.

Система визуализации тренажера позволяет экипажу выполнять визуальный взлет, полет по кругу в ограниченной зоне, а также обеспечивает отображение линии горизонта при полете над облаками. Система включает цветную телекамеру, перемещающуюся над макетом местности (рис. 8). Макет представляет собой летное поле, расположенное в середине участка местности размером $28 \times 9,3$ км (масштаб макета 1:2000), на котором изображены города и дороги. Макет местности, используемый для имитации заправки топливом в полете, выполнен в масштабе 1:144. Получаемое камерой изображение местности отображается перед кабиной экипажа дисплейной системой, предусмотрено моделирование дневных, сумеречных, ночных условий, различной высоты облачности и других визуальных условий.

Модель системы заправки топливом в полете допускает удлинение заправочной штанги и ее перемещение вбок и в вертикальной плоскости. Моделируются директорные и навигационные огни, а также фюзеляж самолета-заправщика. Все это изображается на фоне, соответствующем полету над облачным слоем, при различных уровнях освещенности. Подходы к заправщику могут начинаться с дистанции 1980 м при боковом смещении 210 м и разности высот 365 м. Система перемещений с шестью степенями свободы обеспечивает моделирование крена, тангажа, курса смещения в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Оборудование поста инструктора включает индикатор на ЭЛТ для отображения 230 различных страниц информации для управления тренировочным процессом. С их помощью можно задать отказ какой-либо системы (предусмотрена имитация более 500 неисправностей), схему захода на посадку, профиль полета при выполнении заправки топливом в воздухе и т. д. Совершенная система регистрации и воспроизведения позволяет точно повторить выполненное накануне упражнение.

Математическое обеспечение тренажера для обучения летчиков похоже на вычислительные программы большинства гражданских тренажеров, хотя имеется одно существенное отличие: ВВС требуют, чтобы в течение всего срока функционирования тренажера имелась возможность изменять и совершенствовать программы. В связи с этим получаемые ВВС средства математического обеспечения включают в себя основные программы, обеспечивающие моделирование в реальном масштабе времени, вспомогательные и тестовые программы. Предусматривается дальнейшее расширение возможностей тренажера как часть программы совершенствования системы AWACS [13].

СТЕНДОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНОГО БОЯ В АНГЛИИ

За рубежом первые удачные установки для моделирования воздушного боя были созданы в США. Вслед за фирмой LTV моделированием начали заниматься НИЦ им. Лэнгли (NASA) и фирмы

Нортроп и Макдоннелл-Дуглас. Для этих целей они использовали (и используют до сих пор) стенд, состоящий из двух полусфер, в каждой из которых расположена кабина самолета с соответствующими индикаторами, позволяющими моделировать движение двух самолетов. Характеристики воюющих самолетов и их оружия содержатся в ЭВМ. Иллюзия обстановки воздушного боя довольно сильна, и летчики по достоинству оценили этот стенд. Создание подобных стендов в Англии затруднялось необходимостью больших капиталовложений при создании подобных установок. Например, в 1970 г. общие затраты на НИОКР в области моделирования составляли лишь 3/4 млн. ф. ст., так что о создании стенда, подобного построенному в США, не могло быть и речи. Однако в этот период в Англии разрабатывался истребитель-бомбардировщик «Ягуар» и начались работы по программе истребителя «Торнадо». Наличие пилотажного стенда с системой визуализации позволило бы изучить целый ряд аспектов воздушного боя, таких как перехват, слежение за целью и обеспечение условий применения оружия. В связи с этим фирмой ВАе было начато проектирование и разработка стенда для моделирования маневренного воздушного боя MAS (Manoeuvring and Attack Simulator). Для удешевления программы предполагалось использовать в основном готовое стандартное оборудование. Первоначально предполагалось создать стенд с одной кабиной, а через некоторое время построить такой же второй стенд и объединить их в единый моделирующий комплекс. Стенд был в основном готов в 1974 г. В течение первых шести месяцев были устранены мелкие недостатки в работе оборудования и в математическом обеспечении. Исследования, проводившиеся в течение года, выявили необходимость более полного моделирования воздушного боя. Это было связано с планами закупок в Западной Европе американских истребителей F-16 и возрастающим вниманием в странах НАТО к высокоманевренным самолетам воздушного боя.

Время оказалось критическим фактором, и фактически исключило возможность создания второй полусферы. Были исследованы возможности управления самолетом-целью для моделирования его ответной реакции и обеспечения «агрессивности». Для этого была использована математическая модель воздушного боя под обозначением ВАСТАС, применяемая фирмой ВАе для общей оценки возможностей самолета с различными видами вооружения на стадии проектирования. В результате была создана модель воздушного боя «Летчик против ЭВМ», блок-схема которого показана на рис. 9. Предполагалось, что летчику будет трудно «воевать» с ЭВМ, поскольку его противник располагает нужной информацией, способен быстро принимать безошибочные решения. Однако первые же эксперименты опровергли это предположение. Летчик легко выигрывал бой из-за ошибок в логике противника, относительно несущественных при моделировании воздушного боя с использованием только ЭВМ, но ставших очевидными в экспериментах с участием летчика.

Основная трудность в этом вопросе заключалась в понимании и переводе на язык ЭВМ тактики, успешно применяемой летчиком. Эта проблема становится особенно сложной в случае прост-

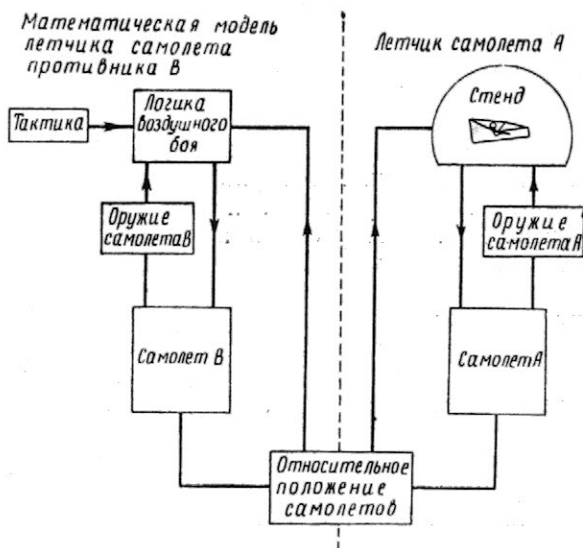
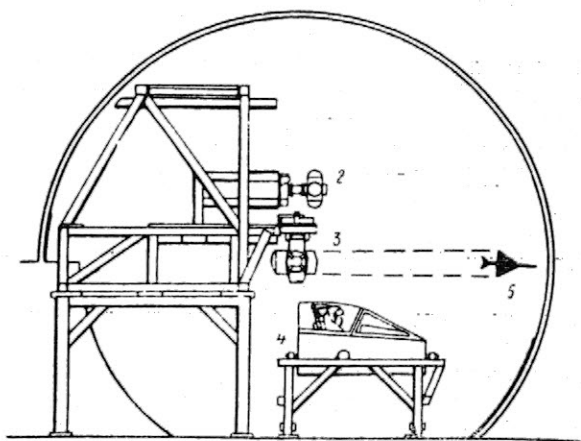


Рис. 9. Блок-схема моделирования воздушного боя

ранственного движения самолетов. Лишь ценою больших усилий эту задачу удалось решить в довольно сжатые сроки. Использование схемы «летчик—ЭВМ» при моделировании воздушного боя имеет и определенные преимущества по сравнению с «боем» двух стендов с двумя летчиками: один из противников всегда «под рукой», никогда не устает и не раздражается, обладает постоянным уровнем летной подготовки, кроме того, эксперимент в этом случае значительно дешевле. Наличие двух схем моделирования воздушного боя [только на ЭВМ (программа ВАСТАС) и ЭВМ (ВАСТАС) — летчик] позволяет быстро обрабатывать вопросы тактики в зависимости от характеристик применяемого оружия и проводить анализ большого числа ситуаций, варьируя параметры самолета и оружия.

Схема стенда воздушного боя показана на рис. 10. Телевизионный проектор на двухступенном кардановом подвесе расположен в центре сферы диаметром 9,1 м, которая выполняет роль экрана. С помощью проектора обеспечивается изображение самолета противника в соответствующем масштабе (зависящем от расстояния между ведущими бой самолетами в требуемом ракурсе и нужном



1—сфера диаметром 9,1 м; 2—проектор земля—небо; 3—проектор изображения самолета противника; 4—ЭВМ PDP 15 для моделирования характеристик самолета; 5—ЭВМ PDP 15 для управления самолетом противника

Рис. 10. Схема стенда для моделирования воздушного боя

положении относительно кабины летчика). Находящийся над телевизионным проектором проектор земля—небо состоит из двух цветных транспарантов в виде полушарий, которые обеспечивают изображение голубого неба, поверхности земли и линии горизонта так, как это видит летчик из самолета. Этот узел имеет три степени свободы: по тангажу, крену и рысканию. Поскольку проектор земля—небо находится не в центре сферы, обе лампы внутри полушарий проекционной системы могут передвигаться в вертикальном направлении в соответствии с сигналами ЭВМ, чтобы обеспечить геометрическую коррекцию положения линии горизонта при маневрировании. Точка, соответствующая положению глаз летчика, находится ниже и слегка впереди обоих проекторов, что позволяет обеспечить угол обзора по вертикали $\sim 85^\circ$ и по горизонтали $\pm 120^\circ$.

В первоначальном варианте кабина была подвижной с тремя степенями свободы. Однако опыт эксплуатации в течение трех лет показал, что почти все летчики, участвовавшие в экспериментах, отмечали весьма полную иллюзию полета и в случае неподвижной кабины, поэтому необходимость ее движения отпала. Изображение для проектора цели обеспечивается телевизионной камерой, направленной на одну из двух одинаковых моделей длиной 7 см, каждая из которых смонтирована на трехступенном кардановом подвесе, причем одна закреплена за носовую часть, а вторая — за хвостовую. ЭВМ рассчитывает размеры изображения самолета противника в зависимости от дальности до него. В проекторе изображения цели не используются объектив с переменным фокусным расстоянием и другие сложные оптические системы, что способствует хорошей яркости изображения ввиду отсутствия потерь. Изменение размера изображения цели в 100 раз осуществляется средствами электроники. Максимальное поле обзора проектора $\sim 25^\circ$, что обеспечивает изображение самолета с размахом крыла 12 м на расстоянии ~ 30 м. При дальности до цели более 3000 м (чем больше размеры самолета, тем больше это расстояние) размеры изображения цели сохраняются постоянными. Проектор цели рассчитан на ускорение 30 град/с^2 , угловую скорость 200 град/с и имеет разрешающую способность $0,05^\circ$. Эти цифры достигаются при использовании электродвигателей постоянного тока без редукторов. Предусмотрено аварийное торможение, чтобы избежать забросов и поломок. Все сервоприводы в индикаторных системах и в системе движения модели самолета имеют безредукторный электропривод, за исключением сложного механизма перемещения проектора земля—небо в связи с необходимостью поступательного движения, хороших частотных характеристик и высокой точности обработки заданного положения.

Для имитации эффекта установившейся нормальной перегрузки яркость индикаторов и всех источников света с увеличением перегрузки уменьшается и одновременно подаются звуковые сигналы, частота которых пропорциональна перегрузке. При достижении предельно допустимой перегрузки звуковой сигнал становится непрерывным. При малых скоростях полета бафтинг имитируется тряской кресла летчика. На стенде использовано стандартное катапультируемое кресло Mk.4, кото-

рое может незначительно перемещаться по направлению с помощью гидравлических цилиндров. Тряска (частотой 8 Гц) начинается при достижении самолетом некоторого заданного коэффициента подъемной силы, и с ростом последнего частота тряски увеличивается.

При моделировании воздушного боя летчик обычно получает недостаточную информацию о высоте полета, что часто приводит к потере чувства высоты и самолет «врезается» в землю. В рассматриваемой схеме воздушного боя ЭВМ, играющая роль противника, имеет программу, которая по мере приближения самолета к земле принимает соответствующие меры. Учитывая это, осторожный летчик может избежать столкновений с землей, держась выше своего противника. Кроме того, предусмотрено непрерывное звуковое предупреждение, которое выключается, как только самолет уходит на безопасную высоту.

Основным элементом в схеме моделирования воздушного боя являются ЭВМ. В первоначальном варианте без программы ВАСТАС использовались две ЭВМ PDP 15, две ЭВМ PDP 11/05 с длиной слова 18 бит и объемом памяти 64К слов. Введение программ ВАСТАС, уравнений динамики и автопилота самолета-противника, ограничений на условия использования оружия и учета результатов стрельб повысило требования к вычислительному комплексу. В связи с этим была расширена память, добавлены операционная система RSX, ЭВМ PDP 11/34 и дисплей VT-11 (рис. 11).

Моделирование воздушного боя требует быстрого решения комплекса уравнений, которые описывают:

- аэродинамические и летно-технические характеристики обоих самолетов;
- кинематику маневров обоих самолетов;
- относительное расположение и ориентацию самолетов;
- положение самолетов относительно земли;
- характеристики оружия;
- логику поведения противника, заложенную в ЭВМ.

Решение этих уравнений на небольших ЭВМ, описанных выше, представляет сложную задачу и может быть осуществлено лишь при использовании очень совершенных программ. Такие программы были написаны инженерами-специалистами по оборудованию стенда без привлечения программистов, что позволило избежать традиционных трудностей, возникающих при написании технического задания для программистов. При этом использовался язык высокого уровня и эффективные методы интерактивной работы с ЭВМ.

Самолетом противника управляет автопилот, введенный в ЭВМ, который реагирует на необходимость обеспечения требуемых скорости, угла крена, скорости разворота и скорости тангажа. Эти требования могут быть преобразованы в различные маневры, такие как разворот с максимальной установившейся перегрузкой и заданной скоростью или форсированный разворот с максимальной возможной угловой скоростью и торможением.

Логика поведения самолета противника представлена в виде дерева решений. Сначала оценивается общая ситуация: в каком положении находится самолет (атакующем, оборонительном или нейтральном)? После этого решается вопрос, улуч-

шается позиция или ухудшается. Если позиция оборонительная, то насколько она опасна? Если атакующая, то каковы условия использования оружия? Каково энергетическое состояние самолета и т. д.?

После оценки различных вариантов дальнейших действий ЭВМ принимает окончательное решение о выборе соответствующего маневра или продолжение уже начатого. В результате самолет, управляемый ЭВМ, может атаковать самолет, управляемый человеком. Летчик соответственно реагирует на движение самолета противника, и процесс повторяется. В рассматриваемой схеме моделирования воздушного боя новое тактическое решение может приниматься ЭВМ по несколько раз в секунду. Это не соответствует реальным возможностям человека, но позволяет определить некоторую идеальную тактику, всегда позволяющую выигрывать бой с равным соперником.

Существующая программа ВАСТАС приближенно обеспечивает равенство в воздушном бою равных самолетов. Перед боем в ЭВМ вводится информация о типе самолета, оптимальных скорости и коэффициенте подъемной силы для различного вида маневров, оружия обоих самолетов. Последняя информация определяет зону воздушного пространства, которую целесообразно занять, и зону, куда нельзя допускать противника.

Первоначальный опыт моделирования боя с «самолетом», управляемым ЭВМ, показал, что летчик выигрывает чаще, особенно если использует маневры в вертикальной плоскости. Более того, неожиданным маневром летчик мог заставить ошибаться ЭВМ. Впоследствии эти недостатки логической программы были ликвидированы.

Логику поведения самолета противника можно совершенствовать бесконечно, вводя в программу ВАСТАС реакцию летчика на перегрузки, возможность использования запомненной информации, запаздывание в принятии решений, случайные ошибки. Однако необходимо где-то остановиться в этом процессе. Одной из полезных особенностей программы является возможность изменять «агрессивность» противника посредством уменьшения коэффициента усиления обратной связи (это означает увеличение времени маневра) или путем уменьшения маневренных возможностей за счет уменьшения допустимых значений n_y и c_y .

Моделирование в настоящее время играет важную роль в процессе создания новых самолетов и их систем. С точки зрения летчика самолет должен иметь хорошую маневренность, высокое отношение тяги к весу, эффективные воздушные тормоза, хорошие характеристики управляемости, круговой обзор из кабины, малые физические размеры и т. д. Однако требования становятся менее очевидными, когда вопрос встает о компромиссе —

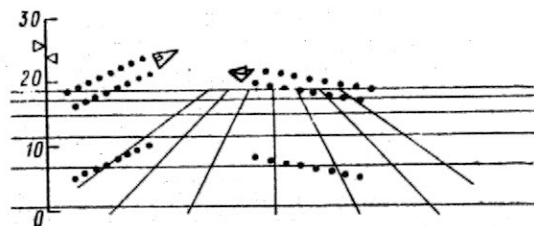


Рис. 11. Дисплей VT-11

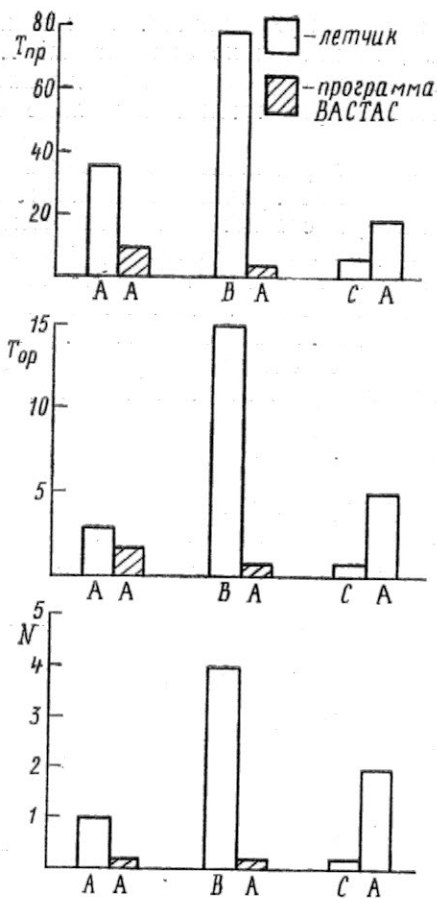


Рис. 12. Типовые результаты экспериментов ($T_{пр}$ — время, в течение которого один из самолетов имеет преимущество; $T_{ор}$ — время реализации положения, благоприятного для применения оружия; N — число пусков оружия)

ухудшение одних характеристик за счет улучшения других. Моделирование на пилотажных стендах позволяет успешно решать эти вопросы. Результаты моделирования, воздушного боя при создании самолетов могут использоваться при разработке аэродинамической компоновки, силовой установки и вооружения, при проектировании систем управления и оценке эффективности индикаторов, при разработке требований к пилотажным характеристикам и исследовании вопросов тактики.

Необходимо провести эксперимент, изменяя определенный параметр самолета и оценивая влияние этого изменения на результат воздушного боя. Однако возникает непростой вопрос: как измерить успех в бою? Эксперименты обычно представляют собой серию двух-трехминутных воздушных боев, каждый из которых начинается при равных условиях, например при полете на встречных курсах. В течение боя каждый из противников может получить несколько возможностей для использования оружия. Что рассматривать в качестве оценки: число таких возможностей или время до первого выстрела (пуска)? И какой выстрел лучше: более ранний, но на большом расстоянии, или более поздний, когда вероятность поражения противника большая? В описываемых экспериментах в качестве оценочных параметров регистрировались следующие три: время, в течение которого самолеты сохраняют преимущество; время пребывания в положении, благоприятном для применения оружия;

число случаев применения оружия. Дополнительно анализируются условия, при которых применялось оружие (скорость, угол атаки, дальность и т. д.), и параметры, характеризующие воздушный бой (средняя скорость, число M , угол атаки, дальность и т. д.).

Регистрируемые параметры зависят, вообще говоря, от специфики исследований и должны выбираться с осторожностью. Регистрация или обработка данных в настоящее время не накладывают каких-либо ограничений. Имеется возможность строить любые графики и повторно проигрывать воздушный бой на экране дисплея VT-11.

Успех в воздушном бою в значительной степени определяется опытом и искусством летчика. Поэтому результаты эксперимента более чувствительны к смене летчиков, чем к изменению в разумных пределах параметров самолета. Поэтому несколько разных боев проводятся одним и тем же летчиком, и затем один и тот же вид боя повторяется с участием трех или четырех летчиков (рис. 12). Осредненные результаты с учетом комментариев летчиков используются затем для оценки самолета. Использование противника в виде ЭВМ особенно полезно при оценке разброса результатов, связанного с квалификацией летчика. В моделирующем комплексе с двумя стендами для этой цели летчики меняются ролями, в то время как использование программы ВАСТАС обеспечивает реализацию возможностей «среднего» летчика. Наличие такого «стандартного» противника упрощает оценку эффекта обучаемости. Большинство летчиков, принимавших участие в экспериментах на описанном стенде, высказались о целесообразности использования его для тренировок летчиков.

Одновременно отмечались и недостатки стенда, в частности ограниченный обзор назад. В настоящее время спроектирована опора для проекторов, которая позволит расширить поле обзора на 30° . Второй недостаток, присущий большинству стендов, состоит в слабом ощущении высоты или его полном отсутствии. Решением этой проблемы явилось воспроизведение с помощью ЭВМ картины земли, которая изменяется в соответствии с высотой полета самолета до земли. Третья проблема — это обеспечение более точной имитации условий прицеливания. Слежение за целью на стенде является более сложным делом, чем в реальном полете. Одна из причин состоит в недостаточной мощности ЭВМ, в результате частота посылки сигналов на индикатор слишком мала. Такая задержка информации в комбинации с быстрым движением самолетов создает проблему слежения. Моделирование воздушного боя нескольких самолетов технически осуществимо, однако в настоящее время оказывается чрезвычайно дорогостоящим [14].

ТЕХНИКА СОВРЕМЕННЫХ ТРЕНАЖЕРОВ И ПИЛОТАЖНЫХ СТЕНДОВ

Кабины, оборудование и системы перемещений

Современные тренажеры создаются на основе последних достижений современной техники. Находящиеся в эксплуатации тренажеры способны практически точно воспроизводить многие летные характеристики современных самолетов [2].

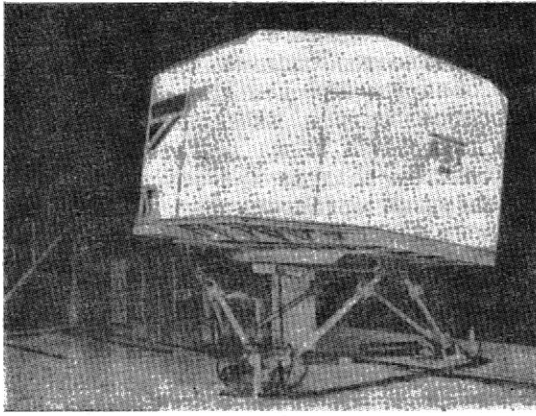


Рис. 13. Стенд, спроектированный фирмой Зингер-Линк в соответствии с концепцией перспективной техники моделирования (AST)

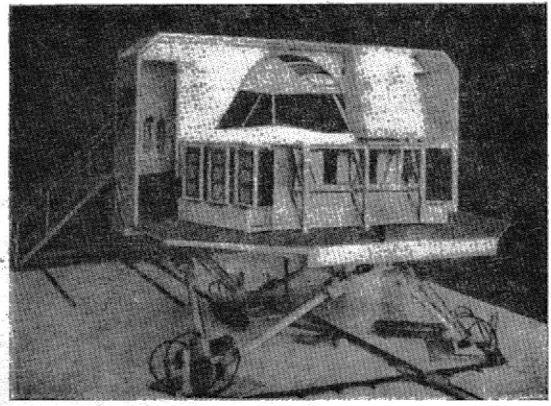


Рис. 14. Размещение электронного оборудования внутри стенда

Основными элементами тренажера являются кабина — копия кабины исследуемого самолета, гидравлическая система, обеспечивающая угловые и линейные перемещения, система визуализации, создающая у обучаемого иллюзию окружающего пространства, ЭВМ, объединяющая работу всех элементов стенда, с тем чтобы состояние систем перемещений и визуализации соответствовало положению органов управления в кабине стенда. В новейших тренажерах также моделируется работа РЛС, систем РПД и других бортовых систем.

В своей деятельности фирма Зингер следует концепции современной техники моделирования — AST (Advanced Simulation Technology), сформулированной в 1976 г. Считается, что стенд является средством тренировки и не обязательно должен иметь внешнее сходство с моделируемым самолетом. Вместе с тем создавалась функционально близкая система на основе результатов анализа кабин различных транспортных самолетов. В результате применения концепции AST достигнут существенный прогресс в характеристиках стендов, повышена их надежность и снижены эксплуатационные расходы.

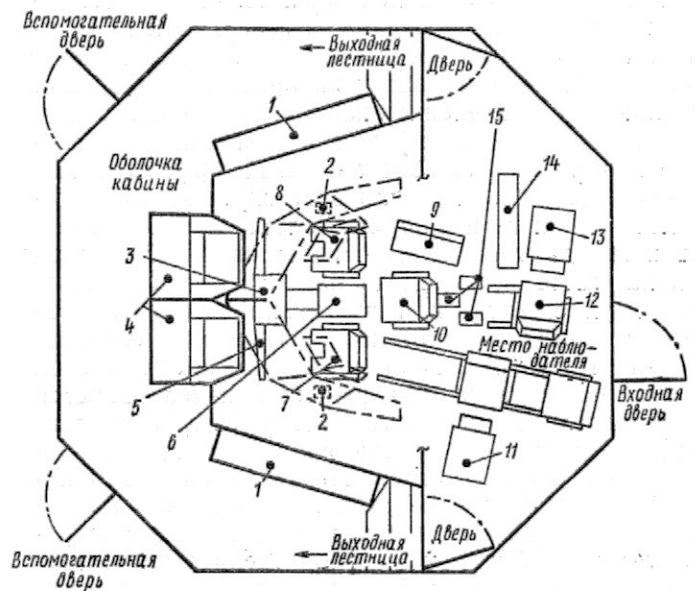
Почти все компоненты тренажера AST в виде автономных моделей размещены внутри восьмиугольной в плане оболочки, смонтированной на подвижной основе (рис. 13). Все пространство внутри оболочки вокруг кабины летчика используется для размещения электронной аппаратуры так, чтобы она располагалась возможно ближе к соответствующей системе стенда (рис. 14). Такая компоновка уменьшает на 80% объем пространства, занимаемого средствами интерфейса в тренажерах. Там же располагается оборудование для систем визуализации, кондиционирования воздуха и пожаротушения. Даже вспомогательное оборудование, такое как освещение, лестницы, кресла, имеет особую конструкцию [15]. Например, на стенде отделения Линк-Майлз, показанном на рис. 15, в результате компактного размещения оборудования удалось сократить пути аналогового сигнала до 18 м вместо 18—24 м на обычных стендах. Передача аналогового сигнала осуществляется через систему ленточных кабелей, имеющих малый вес и простые соединительные разъемы блоков интерфейса. Такие кабели довольно просты в изготовлении, монтаже, эксплуатации и к тому же

практически не создают дополнительных инерционных сил при движении кабины. Агрегаты скомпонованы вокруг кабины летчика и помещены в легкую алюминиевую оболочку [16].

Регулируемая ширина лобового остекления позволяет обеспечить самый большой угол обзора из кабин современных транспортных самолетов. Можно обеспечить боковое смещение кресла летчика от центральной линии, соответствующее любому типу самолетов, начиная с небольших двухдвигательных и кончая самолетом Боинг 747.

Компоновка электронной аппаратуры обеспечивает легкий доступ для технического обслуживания. Конструкция опор кабины также упрощает их техническое обслуживание.

Интерьер стенда копирует кабину моделируемого самолета. В соответствии с концепцией AST были созданы тренажеры для подготовки экипажей самолетов DC-9, L-1011, Боинг 727 и 747



1—блоки электронного оборудования; 2—коммутационный блок; 3—центральная приборная панель; 4—дисплей; 5—основные приборные панели; 6—центральный пульт управления; 7—место командира экипажа; 8—место второго летчика; 9—пульт бортинженера; 10—место бортинженера; 11—пульт летчика-инструктора; 12—место бортинженера-инструктора; 13—пульт бортинженера-инструктора; 14—центральный силовой распределительный пульт; 15—люки к устройствам аварийного выпуска шасси

Рис. 15. Схема размещения основного и вспомогательного оборудования на стенде фирмы Зингер (отделение Линк-Майлз)

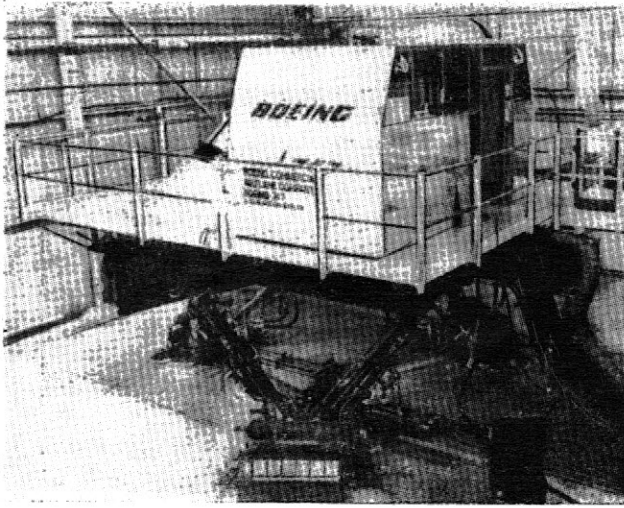


Рис. 16. Пилотажный стенд Боинг 747

(рис. 16), она может быть также применена к тренажеру, соответствующему любому другому транспортному самолету.

При разработке концепции AST ставились три основные цели:

использовать новые технические достижения для улучшения характеристик стендов без увеличения их стоимости;

реализовать программу обеспечения надежности оборудования для повышения коэффициента его готовности и эффективности тренировочного процесса;

в качестве расчетного критерия использовать продажную стоимость и затраты при эксплуатации стенда с целью их минимизации.

Достижение этих целей осуществлялось различными путями. Использовались совершенные мини-ЭВМ и сложные программы обнаружения неисправностей. Система загрузки органов управления улучшалась применением новой гибридной техники. Использование квадрофонической техники способствовало реалистичности звуковых эффектов. Повышение надежности было достигнуто за счет увеличения доли миниатюрных электронных элементов и стандартных блоков. Была заново спроектирована система перемещения кабины с шестью степенями свободы и более низким рабочим давлением жидкости (70 кгс/см^2), что уменьшило уровень шума и ликвидировало проблему утечки жидкости. Система обнаружения неисправностей позволяет контролировать работу различных элементов и заменять их при необходимости, не дожидаясь выхода из строя. Передача цифровой информации осуществляется последовательно по одному семижильному кабелю от главного распределительного блока к 19 распределительным элементам, каждый из которых, в свою очередь, может осуществлять коммуникацию с 16 электронными системами.

Заново спроектированная система электропитания основана на двух принципах: источники питания максимально приближены к системам-потребителям и применены кабели с малым импедансом для распределения энергии от источников постоянного тока.

Вся система электропитания занимает около 1/5 объема, необходимого для размещения обычных систем. Имеется система контроля и автоматического обнаружения неисправностей. Обеспечивается воспроизведение многочисленных звуковых сигналов, начиная от шума двигателя при рулежке и кончая свистом воздуха при обтекании самолета. Система загрузки органов управления объединяет в себе преимущества аналоговой (непрерывность процесса) и цифровой (высокая точность) техники. Аналоговая техника используется для вычисления медленно изменяющихся функций. Цифровая техника используется для обеспечения точности вычислений быстро изменяющихся функций, таких как усилие на ручке управления, шарнирные моменты, балансировочные силы. Такой подход позволяет программировать изменение коэффициентов, тем самым увеличивает гибкость системы. Уменьшение трения сервопривода значительно повышает динамические характеристики последнего, в то время как линейная обратная связь позволяет устранить механический люфт.

Улучшенные динамические характеристики системы перемещений кабины обеспечивают более плавные переходные процессы при управлении, уменьшение числа подвижных элементов увеличило ее надежность.

В новых силовых гидроцилиндрах используются гидростатические подшипники, уменьшающие статическое трение на 75%, что сглаживает линейные перемещения кабины [15].

Обычный силовой гидроцилиндр имеет уровень трения ~55 кгс. Гидроцилиндр с частичным использованием гидростатических возможностей (поршень и подшипники имеют тонкую масляную пленку, снижающую трение) имеет вдвое меньшее трение. У «полностью гидростатического» силового цилиндра трение меньше 4,5 кгс [7].

Встроенные в гидроцилиндры ультразвуковые датчики линейных перемещений позволяют устранить механические связи и люфт между приводом и датчиком и гарантируют точность позиционной обратной связи.

Повышение безопасности экспериментов обеспечивается использованием специального механизма поглощения энергии для плавного управления и ограничения перегрузок кабины стенда в случае превышения допустимых пределов. Общая масса системы трубопроводов уменьшена на 60% по сравнению с обычными гидравлическими системами перемещений. Малое рабочее давление позволяет использовать малощумные лопаточные насосы. Инструкторский отсек с пультами летчика-инструктора, бортинженера-инструктора и местом наблюдателя размещается непосредственно за местом командира экипажа.

Места обоих инструкторов оснащены дисплеями на ЭЛТ и пультами управления, необходимыми для контроля и управления процессом обучения. На экранах ЭЛТ воспроизводится буквенно-цифровая и графическая информация. Система интерфейса, работающая в реальном масштабе времени, связывает пульта инструкторов с ЭВМ [15].

Потребные возможности системы перемещений еще несколько лет назад были предметом разногласий. Когда стенды не имели систем визуализации, считалось, что необходима сложная система

перемещений для создания у летчика иллюзии полета. Одновременно предполагалось, что роль подвижности должна ослабевать при наличии системы визуализации. Однако многочисленные исследования показали, что летчики используют динамические ощущения в значительно большей степени, чем считалось прежде. Чувство перегрузки позволяет быстрее регистрировать резкие изменения пространственного положения самолета в результате турбулентности атмосферы или маневрирования. Так, отказ двигателя под крылом создает неуравновешенную силу, стремящуюся развернуть самолет, и в этом случае летчик сначала воспринимает угловое ускорение и лишь затем визуальные сигналы [1].

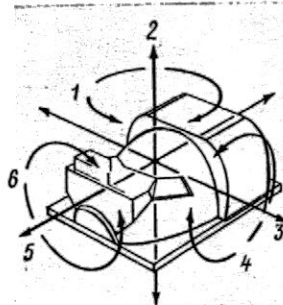
Многие годы развитие этих систем проходило в направлении увеличения воспроизводимых ускорений и перемещений. В настоящее время специалисты считают, что плавность движения кабины более существенна при моделировании полета транспортных самолетов. Чтобы уменьшить влияние трения, люфтов, свести к минимальному число подшипников и устранить взаимовлияние различных элементов, используется новая система подвижности с тремя парами силовых гидроцилиндров, закрепленных непосредственно на базовой платформе верхними концами и к полу нижними концами без промежуточных звеньев. Гидроцилиндры имеют примерно вчетверо меньшее внутреннее трение. Усилие страгивания соответствует ускорению меньше порога чувствительности человека (около 0,04 g).

Силовые приводы с рабочим ходом до 2 м в настоящее время используются в системах перемещений стендов широкофюзеляжных самолетов. Исключение составляет самолет А-300, который имеет динамические характеристики, подобные характеристикам самолета Бойнг 707, и обычно его движение моделируется на стенде при ходе приводов 1,5 м. Толчки при изменении направления движения привода на противоположное должны быть настолько малы, чтобы летчик при выполнении быстрых маневров не заметил возвращения стенда в нейтральное положение, из которого будет осуществляться очередное перемещение стенда.

Новая система перемещений, используемая фирмой Зингер, имеет специальный клапан, который работает как гидравлический демпфер. Система также включает в себя ультразвуковые датчики обратной позиционной связи с дискретными выходными сигналами. Такие датчики свободны от недостатков потенциометрических датчиков.

Фирма САЕ Электроникс выпускает собственные системы перемещений, имеющие исключительно хорошие высокочастотные динамические характеристики. Фирма считает, что ее стенды для вертолетов, в которых эффекты механической вибрации и высокочастотной тряски несущего винта воспроизводятся системой перемещений, позволяют обеспечить более точно и с меньшими затратами имитацию движения реального объема, чем стенды, использующие для этих целей отдельные системы перемещений и вибраций, предлагаемые другими фирмами.

Пилотирование «по ощущениям» требует не только имитацию движения. Все летчики неизменно реагируют на звуковые возбудители и на



1—рыскание; 2—линейное перемещение по вертикали; 3—линейное перемещение вдоль поперечной оси; 4—тангаж; 5—перемещение вдоль продольной оси; 6—крен

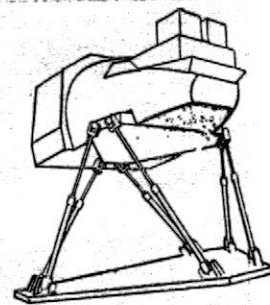


Рис. 18. Система подвижности стенда в виде раздвижных опорных стоек

стендах должны воспроизводиться различные звуки, начиная от ударов колес шасси при взлете с неровного летного поля и кончая шумом обтекающего самолет воздуха на режимах, близких к срывным. Чтобы достигнуть приемлемого уровня подобия, необходимо одновременно использовать различные звуковые источники, изменяя их частоты, относительные амплитуды и ширину полосы частот по командам ЭВМ.

Необходимо моделировать также различные сигналы предупреждения. Многие стенды коммерческих самолетов имеют систему перемещений с шестью степенями свободы (рис. 17). Более простые устройства с тремя или четырьмя степенями подвижности также могут использоваться без значительной потери подобия, особенно в том случае, когда на стенде моделируется самолет с небольшими моментами инерции и двигателями, расположенными близко к плоскости симметрии. Еще несколько лет назад существенным недостатком обычных систем перемещений с опорными стойками (рис. 18) было ограничение линейных движений кабины (рис. 19, 20), хотя эти системы позволяли воспроизводить эффект действия постоянной сил, например, благодаря наклону кабины стенда. Одним из решений этой проблемы является использование системы с подвеской кабины (рис. 21), с более длинными силовыми цилиндрами и большей независимостью между степенями свободы. Однако повышение жесткости конструкции и силовые цилиндры большой длины усложняют

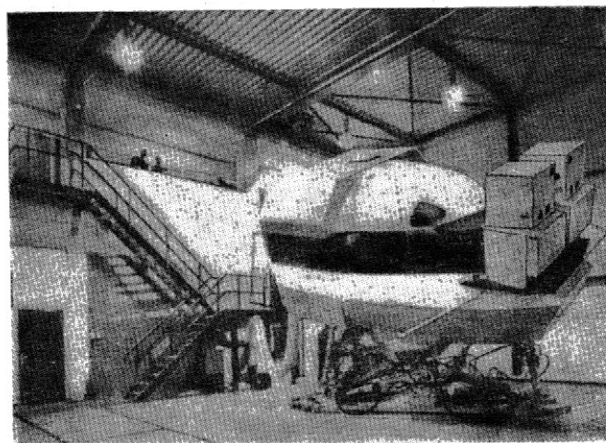


Рис. 19. Пилотажный стенд Фоккер F-28 фирмы САЕ Электроникс. Максимальный правый крен

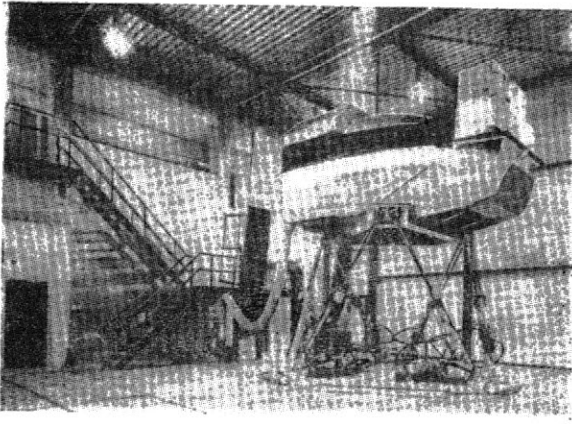


Рис. 20. Пилотажный стенд Фоккер F-28 фирмы САЕ. Крайнее верхнее положение стенда

производство и тем самым увеличивают стоимость. Фирма Кондактрон производит подвесные системы нескольких типов, а фирма Редифон является единственной, предлагающей такого рода продукцию для стендов пассажирских и транспортных самолетов. Большинство других фирм выпускают опорные системы перемещений. Наибольшим спросом пользуются системы подвижности с шестью степенями свободы. Класс имитируемого самолета определяет сложность систем стендов. Могут использоваться системы подвижности с двумя, тремя, четырьмя степенями свободы, однако шестистепенные системы являются практически стандартом для стендов тяжелых самолетов [1].

Центральным элементом каждого современного стенда является ЭВМ.

Появление средств аналогового моделирования в 1950-е годы позволило сделать определенный шаг вперед по обеспечению лучшего соответствия управляющих команд и движения пилотажного стенда, а также более точного моделирования приборного оборудования. Однако как и в большинстве других областей применения электроники, наибольший прогресс в моделировании был достигнут благодаря цифровым ЭВМ. В настоящее время можно написать программу, которая способна обрабатывать большой объем информации, учитывать влияние количества топлива в баках крыла при расчете реакции самолета по крену. Многие достаточно хорошо изученные эффекты поддаются лишь теоретическому расчету, и на стенде их можно запрограммировать и оценить их влияние.

Летная оценка самолета заказчиками является значительной частью общей процедуры приемки самолета, и может потребовать порядка 2000 и более отдельных проверок, которые необходимо отра-

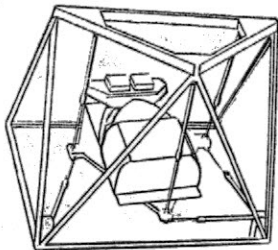


Рис. 21. Подвесная система перемещений стенда

ботать на стенде. Много внимания требует проверка работы систем. Эффект «снежного кома», когда отказ одной системы приводит к серии других отказов, может воспроизводиться на современных стендах с помощью ЭВМ.

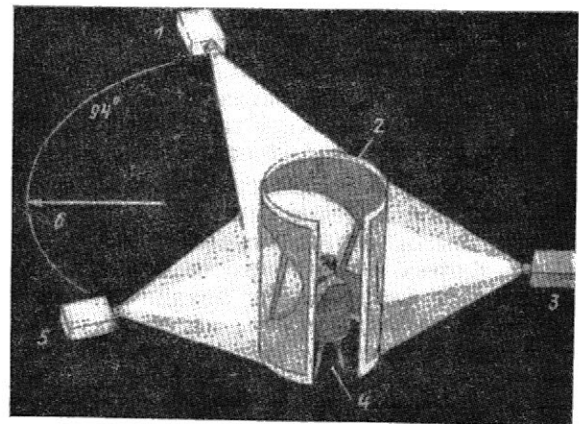
Возникает вопрос: «Какие ЭВМ целесообразнее использовать на стендах — специализированные или универсальные?» До совсем недавнего времени специализированные ЭВМ, хотя и производились в ограниченном количестве, и, следовательно, стоили относительно дорого, использовались значительно чаще и были дешевле в эксплуатации. Однако возросший спрос на коммерческие мини-ЭВМ общего назначения с большим быстродействием привел к значительному совершенствованию последних. Высокая надежность, гарантированная долговечность и массовое производство обусловили широкое применение универсальных ЭВМ на пилотажных стендах. Среди них наиболее известны ЭВМ DEC PDP-11, семейство ЭВМ «Синтра», а также ЭВМ фирм Интердэйта и SEL [1].

Системы визуализации

Система визуализации является одним из основных компонентов современного тренажера. В первых стендах для целей визуализации использовались простейшие ориентиры.

Следующим этапом было использование проекционных систем, в которых на экран, расположенный перед кабиной тренажера, проецируется изображение окружающей обстановки, видимой из кабины самолета в полете. Такая проекционная система визуализации была разработана английской самолетостроительной фирмой БАК для определения потребных размеров лобового остекления кабин проектируемых самолетов (рис. 22).

Полупрозрачный цилиндрический экран диаметром 1,52 м и высотой 1,83 м, а также три проектора изображений на 35-мм пленке составляют основу панорамной системы визуализации PVS (Panoramic Vision System). Эта система обеспечивает пилоту, находящемуся внутри цилиндрического экрана, имитацию панорамного обзора местности. Проекторы формируют непрерывную картину,



1—проектор 2; 2—цилиндр диаметром 1,5 м для проекции изображений на его внешнюю поверхность; 3—проектор 3; 4—летчик-оператор; 5—проектор 1; 6—радиус 4,5 м

Рис. 22. Схема устройства панорамного обзора фирмы БАК (все проекторы имеют объективы с фокусным расстоянием 90 мм)

охватывающую 282° по азимуту и $\pm 45^\circ$ по тангажу. Определение оптимального обзора из кабины является трудной задачей при проектировании, и ее решением обычно является компромисс между «идеальным» остеклением для всех режимов полета и затратами, связанными с энергетическими расходами на работу противообледенительной системы. Кроме того, необходимо обеспечить такое расположение приборов, требующее лишь минимальных перемещений головы и глаз пилота при переносе взгляда с приборной панели на внекабинное пространство или обратно. Система панорамной визуализации фирмы БАК используется для определения минимального безопасного обзора. На начальной стадии проектирования самолетов эта система представляет собой наилучшую альтернативу дорогостоящим деревянным макетам кабин, строившимся в прошлом, модификация которых неизбежно связана с большими затратами. Картина перед глазами летчика соответствует условиям взлета и набора высоты или при посадке. Типичная программа предусматривает возможность моделирования углов крена больше 30° и углов наклона глассады больше 6° . Могут моделироваться различные условия полета днем или ночью и препятствия, возникающие на траектории полета. Окружающая самолет обстановка может проектироваться в темпе реального времени, в ускоренном или замедленном темпе в соответствии с заложеной программой [17].

В 1960-е годы широкое распространение получили телевизионные системы визуализации с макетом местности, выполненным в соответствующем масштабе. На небольшом расстоянии от макета перемещалась миниатюрная телекамера, движение которой с учетом масштаба соответствовало реальным перемещениям самолета. Полученное таким образом изображение передавалось на экран обычного телевизионного стандарта. К недостаткам системы визуализации телекамера—макет следует отнести трудности обеспечения резкости изображения предметов, находящихся от телекамеры на расстояниях от сантиметра до нескольких метров. Увеличение глубины резкости ограничено мощностью освещения. Примером одной из наиболее совершенных систем визуализации такого типа может служить система «Визулинк» фирмы Зингер-Линк, использующая макет местности и телекамеру с высокой разрешающей способностью. В данной системе реалистичность изображения остается высокой независимо от высоты «полета». Это обеспечивается применением детального макета местности и цветной телекамеры с большой разрешающей способностью, подсоединенной к широкоугольному объективу, который перемещается с помощью сервопривода, специально спроектированного для применения в данной системе.

Макет местности изготавливается в точном соответствии с выбранным масштабом так, что операторы могут правильно оценивать высоту, вертикальную скорость, наклонную дальность и т. д. Макет местности с большой степенью подобия позволяет применять систему и для тренировки летчиков вертолета в различных условиях, включая полет на очень малых высотах. Большой масштаб порядка 1500:1 расширяет полетную зону без потери деталей. Инструктор может задавать

тип освещения макета местности: дневной, сумеречный или ночной. Для того чтобы удовлетворить существующим в практике тренажерной подготовки требованиям, фирмой Зингер-Линк разработана высокочувствительная телекамера с большой разрешающей способностью. В ней используются три видикона типа SEC для получения цветной картины со сравнительно низким разрешением, а также новый пятисантиметровый видикон с высокой разрешающей способностью. Использование четырех приемников улучшает изображение и уменьшает число широкополосных каналов до одного, тем самым повышая надежность системы.

Эта высокоразрешающая телевизионная система генерирует примерно 960 000 элементов картины — в четыре раза больше, чем обычные системы, значительно увеличивая возможность получения детального изображения.

В объективе предусмотрена сложная система оптической коррекции, обеспечивающая резкость фокусировки на расстояниях порядка 3 м от точки расположения «глаза» системы и имитацию пролета вблизи вертикальных объектов. Система может функционировать над макетом холмистой местности с резкими перепадами высот (до 450 м). Изменения ориентации самолета в пространстве моделируются с помощью механизмов объектива. Изменение угла тангажа самолета имитируется наклоном зеркала перед объективом, а курс моделируется вращением тангажной призмы вокруг оптической оси. У каждого окна кабины установлена цветная ЭЛТ, наблюдаемая через разделительную призму и сферическое зеркало, которое преобразует изображения таким образом, что обзор не меняется при обычных изменениях положения головы летчика.

Появление систем визуализации CGI (Computer Generated Image) с электронным синтезом (генерацией) изображения привело к значительному улучшению моделирования окружающей обстановки. Изображение в таких системах получается с помощью специальных программ ЭВМ, в которых могут учитываться разнообразные визуальные эффекты.

При использовании на авиационных тренажерах системы CGI могут применяться для таких задач, как полет на малой высоте над холмистой местностью. Система CGI используется и в таком сложном комплексе, как тренажер для экипажа МВКА «Спейс Шаттл», и обеспечивает изображение Земли и выводимого на орбиту груза с помощью манипулятора. Система CGI оперирует с легко изменяемыми информационными массивами, что предусмотрено структурой системы. Массивы содержат информацию о размещении контуров и граней ряд наблюдаемых объектов, таких как взлетные дорожки с сигнальными огнями, строения, дороги, реки и поля.

Система CGI может формировать многокрасочные сцены, перспективное изображение которых на экране соответствует точке зрения наблюдателя.

Функционируя в реальном времени, система может отображать изменения картины обзора с частотой 16 раз в 1 с, чередуя изображения с частотой коммерческого телевидения (30 кадров в 1 с) [15].

Для того чтобы объекты не выглядели гранеными фигурами, сглаживаются резкие переходы от света к тени, и в результате чего образуется мягко очерченный контур. Объекты, освещенные солнцем, подсвечиваются и притеняются с соответствующих сторон. По мере того как солнце или объект движутся, тень перемещается соответствующим образом. Если один объект заходит за другой, он перекрывается последним. Система CGI может отображать не только объемные объекты, но и двумерные участки местности, тонкие линии, точечные огни, которые могут вспыхивать, вращаться или быть видимыми только с определенно го направления.

Все детали картины изменяют свои размеры и форму в соответствии с изменением расстояний до них. Моделируются близкие к реальным условия полета в тумане задаваемой плотности, вершины и нижняя поверхность облаков при «пробивании» самолетом облачного слоя. Могут быть смоделированы отдельные облака, подлет к ним и вылет из них. Наиболее характерной чертой систем CGI является высокая плотность заполнения картинной плоскости. Это особенно заметно при изображении густонаселенных районов. Система позволяет постепенно перемещать детали картины по мере приближения к ним и устранять деталь из изображения после пролета самолета над ней.

В системе предусмотрены также меры борьбы с нежелательными искажениями картины обзора, обычно наблюдаемыми при работе систем генерации изображений на ЭВМ. Сглаживание кромок как горизонтальных, так и вертикальных используется для устранения растровой структуры и сдвигов изображения, наблюдаемых в ранних системах при движении объектов по телевизионным строкам. Для устранения явления исчезновения тонких линий и точечных объектов при пересечении ими строк предусмотрены специальные меры.

Система CGI в принципе может генерировать более одного миллиона элементов картины — каждый своего цвета и формы. Для того чтобы обеспечить это свойство при обычной телевизионной частоте кадров, необходимо применять сверхбыстродействующие электронные схемы на заключительной стадии обработки видеосигналов.

Вычислительные комплексы с графическими дисплеями применяются в разнообразных системах человек—машина с 1950-х годов (рис. 23). В случае пилотажного стенда изображение представляет собой вид кабины. Реакция летчика воспринимает-

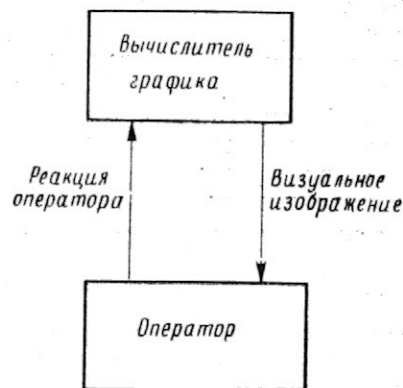


Рис. 23. Основные связи в системе человек—машина

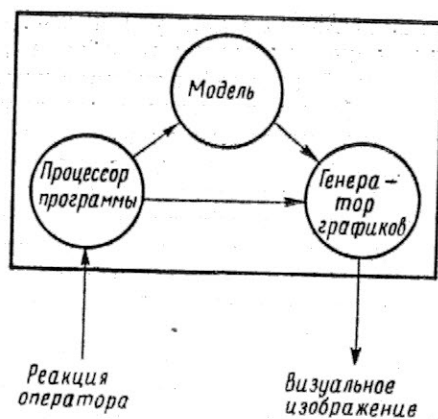


Рис. 24. Компоненты вычислителя графической системы

ся рычагами управления в кабине тренажера. Информация об управлении обрабатывается программой, моделирующей динамику самолета, которая вычисляет координаты, характеризующие положение самолета в пространстве. Эти значения поступают затем в генератор изображений. На рис. 24 представлен вычислитель графической системы, в который входят три внутренних компонента: процессор, модель и генератор изображений. Модель представляет собой информацию, загружаемую в память ЭВМ. Процессор — это обычный вычислитель, который может быть использован для создания или изменения модели. При моделировании он задает генератору требуемую последовательность изображений.

Генератор изображения представляет собой сложное устройство, включающее в себя специализированный вычислитель для синтеза изображения, например в виде телевизионного видеосигнала, и систему отображения, например телевизионную. Иногда на пилотажном стенде летчик видит телевизионный экран через некоторую оптическую систему, которая обеспечивает более реальное восприятие картины окружающей обстановки. Система визуализации вырабатывает последовательность изображений, создающую у летчика зрительное ощущение непрерывно изменяющегося вида из кабины самолета.

За рубежом впервые генерация изображений с помощью ЭВМ в реальном масштабе времени на пилотажном стенде была осуществлена NASA в середине 1960-х годов. До середины 1978 г. около 200 генераторов изображений для пилотажных стендов были созданы и введены в эксплуатацию.

Рис. 25 и 26 иллюстрируют качество и степень насыщенности деталями картин в существующих системах визуализации. На рис. 25 приведена картина местности в сумерках, обеспечиваемая системой «Нововью» SP1. На картине можно выделить два класса элементов. Элементами первого класса являются несколько тысяч огней, каждый из которых характеризуется рядом признаков, в том числе цветом, яркостью, диаграммой направленности и частотой проблеска. Огни на ВПП и в ее окрестности вырабатываются путем направления электронного луча в соответствующее место экрана ЭЛТ. Такой тип индикации называется каллиграфическим.

Второй класс элементов картины включает в себя однотонные области: небо, горы, ВПП, марки-

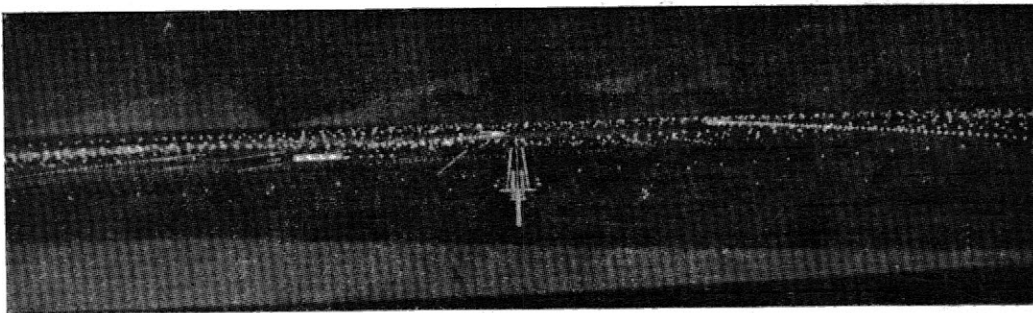


Рис. 25. Генерированная ЭВМ картина местности, окружающей аэропорт (система «Нововью» SPI, рассчитанная на воспроизведение только ночных и сумеречных условий)

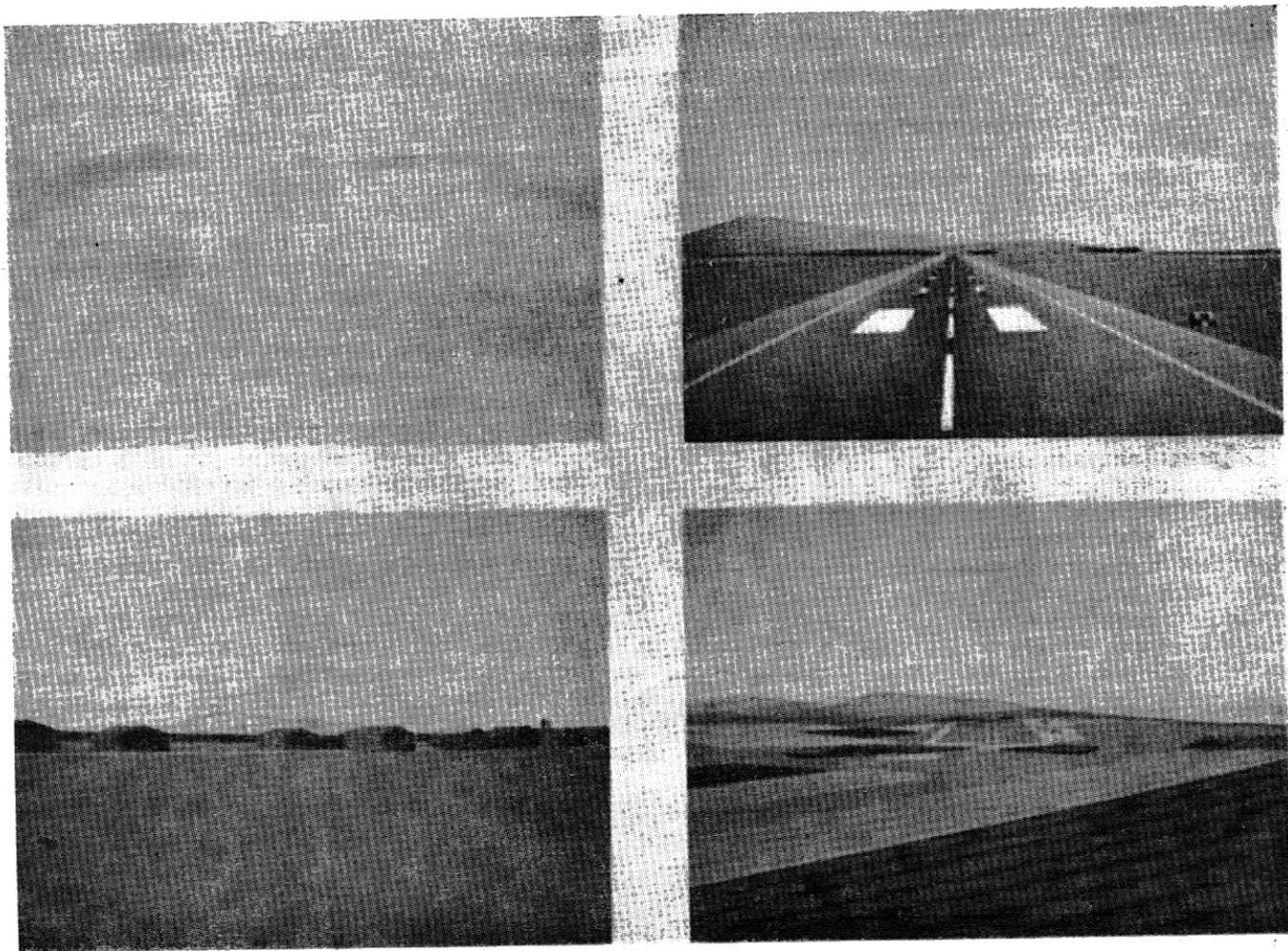


Рис. 26. Картина, полученная генератором изображений, способным моделировать условия ночного и дневного освещения (система «Дэйнайт»)

ровочные знаки и строения. В системе «Нововью» эти элементы генерируются с помощью раstra, аналогичного телевизионному. В других системах такие элементы картины воспроизводятся способом, аналогичным тому, который используется при отображении огней. При подробном рассмотрении этой части изображения можно обнаружить, что разрешающая способность и контраст в этом случае ниже, по сравнению с каллиграфическим дисплеем, так как картина соответствует сумеречным

условиям освещения. Этот способ изображения называется гибридным.

Степень контраста и яркости такой системы не позволяет получить удовлетворительные характеристики для отображения картин при полном дневном освещении. Кроме гибридного и каллиграфического методов создания изображения в системах CGI используется и телевизионный метод. На рис. 26 показана дневная картина, воспроизводимая генератором изображений системы «Дэйнайт»,

изготовленной совместно фирмами Редифон и Эванс-Сюзерленд для авиакомпании Люфтганза. Изображение создается с помощью стандартного телевизионного метода, который позволяет получать цветные и яркие изображения, соответствующие дневным условиям. Разрешающая способность такого телевизионного дисплея выше раstra, используемого в системе «Нововью», но при изображении огней разрешение меньше, чем у каллиграфической системы. Моделирование картин при дневном освещении в условиях хорошей видимости связано с большими трудностями, и стоимость генераторов изображения такого типа весьма высока. Это вызывается двумя причинами. Первая: днем можно увидеть значительно больше деталей, чем ночью. Вторая причина: при ярком освещении глаз гораздо более чувствителен, чем ночью. При малых уровнях освещенности различается гораздо меньше цветов, чем при дневном свете.

Одной из проблем моделирования является использование дискретных картин для моделирования непрерывно изменяющихся картин реального мира. В свою очередь, каждая картина представляется множеством точек и линий, что приводит к появлению различных отвлекающих искажений. Эта совокупность искажений, вызываемая дискретностью во времени и пространстве, является низкочастотными помехами высокочастотной (временной или пространственной) информации о картине. Таким образом, получение высококачественных динамических изображений дневных картин является гораздо более сложной задачей, чем изображения ночных или сумеречных картин [18].

Системы визуализации типа ночь. Среди достоинств, которыми обладают ночные системы визуализации, наиболее существенными являются управление эффектами ограниченной видимости и сохранение высокого качества изображения вплоть до момента касания самолетом ВПП. Одной из систем визуализации, воспроизводящих только ночные сцены, является система NVS, входящая в семейство «Визулинк» фирмы Зингер-Линк. Система визуализации NVS (Night Visual System) представляет собой компактное устройство, изображающее многоцветные ночные картины, генерируемые ЭВМ, включая реалистическое представление динамически изменяющегося освещения посадочными фарами участка местности перед самолетом. Частота кадров (30 раз в 1 с) делает мерцание почти незаметным, изображение свечения горизонта усиливает визуальное впечатление от картины.

По мере приближения к точке касания становятся видимыми текстура поверхности и разметка ВПП. Инструктор может задавать условия плохой видимости и условия полета в облаках. Моделирование огней включает реальные световые эффекты, такие как двунаправленность, стробирование, мерцание и вращение.

Система NVS имеет 16 массивов данных, в каждом из которых имеется информация более чем о 6000 светящихся точек семи различных цветов. Каждый массив данных позволяет разместить светящиеся точки в любом месте зоны с размерами 30×30 км. В районе аэропорта плотность размещения огней можно повысить. База данных любого аэропорта может быть увязана в ЭВМ с подпро-

граммами, моделирующими работу системы посадки по приборам. Выбор канала ILS аэропорта автоматически вызывает появление соответствующей визуальной картины.

Система NVS имеет модульную структуру, поэтому система визуализации, занимающая две панели остекления окон, посредством подсоединения дополнительных блоков может быть расширена до 8 панелей, что обеспечит боковой обзор при разворотах и возможность испытаний специальных компоновок кабин (например, вертолетов).

Ночные системы визуализации, несмотря на их очевидные достоинства, все же существенно ограничивают круг задач, решаемых на стенде. Поэтому в сфере моделирования получили наибольшее распространение более универсальные системы — типа ночь—сумерки и день—ночь [15].

Системы визуализации типа ночь—сумерки и день—ночь. Место систем этого типа в общей совокупности систем CGI показано на рис. 27. Отдельные варианты различаются способами формирования изображений на экране.

В системах день—ночь все содержание картины отображается только растровым способом. Это свойство, совершенно необходимое при отображении сложных картин, одновременно является источником проблем, которые весьма трудно преодолеть. Существующие системы сумерки—ночь классифицируются как каллиграфические и гибридные. Общей характеристикой этих систем является то, что картины отображаются последовательно, а не объединяются параллельно друг с другом для выдачи в формате растрового экрана. Каллиграфические дисплеи способны рисовать светящиеся точки и участки линий и построены на принципе использования систем, отображающих линии. Сплошные поверхности отображаются путем наложения на модель поверхности дополнительных линий, что, однако, не всегда полезно при моделировании, так как эти линии должны быть сходящимися для имитации перспективы. После того как в системах ночь—сумерки стали отображаться сплошные поверхности, такие как железные дороги и маркеры, моделирование перешло в категорию гибридного.

Во всех случаях огни отображаются отдельными точками, обычно по мере вычисления их координат.

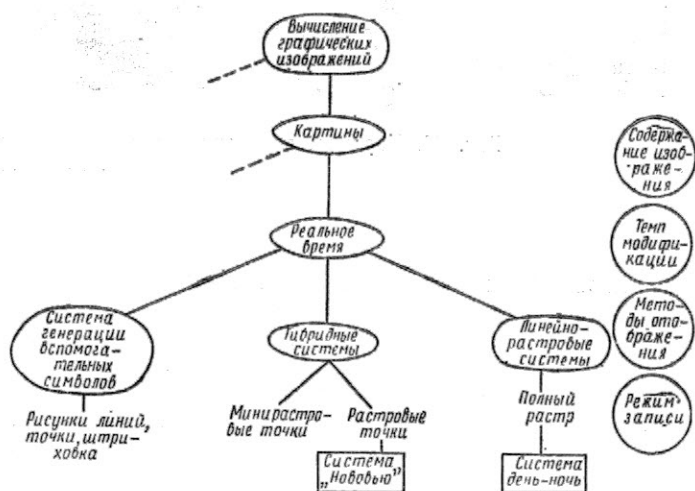


Рис. 27. Классификация систем визуализации на основе ЭВМ

Мини-растровое отображение поверхностей является развитием метода, при использовании которого каждая отдельная поверхность отображается малым растром, размер которого определяется теми зонами экрана дисплея, на которые отображаются эти поверхности. В некоторых случаях такие зоны могут охватывать все поле экрана. Однако важно отметить, что в методе с использованием каллиграфических дисплеев имеется возможность легко изменять ориентацию и плотность раstra, что невозможно при использовании обычных дисплеев телевизионного типа [19].

При постановке задачи на стенде вначале необходимо определить наиболее существенные детали, видимые в окружающем пространстве, и сопоставить эти визуальные признаки с возможностями системы визуализации. Ночное или сумеречное видимое пространство в основном складывается из простых поверхностей различных тонов и светящихся точек, появляющихся в действительности в виде ряда огней.

После того как определены ограничения, графические данные вводятся в ЭВМ. Следующим вопросом является перевод представления вида на землю с птичьего полета в перспективную картину, наблюдаемую летчиком. Это изображение должно перемещаться в соответствии с динамикой стенда и, кроме того, отражать вводимые программно элементы внешней обстановки, такие как облака, туман, время дня и т. д.

Основой системы визуализации является генератор изображения, обеспечивающий выработку в реальном времени ночных и сумеречных видов и реалистичное отображение целого ряда визуальных ориентиров, характеризующих местность в районе аэропорта, городские районы и т. д. Вычисляемые изображения включают в себя сплошные поверхности для представления таких деталей, как железные дороги, маркеры, трехмерные строения и огни. Дополнительно обеспечивается возможность отображения световых эффектов от самолетных посадочных фар и внешней иллюминации. Генератор изображения имеет модульную структуру, допускающую возможность увеличения числа модулей при увеличении содержания изображений и появлении дополнительных каналов изменения изображения. Генератор осуществляет все функции, необходимые для формирования изображения на дисплее с ЭЛТ, в соответствии с выбранной совокупностью данных и с командами, поступающими от ЭВМ. Важной особенностью системы CGI является возможность быстрой смены вида на местность, например замены одного аэропорта другим (рис. 28). Для летчиков авиалиний наиболее существенной чертой системы визуализации является возможность отработки полетов в плохих погодных условиях.

Генератор изображений состоит из трех основных компонентов: универсальной мини-ЭВМ с периферийными устройствами, аппаратных схем формирования изображения и дисплея на ЭЛТ.

Память на магнитном диске обеспечивает быстрый доступ к информации для системных и моделирующих программ и связь между ними посредством памяти с общим доступом. Мини-ЭВМ в реальном масштабе времени осуществляет управление генератором изображений, обрабатывает

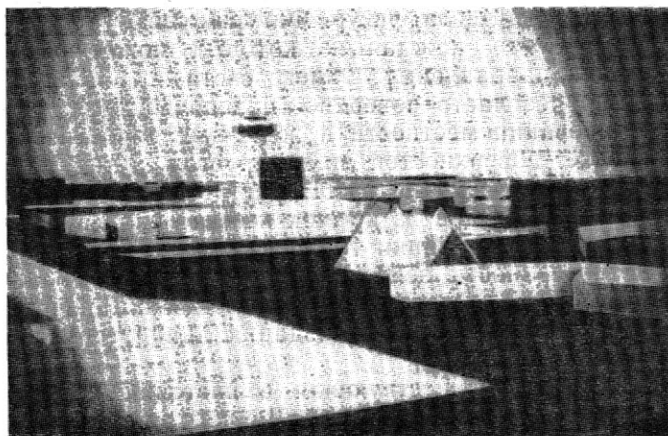


Рис. 28. Вид на город Лас-Вегас (шт. Невада) при заходе самолета на посадку (система визуализации «Визулинк»)

входные данные основной ЭВМ, пересчитывает координаты, генерирует некоторые специальные эффекты. Модель, выбранная из библиотеки на диске, загружается в память ЭВМ. Эти данные вместе с управляющей информацией и информацией о системе координат используются процессором расчета изображений для генерации каждого кадра изображения. Номинальная частота составляет 30 кадр./с.

Процессор изображений производит все вычисления, необходимые для перспективных трансформаций картины и аналогового преобразования данных в формат сигналов дисплея. Это оборудование также производит некоторые часто повторяющиеся вычисления для воспроизведения специальных эффектов.

Базовая конфигурация системы визуализации включает один процессор вычисления эффектов перспективы изображения, один процессор канала и два дисплея.

Расширение основной системы в целях формирования дополнительных зон обзора возможно путем подсоединения печатных схем, аналогичных используемым в исходной системе. Цепочки огней могут отображаться в любом из четырех цветов: красном, оранжевом, светложелтом и зеленом. Кроме того, можно менять направленность этих огней для моделирования некоторых железнодорожных огней. Эффекты вращающихся световых маяков моделируются путем вращения оси диаграммы направленности.

Можно воспроизводить праволинейную последовательность огней (лампы шоссе, рулежные дорожки). Моделируются огни специального типа, например проблесковые, с высокой интенсивностью, подобные тем, которые используются в аэропорту им. Кеннеди (Нью-Йорк). Аэродромные огни системы изображаются рядами светящихся точек. Светящимися точками моделируются звезды на небе.

Другими составляющими картины системы CGI являются объекты, представляемые однотонными поверхностями или элементарными фигурами. Элементарная фигура определяется как выпуклая часть плоскости, ограниченная прямолинейными кромками, число которых не превышает четырех. Фигуры могут быть трех- или четырехугольными: более сложные многоугольники образуются из двух

или большего числа фигур. Фигуры имеют 64 градации яркости, каждая из которых может быть функцией направления лунного света.

Наиболее часто поверхности используются при моделировании местности и железных дорог. Изображение поверхностей индицируется путем покрытия части экрана ЭЛТ растром с высоким разрешением. Одна из кромок всегда используется для обозначения линии горизонта, другая отображает поверхность земли, простирающуюся до линии горизонта. Одна из фигур всегда обозначает небо и используется для создания линий горизонта.

Тенденция, существующая в настоящее время в имитации условий ночь—сумерки, заключается в формировании множества объектов, которые могут закрывать друг друга и горизонт. Все эти детали дополняют изображаемую картину местности и создают более полную иллюзию внешнего мира, обеспечивая возможно лучшие условия тренировок.

Одна из основных целей при проектировании системы SPI заключалась в улучшении моделирования погодных условий. При этом предусматривалось, например, воспроизведение световых эффектов, обусловленных отражением огней самолета от облаков, мелькания местности в разрывах между облаками и т. д.

Системы визуализации типа день—ночь. Наиболее характерные особенности моделирования дневной визуальной обстановки можно проследить при рассмотрении работы системы визуализации «Дэйнайт» (день—ночь).

В этой системе используется улучшенный растровый способ создания изображений на экране, что позволяет воспроизводить визуальную информацию, необходимую при тренировках на стенде операторов летательных аппаратов или других систем человек—машина в полном диапазоне световых условий от глубокой ночи до ясного дня в натуральной световой гамме. В этом и состоит основное отличие системы «Дэйнайт» от системы «Нововью» SPI.

Специфика системы «Дэйнайт» определяется в основном характеристиками генератора изображений, в задачу которого входит формирование электрических сигналов, преобразуемых дисплеем в видимое изображение, хорошо соответствующее реальной визуальной обстановке.

Генератор данных получает с моделирующей установки информацию о положении глаз летчика

и ориентации каждого движущегося объекта, значениях параметров окружающей среды, которыми может управлять инструктор, таких как время дня, облачность, характер освещенности, условия видимости и т. д.

Эта информация используется для управления алгоритмами воздействия на внешнюю картину. Скорость смены изображений достаточна для того, чтобы создать у оператора ощущение плавного движения. По качеству изображения система «Дэйнайт» считается лучше всех других существующих систем (рис. 29).

Для минимизации искажений, обусловленных растровой структурой картины, в системе «Дэйнайт» использован «лобовой» подход. Картина рассчитывается четыре раза за время полного сканирования, и каждая строка растра получается путем осреднения четырех расчетных строк.

Нормально функционирующая система CGI может иногда оказаться перегруженной. Если блок процессора, осуществляющий обработку геометрических данных, выдает сигнал о возможной перегрузке, программа управления увеличивает нижний порог размера многоугольников и таким образом наименьшие из изображаемых многоугольников устраняются из картины. Опыт использования этого процесса показывает, что наблюдатели обычно не замечают исчезновения многоугольников, даже в случае, когда их размеры существенно больше нормальной пороговой величины.

Кроме того, если блок процессора, осуществляющий обработку сегментов, сигнализирует о предстоящей перегрузке, то программа управления уменьшает время расчета строк изображения. Наблюдаемое в результате незначительное ухудшение качества изображения более приемлемо, чем срыв изображения или широко используемый метод повторения предыдущего кадра.

Качество изображения точечных огней в системе «Нововью» является наивысшим для всех существующих в настоящее время растровых систем изображения. Однако простое представление точечных огней в виде клетки растра размером 1×1 или 2×2 неприемлемо для ряда ситуаций, включающих заход на посадку и приземление в ночных условиях. В генераторе изображений системы «Дэйнайт» для достижения высокого качества изображения огней используется специальный процессор точечных огней, который обеспечивает плавность перемещения их изображений, постоянство размера и яркости.

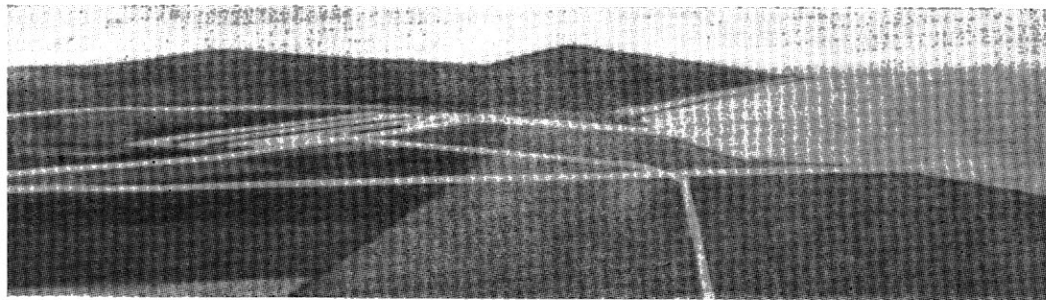


Рис. 29. Высококачественная картина вида из кабины при дневных условиях освещенности (система визуализации «Дэйнайт»)

Тщательная обработка модели изображения достигается путем использования специальных методов для эффективной фильтрации помех.

В генераторе изображения системы «Дэйнайт» модификация картины происходит с частотой полукадров, что позволяет улучшить качество изображения [20].

Проблемы качества изображения систем визуализации типа ночь — сумерки и день — ночь. На качество изображения существенное влияние оказывают тип дисплейных устройств и метод сканирования. Системы типа ночь—сумерки используют дисплеи на ЭЛТ с проникающим лучом. Такие ЭЛТ не только обладают высокими разрешающими характеристиками черно-белых ЭЛТ, но могут создавать и цветное изображение. Спектр свечения двухцветного люминофора экрана этих ЭЛТ охватывает область между красным и зеленым цветом, включая светло-желтый. Эти цвета хорошо подходят для использования в точных сумеречных картинах, но отсутствие голубой компоненты препятствует моделированию условий дневного освещения. Вследствие того что изменение цвета достигается за счет изменения энергии электронного луча, а не объединения нескольких лучей разного цвета, не существует проблемы сведения лучей. Яркость белого свечения на ЭЛТ с проникающим лучом в 3—4 раза меньше яркости, достигаемой на устройствах с полным спектром свечения экрана.

Яркость можно увеличить, однако практически это нецелесообразно, так как в результате увеличивается послесвечение и изображение расплывается.

Способ последовательного сканирования, используемый в системах типа ночь, означает, что огни, отдельные поверхности или их группы могут отображаться в темпе их расчета, что значительно упрощает аппаратные схемы, формирующие изображение.

Системы типа ночь обычно размещаются в одной стойке вместе с универсальной ЭВМ, в то время как число стоек дневных систем достигает десяти. Содержание изображаемых картин для систем типа ночь—сумерки в значительной степени ограничено скоростью формирования картины на экране, хотя были предприняты попытки увеличить параллелизм при отображении поверхностей. Основной способ, предусматривающий отображение и огней, и поверхностей, остается еще последовательным, и при возрастании сложности картины требования к времени отображения повышаются.

В системах типа день—ночь обычно используются дисплеи, основанные на кинескопах или других проекционных устройствах цветного изображения. В любом случае разрешающая способность этих устройств заметно ниже, чем у ЭЛТ с проникающим лучом, что обусловлено их физической структурой, размером светящегося пятна или невозможностью повышения скорости сканирования. Кроме того, возникают проблемы сведения цветных лучей, устранения цветной каймы и разделения цветов. К настоящему времени достигнуты уровни яркости, адекватные сценам при дневном освещении.

Растровый формат представления изображения, используемый в системах типа день—ночь, допускает параллельное объединение очень сложной

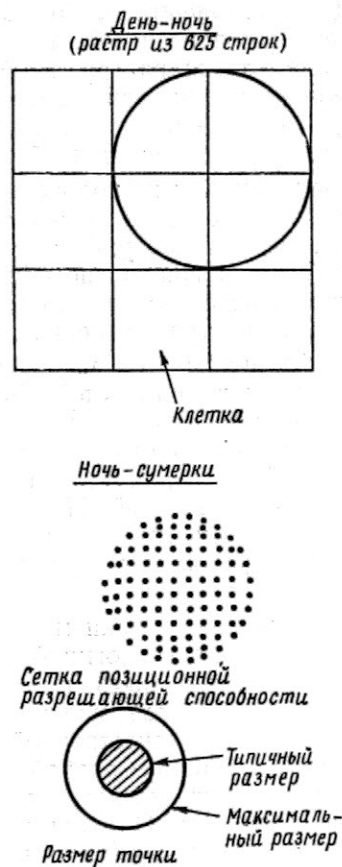


Рис. 30. Различия в разрешающей способности системы «Нововью» и систем типа день—ночь

информации о картине независимо от процесса сканирования. Большая часть объема и степень сложности электронной аппаратуры этих систем связаны с преобразованием данных о картине в растровый формат.

Разница в разрешающей способности системы «Нововью» и систем типа день—ночь, использующих стандартный телевизионный растр в 625 строк, показана на рис. 30. Масштаб изображения выбран в предположении, что размеры экрана ЭЛТ обеих систем одинаковы. При отображении малых объектов, таких как огни, возникают две проблемы. Первой является позиционная разрешающая способность (наименьшее перемещение светящейся точки на экране), второй — размер самой точки. На каллиграфических дисплеях позиционное разрешение может быть равно диаметру точки. Можно достичь плавного перемещения точки с малой дискретностью. Размер точки для изображения одиночного огня составляет $\sim 1/2000$ ширины дисплея, что соответствует менее чем 1,5' в типовой системе визуализации.

Растровая структура, к примеру, существенно грубее. Размер точки обычно неограничен и достаточно велик для того, чтобы сделать незаметной растровую структуру. Интерпретировать разрешение можно размером клетки растра, однако это не вполне корректно. Если представлять светящуюся точку одной клеткой растра, то перемещать ее изображение можно только через некоторое число клеток, что приводит к заметной дискретности

движения. Для устранения этого явления увеличивают размер светового пятна, тем самым, перекрывая соседние клетки растра, необходимо сглаживать движение точки при пересечении линий растра. При этом, однако, возможно увеличение размеров и вялости движения изображения.

Приемлемым выходом из положения может быть показанное на рис. 30 представление огня в виде круга, наложенного на растр. Для того чтобы получить ту же разрешающую способность, что и в случае каллиграфического дисплея, необходимо уменьшить размер растра примерно в четыре раза.

Внешняя обстановка отображается системами типа ночь—сумерки в виде огней, больших участков местности и населенных пунктов с малым числом деталей, мало контрастных и довольно насыщенных зон в районе аэропортов, где важна точность в отображении деталей. Цели, которые ставятся перед системами такого типа, существенно умереннее задач, решаемых при моделировании условий дневного освещения.

Систему типа ночь—сумерки можно усовершенствовать, хотя, конечно, все огни большого городского района не могут быть показаны, однако можно отобразить относительную плотность огней. Хотя построение высококачественной системы такого типа не просто, при ее разработке нет необходимости преодолевать существенные ограничения, присущие дисплеям. Отчасти из-за того, что первые образцы систем давали высококачественные и содержательные изображения, было решено, что усилия при дальнейшей разработке системы необходимо направить не только на увеличение содержательности картин, но и на более тщательную отработку визуальных сигналов, таких как:

световые пятна от посадочных фар—форма этих пятен определяется типом самолета и выбором комбинаций включенных огней;

световые эффекты при ограниченной видимости, включая свечение атмосферы от внешних огней самолета, и эффекты гало;

диаграммы направленности огней (вид, форма и ширина диаграмм направленности должна отвечать отображаемым источникам света);

криволинейные цепочки огней, эффективно отражающие кривизну объектов;

специальные эффекты, включая яркие стробирующие импульсы, световые вспышки, приводные огни и т. д. (гибкость каллиграфического метода делает возможным увеличение светящегося пятна луча для изменения яркости и управления фокусировкой луча).

Следует отметить, что ряд особенностей систем визуализации типа ночь—сумерки нашли впоследствии применение в системах типа день—ночь. В частности, это касается смены данных с удвоенной кадровой частотой. В дневных системах двойные изображения были малозаметны, потому что оно в течение длительного времени маскировалось более серьезными дефектами, связанными с растровой структурой изображения.

В процессе развития систем типа ночь—сумерки вопрос обеспечения высокого качества изображения при увеличении объема информации и попытках отобразить светящиеся сумерки. В настоящее время системы типа ночь—сумерки могут отображать большее число поверхностей, по срав-

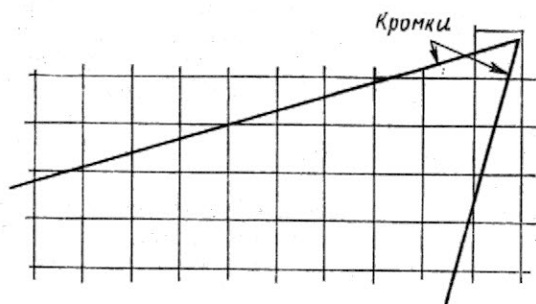


Рис 31. Сглаживание кромок изображения для устранения «ступенчатости»

нению с первыми дневными системами. В дополнение к их способности отображать огни они могут оперировать элементами рельефа местности, движущимися объектами и эффектами освещения; улучшены методы управления базами данных, а семиканальный генератор изображения может быть размещен в двух блоках.

Перед разработчиками систем визуализации типа день—ночь стоит труднодостижимая цель—смоделировать часть реального мира в широком диапазоне освещенности при необходимости использовать растр, который обуславливает дискретную структуру картин, непрерывных в других отношениях. При этом возникает множество проблем, таких как зазубренность, растровость, ступенчатость и сцинтилляция.

Главная проблема псевдоизображения охватывает множество эффектов, которые возникают из-за квантования и отбора сигналов на различных стадиях обработки и вывода на экран дискретных телевизионных изображений.

До 1973 г. «дневными» системами отображались рисунки участков поверхностей с кромками в виде последовательности ступенек (рис. 31). Ступеньки появлялись вследствие того, что каждой клетке приписывалась величина, цвет/интенсивность, полностью определяемые одиночной пробой картины, взятой в центре элемента.

Способ, которым была решена проблема ступенчатости изображений, получил название «сглаживание кромок» (вертикальное или горизонтальное в зависимости от их наклона и положения). Это свойство можно обеспечить, например, отображая каждую клетку растра, пересекаемую кромкой, смешанным цветом; соотношение цветов определяется размерами смежных зон. Для почти вертикальных кромок такой переход осуществляется на одном элементе.

На рис. 32 показаны некоторые дополнительные эффекты от квантования вершин на границах растровых линий. Этот метод используется не потому, что трудно правильно вычислить положение вершины, а потому, что обработка данных, ориентированная на растр, не может формировать кромки, начинающиеся или заканчивающиеся в середине линии.

Изображения приемлемо выглядят в статическом положении, но движение сопровождается неустойчивым поведением кромок, а точки вершин произвольно перемещаются с одной клетки на другую.

Частичное решение проблемы «гуляния кромок» может быть достигнуто путем точного определения пересечений кромки с рядом растровых линий и

вычислением соответствующих сглаживающих переходов для этих линий.

Сложность изображения углов многоугольника связана с образованием специфических зон, определяемых двумя и более кромками, пересекающимися где-то в середине растровой линии. Необходимо найти соответствующие весовые коэффициенты зон, прилегающих к каждой вершине. Приемлемую аппроксимацию весового соотношения можно достичь при замене этих зон соответствующим образом сформированными другими зонами, покрывающими целиком растровую линию.

Проблему псевдоизображений при совместной разработке системы визуализации для авиакомпании Люфтганза фирмы Эванс-Сюзерленд и Редифон решали следующим образом.

Основная цель заключалась в получении высокого качества изображения, содержательность отображаемой картины считалась важным, но второстепенным фактором. Система визуализации должна была создавать картины одновременно для двух независимых и малоотличающихся друг от друга кабин пилотажного стенда.

Потребное качество изображений обеспечивалось по трем основным направлениям.

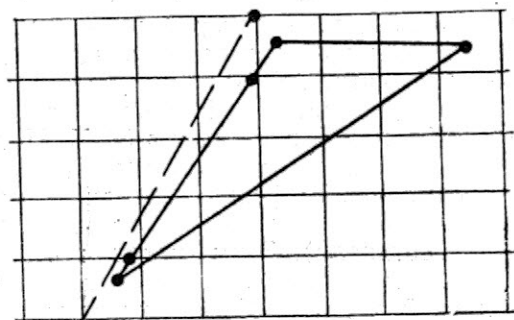


Рис. 32. Дефекты изображения из-за квантования

Во-первых, при обработке поверхности использовался метод сглаживания кромок — вычисления выполнялись 4 раза за время развертки одной линии растра. Это эквивалентно развертке четырех пробных линий внутри каждой строки развертки. При создании видеосигнала для каждой строки результаты этих вычислений осредняются.

Во-вторых, были установлены требования к изображению огней и было решено проводить более сложную их обработку, по сравнению с методом использования квазисканирующей линии.

В-третьих, для максимального использования существующих возможностей по отображению картин были разработаны новые методы управления базами данных.

Система визуализации типа день—ночь для стенда авиакомпании Люфтганза имеет следующие характеристики:

- два независимых канала;
- телевизионный стандарт 625 строк;
- скорость обмена данных — с удвоенной кадровой частотой;
- отображение каждым каналом 1000 многоугольников и 2000 огней.

Малые детали хорошо выделяются на фоне и не сцинтиллируют.

Длинные тонкие детали, такие как полосы взлетных дорожек, постепенно переходят в окружающие их поверхности. Элементы картины, движущиеся перпендикулярно растровым линиям, перемещаются плавно. По мнению разработчиков, данная система может служить основанием для введения новых стандартов на качество изображения в системах CGI типа день—ночь. Однако это еще не означает, что проблема псевдоизображений решена окончательно; как показывают последние результаты исследований, после каждого существенного уменьшения искажений изображения возникают другие неприятные эффекты. Для статических условий и при большинстве маневров транспортных самолетов изображение было хорошее. Однако некоторые движения по тангажу и (реже) по крену, осуществляемые со сравнительно большими скоростями, вызывают эффекты, сходные с неправильным сглаживанием кромок. Это наиболее заметно на кромках, которые в основном параллельны растровым линиям и, следовательно, перемещаются по ним при вертикальном смещении картин. Проблема эта связана с наложением соседних полукадров. Наложение является причиной хорошо известного, но редко встречающегося явления в практике коммерческого телевидения; вертикальное движение картины вынуждает глаз наблюдателя замечать наложенные полукадры. В результате этого создается зрительное впечатление того, что растр медленно движется в вертикальном направлении и содержит только половину обычного числа строк. Наблюдаемый эффект оказывается более значительным, чем можно было бы ожидать. Эффект наложения появляется несмотря на то, что используется обмен данных с частотой смены полукадров; при обмене с частотой смены кадров эффект еще заметнее. Это явление устраняется посредством использования специального экрана, что однако связано со значительными трудностями.

Процесс улучшения качества изображения, несмотря на известные достижения, к настоящему времени не завершен [19].

В дальнейшем упор будет делаться на снижение стоимости эксплуатации систем CGI путем усовершенствования генератора изображений и снижения потребления энергии.

Проблемы, присущие существующим системам визуализации и в основном связанные с вычислительными блоками генератора изображений, определяются следующими ограничивающими факторами:

- разрешающая способность изображения;
- качество изображения;
- степень детализации;
- насыщенность картины;
- угол обзора;
- фактура поверхности;
- освещение;
- тени;
- стоимость.

Телевизионный способ изображения достиг сравнительно высокого уровня, и быстрого повышения качества изображения здесь трудно ожидать. В настоящее время имеются несколько обнадеживающих разработок по другим способам отображения, включая использование сканирующих лучей лазера. Это может значительно повысить

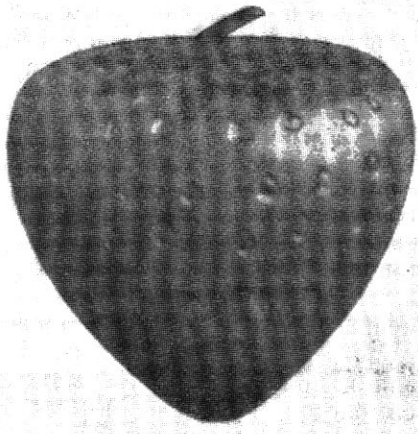


Рис. 33. Пример использования фактуры в изображениях, получаемых с помощью ЭВМ (детали изображения наложены на гладкую геометрическую модель земляники)

сить разрешающую способность и увеличить угол обзора.

Разрешающая способность и линейность дисплеев при создании астронавигационных стендов должна быть значительно улучшена. Отработка на тренажерах боевых операций также требует большего разрешения и малых геометрических искажений изображения по сравнению с достигнутым уровнем. При имитации воздушного боя необходимо моделировать движение нескольких летательных аппаратов и эффекты применения оружия. И хотя принципиальных трудностей в моделировании сложных динамических систем нет, возникает проблема значительного роста стоимости стенда и его эксплуатации.

Техника систем визуализации не имеет абсолютных пределов по разрешению или искажениям, однако стоимость систем быстро растет с их совершенствованием. В ближайшем будущем не следует ожидать реализации богатых деталями картин, близких к реальным картинам, хотя эффект использования фактур поверхностей поможет увеличить степень насыщенности деталями. На рис. 33 показано применение фактур поверхности на сравнительно простой модели. Можно с уверенностью ожидать более широкого использования подобной методики в визуализационных устройствах систем человек—машина. Возможна также замена традиционной системы индикации в кабине самолета более динамичным типом дисплея, базирующимся на принципе выдачи исключительной информации вместо непрерывного отображения всех важных показателей. Возможно выведение выбранной по запросу информации на более детальном уровне для целей диагностики.

В последующем десятилетии ожидается дальнейшее совершенствование техники машинного генерирования изображений и более широкого ее применения [18].

Техника пилотажных стендов быстро совершенствуется. Если при создании стенда NASA II генератор изображений мог отобразить картину, состоящую из 20 фигур типа куба, то в настоящее время рассматриваются требования к системам,

отображающим картину, эквивалентную 1000 кубов.

В конце 1960-х годов за рубежом существовало только четыре генератора изображений, весьма ограниченных возможностей, а в начале 1978 г. действовало уже более 120 систем такого типа. Совсем недавно фирмам-разработчикам систем визуализации с трудом удавалось находить заказчиков, желающих использовать на своих стендах систему с машинным генерированием изображения.

Сейчас ситуация коренным образом изменилась. Появились высокоэффективные системы визуализации «Нововью» SPI фирмы Редифон и система «Вайтол» IV фирмы Макдоннелл-Дуглас. Эти фирмы продали к 1978 г. около 90 систем визуализации типа CGI. Система визуализации NVS фирмы Зишгер к этому времени была заказана для 18 тренажеров. Все более широким спросом пользуются системы визуализации типа день—ночь. Эти системы стоят около 1—1,5 млн. ф. ст. каждая, почти в 4 раза дороже систем типа ночь—сумерки. В 1978 г. в США стоимость заказов на системы визуализации типа CGI превысила 40 млн. долл., в 1979 г. ожидалось заказы на сумму 150 млн. долл. [20].

В 1978 г. фирма Редифон по заказу ВМС США построила демонстрационную модель лазерной системы визуализации, в которой модель местности просматривается тремя лучами лазера (красным, голубым и зеленым). Освещенная таким образом картина воспринимается фотосинтезаторами, от которых информация поступает в ЭВМ. Последняя управляет лазерным трехцветным прожектором, который создает на сферическом экране цветное изображение размером 180° (по горизонтали) $\times 90^\circ$ (по вертикали). Этим методом воспроизводится более детальная картина, чем с помощью телевизионной системы. Поскольку опытная система работала только «в одном цвете», продолжались работы по созданию трехцветной системы [3, 6].

1. Hirst M., Goodman W. Simulated performance means real business. Flight International, 1978, v. 113, 18/II, N 3596, p. 435—437, 449.
2. Day B. Simulators: a mixed blessing? Air Force Magazine, 1978, v. 61, VII, N 7, p. 76—79.
3. Flight International, 1979, v. 115, 21/IV, N 3657, p. 1241—1246.
4. Air et Cosmos, 1979, 12/V, N 765, p. 32—33.
5. ICAO Bulletin, 1980, v. 35, IV, N 4, p. 35—38.
6. Flight International, 1978, v. 114, 25/XI, N 3636, p. 1951—1954, 1957.
7. ICAO Bulletin, 1980, v. 35, IV, N 4, p. 30—34.
8. Stein K. J. Europeans increasing use of simulators. Aviation Week and Space Technology, 1978, v. 109, 6/XI, N 19, p. 64—71.
9. Goodman W. The world's largest simulator fleet. Flight International, 1978, v. 113, 18/II, N 3596, p. 440.
10. Smith B. A. New simulator to be added by USAF. Aviation Week and Space Technology, 1978, v. 108, 20/II, N 8, p. 73, 76, 77.
11. Hornbarger H. A., Stover T. A. Current applications in training. Pilots and navigators are now taught by simulators. National Defense, 1977, v. LXII, VII—VIII, N 343, p. 36—39.
12. Simulation in the U.S. Air Force. The emphasis is on technology and operational use. National Defense, 1977, v. LXII, VII—VIII, N 343, p. 33—35.

13. Snow S. E. Airborne warning and control. Computer-controlled simulator vital to TAC operations. National Defense, 1977, v. LXII, VII—VIII, N 343, p. 39—42.
14. Barnes A. G., Houghton E. A. Air-to-air combat simulation. The Aeronautical Journal, 1978, v. 82, VI, N 810, p. 255—260.
15. Forbes J. E. Dynamic flight simulation: the stress is now toward better training in less space at lower cost. ICAO Bulletin, 1978, v. 33, IV, N 4, p. 22—25.
16. Link-Milés' new-style simulator. Flight International, 1976, v. 110, 18/XII, N 3484, p. 1793—1794.
17. Low-cost panoramic vision. Aerospace International, 1976, v. 113, III—IV, N 2, p. 58.
18. Evans D. C. Computer generated images for aircraft use. The Aeronautical Journal, 1978, v. 82, VIII, N 812, p. 342—345.

19. Schumaker R. A., Rougelot R. S. Computer generated imagery for visual flight simulation has come of age. Image quality—a comparison of night/dusk and day/night CGI systems (part II). ICAO Bulletin, 1978, v. 33, IV, N 4, p. 17—20.
20. Grant M. S. K. Computer generated imagery for visual flight simulation has come of age. Day, dusk and night visuals are here, but cost and image quality are trade-off considerations (part I). ICAO Bulletin, 1978, v. 33, IV, N 4, p. 12—16.

Референты: Ю. Б. Дубов,
А. Г. Терпугов,
Ю. Я. Шилов

„ТИ“, ОНТИ ЦАГИ, 1981, № 6, 1—28.

Редакционная коллегия: Г. В. Александров, Г. Е. Данышина (секретарь), Р. Д. Иродов, А. Г. Муни,
Е. И. Ружицкий (председатель), В. М. Фролов, Ю. Я. Шилов (и. о. ответственного редактора).

Технический редактор В. Н. Добровольская

Корректор Л. Д. Курдюкова

Сдано в набор 10.02.81.
Высокая печать.

Подписано в печать 26.03.81.
Бум. л. 1,75.

Формат бумаги 60×90¹/₈.
Усл. печ. л. 3,5.

Уч.-изд. л. 4,34.

Типографская № 1.
Тираж 2881 экз.

Литературная гарнитура.
Цена 55 коп.

Типография ЦАГИ. Заказ 1313.

