

УДК 629.396.933.23:629.735.05(045)

Я.В. Кондрашов¹, Т.С. Фиалкина², Д.С. Хоменко³¹ Государственное научно-производственное предприятие «Авиа-радиосервис», Киев² ГП «Центральный научно-исследовательский институт навигации и управления», Киев³ Национальный авиационный университет, Киев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАЛЬНОМЕРНО-УГЛОМЕРНОЙ РАДИОСИСТЕМЫ ДЛЯ НАВИГАЦИОННО-ПОСАДОЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

В статье проанализированы конфигурации навигационных и посадочных полей для местных воздушных линий (МВЛ). Предложены варианты управления полетом на основе информации по курсовому углу (или/и дальности). Проведено моделирование вариантов многопозиционной радиотехнической системы. Даны оценки требований по точностным характеристикам бортового оборудования, необходимым для обеспечения эшелонирования ВС при навигации и их категорированной посадки на необорудованные стандартными средствами аэродромы. Показано, что такие требования могут быть обеспечены штатными бортовыми радиолокатором и вычислителем в системе с наземными радиомаяками-ответчиками.

Ключевые слова: воздушное судно, бортовая аппаратура, маяки-ответчики, многопозиционность, радиолокационная навигационно-посадочная система, статистическое моделирование, точностные характеристики.

Введение

Тактика полетов воздушных судов (ВС) в зонах местных воздушных линий (МВЛ) позволяет определить условный типовой маршрут между точками взлета (А) и посадки (В), представленный на рис. 1.

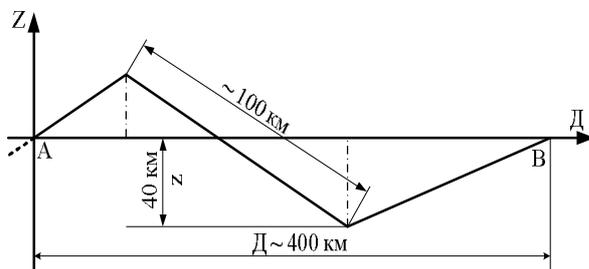


Рис. 1. Условный типовой маршрут между пунктами (точками) А и В:

Д – дальность между точками А и В; Z – боковое отклонение от прямой, соединяющей точки А и В

Данный условный маршрут состоит из нескольких участков прямолинейного полета и определенными боковыми отклонениями от прямой линии, соединяющей точки А и В. Численные характеристики типowego маршрута, на основании которых могут быть предъявлены тактико-технические требования, энергетические, точностные и др., к радиотехнической навигационной системе, представлены в табл.

Согласно существующим нормам бокового эшелонирования ВС на маршруте МВЛ допускается ширина коридора – 50 км. Перспективные нормы бокового эшелонирования указывают, что ширина коридора должна составлять 20 км. По данным на-

вигационного плана США [1] на внутренних авиалиниях ширина коридора на высотах более 6000 м составляет 29,6 км.

Таблица

Параметры типowego маршрута ВС МВЛ

Средняя дальность маршрута	$D_{\text{ср}}$, км	400
Среднее количество участков прямолинейного полета	m	3 ÷ 4
Средняя дальность прямолинейного полета	км	100
Среднее боковое отклонение	км	40
Минимальная высота полета на маршруте	м	600
Максимальная высота полета на маршруте	м	12000

Исходя из тактики полетов ВС МВЛ и технических возможностей радиотехнических навигационных систем, можно заключить:

– зона действия системы навигации по дальности должна охватывать не весь маршрут (что на небольших высотах полета может превысить дальность радиовидимости), а участок прямолинейного полета;

– на участке прямолинейного полета, т.е. в зоне действия радионавигационной системы может одновременно находиться ограниченное число – не более трех ВС МВЛ.

Следовательно, зона действия радиотехнической системы навигации ВС МВЛ должна обеспечивать участки пространства, изображенные на рис. 2, а.

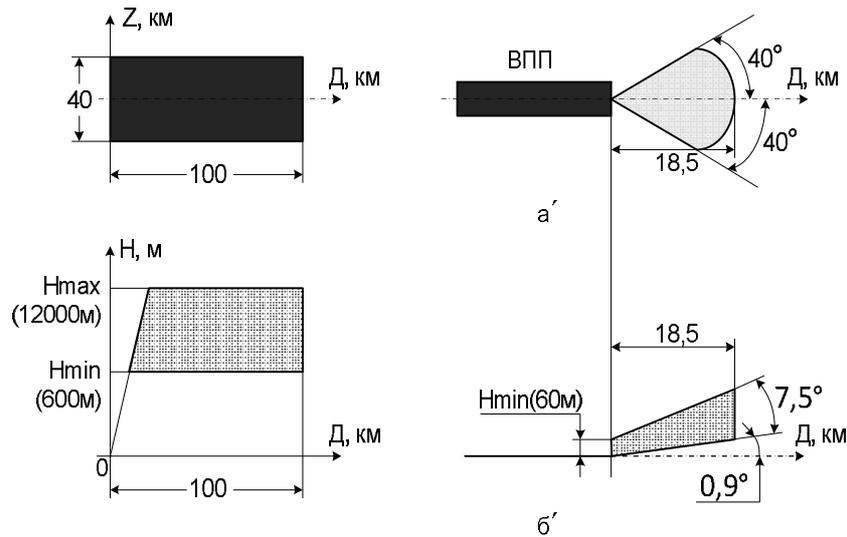


Рис. 2. Зоны действия систем навигации (а, б) и посадки (а', б') ВС МВЛ: а, а' – в горизонтальной плоскости; б, б' – в вертикальной плоскости

Тактика посадки ВС МВЛ на аэродромы, не оборудованные стандартными стационарными системами посадки, позволяет заключить следующее:

- заход на посадку и саму посадку осуществляют одиночные ВС МВЛ с одного конца взлетно-посадочной полосы (ВПП);
- заход на посадку и посадка ВС производится в директорном режиме;
- зона действия системы посадки должна строиться с учетом регламентированных зон действующих стандартных систем [2];
- обеспечение безопасности пассажирских перевозок; система посадки должна обеспечивать требования, как минимум I категории ИКАО.

Исходя из вышеизложенного, параметры зоны посадки ВС МВЛ следует принимать со следующими значениями:

- ✓ по дальности - не менее 18,5 км, отсчитываемых от торца ВПП;
- ✓ по азимутальному углу $\pm 40^\circ$, отсчитываемых от торца ВПП;
- ✓ по углу места - $0,9 - 7,5^\circ$ от плоскости горизонта, от высоты 60 м до высоты 6000 м.

Схематическая зона действия радиотехнической системы посадки ВС представлена на рис. 2, б. Анализ энергетических характеристик бортовых РЛС типа "Гроза", "Буран", МНРЛС-85 [3, 4] и работающих совместно с ними в локальной многопозиционной навигационно-посадочной системе [5] наземных малогабаритных радиомаяков-ответчиков показывает возможность создания непрерывного навигационного, или посадочного, полей в необходимых для МВЛ конфигурациях (рис. 2, а, б).

Варианты управления полетом ВС

Рассмотрим возможные варианты управления полетом ВС в описанных выше условиях для МВЛ.

При наличии на борту ВС штатной радиолокационной станции (РЛС), существует возможность автоматически измерять курсовой угол КУ и дальность Д до радиомаяков-ответчиков. Если маяки расположить на земле симметрично вдоль проекции маршрута полета – при навигации или продолжения оси ВПП - при посадке, рис. 3, то полет ВС в горизонтальной плоскости можно производить по линии равных углов и линии равных (или пропорциональных) дальностей по алгоритму, например [5]:

$$\left. \begin{aligned} \text{КУ} &= \text{КУ}_1 - \text{КУ}_2 \rightarrow 0; \\ \Delta \text{Д} &= \text{Д}_1 - \text{Д}_2 \rightarrow 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

При другом алгоритме вычислений можно, зная расположение базы маяков относительно севера, осуществлять зональную навигацию.

После поступления в бортовое вычислительное устройство отметок координат маяков КУ_1 и КУ_2 и вычисления дальностей до каждого из маяков Д_1 и Д_2 они усредняются, сглаживаются на определенном интервале времени и на основании сглаженных величин КУ_1 , КУ_2 , Д_1 , Д_2 вычисляется алгоритм (1) полетов горизонтальной плоскости. Зная азимут базы маяков α_d и базу маяков d, можно определить азимут ВС $\alpha_{\text{ВС}}$ по формуле:

$$\alpha_{\text{ВС}} = \alpha_d - (\text{КУ}_1 - \text{КУ}_2) \frac{1}{d} \text{Д}_2 - \text{КУ}_1. \quad (2)$$

Далее, если с пульта управления ввести в вычислительное устройство опорное значение азимута $\alpha_{\text{ОП}}$, можно вычислить разность:

$$\alpha_{\text{ВС}} - \alpha_{\text{ОП}} = \Delta \alpha. \quad (3)$$

Это значение $\Delta \alpha$ может служить основанием для зональной навигации ВС.

Экипаж ВС должен управлять полетом при посадке обеспечивая условие $\text{КУ} \rightarrow 0$ (для навигации $\Delta \alpha \rightarrow 0$ или также $\Delta \text{КУ} \rightarrow 0$).

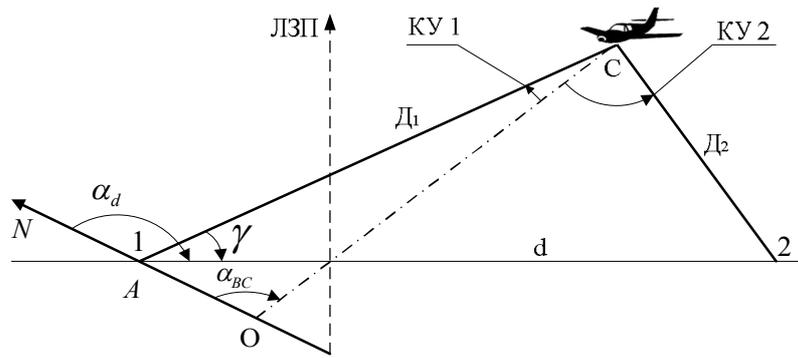


Рис. 3. Проекция маршрута ЛА на горизонтальную плоскость:

А и В – точки расположения соответственно маяков 1 и 2; С – точка расположения ЛА на его линии движения СО; D_1 и D_2 – дальности до маяков; КУ1, КУ2 – курсовые углы до каждого из маяков; OAN – направление на север; d – база маяков; α_d – азимут базы маяков; α_{BC} – азимут полета ВС; ОС – направление продольной оси ЛА

Для управления полетом в вертикальной плоскости при посадке можно использовать данные непосредственного измерения высоты полета с помощью штатного радиовысотомера, а можно вычислять дальность D_{BC} до начала ВПП, а затем и угол места ϵ_{BC} (рис. 4):

$$\epsilon_{BC} = \arcsin \frac{H_{BC}}{D_{BC}} \quad (4)$$

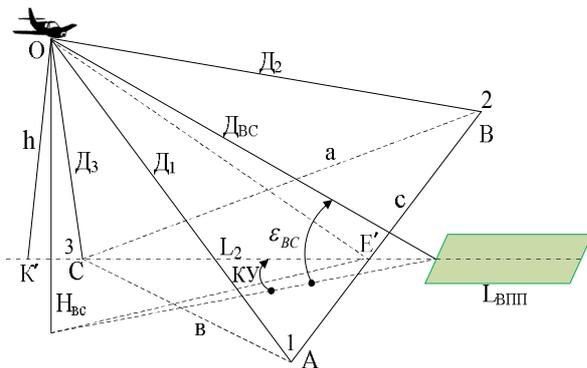


Рис. 4. Взаимное расположение ВС и наземных маяков-ответчиков:

О – точка текущего местонахождения ВС; А, В, С – места размещений маяков 1, 2, 3; а, в, с – базы маяков; $EE' = L_{\text{лм}}$ – расстояние от торца ВПП до базы маяков 1, 2; $L_{\text{ВПП}}$ – длина ВПП; L_2 – расстояние от торца ВПП до маяка 3; $AE' = E'B = L$ – расстояние от продолжения оси ВПП до маяков 1, 2; D_1, D_2, D_3 – наклонные дальности от ВС до маяков 1, 2, 3; $D_{BC}, H_{BC}, KU, \epsilon_{BC}$ – наклонная дальность, высота, курсовой угол и угол места ВС в системе координат, связанной ВПП; EK' – продолжение оси ВПП; K' – проекция точки О на продолжение оси ВПП; К – проекция точки О на плоскость, содержащую ВПП

Если задать с пульта управления бортовой аппаратурой опорный угол глиссады $\epsilon_{оп}$, то алгоритм полета ВС в вертикальной плоскости вычисляется в виде:

$$\epsilon_{BC} - \epsilon_{оп} = \Delta\epsilon \rightarrow 0 \quad (5)$$

Значение $\Delta\epsilon$ также выводится на пульт управления для информации экипажу. Следует отметить, что задавая разные значения $KU_{оп}$ и $\epsilon_{оп}$, можно формировать различные траектории посадки в обеих плоскостях, в том числе криволинейные.

Точностные характеристики НПС

Проведем анализ точностных характеристик систем, основанных на комплексировании вышеописанного оборудования, исходя из возможности обеспечения посадки ВС по I категории ИКАО. При этом можно предположить, что если навигационно-посадочная система удовлетворяет требованиям категорированной посадки, навигационные задачи, в смысле выдерживания норм эшелонирования, будут выполнены даже с запасом по точности.

Существующие регламентирующие требования для систем посадки определяют область допустимых линейных отклонений траектории посадки ВС в горизонтальной и вертикальной плоскостях, в том числе в точке перехода на визуальный полет. В горизонтальной плоскости по I категории ИКАО линейное боковое отклонение не должно превышать ± 60 м [6]. В той же точке перехода на визуальный полет требований по линейным отклонениям в вертикальной плоскости не предъявлено.

Точностные характеристики системы посадки, а именно, точность формирования радиотехнических траекторий по курсу и глиссаде, наряду с погрешностями измерителей координатной информации – радиолокаторов, радиовысотомеров, радиодальномеров, зависят от взаимного расположения ВС и маяков-ответчиков. Поэтому исследование точностных характеристик в точке перехода на визуальный полет проведено для различных вариантов размещения маяков.

Первый (*поперечный*) вариант размещения маяков относительно ВПП при оценке местоположения ВС представлен на рис. 4.

При таком расположении маяков-ответчиков относительно ВПП линейное боковое отклонение Z оценивается по формуле:

$$Z = L_1 \cdot \frac{\sin(KY_1 + KY_2)}{\sin(KY_1 - KY_2)} \quad (6)$$

Поскольку величина Z является нелинейной функцией двух измеряемых радиолокатором случайных величин $-KY_1$ и KY_2 , ее оценка проведена методами статистического моделирования. При этом значения случайных величин, какими являются измерения радиолокатора, $-KY_1$ и KY_2 были распределены по нормальному закону с заданными математическими ожиданиями и дисперсиями, $\sigma_{KY1} = \sigma_{KY2} = \sigma_{KY}$. Затем строились гистограммы распределения величин Z . Величины максимальных отклонений Z_{max} и $-Z_{max}$ определялись из условия, что вероятность успешного захода на посадку, согласно [6], $P_z = 0,988$, точность оценки $\varepsilon = 10^{-8}$.

В результате статистического моделирования рассчитаны максимально возможные боковые линейные отклонения Z , соответствующие вероятности 0,988, при различных значениях σ_{KY} , L_1 , L_{1M} . Результаты моделирования приведены на рис. 5, а, б. Из рис. 5, а, б следует, что при определенном размещении маяков-ответчиков относительно ВПП можно добиться удовлетворения требований I категории ICAO по точности при значении $\sigma_{KY} = 0,4 - 0,6^\circ$, что является вполне реализуемой точностью при автоматическом взаимодействии радиолокатора с маяками-ответчиками в обеспечение категорированной посадки ВС.

Другой (продольный) вариант размещения маяков относительно ВПП представлен на рис. 6.

При наличии на борту ВС радиолокатора линейное боковое отклонение Z и Z_{max} в этом случае можно определить по формулам, приведенным в [3, 4], результат расчетов по которым представлены на рис. 7. Из рис. 7 следует, что при определенном размещении маяков-ответчиков можно добиться удовлетворения требований по точности, в обеспечении посадки по I категории ICAO при значениях $\sigma_{KY} = 0,3 - 0,4^\circ$. Полученные значения σ_{KY} представляют несколько более жесткие требования к точности вычисления местоположения ВС, чем при поперечном размещении маяков.

В точке перехода на визуальный полет жестких требований к вертикальным отклонениям не предъявляется. Считается [6], что для успешной посадки более существенна регламентация по боковому отклонению. Однако, по описанным выше методикам такая оценка проведена [4]. Она показывает, что ошибки в вертикальной плоскости при различных конфигурациях размещения маяков превышают ошибки в горизонтальной плоскости при том же наборе бортового и наземного оборудования системы.

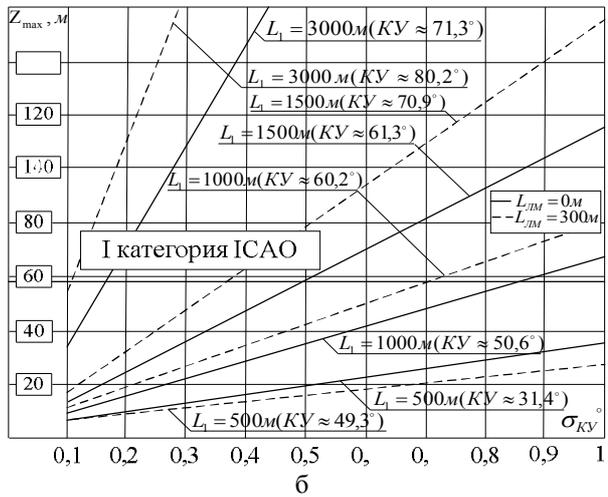
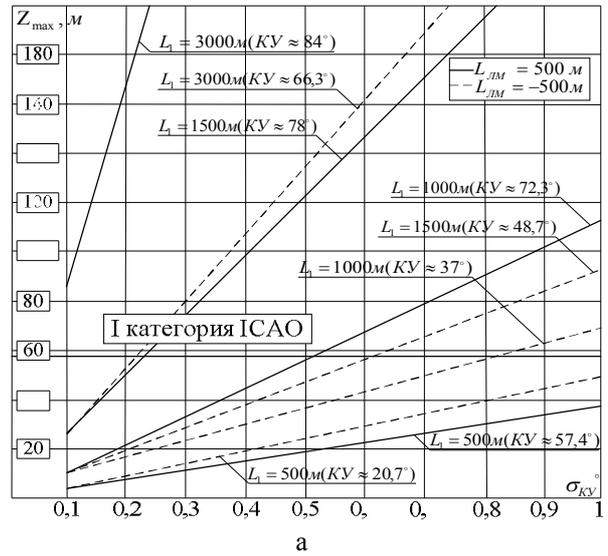


Рис. 5. Зависимость линейного бокового отклонения от среднеквадратической ошибки измерения курсового угла ($P_z = 0,988$)

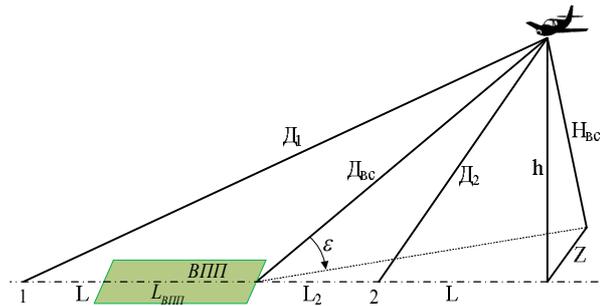


Рис. 6. Продольный вариант размещения маяков-ответчиков относительно ВПП

Поэтому для условий безопасности посадки целесообразно использовать в бортовом вычислителе, дополнительно к радиолокационной, информацию бортовых радиовысотомеров.

Следует отметить, что кроме рассмотренных σ_{KY} (или σ_D) ошибок в формировании радиотехнической траектории при пилотировании ВС возникают ошибки, обусловленные движением ВС, а имен-

но неточністю обробки команд, турбулентними возмущеннями и др. Эти ошибки существенно субъ-ективны и их учесть – есть результат отдельной работы.

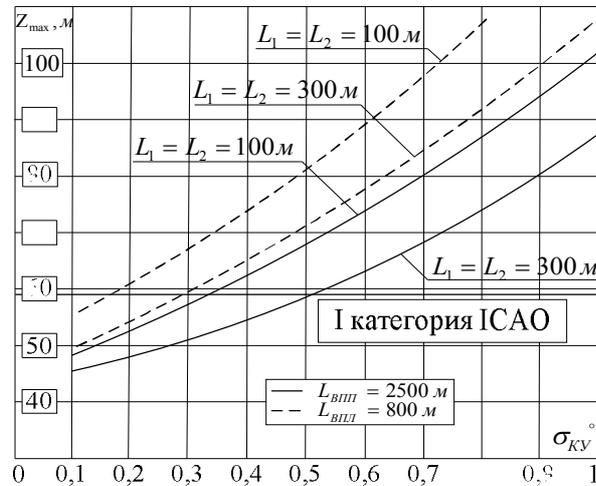


Рис. 7. Зависимость линейного бокового отклонения от среднеквадратической ошибки измерения курсового угла

Выводы

В результате проведенных в настоящей работе исследований показаны возможности использования угломерного, а в работе [4] дальномерного каналов штатных самолетных радиолокаторов в системе с бортовыми вычислителями и наземными радиомаяками-ответчиками для целей категорированной посадки и навигации воздушных судов МВЛ.

МОДЕЛЮВАННЯ ДАЛЕКОМІРНО-КУТОМІРНОЇ РАДІОСИСТЕМИ ДЛЯ НАВІГАЦІЙНО-ПОСАДКОВИХ ОПЕРАЦІЙ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

Я.В. Кондрашов, Т.С. Фіалкіна, Д.С. Хоменко

У статті проаналізовано конфігурації навігаційних і посадкових полів для місцевих повітряних ліній (МПЛ). Запропоновано варіанти управління польотом на основі інформації по курсовому куту (або / і дальності). Проведено моделювання варіантів багатопозиційної радіотехнічної системи. Дано оцінки вимог по точності бортового обладнання, необхідного для забезпечення ешелонування ПС при навігації та їх категорійній посадці на необладнані стандартними засобами аеродрому. Показано, що такі вимоги можуть бути забезпечені штатними бортовими радіолокатором і обчислювачем в системі з наземними радіомаяками-відповідачами.

Ключові слова: повітряне судно, бортова апаратура, маяки-відповідачі, багатопозиційність, радіолокаційна навігаційно-посадкова система, статистичне моделювання, точнісні характеристики.

MODELING OF RHO-THETA RADIO SYSTEM FOR NAVIGATION-LANDING OPERATION OF AIRCRAFTS

Ya. V. Kondrashov, T. S. Fialkina, D. S. Khomenko

In the research the configuration of navigation and landing fields for local air lines (LAL) is analyzed. Variants of the flight control based on the information on course angle (and/or distance) are proposed. The modeling of multi-position radio system variations is carried out. The estimates of requirements for accuracy characteristics of airborne equipment necessary to ensure separation of aircrafts at navigation and categorized landing on unequipped with standard means airfields are given. It is shown that such requirements may be provided by standard on-board radar and airborne computer in the system with ground-based transponder radio beacons.

Keywords: aircraft, airborne equipment, beacon, multiposition, radar navigation and landing system, statistical modeling, the accuracy characteristics.

Список литературы

1. План развития радионавигационных систем в США / Ю.Т. Зубаров и др. // Зарубежная радиоэлектроника. – М., 1983. – № 9. – С.3-17.
2. Поправка 63 ИКАО. Приложение 10, т.1 Авиационная электросвязь. – М.. – С. 105.
3. Кондрашов В.И. Анализ путей использования штатных бортовых радиолокаторов в конфигурациях зон управления полетом воздушных судов применительно к условиям местных воздушных линий / В.И. Кондрашов, Я.В. Кондрашов // Методы и средства дистанционного зондирования: сб.; Московский государственный технический университет гражданской авиации. – М., 1995. – С. 98-109.
4. Кондрашов Я.В. Пути использования информации высотомерно-угломерно-дальномерных бортовых датчиков и вычислительных средств в системе с радиомаяками-ответчиками для целей посадки, ближней и межсамолетной навигации / Я.В. Кондрашов // Методы управления системной эффективностью функционирования электрофицированных и пилотажно-навигационных комплексов, Авионика 95: тезисы докладов Международной научно-технической конференции; Киевский международный университет гражданской авиации. – К., 17-19.05.1995. – С. 106-107.
5. Кондрашов Я.В. Мобильные многопозиционные дальномерные и разностно-дальномерные радиосистемы посадки летательных аппаратов / Я.В. Кондрашов, Т.С. Фіалкіна // Електроніка та системи управління: журнал; Національний авіаційний університет. – К., 2008. – № 2 (16). – С. 77-84.
6. Белгородский С.А. Автоматизация управления посадкой самолета / С.А. Белгородский // Транспорт. – М., 1981. – С. 180.

Поступила в редколлегию 18.11.2011

Рецензент д-р техн. наук Н.И. Житник, АОЗТ «Укравто-транс», Киев.