

В. В. Маркелов¹, ведущий инженер-программист, **А. В. Шукалов**², канд. техн. наук, доц.,
М. О. Костишин², канд. техн. наук, доц., maksim@kostishin.com,
И. О. Жаринов², д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой, igor_rabota@pisem.net,
В. А. Нечаев^{1, 2}, главный конструктор, старший преподаватель,
¹ АО "ОКБ "Электроавтоматика",
² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО)

Алгоритм расчета навигационных параметров полета летательного аппарата по маршрутам зональной навигации

Рассматривается проблема повышения ситуационной осведомленности экипажа воздушного судна. Предлагается алгоритм расчета и формирования навигационных параметров полета в горизонтальной плоскости по маршрутам зональной навигации, используемый в качестве функционального дополнения программно-математического обеспечения бортового комплекса [1–3]. Расчет навигационных параметров полета осуществляется в реальном времени на основе данных о текущем и следующем участках траекторий, составляющих маршрут, с учетом фактических параметров полета. Рассматривается набор участков траекторий, применяемых для построения схем и маршрутов зональной навигации. Рассчитанные параметры используются для отображения на многофункциональных индикаторах кабины экипажа, а также, при необходимости, для формирования директорных и управляющих сигналов. Алгоритм расчета позволяет осуществить адаптацию бортового пилотажно-навигационного комплекса под требования, предъявляемые к системам зональной навигации, в части обеспечения экипажа необходимыми навигационными параметрами полета в горизонтальной плоскости.

Ключевые слова: навигационные параметры полета, навигационный алгоритм, зональная навигация

Введение

Маршруты зональной навигации позволяют обеспечить вылет, прибытие и заход на посадку с выдерживанием установленного запаса высоты над препятствиями при оптимальных градиентах набора высоты и снижения, пролет и облет потенциально опасных или закрытых для полетов районов, районов снижения шума, а также упорядочить движение воздушных судов в целях предотвращения опасных сближений между ними при увеличении пропускной способности аэродрома и повышения качества управления воздушным движением.

В большинстве современных воздушных судов функции полета по маршрутам (схемам) зональной навигации обеспечиваются в полном объеме системами самолетовождения. Однако имеется целый ряд воздушных судов, не обладающих данными функциями. Отсутствие функций обуславливалось имеющим место в прошлом единичным использованием схем зональной навигации на отечественных аэродромах.

В настоящее время при расширении внедрения схем зональной навигации, применяемых в районе аэроузла, а также при повышении требований к выполнению данных схем как в зарубежных, так и в отечественном воздушном пространстве, возникла потребность в обеспечении полетов по данным схемам воздушных судов, не обладающих необходимой функциональностью.

Решение данной проблемы обычно осуществляется либо с помощью использования дополнительных автономных инструментов — мобильных навигационных систем, либо с использованием электронных карт-схем зональной навигации.

Основными недостатками данных подходов является отсутствие согласованности показаний основных датчиков пилотажно-навигационной информации с выполняемой схемой полета и появление дополнительной нагрузки на экипаж.

Устранить данные недостатки представляется возможным путем дополнительной доработки программно-математического обеспечения бортового комплекса.

Для осуществления полетов по схемам и маршрутам зональной навигации бортовое навигационное оборудование воздушного судна должно обеспечивать решение задачи выдерживания заданной траектории движения в горизонтальной плоскости. Результатом решения данной задачи является набор основных параметров, включающий в себя заданный путевой угол, заданный курс, боковое отклонение от линии пути, расстояние по траектории и оставшееся время.

Отображение указанных навигационных параметров на многофункциональных индикаторах обеспечивает информирование экипажа об отклонении от заданной траектории и наведение летательного аппарата по каналу курса для выдержива-

Траектории зональной навигации

Указатель окончания траектории и описание траектории		Исходные данные
CA	Полет с заданным путевым углом до достижения заданной высоты	ЗПУ — заданный путевой угол $H_{\text{набор}}/H_{\text{снижение}}$ — заданная высота
CF	Полет в заданную контрольную точку с заданным путевым углом подхода	НТ — координаты контрольной точки ЗПУ — заданный путевой угол Признак пролета
DF	Полет прямо на заданную контрольную точку	НТ — координаты контрольной точки Признак пролета
FA	Полет от заданной контрольной точки с заданным путевым углом до достижения заданной высоты	НТ — координаты контрольной точки ЗПУ — заданный путевой угол $H_{\text{набор}}/H_{\text{снижение}}$ — заданная высота
FM	Полет от заданной контрольной точки с заданным путевым углом с окончанием траектории вручную	НТ — координаты контрольной точки ЗПУ — заданный путевой угол
NM	Полет в зоне ожидания относительно заданной контрольной точки с окончанием траектории вручную	НТ — координаты точки зоны ожидания ЗПУ — заданный путевой угол приближения L — длина участка приближения TD — направление разворота (+1 — правый)
RF	Полет по дуге заданного радиуса вокруг заданного центра до заданной контрольной точки	ЦД — координаты центра дуги RA — радиус дуги TD — направление разворота (+1 — правый) НТ — координаты контрольной точки на дуге $ПУ_{\text{нт}}$ — направление линии пути удаления Признак пролета
TF	Полет по линии пути между двумя заданными контрольными точками	НТ0 — координаты первой контрольной точки НТ — координаты второй контрольной точки (ЗПУ — направление линии пути к НТ) Признак пролета
VA	Полет с заданным курсом до достижения заданной высоты	$\Psi_{\text{зад}}$ — заданный курс $H_{\text{набор}}/H_{\text{снижение}}$ — заданная высота
VI	Полет с заданным курсом до пересечения с заданной линией пути	$\Psi_{\text{зад}}$ — заданный курс Признак пролета
VM	Полет с заданным курсом с окончанием траектории вручную	$\Psi_{\text{зад}}$ — заданный курс

ния траектории [4, 5]. При необходимости данные параметры также используются для формирования директорных и управляющих сигналов.

1. Принцип отображения навигационных параметров на многофункциональных индикаторах

Примеры индикационных кадров, содержащих навигационные параметры, на экране многофункционального индикатора приведены на рис. 1 (см. вторую сторону обложки).

Схемы и маршруты полета зональной навигации представляются на экране в виде заданной последовательности участков траекторий, характеризующихся описанием требований полета по участку и признаками его окончания. Участки траекторий, используемые в схемах зональной навигации, регламентируются правилами аэронавигационного обслуживания ИКАО DOC 8168 "Производство полетов воздушных судов" и кодируются в виде указателей окончания траекторий. Указатели окончания траекторий и набор данных, необходимых для обеспечения полета по участкам траекторий, опре-

делены стандартом ARINC-424-15 "Технические требования к базе данных навигационных систем".

Перечень и описание указателей окончания траекторий, приемлемых для построения схем с применением принципов зональной навигации, представлены в таблице. Данные таблицы являются исходными данными для разработки алгоритма зональной навигации [6, 7].

2. Алгоритм расчета навигационных параметров полета летательного аппарата по маршрутам зональной навигации

Расчет навигационных параметров полета на основе данных о текущем и следующем участках траектории с учетом фактических параметров полета реализуется с помощью специализированного алгоритма, представленного на рис. 2.

Алгоритм является составной частью программного обеспечения авиационного комплекса и встраивается в основной вычислительный контур бортовой вычислительной системы в качестве самостоятельного модуля. Алгоритм основан на применении оператора выбора и выполняется в теле

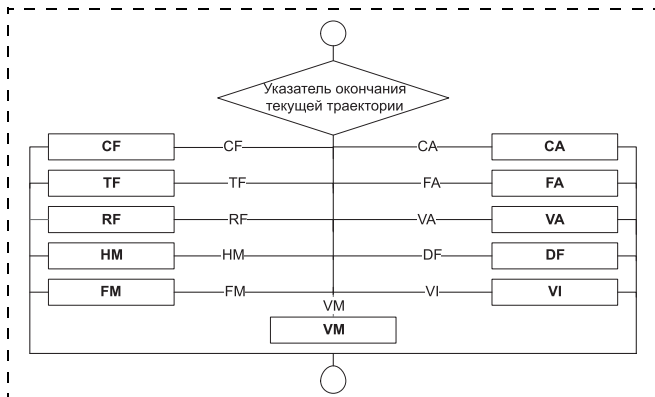


Рис. 2. Обобщенный алгоритм расчета навигационных параметров полета

цикла основного вычислительного контура решения навигационной задачи. Блок-схемы процедур (алгоритмов), являющихся составной частью обобщенного алгоритма (рис. 2), приведены на рис. 3–6.

Перечень параметров, определяемых с помощью алгоритма, включает в себя:

- имя навигационной точки (НТ) — имя (обозначение) текущей навигационной точки;

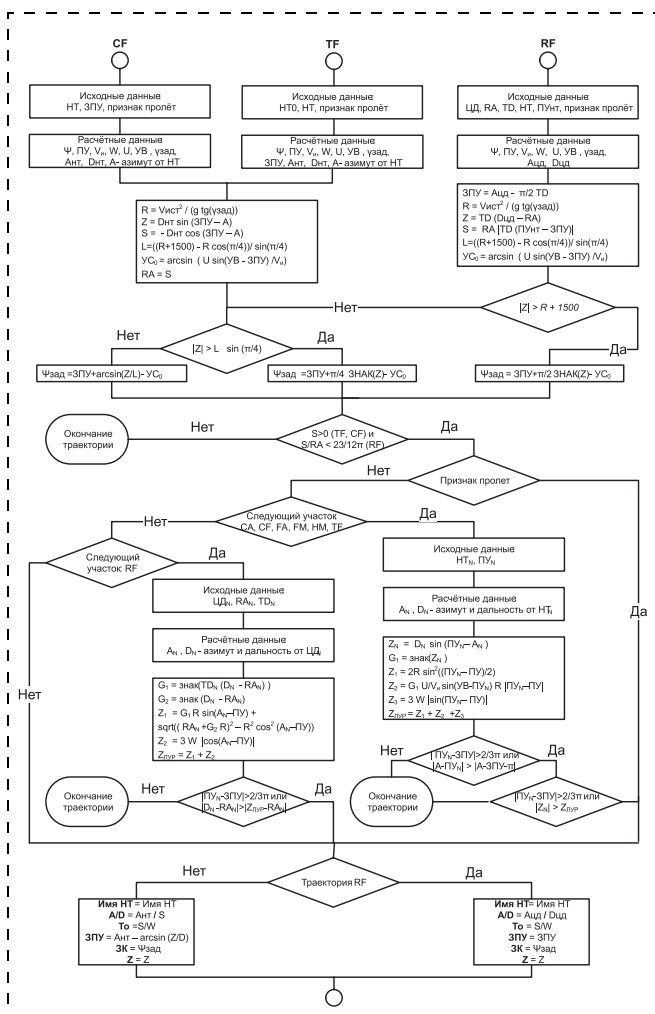


Рис. 3. Алгоритм расчета участков траекторий CF, TF, RF

- A/D — расчетные азимут A и дальность D до текущей или характерной точки траектории;
- T_o — расчетное оставшееся время полета по траектории;
- ЗПУ — заданный путевой угол (истинный или магнитный);
- ЗК — заданный курс (истинный или магнитный);
- Z — линейное боковое отклонение от траектории.

Данные параметры выводятся для отображения на бортовых индикаторах и, при необходимости, используются для формирования директорных и управляющих сигналов. Исходные данные алгоритма включают в себя указатель окончания текущей траектории полета по маршруту и соответствующие ему исходные данные, также приведенные в таблице.

Для расчета критериев окончания отдельных участков траекторий используются исходные данные следующего участка, включающие в себя:

- HT_N — координаты контрольной точки участков CA, CF, FA, FM, HM, TF;
- $ПУ_N$ — путевой угол участков траекторий CA, CF, FA, FM, HM, TF;
- $ЦД_N$ — координаты центра дуги участка RF;

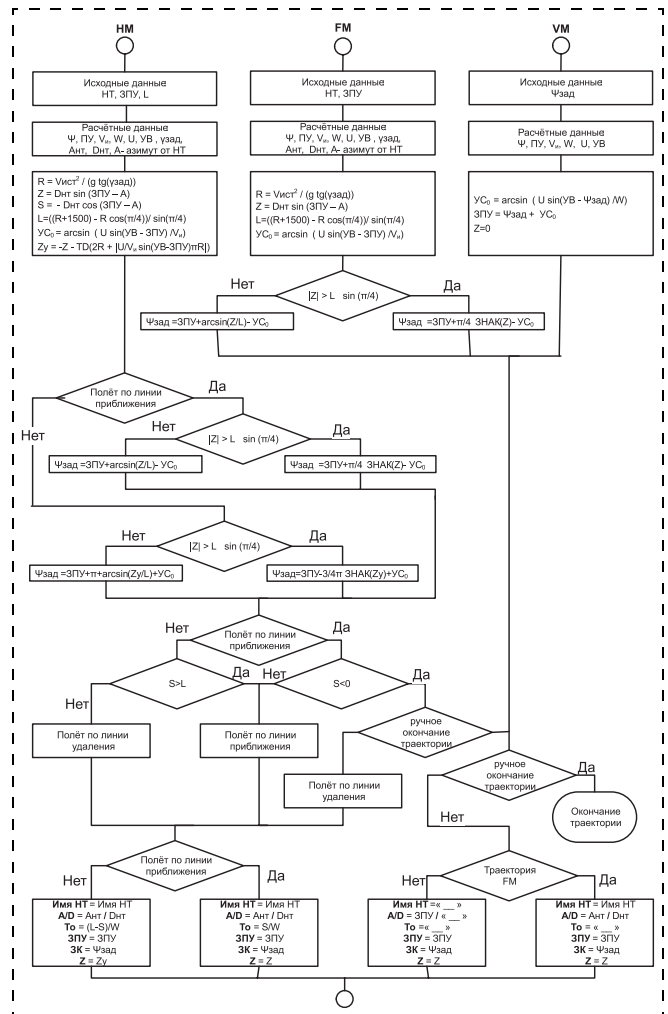


Рис. 4. Алгоритм расчета участков траекторий HM, FM, VM

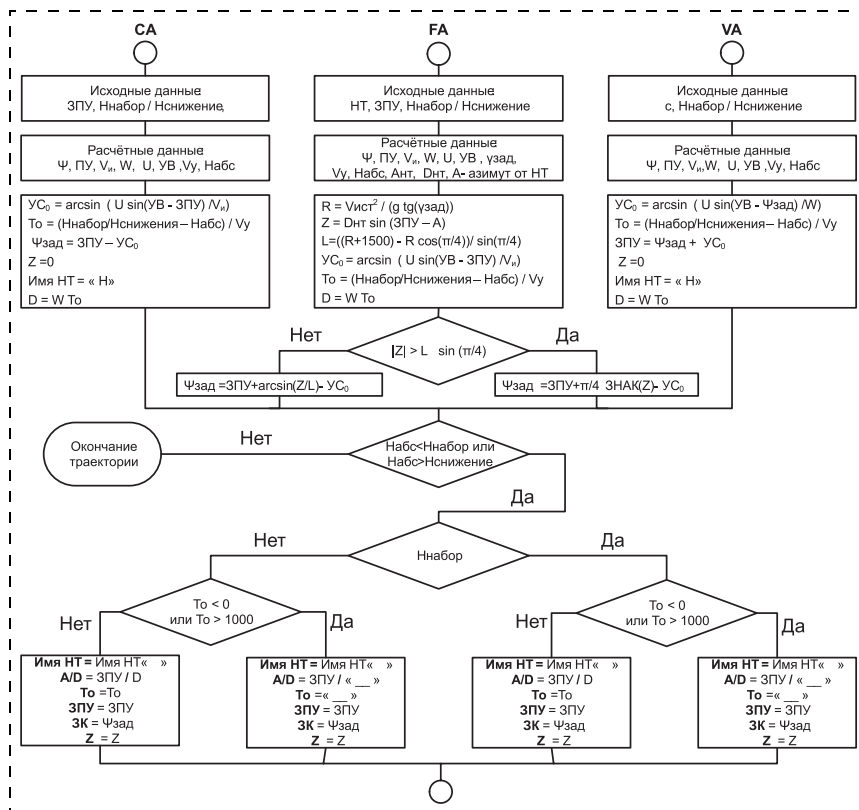


Рис. 5. Алгоритм расчета участков траекторий CA, FA, VA

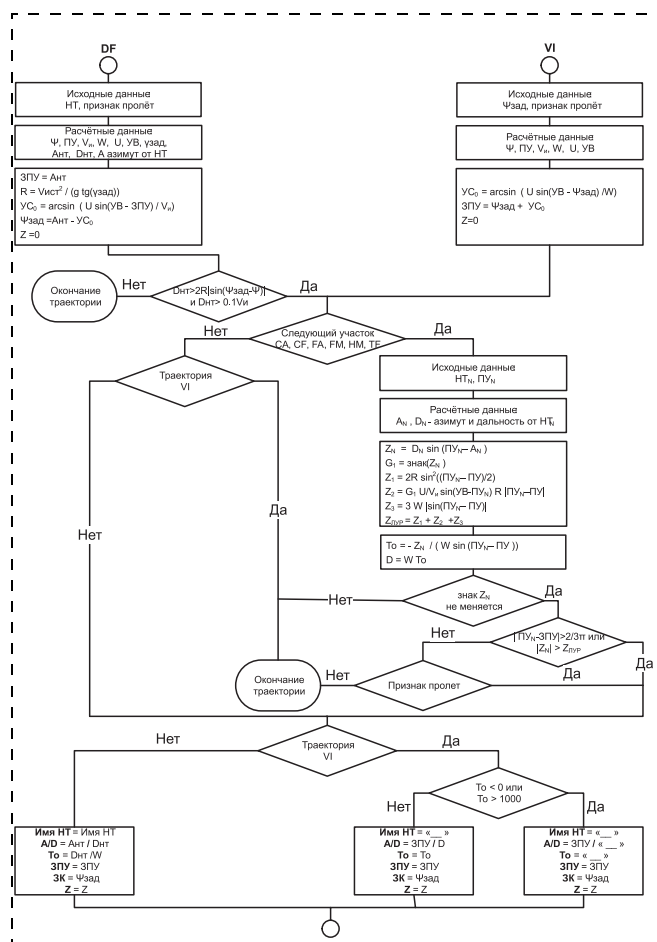


Рис. 6. Алгоритм расчета участков траекторий DF, VI

- RA_N — радиус дуги участка RF;
 - TD_N — направление разворота по дуге для участка RF.
- В алгоритме используются текущие расчетные данные, определенные или вычисленные бортовым пилотажно-навигационным комплексом:
- Ψ — текущий курс (истинный или магнитный);
 - ПУ — текущий путевой угол (истинный или магнитный);
 - $V_{\text{и}}$ — текущая истинная скорость (м/с);
 - W — текущая путевая скорость (м/с);
 - U — скорость ветра (м/с);
 - UB — навигационное направление ветра (радианы);
 - $\gamma_{\text{зад}}$ — заданный угол крена для разворота (радианы);
 - $A_{\text{нт}}$ — азимут на заданную контрольную точку НТ (радианы);
 - $D_{\text{нт}}$ — дальность до заданной контрольной точки НТ (м);
 - A — азимут от заданной контрольной точки НТ (радианы);
 - $A_{\text{цд}}$ — азимут на центр дуги (радианы);

- $D_{\text{цд}}$ — дальность до центра дуги (м);
- V_y — вертикальная скорость (м/с);
- $H_{\text{абс}}$ — абсолютная высота (м).

На входе обобщенного алгоритма реализуется диспетчер, определяющий в зависимости от указателя окончания исполняемой траектории (CF, TF, RF, NM, FM, VM, CA, FA, VA, DF, VI) необходимую вычислительную ветвь — исполняемый далее алгоритм вычисления навигационных параметров полета по участкам траекторий.

Алгоритмы вычисления навигационных параметров полета по участкам траекторий CF, TF и RF (рис. 3) включают в себя определение положения воздушного судна относительно заданной линии пути. В качестве заданной линии пути принимается: для участка CF — линия пути, проходящая через заданную навигационную точку с заданным путевым углом; для участка TF — линия пути, проходящая через две заданные навигационные точки с расчетным путевым углом; для участка RF — линия пути, совпадающая с ближайшей касательной к заданной дуге [8, 9].

Заданный курс рассчитывается как направление на точку на заданной линии пути, расположенной на фиксированном удалении от воздушного судна с ограничением угла приближения значением 45° . Окончание участка определяется наличием признака пролета и параметрами следующего участка траектории. При отсутствии признака пролета и наличии фиксированной линии пути на следующем участке текущий участок траектории оканчивается на расчетном упреждении, определяющемся крат-

чайшим выходом на линию пути следующего участка с ограничением угла разворота значением 120° . Иначе текущий участок траектории оканчивается при обнулении расстояния по линии пути до заданной навигационной точки.

Алгоритмы вычисления навигационных параметров полета по участкам траектории FA и FM (рис. 4, 5) включают в себя определение положения воздушного судна относительно заданной линии пути, проходящей через заданную навигационную точку с заданным путевым углом. Заданный курс рассчитывается как направление на точку на заданной линии пути, расположенной на фиксированном удалении от воздушного судна с ограничением угла приближения значением 45° . Окончание участка FA определяется пролетом характерной точки траектории, в которой достигается заданная высота. Участок FM оканчивается при принудительной отмене экипажем.

Алгоритмы вычисления навигационных параметров полета по участкам траектории CA, VA, VM и VI (рис. 4—6) определяют условия окончания полета в заданном направлении. Заданный путевой угол для траектории CA или курс для траекторий VA, VM и VI задаются в исходных данных. Окончание участков CA и VA определяется пролетом характерной точки траектории, в которой достигается заданная высота. Участок VM оканчивается при принудительной отмене экипажем. Окончание участка VI определяется наличием признака пролета и параметрами следующего участка траектории, который обязательно должен иметь фиксированную линию пути. При отсутствии признака пролета текущий участок траектории оканчивается на расчетном упреждении, обеспечивающем кратчайший выход на линию пути следующего участка с ограничением угла разворота значением 120° . Иначе текущий участок траектории оканчивается при пересечении линии пути следующего участка.

Алгоритм вычисления навигационных параметров полета по участку траектории DF (рис. 6) включает в себя определение заданного путевого угла как направления на заданную навигационную точку. Окончание участка определяется наличием признака пролета и параметрами следующего участка траектории. При отсутствии признака пролета и наличии фиксированной линии пути на следующем участке текущий участок траектории оканчивается на расчетном упреждении, обеспечивающем кратчайший выход на линию пути следующего участка с ограничением угла разворота значением 120° . Иначе текущий участок траектории оканчивается при минимальном приближении к заданной навигационной точке.

Алгоритм вычисления навигационных параметров полета по участку траектории НМ (см. рис. 4) включает в себя определение положения воздушного судна относительно заданной линии пути, проходящей через заданную навигационную точку с заданным путевым углом и представляющей со-

бой линию приближения. При обнулении расстояния по линии пути до заданной навигационной точки осуществляется переход на линию удаления, обратную и параллельную линии пути приближения и расположенную в заданном направлении на дальности, равной двум радиусам разворота с учетом влияния ветра. Полет по линии пути удаления продолжается до заданного удаления от траверза навигационной точки. После этого вновь осуществляется переход на линию приближения. Заданный курс рассчитывается аналогично полету по участкам траектории CF. Полет по участку НМ продолжается до очередного пролета заданной навигационной точки после принудительной отмены экипажем [10, 11].

Заключение

Приведенные на рис. 2—6 блок-схемы алгоритма расчета и формирования навигационных параметров полета позволяют обеспечить отображение на бортовых многофункциональных индикаторах параметров в объеме, необходимом экипажу для выполнения полетов по маршрутам зональной навигации в горизонтальной плоскости. Вместе с тем, использование данных параметров позволяет реализовать как директорный, так и автоматический режим выполнения полета по заданному маршруту.

Реализация алгоритма в бортовой вычислительной системе адаптирует бортовой пилотажно-навигационный комплекс под требования, предъявляемые к системам зональной навигации в части обеспечения экипажа необходимой информацией для полетов в горизонтальной плоскости.

Список литературы

1. Парамонов П. П., Коновалов П. В., Жаринов И. О., Кирсанова Ю. А., Уткин С. Б. Реализация структуры данных, используемых при формировании индикационного кадра в бортовых системах картографической информации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2. С. 165—167.
2. Жаринов И. О., Жаринов О. О. Бортовые средства отображения информации на плоских жидкокристаллических панелях: Учеб. пособие // Информационно-управляющие системы. СПб.: ГУАП, 2005. 144 с.
3. Костишин М. О., Жаринов И. О., Жаринов О. О., Нечаев В. А., Суслов В. Д. Оценка точности визуализации местоположения объекта в геоинформационных системах и системах индикации навигационных комплексов пилотируемых летательных аппаратов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 1. С. 87—93.
4. Парамонов П. П., Ильченко Ю. А., Жаринов И. О., Тарасов П. Ю. Структурный анализ и синтез графических изображений на экранах современных средств бортовой индикации на плоских жидкокристаллических панелях // Авиакосмическое приборостроение. 2004. № 5. С. 50—57.
5. Парамонов П. П., Костишин М. О., Жаринов И. О., Нечаев В. А., Сударчиков С. А. Принцип формирования и отображения массива геоинформационных данных на экран средств бортовой индикации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 6. С. 136—142.
6. Navigation System Data Base. ARINC Specification 424.
7. Guidance Material for Design of Terminal Procedures for Area Navigation (DME/DME, B-GNSS, Baro-VNAV & RNP-RNAV).

8. Харин Е. Г. Комплексная обработка информации навигационных систем летательных аппаратов. Опыт многолетнего практического применения. М.: Изд-во МАИ, 2002. 264 с.

9. Липин А. В., Ключников Ю. И. Применение зональной навигации при обслуживании воздушного движения. Зональная навигация. Университет ГА. С.-Петербург, 2011. 79 с.

10. Харин Е. Г., Копылов И. А. Технологии летных испытаний бортового оборудования летательных аппаратов с приме-

нением комплекса бортовых траекторных измерений. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2012. 360 с.

11. Харин Е. Г., Копылов И. А., Копелович В. А., Ясенюк А. В. Технология автоматизированного оценивания самолетовождения по стандартным маршрутам вылета и прибытия // Сб. трудов XXII междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, СПб.: Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2015. С. 157–161.

Algorithm for Calculation of the Aircraft Navigational Flight Parameters on RNAV Routes

V. V. Markelov¹, A. V. Shukalov², M. O. Kostishin², maksim@kostishin.com,

I. O. Zharinov², igor_rabota@pisem.net✉, V. A. Nechayev^{1, 2},

¹Stock company "Experimental Design Bureau "Electroavtomatika" named after P. A. Yefimov, St. Petersburg, 198095, Russian Federation,

²National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (University ITMO), St. Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: Zharinov Igor O., D. Sc., Chief of Department, Associate Professor, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (University ITMO), St. Petersburg, 198095, Russian Federation, e-mail: igor_rabota@pisem.net

Received on June 27, 2016

Accepted on July 04, 2016

During the flights on RNAV routes the aircraft equipped with the flight and navigation systems not adapted for implementation of the area navigation functions, a problem arises of lack of the adequate information support for the crew. The situational awareness of the crew is improved with Dora-processing on-board equipment providing the crew with the required volume of the navigation parameters. An algorithm is offered for calculation and formation of the navigational flight parameters in the horizontal plane along the RNAV routes, which can be used as augmentation program for the onboard software complex. Calculation of the flight navigation parameters is performed in real time based on the data about the current and next phases of the route trajectory based on the actual flight data. We consider a set of the trajectories of the sites applied to build the circuits and route area navigation. The trajectory data settings are contained in the air navigation databases, compiled in accordance with the aviation industry standards. The calculation algorithm allows us to obtain the navigational flight parameters and display them in the same format, as in the next one, and change the operational sequence of the route segments. The calculated parameters can be displayed on the cockpit multifunction displays and, if necessary, generate the control signals and Yagi. The calculation algorithm allows adaptation of the onboard navigation system to the requirements of the area navigation systems.

Keywords: navigation flight parameters, navigation algorithm, area navigation

For citation:

Markelov V. V., Shukalov A. V., Kostishin M. O., Zharinov I. O., Nechayev V. A. Algorithm for Calculation of the Aircraft Navigational Flight Parameters on RNAV Routes, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 11, pp. 697–702.

DOI: 10.17587/mau.17.697-702

References

1. Paramonov P. P., Konovalov P. V., Zharinov I. O., Kirsanova Ju. A., Utkin S. B. Implementation of data structure in indication frame formation for onboard geospatial data computer systems (Implementation of the data structures used in the formation of the indicator frame in airborne systems cartographic information), *Nauchno-tehnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 2, pp. 165–167 (In Russian).

2. Zharinov I. O., Zharinov O. O. Onboard display on flat liquid crystal panels (Airborne displaying information on a flat panel liquid crystal), *Informacionno-upravljajushhie sistemy*, SPb, GUAP, 2005, p. 144 c.

3. Kostishin M. O., Zharinov I. O., Zharinov O. O., Nechayev V. A., Suslov V. D. Accuracy evaluation of the object location visualization for geo-information and display systems of manned aircraft navigation complexes (Evaluation of imaging positioning accuracy Geoinformation systems and navigation systems display systems Timber-orientable-aircrafts), *Nauchno-Tekhnicheskii Vestnik Informatsionnykh Tekhnologii, Mekhaniki i Optiki*, 2014, no. 1, pp. 87–93 (in Russian).

4. Paramonov P. P., Il'chenko Yu. A., Zharinov I. O., Tarasov P. Yu. Structural analysis and synthesis of graphic images on the screens of modern on-board display on flat liquid crystal panels (Structural

analysis and synthesis of graphic images on the screens of modern on-board display at LCD Flat Panel), *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2004, no. 5, pp. 50–57 (In Russian).

5. Paramonov P. P., Kostishin M. O., Zharinov I. O., Nechaev V. A., Sudarchikov S. A. Formation and display principles for an array of geoinformation data by means of onboard display screen (The principle of forming and displaying an array of geospatial data on the screen means display board), *Nauchno-tehnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 6, pp. 136–142 (in Russian).

6. Navigation System Data Base, ARINC Specification 424.

7. Guidance Material for Design of Terminal Procedures for Area Navigation (DME/DME, B-GNSS, Baro-VNAV & RNP-RNAV).

8. Kharin E. G. Kompleksnaya obrabotka informatsii navigatsionnykh sistem letatel'nykh apparatov (Complex Information Processing of Aircraft Navigation Systems), Moscow, Publishing house of MAI, 2002, 264 p. (in Russian).

9. Lipin A. V., Klyuchnikov Yu. I. Primenenie zonal'noy navigatsii pri obsluzhivanii vozdušnogo dvizheniya. Zonal'naya navigatsiya (Use of Area Navigation in Air traffic service. Area Navigation), University CA, Saint-Petersburg Publ., 2011, 79 p. (in Russian).

10. Kharin E. G., Kopylov I. A. Tekhnologii letnykh ispytaniy bortovogo oborudovaniya letatel'nykh apparatov s primeneniem kompleksa bortovykh traektornykh izmereniy (The Onboard Trajectory Measurements Complex), Moscow, MAI-PRINT, 2012, 360 p. (in Russian).

11. Kharin E. G., Kopylov I. A., Kopylov V. A., Yasenok A. V. Tekhnologiya avtomatizirovannogo otsenivaniya samoletovozhdeniya po standartnym marshrutam vyleta i pribytiya (Automatic Evaluation of Aircraft Navigation along Standard Instrument Departure and Arrival Routes), *Proceedings of 22-th Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg, Elektropribor, Russia, 2015, pp. 176–180 (in Russian).