

В. Н. Козлов¹, В. М. Коротун¹¹ ОАО «НПК «Научно-исследовательский институт Дальней Радиосвязи»»

ПРИНЦИПЫ КОРРЕКЦИИ МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ С РАЗРАБОТКОЙ ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛЬНО ДОСТИЖИМОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ДКМВ-РАДИОКАНАЛА

В работе рассмотрены принципы коррекции модели ионосферы в реальном масштабе времени. Эти принципы основаны на табулировании математически сложной (комбинированной физико-эмпирической) модели на участке конкретной трассы (сечение) с достаточно мелкой пространственной сеткой, на построение эффективного восстанавливающего алгоритма для области сечения, на коррекцию значений модели в узлах сетки соответственно информативности используемых радиофизических измерений, проводимых в реальном времени, на использование графического отображения структуры сечения модели с целью возможности эффективных действий оператора по оптимизации параметров режима коррекции.

Ключевые слова: IRI – международная модель ионосферы, КВ – короткие волны, ВЗ – вертикальное зондирование, НЗ – наклонное зондирование, МПЧ – максимально применимая частота, МЧМ – максимальная частота двухскачкового мода, МЧР – многочастотные радиосигналы.

Модель вынужденно используется там, где нет достаточно информативных данных текущих радиофизических измерений. Принципы построения глобальных моделей, как правило, основаны на объединении обобщенных эмпирических данных и физических закономерностей, воплощенных в алгебраических, дифференциальных, интегральных уравнениях. Эти принципы позволяют минимизировать параметрическую размерность математической модели, что облегчает исследование физической природы взаимодействия различных крупномасштабных явлений в ионосфере. Однако при этом, как правило, для вычисления довольно гладких функций приходится совершать неадекватно большое количество простейших алгебраических операций, вследствие которых теряется быстродействие, что часто создает сложности для обеспечения режима реального времени вычислений параметров КВ-радиосигналов на конкретных трассах.

Возникает задача оптимального совместного использования априорной (эмпирической и физической) информации и данных текущих радиофизических измерений, решаемая путем коррекции модели ионосферы в реальном масштабе времени.

Предлагается следующий порядок коррекции модели ионосферы [1–2]:

- табулирование математически сложной (комбинированной физико-эмпирической) модели только на участке конкретной трассы (сечение) с достаточно мелкой пространственной сеткой;
- построение эффективного восстанавливающего алгоритма для области сечения;
- коррекция значений модели в узлах сетки соответственно информативности используемых радиофизических измерений, проводимых в реальном времени;
- использование графического отображения структуры сечения модели с целью возможности эффективных действий оператора по оптимизации параметров режима коррекции (начальные условия, дискретность переменных, логика алгоритмов и др.).

В качестве восстанавливающего алгоритма на данном этапе использовались системы сплайнов первого порядка – кусочно-линейная интерполяция и второго порядка с разрывной первой производной и кусочно-параболическая интерполяция с непрерывной первой производной по высоте. Реальные требования к быстродействию алгоритмов при использовании ПК среднего класса (процессор с тактовой частотой 2,5 ГГц) – порядка мс на вычисление

одной траектории сигнала. В результате реализации указанных принципов ожидаемое быстродействие решения обратной задачи коррекции модели, включая краевые задачи ВЗ, НЗ, ВНЗ, может осуществляться за время порядка единиц-десятков секунд, то есть будет обеспечен режим реального времени оптимальной адаптации КВ-связи даже в условиях возмущенной ионосферы.

Разработанный стандарт представления расчетных данных предусматривает выдачу времени решения краевой задачи синтеза ионограммы НЗ с указанием общего количества рассчитанных траекторий сигнала и точности удовлетворения краевым условиям для каждого мода каждой частоты.

Анализ проведенных расчетов показывает, что достигнутое время расчета одной траектории при средней погрешности удовлетворения краевым условиям менее 1 км составляет единицы мс, что обеспечивает режим реального времени коррекции модели ионосферы.

Оценки чувствительности характеристик сигнала к коррекции модели

Коррекция сечения модели ионосферы по данным ВЗ на одном конце трассы – наиболее часто используемый вид адаптации режима КВ загоризонтной радиосвязи к текущему состоянию ионосферы. На рис. 1 и 2 показаны результаты коррекции модели по основным параметрам Ншах и Fкрит слоя F ионосферы.

На пропускную способность ионосферного КВ-канала (максимальную скорость передачи информации) влияют многочисленные факторы, объединяемые в категории внешних активных помех, ионосферных и земных пассивных помех, внутренних шумов и искажений, а также диаграммы

направленности передающих и приемных антенн. Наиболее распространенным приемом оценки качества передачи информации является кратковременное статистическое испытание всех доступных каналов и выбор наилучшего для данного момента времени. Однако здесь возникает необходимость поиска путей максимального снижения количества испытываемых каналов на основе априорного анализа их свойств, получаемых на основе Международной модели ионосферы IRI (анализа регулярных ионосферных свойств).

Программно-алгоритмическое обеспечение синтеза и графического отображения структуры модели ионосферы и частотных характеристик сигналов на заданной трассе

Алгоритм расчета частотных характеристик сигнала в произвольной трехмерно неоднородной анизотропной ионосфере разработан на основе метода геометрической оптики. Программно алгоритм реализован в изотропном приближении, достаточном для получения оценок пропускной способности КВ-каналов на основе получения характеристик слоевой и двухскачковой многолучевости и известных оценок влияния геомагнитного поля.

Оптимизация программной реализации алгоритма предполагает как получение оценок предельно достижимой пропускной способности ионосферных КВ-каналов, так и достижение максимального быстродействия, необходимого для обеспечения режима реального времени в процессе адаптации системы связи к изменяющимся ионосферным условиям. Вместе с тем в рамках экспериментальных работ целесообразно участие оператора в процессе адаптации системы связи. Последнее требует разработки сервисных

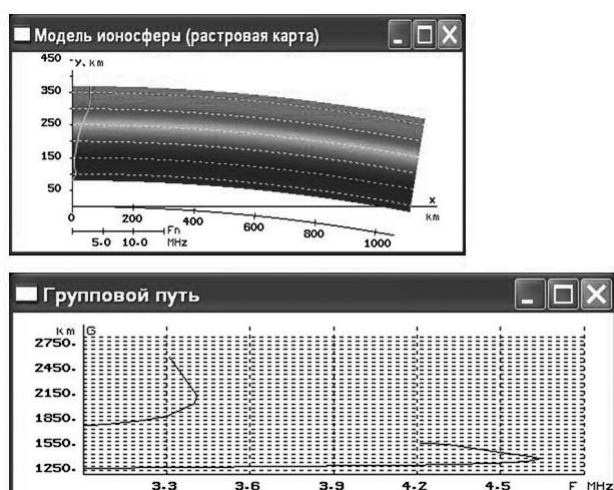


Рисунок 1. Трасса Москва – Калининград (1100 км). Коррекция модели с уменьшением Ншах на 10 км

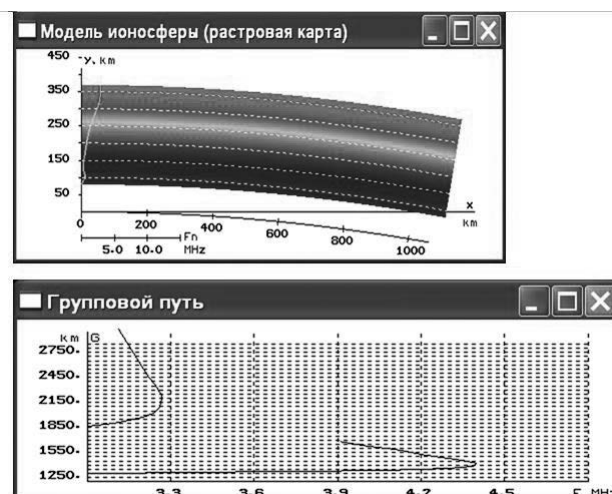


Рисунок 2. Трасса Москва – Калининград (1100 км). Коррекция модели с уменьшением Fкрит на 0,1 МГц

программ графического отображения (визуализации) сечения ионосферы на трассе в любой момент времени и частотных характеристик группового пути слоев и скачковых мод сигнала. Выходные данные программ содержат также подробные частотные характеристики сигнала – углов выхода и прихода, расстояния вдоль сферы Земли, интенсивность поля в точке приема для каждого мода без учета или с учетом омического затухания, без учета или с учетом типовой связной антенны.

Разработан пакет программ, поддерживающий адаптацию передачи информации и связи, обеспечивающий диалоговый режим, ввод исходных данных, расчет сечения модели ионосферы, расчет частотных характеристик сигнала и т.д. Стандарт (единый вид) представления данных, используемый при расчетах на модели, показан на рис. 3. Особенности формирования графических представлений (изображений) результатов моделирования представлены следующие:

1. При формировании изображения сечения ионосферы для представления двумерного распределения плазменной частоты вдоль трассы используются:
 - шкала цветов, наложенная на основное изображение в виде высотного профиля плазменной частоты на одном конце трассы;
 - концентрические штриховые линии по сетке высот среды одновременно с возможностью точной количественной оценки плазменной частоты с помощью числовой градации оси F_n , параллельной оси дальности X .
2. Концентрации электронов в области ионосферы, взятой в ее сечении плоскостью, проходящей через центр Земли, может представляться либо в виде растровой карты (рис. 3), либо в виде линий постоянных концентраций (рис. 4), называемых также линиями уровня. Для получения рис. 3 берется полигональное представление отображаемой области (рис. 5), в зависимости от концентрации рассчитываются

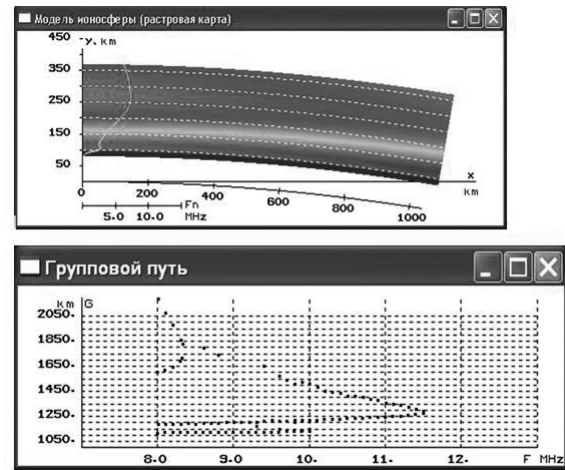


Рисунок 3. Сечение ионосферы и частотная характеристика группового запаздывания сигнала (ионограмма НЗ) трассы Москва – Калининград

цвета в вершинах четырехугольников и выполняется их заливка с использованием интерполяции цветов.

3. Для построения растровых карт и линий уровня используются значения концентрации электронов в узлах прямоугольной сетки, которые генерируются Международной моделью ионосферы IRI. Минимальной концентрации отвечает синий цвет, максимальной – красный, а среднему значению – зеленый. Промежуточные цвета, соответствующие концентрациям, меньшим среднего значения, получаются в результате смешения синего и зеленого цветовых оттенков. Цвета, отображающие концентрации больше среднего значения, определяются в результате смешения зеленого и красного цветов. Зависимость группового пути от частоты, кроме изображений в виде точек (рис. 3) может также отображаться в виде отрезков прямых, соединяющих полученные расчетным путем точки. Одновременно можно представить несколько графиков (рис. 6).

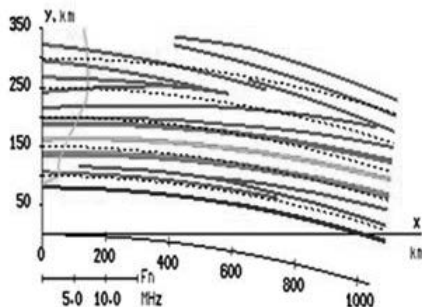


Рисунок 4. Линии постоянной концентрации

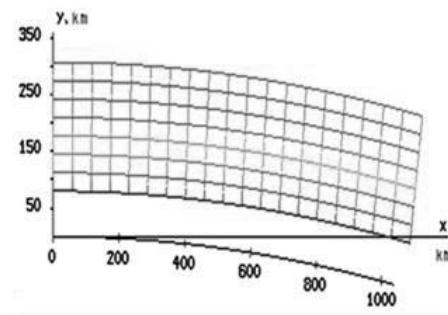


Рисунок 5. Полигональное представление электронов исследуемой области ионосферы

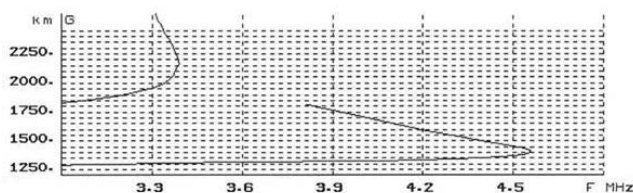


Рисунок 6. Графики групповых путей в виде кусочно-непрерывных кривых

Для демонстрации работы пакета программ выберем время перестройки ионосферы с дневной на ночную, когда трассу пересекает линия терминатора. Особенности этого перехода показаны на рис. 3 и 4. Для распространения КВ наблюдаются два основных слоя: нижний слой (слой E), который имеет форму выступа высотного профиля плазменной частоты и окрашен вдоль трассы в синий цвет, и слой F – выше 150 км. Между ними расположена межслоевая впадина (долина). С увеличением дальности вдоль трассы слой F ионосферы поднимается, а плазменная частота уменьшается на всех высотах. В результате вдоль трассы образуются наклоны областей равной концентрации, приводящие к существенной разнице углов выхода и прихода сигналов в вертикальной плоскости, превышающей для некоторых частот несколько градусов. Этот факт необходимо учитывать при использовании узконаправленных по углу места передающих и приемных антенн.

В нижней части рис. 3, где точками представлен групповой путь отдельных модов сигнала, наблюдается характерная для выбранного времени довольно сложная модовая структура. Самый нижний, имеющий минимальное время распространения из всех наблюдаемых модов, почти горизонтальный (с минимальным дисперсионным уширением импульса) след, обусловлен отражением сигнала от самого нижнего отражающего слоя ионосферы – слоя E. Следующий за ним по высоте также почти горизонтальный след – нижний мод слоя F, простирающийся вплоть до максимально применимой для данной трассы частоты (МПЧ трассы). Монотонно повышающийся при уменьшении частоты от МПЧ след – верхний мод слоя F (луч Педерсена). Этот луч имеет на порядок большую дисперсию (временное уширение импульса), чем предыдущие моды. И, наконец, следы для самых малых частот, имеющие наибольшую производную по частоте (самые диспергирующие моды) – нижний и верхний моды F для двухскачкового сигнала, дважды отражающегося от ионосферы с промежуточным отражением от Земли.

Сравнительная характеристика частотных каналов по признаку пропускной способности

Пропускная способность канала в конечном итоге определяется общим уширением элементарного

импульса в кодовой посылке и стабильностью амплитуды всех импульсов посылки. Под общим уширением импульса имеется в виду наибольшая межмодовая задержка совместно с дисперсионным уширением каждого мода, а под амплитудой импульса посылки – амплитуда суммы всех пересекающихся во времени модов сигнала. Наибольшей пропускной способностью, очевидно, обладает одномодовый частотный канал с минимальной частотной дисперсией в достаточно широкой частотной полосе, поскольку при этом отсутствует основная причина замираний амплитуды сигнала – межмодовая интерференция, а длительность элементарного импульса может быть взята достаточно короткой. На практике требуется определить наличие частотных интервалов с минимальной многолучевостью и дисперсией по множеству трасс и геофизических условий и найти способ быстрого определения этих интервалов. Из рис. 3 видно, что для данного примера по признаку наименьшего общего уширения импульсов наивысшей пропускной способностью могут обладать частотные каналы в окрестности МПЧ трассы слева и в окрестности максимальной частоты двухскачкового мода (МЧ2М) справа (МЧ2М > МПЧ). Причем интервал частот в окрестности МЧ2М справа, обладающий свойством высокой пропускной способности, существенно больший. Хотя при наличии в окрестности МЧ2М справа второго мода (E) общее уширение импульса несколько возрастает. Учет магнитоионного расщепления излучаемой линейной поляризации не изменяет оценку максимально достижимой пропускной способности по признаку общего уширения импульса в этих двух интервалах, поскольку в окрестности МПЧ слева присутствует только одна магнитоионная компонента, а в окрестности МЧ2М справа нижние моды двух магнитоионных компонент, как известно, имеют практически одинаковый групповой путь. Однако в указанных частотных интервалах при излучении линейной поляризации всегда присутствуют как минимум два мода сравнимой амплитуды, вызывающие глубокую межмодовую интерференцию, а следовательно, и нестабильность амплитуды принимаемого сигнала, снижающую реальную пропускную способность канала. Известен технический способ существенного подавления одной из двух эллиптических поляризаций противоположного вращения путем приема на скрещенные антенны. Можно также организовать передачу одной из эллиптических поляризаций. В результате при использовании модели ионосферы достаточным является использование предположения об изотропном приближении.

В окрестности МПЧ слева существенное подавление межмодовой интерференции близких (верхнего и нижнего) модов одной поляризации

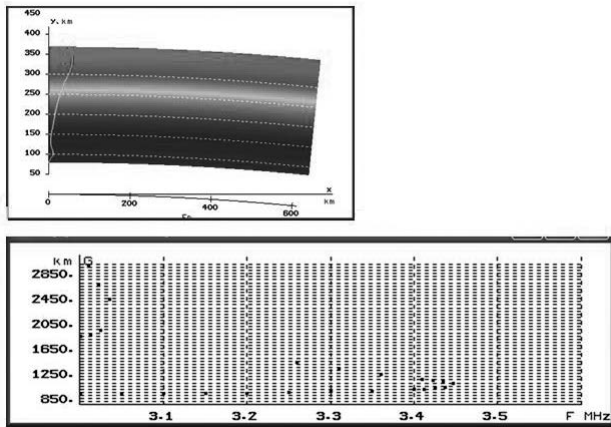


Рисунок 7. Ионограмма на трассе Москва – Санкт-Петербург (дальность – 640 км, азимут – 3190, месяц – 1, мировое время – 1 час)

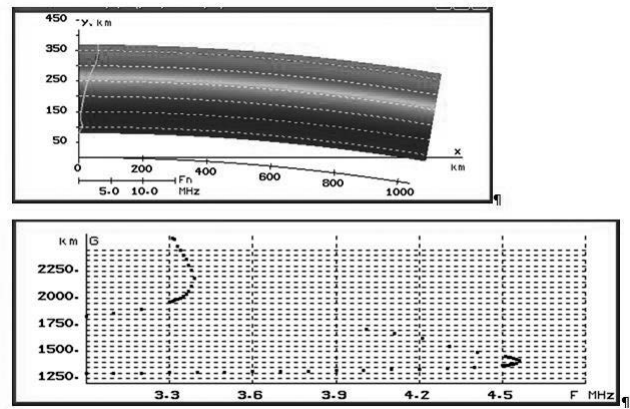


Рисунок 8. Ионограмма на трассе Москва – Калининград (дальность – 1100 км, азимут – 2690, месяц – 1, мировое время – 1 час)

(X-компоненты) возможно с помощью использования многочастотных сигналов (МЧР). Таким образом, определение требуемых частотных интервалов позволяет близко подойти к реализации максимальной пропускной способности канала, ограничиваемой лишь дисперсионным уширением импульса в ионосфере и рассеянием на мелко-масштабных неоднородностях.

Для получения количественных оценок пропускной способности каналов на трассах различной протяженности и ориентации в различных геофизических условиях проведена серия модельных экспериментов. Примеры представления результатов моделирования ионограмм НЗ для различных трасс показаны на рис. 7 и 8.

Из результатов моделирования следует, что частотные каналы, обладающие свойством высокой пропускной способности по признаку минимального общего уширения импульса, имеют 3 типичных случая расположения на ионограмме НЗ:

- в окрестности МПЧ трассы слева, образуемой верхним и нижним модами F слоя X-поляризации;
- в окрестности МПЧ трассы слева, образуемой верхним и нижним модами E слоя X-поляризации;
- в окрестности максимальной частоты двухскачкового мода (МЧ2М) справа (МЧ2М«МПЧ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коротун В.М. Повышение точности измерения координатной информации на основе измерения плотности электронной концентрации методом некогерентного рассеяния // Материалы 2-й Всероссийской научно-технической конференции. Тверь, 2006. С. 47–48.
2. Коротун В.М. Обоснование состава и структуры построения комплекса средств диагностической, метеорологической, геогелиофизической информации, в интересах повышения условий функционирования РЛС ДО // Материалы ВНК Военного университета им. Г.К. Жукова. М., 2007. С. 164–165.
3. Коротун В.М. Одно усовершенствование метода параллельного поиска коллизий в задаче вычисления дискретного алгоритма // Сб. трудов 23-й Конференции молодых ученых механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. М.: Изд-во МГУ, 2008. С. 99–103.

Наивысшую достижимую пропускную способность, даже превышающую максимальный технический номинал 1200 бод, реализуемый во многих современных КВ-радиомодемах, можно ожидать во втором случае даже при отсутствии еще менее дисперсного спорадического слоя E. Близкими к этому номиналу характеристиками могут обладать каналы в третьем случае полного (рис. 8) или частичного отсутствия мода слоя E.

Таким образом, наиболее благоприятной для адаптивной высокоскоростной загоризонтной КВ-связи и наиболее часто встречающейся обстановкой является отсутствие мода E в окрестности МЧ2М справа. В этом случае нижний мод F является единственным (в изотропном приближении), достаточно энергетичным, а частотный интервал этой окрестности – самым протяженным по сравнению с другими благоприятными случаями. При этом, как было указано выше, расчеты и эксперименты показывают, что в этом интервале моды магнитоионного расщепления имеют практически одинаковый групповой путь, и известным способом приема на скрещенные антенны или излучением одной поляризации вращения можно существенно подавить эффект замиранья сигнала типа фарадеевского вращения, тем самым обеспечив устойчивость амплитуды принимаемого сигнала.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Козлов Виктор Николаевич, д.т.н., профессор, заслуженный конструктор РФ, ОАО «НПК «НИИДАР»», 127083, Москва, ул. 8 Марта, д. 10, стр. 5. тел.: 8 (499) 162-03-87, факс: 8 (499) 162-73-28.

Коротун Владимир Михайлович, к.т.н., ОАО «НПК «НИИДАР»», 127083, Москва, ул. 8 Марта, д.10, стр. 5. тел.: 8 (499) 162-03-87, факс: 8 (499) 162-73-28, e-mail: vkorotun@niidar.ru.

*For citation: Radiopromyshlennost. – 2016. – № 3. – P. 39–45.
V. Kozlov, V. Korotun*

PRINCIPLES OF CORRECTION OF THE IONOSPHERE MODEL WITH DEVELOPMENT OF SOFTWARE-ALGORITHMIC SUPPORT FOR EVALUATION OF MAXIMUM ACHIEVABLE CAPACITY OF HF-RADIO CHANNEL

The article outlines the principles of correction of the ionosphere model in real time. These principles are based on the tabulation of mathematically complex (integrated physical and empirical) models on the section of a particular path (cross section) with sufficiently fine space grid, for development of effective reinstating algorithm for the cross section, for adjustment of values of the model in the grid points, according to informative value of used radio physical measurements performed in real time, for utilization of graphical display of the cross section structure of the model for the purpose of ensuring effective actions of the operator related to optimization of the parameters of the correction mode.

Keywords: IRI – international reference ionosphere, SW – waves, VS – vertical sounding, OS – oblique sounding, MUF – maximum usable frequency, MF2M – maximum frequency of double-hop mode, MFS – multi-frequency signals.

REFERENCES

1. Korotun V.M. Povyshenie tochnosti izmereniya koordinatnoy informatsii na osnove izmereniya plotnosti elektronnoy kontsentratsii metodom nekogerentnogo rasseyaniya [Improving the accuracy of the measurements of coordinate information based on the measurement of the density of electron density by incoherent scattering]. *Materialy 2-y Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Tver', 2006, pp. 47–48.
2. Korotun V.M. Obosnovanie sostava i struktury postroeniya kompleksa sredstv diagnosticheskoy, meteorologicheskoy, geogelifizicheskoy informatsii, v interesakh povysheniya usloviy funktsionirovaniya RLS DO [Justification of the composition and structure of construction of the complex diagnostic tools, meteorological, geo-helio physical information, in order to improve conditions for the functioning of the radar station]. *Materialy VNK Voennogo universiteta im. G.K. Zhukova*. M., 2007, pp. 164–165.
3. Korotun V. M. Odno usovershenstvovanie metoda paralel'nogo poiska kolliziy v zadache vychisleniya diskretnogo algoritma [One improvement of method for the parallel collision search in the problem of calculating the discrete algorithm]. *Sbornik trudov 23-y Konferentsii molodykh uchenykh mekhaniko-matematicheskogo fakul'teta MGU im. M. V. Lomonosova*. M.: MGU, 2008, pp. 99–103.

AUTHORS

Kozlov Victor, doctor of technical sciences, professor, Honored Designer of the Russian Federation, «NPK «НИИДАР»», p. 5, d. 10, 8 March st., Moscow, 127083, tel.: +7 (499) 162-03-87, fax: +7 (499) 162-73-28.

Korotun Vladimir, PhD, Senior Researcher, «NPK «НИИДАР»», p. 5, d. 10, 8 March st., Moscow, 127083, tel.: +7 (499) 162-03-87, fax: +7 (499) 162-73-28, e-mail: vkorotun@niidar.ru.