

УДК 519.876

## МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА СИСТЕМООБРАЗУЮЩИХ СРЕДСТВ НА ПРИМЕРЕ ОРГАНИЗАЦИИ НАВИГАЦИОННО- ВРЕМЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

## METHODOLOGY TO JUSTIFY THE RATIONAL STRUCTURE OF SYSTEM-MAKING MEANS BASED ON THE EXAMPLE OF HOW THE NAVIGATION-TIME MAINTENANCE IS ORGANIZED

**В. А. Качко,**

адъюнкт НИИ Вооруженных Сил Республики Беларусь

**V. Kachko**

Дата поступления в редакцию — 09.10.2015 г.

В статье приведена разработанная оригинальная методика, базирующаяся на матричной реализации алгоритма Красскала, позволяющая на основании сведений о возможностях существующих (перспективных) системообразующих средствах определить их рациональный состав с учетом требований потенциальных потребителей результатов функционирования сложной организационно-технической (технической) системы. Представление возможностей методики осуществляется на примерах ее использования при обосновании концептуальных основ создания Единой системы навигационно-временного обеспечения Республики Беларусь, подсистемы навигационно-временного обеспечения (НВО) комплексной системы геоинформационного обеспечения Вооруженных Сил.

The article presents a unique developed methodology which is based on matrix realization of Kraskal's algorithm. Based on the data about possibilities of the existing (future) system-making means, it allows to define their rational structure with view of the demands of potential consumers to the results of functioning of a complex organizational-technical (technical) system. The potential of the methodology is illustrated by the examples of how it is applied to justify the conceptual framework for the creation of the Uniform system of navigation-time maintenance in the Republic of Belarus, and a subsystem of navigation-time maintenance (NTM) of the complex geographic information system of the Armed Forces.

Развитие современных технологий в гражданской и военной сферах деятельности человека влечет усложнение условий принятия управленческих решений и применения технических средств, используемых для достижения определенных целей. Это обуславливает рост требований к всестороннему обеспечению функционирования технических (организационно-технических) систем. Математическое

обеспечение решения сложных задач зачастую вынуждено смещаться в область решения многокритериальных задач высокой вычислительной сложности.

Элементы методики использовались при обосновании концептуальных основ создания Единой системы НВО Республики Беларусь, подсистемы НВО комплексной системы геоинформационного обеспечения Вооруженных Сил.

*Анализ существующих подходов к решению многокритериальных задач.*

Многокритериальной задачей (МКЗ) будем считать задачу нахождения и представления множества альтернатив (МА) в явном виде. Причем под МКЗ подразумеваются как массовая, так и индивидуальная задачи. Считается, что вычислительная сложность (трудоемкость) МКЗ оценивается количеством элементарных операций, затрачиваемых на нахождение и представление искомого МА. При этом сложность, как обычно, оценивается относительно размерности задачи [1].

Для некоторых сформулированных ранее задач дискретной оптимизации существуют достаточно эффективные специальные алгоритмы решения. Однако для большинства дискретных задач такие алгоритмы не известны. В тех случаях, когда множество допустимых значений конечно (дискретная задача), можно организовать перебор этих значений и найти решение. В силу больших размерностей практических задач, реализация такого подхода невозможна даже при использовании компьютеров [1].

Как отмечено в [2], эффективные алгоритмы нахождения МА разработаны лишь для некоторых дискретных задач с двумя критериями. До сих пор неизвестны задачи дискретной оптимизации с  $N \geq 3$  критериями, для которых существовали бы алгоритмы гарантированного нахождения МА, принципиально отличающиеся от перебора всех элементов множества допустимых решений.

Так, при проведении исследований, предшествующих созданию проекта закона Республики Беларусь «О навигационной деятельности», проекта концепции создания Единой системы навигационно-временного обеспечения Республики Беларусь, утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 4 июля 2011 г. № 902, ряда ведомственных правовых актов в этой области [3] установлено, что в качестве исходных данных выделено более 15 типов существующих и перспективных радионавигационных средств (РНС) рассматриваемых, как самостоятельные типы системообразующих средств (СС). При этом предполагалось их использование для решения более 20 видов задач, решаемых с помощью навигационных технологий. В ходе моделирования облика системы количество типов СС может увеличиться

из-за рассмотрения проработанных ранее вариантов их комплексирования в интересах обеспечения более полного выполнения требований потребителей и составит значение более 20.

Для РНС наиболее значимыми принято считать 6 основных показателей [3], характеризующих качество функционирования системы с их использованием:

- среднеквадратическое отклонение (СКО) систематической ошибки определения местоположения в пространстве (в плане и по высоте);
- СКО синхронизации по времени (для образцов вооружения и военной техники, в которых существует необходимость синхронизации удаленных шкал времени);
- доступность (готовность);
- целостность;
- непрерывность обслуживания.

Вычислительная сложность решения подобной может иметь порядок  $10^{77}$ .

Исследования показали, если удастся свести решение этой задачи к условию  $N = 1$ , то при некоторых допущениях алгоритм ее решения может быть осуществлен путем нахождения остоного дерева и строиться с использованием алгоритма Краскала [4]. Задача нахождения минимального остоного дерева разрешима за полиномиальное время. Верхняя оценка сложности реализации алгоритма Краскала составляет для рассматриваемого случая значение около 480 000 операций [1].

Таким образом, в настоящее время не существует готовых алгоритмов решения МКЗ такого класса. Разрешимость этой задачи может быть достигнута только путем принятия некоторых допущений и реализации специальных операций, позволяющих свести ее к решению существующими алгоритмами. Методика решения стоящей задачи и алгоритм ее реализации должны разрабатываться индивидуально.

*Методика обоснования рационального состава системообразующих средств на основе обоснованных требований по группе показателей.*

В общем виде предлагаемая методика, представляющая собой совокупность методов дискретной оптимизации и теории графов, позволяет установить соответствие между требованиями потенциальных потребителей и возможностями существующих (перспективных)

СС по нескольким показателям. Применительно к рассматриваемому случаю выбор типа РНС для обеспечения потребителей навигационных услуг при решении одной из собственных задач с помощью навигационных технологий осуществляется при условии выполнения требований потребителей по максимальному числу показателей для РНС.

Следует отметить некоторые особенности методики.

На первом этапе предлагается осуществить формирование двудольного графа  $G_S(V, E)$ , отражающего возможности существующих СС по обеспечению выполнения стоящих перед системой задач.

При этом все его вершины должны быть разделены на 2 непересекающихся подмножества  $V_S$  и  $V_Z$ , соответствующих существующим в настоящее время типам СС и задачам, решаемым с использованием рассматриваемой системы. В рассматриваемом примере подмножества характеризовались следующим образом:

- подмножество  $V_Z$  состояло из 21 вида задачи, потенциально требующей в ходе ее выполнения использования навигационных технологий (полет летательного аппарата по маршруту, заход на посадку, топогеодезическая привязка определенных технических средств, диспетчеризация движения опасных грузов и т. п.);

- подмножество  $V_S$  состояло из 15 типов существующих и перспективных РНС (в дальнейшем их количество росло при реализации последующих этапов методики при рассмотрении вариантов их комплексного использования).

Множество ребер  $E$  пустое (соответствие СС задачам не установлено).

На втором этапе рассмотрению подлежат подграфы показателей  $G_{NS}$ , составляющие граф  $G_S(V, E)$ . Их количество равно количеству  $N$  рассматриваемых показателей, характеризующих качество функционирования системы. Для приводимого примера  $N = 6$ . На данном этапе все подграфы  $G_{NS}$  и граф  $G_S$  инцидентны друг другу и являются нуль графами.

Вершинам подмножества  $V_S$  каждого из подграфов  $G_{NS}$  присваивается значение  $n_{NS}$ , соответствующее возможностям конкретного СС по выполнению определенных ему функций по  $N$ -му показателю.

Вершинам подмножества  $V_Z$  подграфов  $G_{NS}$  присваивается значение  $n_{NZ}$ , соответствующее

требованиям потребителей к значению  $N$ -го показателя, для решения конкретных задач из  $V_Z$ . Исходя из этого осуществляется наполнение подграфов  $G_{NS}$  ребрами  $e$  из множества  $E$  при условиях:

$$n_{NS} \geq n_{NZ} \quad (1)$$

в части, касающейся  $N$ , имеющих вероятностный характер,

$$n_{NS} \leq n_{NZ} \quad (2)$$

для  $N$ , носящих точностный характер (рис. 1).

На третьем этапе, путем определения наличия на графе изолированных вершин, осуществляется проверка реализуемости задач, стоящих перед системой (см. рис. 1).

На четвертом этапе предлагается осуществить объединение показателей. Осуществив пересечение двудольных подграфов  $G_{NS}$  возможно преобразовать двудольный граф  $G_S$  к простому виду, то есть не будет иметь кратных ребер. Повторив для него процедуру третьего этапа, можно проверить возможность выполнения стоящих перед системой задач с использованием конкретных СС по всем  $N$  показателям одновременно.

Если изолированных вершин нет, то на основе полученного графа  $G_S$  можно осуществить моделирование системы или его анализ с использованием каких-либо дополнительных показателей.

Если в ходе выполнения третьего или четвертого этапов на  $G_{NS}$  или  $G_S$  выявлены изолированные вершины, предлагается установить возможность интегрирования существующих СС. Это производится с целью улучшения значений  $n_{NS}$ . При наличии такой возможности подмножество  $V_S$  дополняется подмножеством  $V_{SI}$ , вершины которого соответствуют вариантам интегрирования СС.

Из вариантов интегрирования приемлемыми принимаются только те, в которых улучшение значений  $n_{NS}$  станет удовлетворять условиям (1) и (2).

Полученные таким образом подграфы  $G_{NSI}$  необходимо подвергнуть преобразованию и анализу в соответствии с требованиями всех этапов методики, начиная со второго (рис. 2).



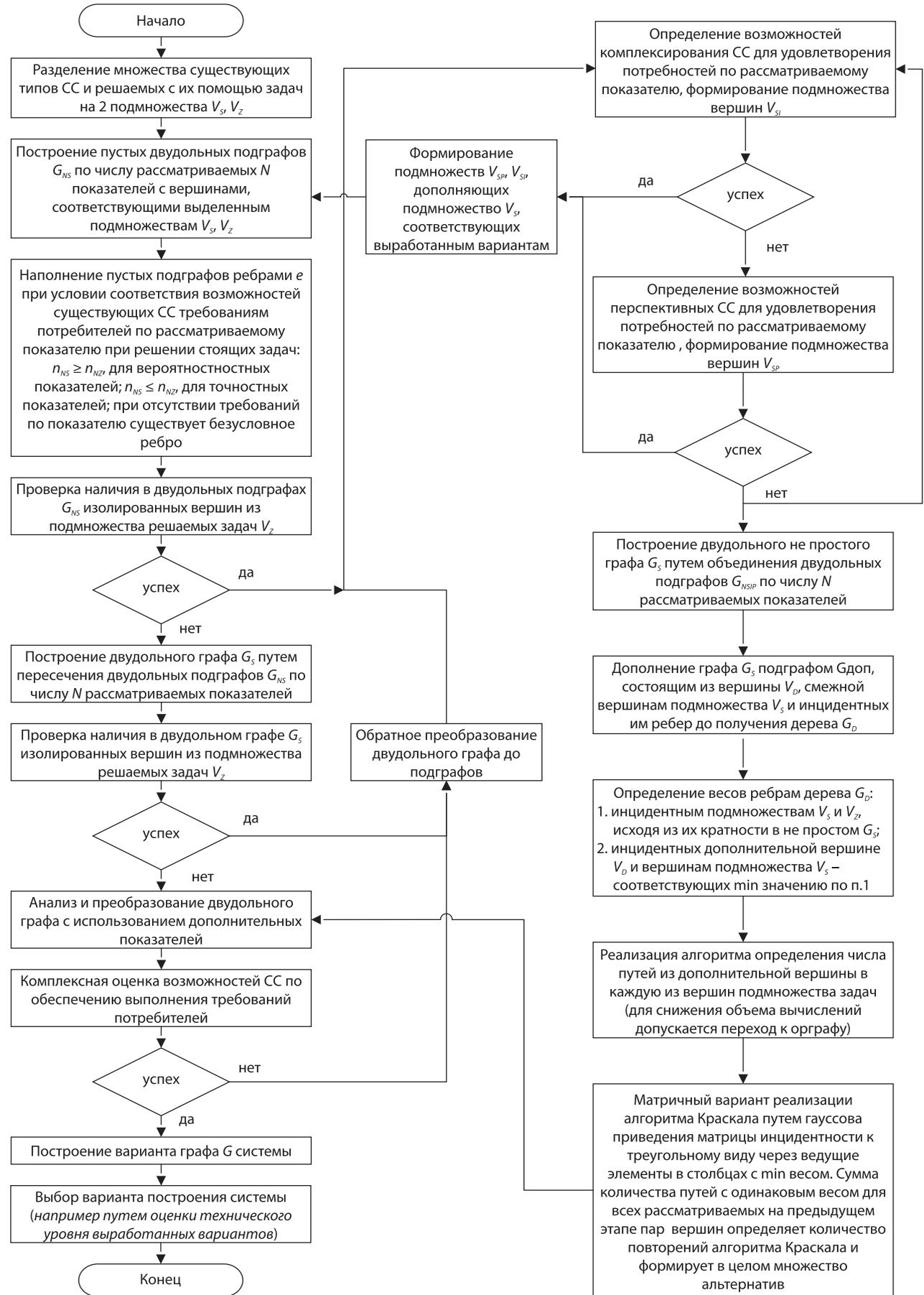


Рис. 2. Алгоритм реализации методики

Если для подграфов  $G_{NSI}$  реализация третьего этапа методики позволила установить, что существующие СС и варианты их интегрирования не в состоянии обеспечить решение стоящих задач (наличие изолированных вершин), то дополнение подмножества  $V_S$  необходимо осуществлять подмножеством  $V_{SP}$ , вершины которого будут соответствовать перспективным образцам СС с соответствующими значениями показателей  $N$ .

Дополнение подмножества  $V_S$  подмножеством  $V_{SP}$  осуществляется при условии выполнения неравенств (1), (2), на основании глубокого анализа опыта их применения за рубежом. Действия с полученными подграфами  $G_{NSIP}$  аналогичны действиям с  $G_{NSI}$ , а при необходимости — целесообразно рассмотреть варианты комплексирования и перспективных СС.

В случае, если ни одно из существующих и перспективных СС, а также вариантов их интегрирования не в состоянии обеспечить решение задач, стоящих перед системой, необходимо проанализировать и при необходимости уточнить требования потребителей в областях, соответствующих нереализованным задачам, на предмет их ослабления. Либо дальнейшее преобразование подграфов производить в имеющемся состоянии, свидетельствующем о том, что в настоящее время по «проблемному» показателю удовлетворить требования потребителей к качеству системы не представляется возможным.

На пятом этапе следует осуществить формирование вспомогательного графа и взвешивание ребер. Для этого необходимо выполнить дополнение графа  $G_S$  дополнительным подграфом, состоящим из вершины  $V_D$ , смежной вершинам подмножества  $V_S$  и инцидентных им ребер до получения дерева  $G_D$  (рис. 3).

Вспомогательный граф  $G_D$  можно преобразовать к форме простого, осуществив взвешивание его ребер по следующему правилу:

- кратные ребра графа  $G_D$  исключить;
- ребрам, инцидентным подмножествам вершин  $V_S$  и  $V_Z$ , присвоить веса

$$w_{ZS} = \frac{1}{N_{ZS}}, \quad (3)$$

где  $N_{ZS}$  — кратность ребер между парами вершин подмножеств  $V_S$  и  $V_Z$ ;

- ребрам, инцидентным подмножествам вершин  $V_S$  и  $V_D$ , присвоить равные веса

$$w_{DS} = \min\{w_{ZS}(e)\}. \quad (4)$$

На шестом этапе для удобства дальнейшей реализации методики определяется число путей длиной 2 из дополнительной вершины  $V_D$  в каждую из вершин подмножества  $V_Z$ .

Для этого можно определить матрицу смежности  $A$  графа  $G_D$ , возвести ее в квадрат и установить значения элементов  $a_{ij}^2$  матрицы  $A^2$ . При этом станет возможно судить о количестве путей из  $V_D$  в  $V_Z$  длиной 2, которое соответствует их количеству.

На седьмом этапе предлагается определить наиболее пригодные СС для использования в интересах системы. Реализовав на графе  $G_D$  алгоритм Краскала [4], можно найти остовное дерево минимального веса. По сути, это позволит выделить из подмножества вершин  $V_S$  такой кортеж, вершины которого будут соответствовать минимальному составу СС, позволяющему выполнять стоящие перед системой задачи, с качеством, удовлетворительным по всем  $N$  показателям. В дальнейшем удалив из них дополнительную вершину из  $V_D$  и инцидентные ей ребра, подграфы  $G_D^A$  преобразуются в двудольные. В них вершинам подмножества  $V_Z$  поставлено в однозначное соответствие некоторое подмножество вершин  $V_S^A$  из подмножества  $V_S$ , при этом количество выделенных вершин из  $V_S$  в  $V_S^A$  минимально. Однако следует учитывать, что число минимальных остовных деревьев, которые можно построить на  $n$ -вершинном графе составляет  $n^{n-2}$ . Число не изоморфных конечно может быть меньше, но все равно экспоненциально [7].

Поэтому на восьмом этапе предлагается осуществить непосредственный выбор вариантов использования СС в интересах системы. Для этого возможно будет необходимо снизить инвариантность МА до минимума в соответствии с требованиями конкретной задачи. Например, на основании сравнения результатов оценки технического уровня СС из выработанного МА или путем оценки способности системы с различными вариантами комплектования СС и т. д. Нельзя исключать возможности проведения определенной аналитической работы, позволяющей выделить из МА подграфы, содержащие СС узконаправленного действия, или СС, не являющиеся собственностью РБ, и т. п.

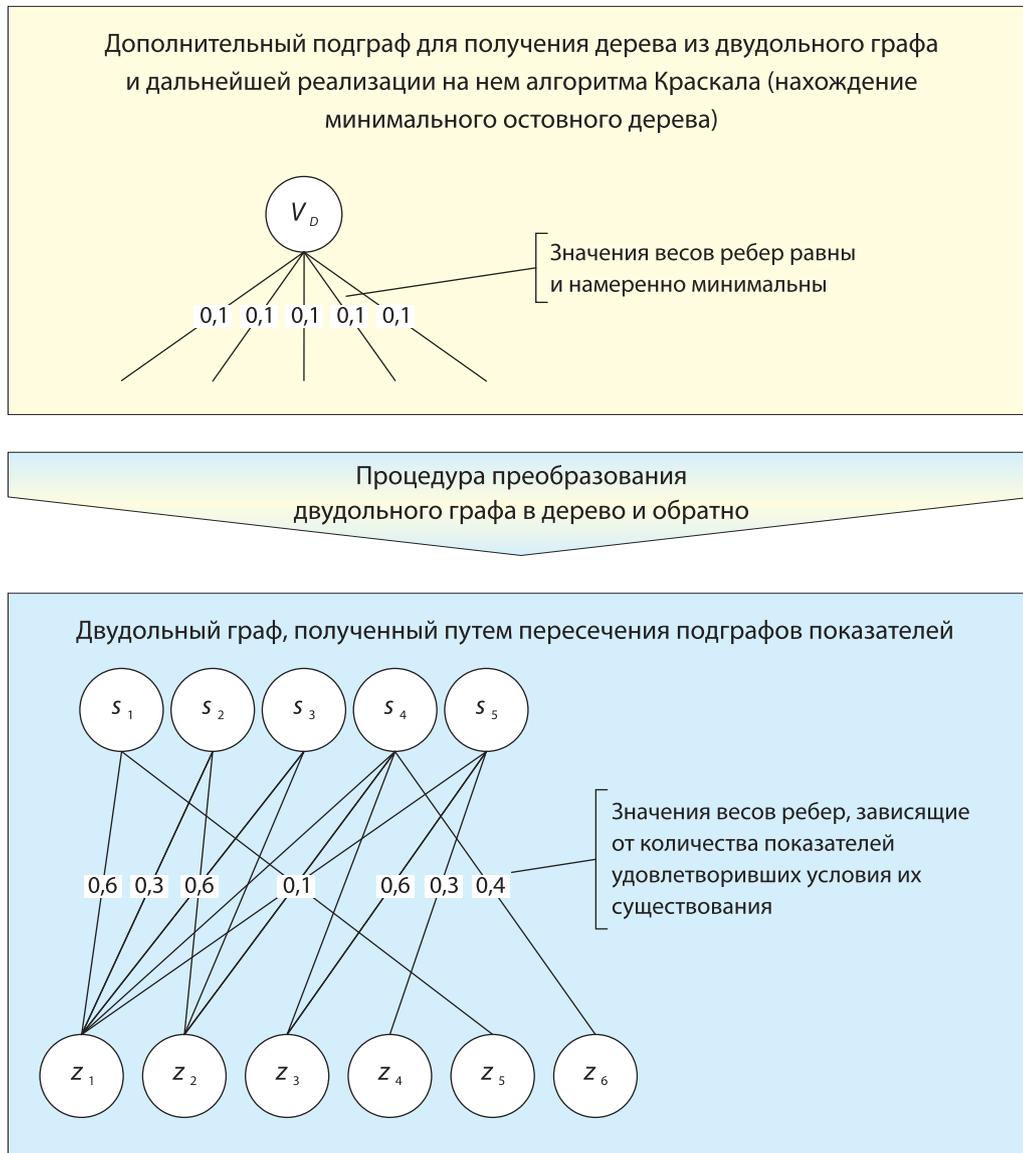


Рис. 3. Схема построения дерева из двудольного графа

*Практическая реализация предложенной методики.*

Рассматриваемые в ходе практических исследований РНС в основном активно используются только в качестве средств радиотехнического обеспечения (РТО) полетов авиации. Радионавигационные системы РТО включают помимо прочих: радиотехнические системы ближней навигации (РСБН), дальней навигации (РСДН), спутниковые радионавигационные системы (СРНС). В развитие установившейся классификации в ходе исследований было предложено не рассматривать радиомаячные си-

стемы посадки в качестве системообразующих средств НВО, поскольку специфика решаемых ими задач накладывает значительный отпечаток на принципы их применения, и использования альтернативных средств обеспечения посадки.

Анализ значительного числа проведенных ранее исследований [5], [6] позволил формализовать возможности, состоящих на вооружении и перспективных РНС, в качестве которых рассматривались существующие в мире средства НВО с присущими им характеристиками, лучшими по сравнению с аналогами. При этом практически все показатели, рассматриваемые

в качестве требований, были для них определены численно и не приводятся в рамках данной статьи ввиду объемности материала.

Практическое применение предложенной методики [4] позволило с использованием исходных данных [3], [4] выделить в качестве подмножества  $V_S$  множества  $V$  графа  $G_S$  — 5 вершин (РСБН, РСДН, СРНС и т.д.). По аналогии было сформировано подмножество вершин  $V_Z$  множества  $V$  графа  $G_S$ , в котором каждой вершине поставлена в однозначное соответствие задача, решаемая с определенными требованиями потребителей к качеству НВО.

Рассматривая варианты интегрирования различных РНС и комплексирования соответствующей потребительской аппаратуры подмножество вершин  $V_S$  было дополнено подмножеством вершин  $V_{SP}$ , состоящим из одной вершины, соответствующей совместному применению СРНС и РСДН.

Рассмотрев перспективные РНС, подмножество  $V_S$  подграфов  $G_{NS}$  было дополнено подмножеством  $V_{SP}$  с 8 вершинами соответствующими этим средствам и 6 вершинами, соответствующими вариантам интегрирования перспективных РНС.

Непосредственные вычисления при реализации методики позволили установить, что на некоторых подграфах имеются изолированные вершины. Это свидетельствует о том, что нет возможности в имеющейся постановке решить ряд задач.

Следовательно, НВО решения этих задач по соответствующим показателям следует осуществлять с использованием дополнительных эксплуатационных процедур либо средств, не относящихся к системе НВО непосредственно. Анализ таких возможностей предусмотрен алгоритмом предложенной методики на этапе анализа двудольного графа системы с использованием дополнительных показателей.

Полученное МА в представленном варианте решения задачи составило 7 372 800 вариантов. Если для дальнейшего исследования использовать один из путей, позволяющих осуществить выбор наиболее рационального варианта из МА, автоматизировав при этом вычисления, то выработанное МА можно применять в качестве исходных данных без дополнительного анализа и снижения его размерности. Например, в ходе исследований был осуществлен выбор рационального варианта использования РНС путем

оценки их технического уровня. Очевидно, что ввиду привлечения экспертов к оценкам подобного рода необходимо снизить инвариантность МА до единиц или десятков.

Для реализации возможности снижения численности МА предусмотрено проведение их анализа по дополнительным показателям, характеризующим не затронутые ранее свойства системы (мобильность, информационные возможности и т. п.). В ходе его проведения было установлено, что одними из наиболее часто встречаемых элементов является вершина, соответствующая широкозонным дифференциальным подсистемам (ШДПС) СРНС. Этот факт играл бы для поиска наиболее рационального решения стоящей задачи существенную положительную роль, однако существующие в настоящее время ШДПС СРНС (WAAS, EGNOS, MSAS) находятся в собственности США, Евросоюза и Японии с соответствующими интересам этих стран рабочими зонами. Существующая в мире геополитическая обстановка не позволяет рассчитывать на возможность их широкого использования в интересах нашей страны, особенно в военное время. Из-за локальности национальных интересов, а также в связи с очевидной затратностью подобных проектов (обязательное наличие космического сегмента), постановка вопроса о создании в стране собственной ШДПС СРНС не может считаться реалистичной. Исключив из рассмотрения ШДПС СРНС и соответствующую ей вершину, представилась возможность сократить МА до 259 000.

Дальнейший анализ МА позволил исключить из рассмотрения вершину, соответствующую региональным дифференциальным подсистемам (РДПС) СРНС при условии принятия допущения об объединении вершин, соответствующих интегрированным системам СРНС и РСДН с РДПС СРНС и РСДН (принцип EuroFix). Это позволило сократить множество альтернатив до 46 080.

В ходе исследований стало очевидно, что решение большинства задач чаще всего возможно с использованием РНС, соответствующих локальным дифференциальным подсистемам (ЛДПС) СРНС и РДПС СРНС с РСДН. Известно, что основными отличиями РДПС и ЛДПС являются значения их точностных показателей и показателей, характеризующих пло-

щадь рабочей зоны. Следовательно, если потенциального потребителя удовлетворяют значения основных показателей, достигаемых с помощью РДПС, то использование ЛДПС будет нецелесообразно из-за сравнительно небольших значений рабочих зон. При возможности использования для решения каких-либо задач РДПС и ЛДПС к МА следует относить РДПС, так как она позволит обеспечить пространственный охват работы системы на региональном уровне при меньшем количестве контрольно-корректирующих станций и соответствующих затрат. Такое допущение позволило свести МА к значению 6 по всем задачам, за исключением посадки ЛА, которые в рамках исследований не рассматривались.

Таким образом, предложенная методика обоснования рационального состава СС на основе обоснованных требований по группе показателей позволяет сформировать МА вариантов использования СС в интересах рассматриваемой системы, исключая метод полного перебора вариантов их использования. Оптимизационную основу методики составляет матричная реализация алгоритма Краскала. Полученное с его помощью МА, позволяет осуществить дальнейшую комплексную оценку возможностей СС по решению стоящих перед системой задач.

Увеличение количества показателей, по которым предъявляются требования к системе, снижает инвариантность результатов реализации методики, но и увеличивает вычислительную сложность задачи. Поэтому одним из наиболее перспективных путей ее совершенствования видится «взвешивание» значимости показателей, характеризующих качество функционирования рассматриваемой системы.

В рассматриваемом примере ее практического использования были получены следующие основные результаты.

Во-первых, ни одна из существующих в настоящее время РНС не отвечает требованиям потребителей по всем шести выделенным показателям.

Во-вторых, основу радионавигационного обеспечения потребителей должны составлять СРНС, из которых интересы страны наиболее полно удовлетворяет ГЛОНАСС (Россия) и, в будущем, Beidou\Compass (Китай).

В-третьих, в интересах Республики Беларусь наиболее перспективным признано использование РДПС СРНС ГЛОНАСС в сочетании с усовершенствованной РСДН, также предусматривающей возможность дифференциальной коррекции. Наиболее важными определены такие свойства РДПС и РСДН как подвижность (мобильность) и помехоустойчивость (доведение контрольно-корректирующей информации на частоте или в сигнале РСДН, многочастотность).

В-четвертых, требуемое качество НВО при выполнении топогеодезических работ возможно обеспечить при использовании ЛДПС СРНС в режиме постобработки.

#### Литература:

1. Емеличев, В. А. Сложность дискретных многокритериальных задач / В. А. Емеличев, В. А. Перепелица // Дискретная математика. Т. 6. — 1994. — № 1. — С. 3–33.
2. Подиновский, В. В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В. В. Подиновский, В. Д. Ногин. — М.: Наука, 1982.
3. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / А. И. Перов [и др.]; под общ. ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. — 3-е изд. — М.: Радиотехника, 2005.
4. Владимирский, Б. М. Математика. Общий курс: учебник / Б. М. Владимирский, А. Б. Горстко, Я. М. Ерусалимский. — СПб.: Лань, 2004.
5. Соловьев, Ю. А. Спутниковая навигация и ее приложения / Ю. А. Соловьев. — М.: ЭкоТрендз, 2003.
6. Иванюк, В. С. Радиотехнические системы обеспечения полетов авиации. Особенности построения и функционирования, требования к параметрам и перспективы развития: учеб. пособие / В. С. Иванюк, А. П. Кульпанович, С. А. Федукевич. — Минск: ВА РБ, 2008.
7. Босс, В. Лекции по математике. Т. 10. Перебор и эффективные алгоритмы: учеб. пособие / В. Босс. — М.: Издательство ЛКИ, 2008.