

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА, ВОЗДУХОСНАБЖЕНИЯ И ФИЛЬТРАЦИИ ТРАНСПОРТИРУЕМЫХ БЛОК-МОДУЛЕЙ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ РАДИУСА УСТОЙЧИВОСТИ

А. А. Гирченко¹, А. А. Румянцев², А. М. Казанцев²,
Д. И. Буханец², А. В. Тимошенко^{2,3}, А. А. Мурашов⁴

¹Государственное научно-производственное предприятие «КРОНА»,
Россия, 600036, г. Владимир, пр. Ленина, 73

²АО «Радиотехнический институт имени А. Л. Минца»,
Россия, 127083, г. Москва, ул. 8 Марта, д. 10, стр. 1

³Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»,
Россия, 124498, г. Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, д. 1

⁴Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны,
Россия, 150001, г. Ярославль, Московский пр., 28

В статье представлен подход к формализации процесса создания системы обеспечения температурного режима, воздухообеспечения и фильтрации (СОТРВФ) транспортируемых блок-модулей управления (ТБМУ) комплексов воздушно-космической обороны.

Применение линейных графиков для контроля создания СОТРВФ ТБМУ в последнее время показывает свою несостоятельность и требует совершенствования в части способов управления процессами создания таких систем. В качестве основы предлагается применять динамическую теорию графов, которая позволяет учитывать не только ресурсно-временные ограничения, но и возможные изменения в структуре связей последовательностей выполняемых работ по созданию СОТРВФ ТБМУ.

В работе показано, что ключевым элементом управления процессом создания СОТРВФ ТБМУ является комплексный моделирующий стенд, с помощью которого можно получать объективные данные о ходе разработки аппаратуры системы. Наличие такой информации позволяет контролировать при помощи сетевой модели процесс создания СОТРВФ ТБМУ на всех стадиях жизненного цикла. Состав и структурная схема такого стенда приведены в статье.

Ключевые слова: система обеспечения температурного режима, воздухообеспечения и фильтрации; транспортируемый блок-модуль управления, сетевое планирование, сетевая модель, стенд, испытания.

Введение

Создаваемые в настоящее время транспортируемые блок-модули управления (ТБМУ) с системами жизнеобеспечения являются сложными техническими системами, представляющими собой аппаратно-программные комплексы, построенные на основе высокопроизводительной аппаратуры и специализированного программного обеспечения и предназначенные для размещения в них оборудования модуля управления и вспомогательного оборудования. Основной задачей ТБМУ является организация мобильных рабочих (служебных) помещений и мест отдыха операторов.

Ключевым элементом ТБМУ является система обеспечения температурного режима, воздухообеспечения и фильтрации (СОТРВФ) [1, 2], обеспечивающая независимое управление микроклиматом операторского отсека и охлаждение вычислительных средств, размещаемых в аппаратных шкафах. Опыт эксплуатации современных СОТРВФ большой мощности (более 100 кВт) показывает, что принудительно-воздушные СОТРВ при высо-

ких температурах окружающей среды (более 20°C) не обеспечивают заданный режим эксплуатации в части термостатирования. Решение этой задачи возможно путем применения комбинированной СОТРВ, включающей подсистемы принудительно-воздушного охлаждения (ПВО) и воздушно-жидкостного охлаждения (ВЭКО).

Процесс создания такой системы — сложная многоступенчатая задача, характеризующаяся минимизацией стоимости и времени проведения работ. Сложность проектирования и разработки таких систем требует комплексирования большого числа разнородных и разноплановых работ. Организация и управление такими работами возможны за счет использования моделей и методов сетевого планирования [3, 4], в основу которых положена сетевая модель.

Постановка задачи

Широко используемый в настоящее время принцип календарно-сетевого планирования процесса создания СОТРВФ предусматривает планирование

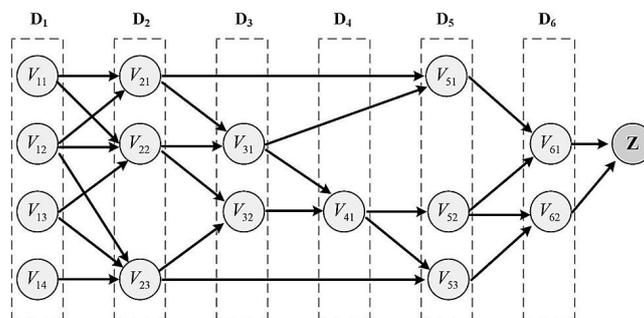


Рис. 1. Шестиугольный граф, описывающий различные варианты создания СОТРВФ ТБМУ (пример)
 Fig. 1. A six-character graph describing various creation options of system
 for providing temperature, air supply and filtration of transported control modules

задач и работ, установление взаимосвязи между ними и определение последовательности их выполнения в виде диаграммы Ганта на основе:

- экспертных оценок планируемых работ;
- справочников по типовым операциям (технологическим картам);
- аналогичных, ранее выполнявшихся работ.

В качестве основных программных средств используются такие пакеты прикладных программ, как *Microsoft Office Project* и, с недавнего времени, *Spider Project* [5].

Однако, несмотря на то что формировать диаграммы Ганта достаточно просто и они наглядно показывают ход работ, применение календарно-сетевое планирование в виде диаграммы Ганта не в полной мере обеспечивает управление процессом создания СОТРВФ.

Практика создания СОТРВФ показала, что к числу наиболее существенных следует отнести следующие недостатки диаграммы Ганта:

- статичность — диаграмма не отражает всей динамики процесса и нуждается в постоянной корректировке;
- невозможность отражать значимость и ресурсоемкость работ, а также невозможность оперативного и точного определения зависимости между различными операциями процесса создания, которые в значительной мере определяют темпы реализации создания РЛС в целом;
- отсутствие возможности прогнозировать ход событий, что осложняет выбор правильного решения при выполнении последующих работ;
- контрольные точки (вехи) на диаграмме, как и другие границы, не являются календарными датами, что не позволяет количественно определить, насколько сдвиг одной контрольной точки приводит к сдвигу всего проекта.

Кроме того, диаграмма Ганта не позволяет оперативно реагировать на отклонения параметров календарного (сетевого) графика [6, 7]. При этом, ввиду отсутствия сетевой модели, планирование и управление созданием СОТРВФ сводятся к мониторингу текущего состояния проекта, в результате необходимые проектные решения по корректировке процесса создания системы охлаждения принимаются с опозданием, что может привести к срыву сроков как выполнения этапа, так и всего проекта по созданию СОТРВФ.

Таким образом, для снижения рисков создания СОТРВФ и контроля ее создания необходимо разработать сетевую модель, которая бы адекватно отражала процесс создания СОТРВФ.

Теория

В процессе создания СОТРВФ возможны случаи отказа от планируемых решений в связи с:

- недостижимостью требуемых характеристик;
- значительными превышениями сроков и стоимости;
- технологическими или другими ограничениями.

Решением может стать как изменение технологической цепочки, так и появление новых решений (работ). Данные обстоятельства приводят к изменению сетевой модели и, соответственно, календарного графика. Учет таких изменений при использовании классических детерминированных и стохастических сетевых моделей не рассматривался изначально ввиду статичности самих структур сетевых моделей. Поэтому в качестве основы для описания процесса создания СОТРВФ предлагается использовать динамический граф, который позволяет учитывать изменения в структуре сетевой модели [8–10].

Сетевую модель создания СОТРВФ представим как динамический многодольный граф $G = (G_1, G_2, \dots, G_l)$, $G_l = (D_l, E_l)$, где $D_l = \{d_1, d_2, \dots, d_z\}$ — множество долей графа, которые сопоставляются множеству технических решений (структурных элементов) системы охлаждения ТБМУ, причем каждая доля представляет собой множество вершин $V_s^D = \{v_1^D, v_2^D, \dots, v_{sn}^D\}$, которые соответствуют определенной аппаратуре; $E = \{e\}$ — множество ребер графа — множество событий, характеризующих выполнение определенной работы и соединяющих вершины v_i и v_j между собой, для которых задано направление $(i, j = \overline{1, n})$, где n — количество вершин графа G_l). Каждому ребру $e \in E$ приписан его вес, т.е. число $w(e)$, которое описывает ресурсное содержание перехода к новому событию графа. Пример такого графа приведен на рис. 1.

Каждая работа на любом из этапов характеризуется многими факторами, среди которых целесообразно выделить следующие:

- уровень финансирования работ и производства по созданию СОТРВФ;
- наличие опыта разработки аналогичных изделий;
- наличие комплекса математических моделей для оценки как отдельных характеристик, так и изделия в целом, а также стендовой и контрольно-испытательной базы;
- необходимость в дополнительном оборудовании и в специальной оснастке;

- состояние материально-технической базы;
- условия проведения различных видов проверок и испытаний;
- условия труда и уровень оплаты труда работников.

Данные факторы косвенно или напрямую влияют как на сами параметры сетевой модели, так и на возможность их изменения в процессе создания СОТРВФ, которые для удобства их оценки формализуются в виде весовых коэффициентов сетевой модели (финансовые затраты C , время выполнения работ T , трудоемкость работ τ).

Вышеуказанные параметры сетевой модели в большей степени отражают экономическую составляющую процесса создания СОТРВФ и не касаются его технической части, которая играет ключевую роль.

Для того чтобы иметь возможность в процессе создания системы оценивать ход разработки структурных элементов и достижение требуемых технических характеристик, в дополнение к имеющимся параметрам сетевой модели целесообразно характеризовать выполняемые работы с помощью коэффициента готовности K . Под коэффициентом готовности будем понимать коэффициент, который позволяет выявить степень соответствия текущих конструкторско-технических параметров разрабатываемой аппаратуры требованиям к ней [11].

В результате на основе предложенной сетевой модели главный конструктор в соответствии с некоторым критерием выбирает из всего множества вариантов компоновки аппаратуры оптимальный состав системы, который в дальнейшем формализуется в виде сетевого графика, а сама модель может быть использована при контроле процесса создания СОТРВФ на всех стадиях жизненного цикла.

В общем случае, контроль реализации проекта и его параметров, как функция управления, предназначен для получения информации о ходе и качестве реализуемого процесса и выработки управляющего воздействия в случае, если имеются отклонения от заданного показателя [12]. С точки зрения контроля создания СОТРВФ, первоочередной задачей является определение критерия, на основе которого будет приниматься решения о дальнейших работах. В соответствии с решаемой задачей данный критерий должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Комплексная оценка задачи создания СОТРВФ.
2. Возможность учета изменений параметров процесса создания и их влияния на решение задачи.
3. Оценка хода разработки СОТРВФ по данным результатов моделирования, испытаний и иной информации о процессе создания изделия.

Анализ показал, что наиболее близким понятием, отражающим суть проблемы контроля создания СОТРВФ, является понятие устойчивости, которое в наиболее общем смысле отражает способность системы сохранять свое состояние при изменении параметров этой системы [13]. Ключевым понятием для оценки устойчивости реализуемого проекта является понятие радиуса устойчивости [14–16], которое оценивает максимально возможные изменения весов ребер графа, не приводящее к изменению решения самой задачи — созданию на основе реализуемого сетевого графика СОТРВФ с заданными характеристиками.

Выражение для расчета радиуса устойчивости может быть представлено в следующем виде:

$$\rho(A) = \min_{i \in \varphi(A)} \max_{j \in \varphi(A)} \frac{\tau_i(A) - \tau_j(A)}{|\tau_i| + |\tau_j| - 2|\tau_i \cap \tau_j|},$$

где $\rho(A)$ — радиус устойчивости; A — матрица смежности весов ребер графа $G_L = (D_L, E_L)$; τ_i, τ_j — длина (сумма весов) i -го и j -го путей графа G_L ; $|\tau_i|, |\tau_j|$ — мощности множества τ_i и τ_j соответственно; $|\tau_i \cap \tau_j|$ — мощность пересечения; $\varphi(A)$ — множество номеров оптимальных траекторий. Задача с матрицей A , в таком случае, называется устойчивой, если для любой матрицы $B \in R^m$ такой, что $\|B\| < \varepsilon$, выполняется соотношение $\varphi(A+B) \subseteq \varphi(A)$. Под матрицей B в рассматриваемой задаче понимается совокупность данных, поступающих в процессе реализации проекта создания СОТРВФ из различных источников и формализуемых в виде весовых коэффициентов сетевой модели. Для расчета радиуса устойчивости выбранной совокупности технических решений графа G_L необходимо осуществить сведение многокритериальной (векторной) задачи к однокритериальной. В общем случае задача свертки может быть решена как представлено в [17].

В результате проведенных расчетов радиус устойчивости создания СОТРВФ оказался равным 0,7. Таким образом, зная значение радиуса устойчивости, становится возможным оценить влияние изменений первоначальных параметров сетевой модели на процесс создания СОТРВФ.

Результаты экспериментов

В условиях управления современным производством основным инструментом для получения объективных данных о выполнении поставленных в техническом задании требований к аппаратуре СОТРВФ, а следовательно, и оценки изменения радиуса устойчивости, являются комплексные моделирующие стенды.

В качестве такого моделирующего стенда была разработана лабораторная установка, схема которой представлена на рис. 2, и имитатор радиоэлектронного комплекса (РЭК) (рис. 3).

Лабораторная установка построена на базе компьютера с установленной в нем платой PCI-1716 фирмы Analog Devices, а также блока состоящего из шести датчиков температуры ДТС424-Pt100.В3.40/5, которые считывают данные СОТРВФ при заданном диапазоне температур от 0 до 100 °С. При этом два датчика определяют температуру воздуха на входе и выходе, два датчика определяют температуру жидкости на входе и выходе и два датчика определяют температуру имитатора РЭК. Данные, полученные с датчиков, поступают на плату PCI-1716 для программной обработки на компьютере. Команда для запуска вентилятора (M1) поступает через частотный преобразователь VLT Micro FC-051 (ЧП1) с целью создания потока воздуха в установке. Команда для запуска насоса (M2) поступает через частотный преобразователь VLT Micro FC-051 (ЧП2) с целью создания потока жидкости в установке. Компьютер выдает задание на твердотельное реле, по которому определяется, какое будет напряжение на теплонагревательных элементах (ТЭН), после чего поступает команда на запуск блока нагревателей, состоящего из трех ТЭН ОУ387. Измерение мощности учитывается счетчиком Меркурий 230 AR-03 R и передается для наблюдения на компьютер. Расход жидкости в системе отслеживается турбинным расходомером Vision 3000. Поток воздуха

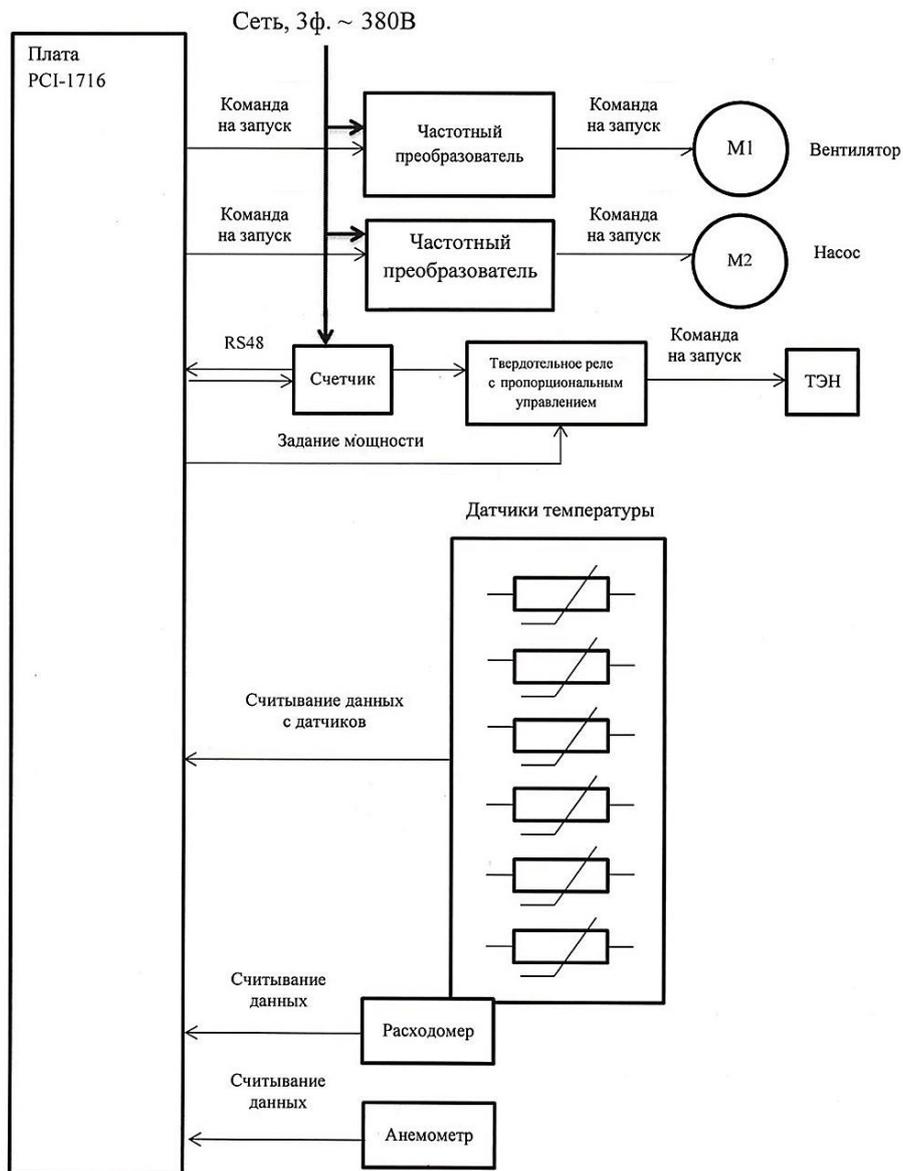


Рис. 2. Схема лабораторной установки регулирования потоков в СОТРВФ ТБМУ
 Fig. 2. Scheme of the laboratory installation of flow control in system for providing temperature, air supply and filtration of transported control modules

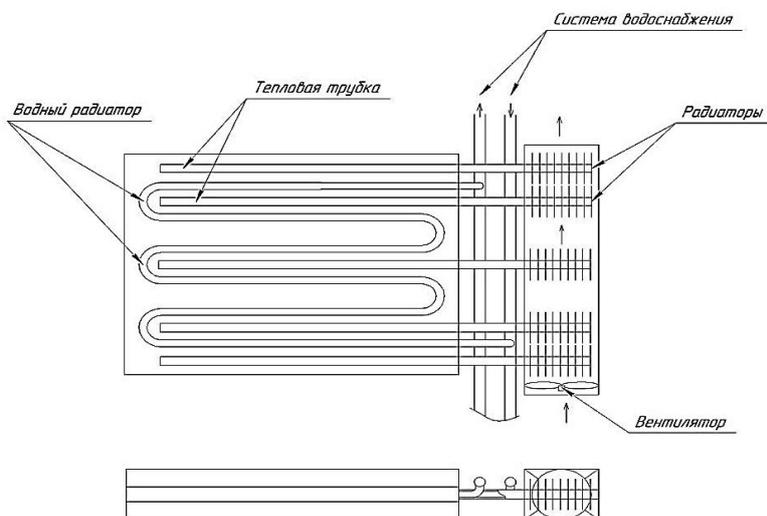


Рис. 3. Общая схема имитатора электронного блока с охлаждением
 Fig. 3. General scheme of the electronic block simulator with cooling

Таблица 1. Результаты опытно-экспериментальных работ по проверке работоспособности СОТРВФ и реализации заданных технических характеристик

Table 1. Results of experimental work to check the performance of system for providing temperature, air supply and filtration and the implementation of the specified technical characteristics

№	Кол-во подв. тепла (Вт)	Расход воздуха (куб. м/час)	Расход жидкости (л/мин)	Температура воздуха на входе (град., С)	Температура воздуха на выходе (град., С)	Температура жидкости на входе (град., С)	Температура жидкости на выходе (град., С)	Температура охлаждающего элемента (град., С)
1	850	450	1,5	20,1	17,9	27,31	32,1	72,5
2	700	450	1,5	20	16,6	22,5	27	72,3
3	1000	450	1,6	20,2	18	21,9	27,7	69,2

в системе отслеживается датчиком скорости ветра МПВ-502.12120. Полученные данные с датчиков позволяют регулировать расход жидкости и воздуха в системе.

Таким образом, разработанные лабораторный стенд и имитатор РЭК позволяют оценить технические характеристики выбранных решений (аппаратуры) СОТРВФ.

В процессе выполнения опытно-экспериментальных работ по проверке работоспособности системы и реализации заданных технических характеристик были получены результаты, представленные в табл. 1. В результате исследований оказалось, что система воздушного охлаждения не обеспечивает заданной производительности, что в рамках предложенной сетевой модели соответствует снижению коэффициента готовности для данной системы (коэффициент готовности снизился на 0,3 пункта при изначально спланированном 0,7) и, соответственно, ставит вопрос о реализуемости СОТРВФ в заданные сроки. Анализ полученных данных и оценка устойчивости создания СОТРВФ показали, что необходимо проведение дополнительных работ и разработка нового технического решения (добавление новых вершин).

Выводы и заключение

В статье рассмотрены вопросы, связанные с совершенствованием процесса создания СОТРВФ ТБМУ. Показано, что использование линейных графиков и общепризнанных подходов в сетевом планировании не позволяет учесть возможные появления новых технических решений и требует своего совершенствования.

Рассмотрен вопрос адаптивного подхода к созданию СОТРВФ ТБМУ за счет использования сетевой модели на базе динамической теории графов. В качестве методического аппарата оценки реализуемости процесса создания СОТРВФ предложено использовать радиус устойчивости. Показано, что ключевую роль при создании СОТРВФ играют комплексные моделирующие стенды, данные с которых позволяют контролировать процесс создания таких систем. Приведены состав и структурная схема такого стенда, а также результаты экспериментальных исследований.

Список источников

1. ГОСТ EN 378-1-2014. Системы холодильные и тепловые насосы. Требования безопасности и охраны окружающей среды. Ч. 1. Основные требования, определения, классификация и критерии выбора. М.: Стандартинформ, 2014. 73 с.

2. ГОСТ EN 378-2-2014 Системы холодильные и тепловые насосы. Требования безопасности и охраны окружающей среды. Ч. 2. Проектирование, конструкция, изготовление, испытания, маркировка и документация. М.: Стандартинформ, 2016. 86 с.

3. Доппира Р. В., Кордюков Р. Ю., Беглецов А. А., Сергиенко С. В. Метод сетевого планирования разработки сложных технических систем // Программные продукты и системы. 2014. № 2. С. 22–26.

4. Новицкий Н. И. Сетевое планирование и управление производством. М.: Новое знание, 2004. 159 с.

5. Кульгин Н. Б. Инструменты управления проектами: Project Expert и Microsoft Project. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 160 с. ISBN 978-5-9775-0373-0.

6. Батрова Р. Г., Глухов С. В. Календарное планирование программ сетевыми методами // Сб. тр. конф., посвященной 90-летию со дня рождения Алексея Андреевича Ляпунова, 8–11 октября 2001. Новосибирск, 2011. URL: <http://www.ict.nsc.ru/ws/Lyap2001/2226/> (дата обращения: 15.03.2020).

7. Линч Л. Вовремя и в рамках бюджета: управление проектами по методу критической цепи: пер. с англ. М.: Альпина Паблишерз, 2010. 354 с.

8. Harary F., Gupta G. Dynamic graph models // Mathematical and Computer Modelling. 1997. Vol. 25, no. 7. P. 79–87. DOI: 10.1016/S0895-7177(97)00050-2.

9. Кочкаров А. А., Кочкаров Р. А., Малинецкий Г. Г. Некоторые аспекты динамической теории графов // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2015. Т. 55, № 9. С. 1623–1630.

10. Кочкаров А. А., Яцкин Д. В. Теория графов и классические задачи прикладной математики в экономике. М.: КНОРУС, 2019. 248 с. ISBN 978-5-406-01309-0.

11. Боев С. Ф. Управление рисками проектирования и создания радиолокационных станций дальнего обнаружения: моногр. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. 430 с. ISBN 978-5-7038-4775-6.

12. Меденцева Е. В. Общая характеристика контрольной функции в системе управления коммерческой организации // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-2. 10 с.

13. Иванко Е. Е. Маршрутно-распределительные задачи: теория и приложения: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Екатеринбург, 2015. 289 с.

14. Гордеев Э. Н. Сравнение трёх подходов к исследованию устойчивости решений задач дискретной оптимизации и вычислительной геометрии // Дискретный анализ и исследование операций. 2015. Т. 22, № 3. С. 18–35.

15. Гордеев Э. Н., Леонтьев В. К. Общий подход к исследованию устойчивости решений в задачах дискретной оптимизации // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1996. Т. 36, № 1. С. 66–72.

16. Емеличев В. А., Кузьмин К. Г., Леонович А. М. Устойчивость в векторных комбинаторных задачах оптимизации // Автоматика и телемеханика. 2004. № 2. С. 79–92.

17. Полосинов С. А. Синтез интегральных оценочных критериев в задачах принятия решений // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014 (Москва, 16–19 июня 2014 г.). М., 2014. С. 7943–7954.

ГИРЧЕНКО Андрей Александрович, заместитель директора по развитию Государственного научно-производственного предприятия «КРОНА», г. Владимир.

Адрес для переписки: sovetic@fgupkrona.ru

РУМЯНЦЕВ Антон Андреевич, инженер АО «Радиотехнический институт имени А. Л. Минца», г. Москва.

Адрес для переписки: antoshkes@yandex.ru

КАЗАНЦЕВ Андрей Михайлович, ведущий инженер АО «Радиотехнический институт имени А. Л. Минца», г. Москва.

SPIN-код: 6464-7078

AuthorID (РИНЦ): 992463

Адрес для переписки: kazantsev.andrei@gmail.com

БУХАНЕЦ Дмитрий Иванович, доктор технических наук, начальник отдела АО «Радиотехнический институт имени А. Л. Минца», г. Москва.

Адрес для переписки: dbuhanets@rti-mints.ru

ТИМОШЕНКО Александр Васильевич, доктор технических наук, профессор, начальник лаборатории

НИУ Московского института электронной техники, г. Москва, Зеленоград.

SPIN-код: 7172-8764

AuthorID (РИНЦ): 525742

AuthorID (SCOPUS): 96504899

Адрес для переписки: u567ku78@gmail.com

МУРАШОВ Анатолий Александрович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор Ярославского высшего военного училища противозвоздушной обороны, г. Ярославль.

SPIN-код: 6992-1460

AuthorID (РИНЦ): 389798

Для цитирования

Гирченко А. А., Румянцев А. А., Казанцев А. М., Буханец Д. И., Тимошенко А. В., Мурашов А. А. Проектирование систем обеспечения температурного режима, воздухообеспечения и фильтрации транспортируемых блок-модулей на основе оценки изменения радиуса устойчивости // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 3. С. 63–70. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-3-63-70.

Статья поступила в редакцию 25.04.2020 г.

© А. А. Гирченко, А. А. Румянцев, А. М. Казанцев, Д. И. Буханец, А. В. Тимошенко, А. А. Мурашов

MONITORING PROCESS OF DEVELOPING SYSTEM FOR PROVIDING TEMPERATURE, AIR SUPPLY AND FILTRATION OF TRANSPORTED CONTROL MODULES

A. A. Girchenko¹, A. A. Rumyantsev², A. A. Kazantsev²,
D. I. Bukhanets², A. V. Timoshenko³, A. A. Murashev⁴

¹State Scientific-Production Enterprise «KRONA»,
Russia, Vladimir, Lenin Ave., 73, 600036

²Academician A. L. Minz Radiotechnical Institute,
Russia, Moscow, Marta St., 8, Bd. 10/1, 127083

³National Research University of Electronic Technology,
Russia, Moscow, Zelenograd, Shokin Sq., Bd. 1, 124498

⁴Yaroslavl Higher Military School of Air Defense,
Russia, Yaroslavl, Moscow Ave., 28, 150001

The article presents an approach to formalizing the process of creating a system for providing temperature, air supply and filtration (TAFS) of transported control modules of aerospace defense complexes.

The use of line graphs to control the creation of such systems has recently shown its inconsistency and requires improvement in terms of how to manage the processes of creating such systems. As a basis, it is proposed to use the dynamic theory of graphs, which allows one to take into account not only resource-time constraints, but also possible changes in the structure of relations of sequences of work performed to create TAFS.

The paper shows that the key element of managing the process of creating TAFS is a complex modeling stand, which can be used to obtain objective data on the development of system equipment. The availability of this information allows taking control on the process of creating TAFS at all stages of the life cycle using a network model. The composition and structural diagram of such a stand are given in the article.

Keywords: system for providing temperature, air supply and filtration, transportable control unit, network planning, stand, tests.

References

1. GOST EN 378-1-2014. Sistemy kholodil'nyye i teplovyye nasosy. Trebovaniya bezopasnosti i okhrany okruzhayushchey sredy. Ch. 1. Osnovnyye trebovaniya, opredeleniya, klassifikatsiya i kriterii vybora [Refrigeration and heat pump systems. Safety and environmental requirements. Part 1. Basic requirements, definitions, classification and selection criteria]. Moscow, 2014. 73 p. (In Russ.).
2. GOST EN 378-1-2014. Sistemy kholodil'nyye i teplovyye nasosy. Trebovaniya bezopasnosti i okhrany okruzhayushchey sredy. Ch. 2. Proektirovaniye, konstrukttsiya, izgotovleniye, ispytaniya, markirovka i dokumentatsiya [Refrigeration and heat pump systems. Safety and environmental requirements. Part 2. Design, construction, manufacturing, testing, marking and documentation]. Moscow, 2016. 86 p. (In Russ.).
3. Dopira R. V., Kordyukov R. Yu., Begletsov A. A., Sergiyenko S. V. Metod setevogo planirovaniya razrabotki slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Network planning method for developing complex engineering systems] // Programmye produkty i sistemy. *Software & Systems*. 2014. No. 2. P. 22–26. (In Russ.).
4. Novitskiy N. I. Setevoye planirovaniye i upravleniye proizvodstvom [Network planning and production management]. Moscow, 2004. 159 p. (In Russ.).
5. Kul'tin N. B. Instrumenty upravleniya proyektami: Project Expert i Microsoft Project [Project management tools: Project Expert and Microsoft Project]. St. Petersburg, 2009. 160 p. ISBN 978-5-9775-0373-0. (In Russ.).
6. Batrova R. G., Glukhov S. V. Kalendarnoye planirovaniye programm setevymi metodami [Network scheduling of programs] // Cb. tr. konf., posvyashchennoy 90-letiyu so dnya rozhdeniya Alekseya Andreyevicha Lyapunova. *Cb. tr. konf., posvyashchennoy 90-letiyu so dnya rozhdeniya Alekseya Andreyevicha Lyapunova*. Novosibirsk, 2011. URL: <http://www.ict.nsc.ru/ws/Lyap2001/2226/> (accessed: 15.03.2020). (In Russ.).
7. Linch L. Vovremya i v ramkakh byudzheta: upravleniye proyektami po metodu kriticheskoy tsepi [On time and on budget: critical chain project management] / trans. from Engl. Moscow, 2010. 354 p. (In Russ.).
8. Harary F., Gupta G. Dynamic graph models // *Mathematical and Computer Modelling*. 1997. Vol. 25, no. 7. P. 79–87. DOI: 10.1016/S0895-7177(97)00050-2. (In Engl.).
9. Kochkarov A. A., Kochkarov R. A., Malinetskiy G. G. Nekotoryye aspekty dinamicheskoy teorii grafov [Issues of dynamic graph theory] // *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki. Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2015. Vol. 55, no. 9. P. 1623–1630. (In Russ.).
10. Kochkarov A. A., Yatskin D. V. Teoriya grafov i klassicheskoye zadachi prikladnoy matematiki v ekonomike [Graph theory and classical problems of applied mathematics in Economics]. Moscow, 2019. 248 p. ISBN 978-5-406-01309-0. (In Russ.).
11. Boyev S. F. Upravleniye riskami proyektirovaniya i sozdaniya radiolokatsionnykh stantsiy dal'nego obnaruzheniya [Risk management of design and construction of early warning radars]. Moscow, 2017. 430 p. ISBN 978-5-7038-4775-6. (In Russ.).

