

УДК 551.508:656

doi 10.33933/2074-2762-2020-59-111-123

Структура живучей сети метеокомплексов транспортно-логистических систем «Индустрии 4.0»

В.В. Грызунов, А.О. Нестерова

Российский государственный гидрометеорологический университет, viv@a-tree.ru

Представлен вариант решения задачи метеорологического сопровождения транспортно-логистических систем «Индустрии 4.0» достоверными метеоданными за счет создания живучей структуры Сети метеокомплексов (Сети). Дано понятие гидрометеорологической сети. Приведены способы решения возникающего противоречия между требованиями предприятий, основывающихся на Индустрии 4.0, и возможностями Сети. Повысить вероятность выполнения задач, поставленных перед Сетью, предлагается за счет выбора живучей структуры Сети. Выбор осуществляется на основе критериев оптимальности: *d*-инвариантность и качество структуры, которые показывают, насколько сбалансирована структура сети. Проанализированы такие варианты структуры сети метеокомплексов, как шина, кольцо, звезда, полносвязная, решетка, тор, гиперкуб, ячеистая, циркулянты.

Ключевые слова: киберфизическая система, Индустрия 4.0, гидрометеорологическое обеспечение, прогноз погоды, цифровая метеорология, живучесть структур.

Survivable structure of network of meteorological complexes of transport and logistics systems “Industry 4.0”

V.V. Gryzunov, A.O. Nesterova

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

In industry, more and more money is being invested in transition to new standards - Industry 4.0. The network of weather stations (Network) required by Industry 4.0 must capture and transmit data exceeding 200 times the amount of current data and have transmission delays not exceeding 30 seconds. The main requirement of Industry 4.0 for the Network is the high efficiency of delivering reliable data to a consumer.

If a Network element fails, the consumer loses data not only of the failed element, but also of all elements transmitting their data through it. That is, the consumer does not receive reliable data, the probability of completing a task by the entire Network becoming less. The Network structure maximizing the probability of executing the tasks by the Network has been chosen in the article.

The laws of distribution describing appearance or disappearance of Network elements are unknown and impossible to be obtained, therefore, the survivability index of the Network should not depend on the laws of distribution, that is, it should be incredible. It is the *d*-invariantism, the indicator showing the uniform distribution of weights (significance) among the structural elements. If the significance of all the arcs/ nodes is the same, the *d*-invariance equals 1, that is, the structure does not care which element will be deleted.

If several structures with the same *d*-invariantism are possible on the given sets, then, to compare the structures with each other, we propose to use the indicator of structure quality, revealing the structure with the least average number of bonds per node. Using the indicators described above, the following structures have been evaluated: star, fully connected structure, tire, hypercube, lattice, torus, mesh, circulant. Having analyzed these structures, the following conclusions can be drawn: ring-containing structures are more

survivable; the most survivable structure in the sense of d-invariantism is the circulant $D(16; 1,7)$. These indicators allow to obtain the maximum possible probability of executing the tasks by the Network.

Keywords: cyber-physical system, industry 4.0, hydrometeorological support, weather forecast, digital meteorology, structure survivability.

For citation: *V.V. Gryzunov, A.O. Nesterova.* Survivable structure of network of meteorological complexes of transport and logistics systems "Industry 4.0". *Gidrometeorologiya i Ekologiya. Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University).* 2020. 59: 111—123. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-59-111-123

Введение

В промышленности все больше денег инвестируется в переход на новые стандарты — «Индустрия 4.0». В рамках этих стандартов виртуальные и физические системы интегрируются между собой, образуя киберфизические системы [1]. Так, например, к 2020 г. только в одной Германии планируется инвестировать в переход на «Индустрию 4.0» до 140 млрд евро в год [2]. В «Индустрии 4.0» подразумевается автоматизация полной технологической цепочки: от добычи полезных ископаемых до доставки до потребителя конечного продукта [3]. Системы «Индустрии 4.0» проектируются как унифицированные, распределенные, многофункциональные с рекурсивным самовоспроизводящимся адаптивным замкнутым характером коммутационных отношений [2, 4, 5, https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/50451/INDUSTRIYA_4_0_NOVAYA_PROMYSHLENNAYA_POLITIKA_GERMANII.pdf].

Уже сегодня от запроса товара с заданными характеристиками до его изготовления и доставки до потребителя проходит от 30 минут (обычная пицца на дом) до нескольких недель (кроссовки Nike или мотоцикл Harley Davidson). Компании планируют доставлять товары дронами. Доставка товаров до потребителей по воздуху по версии компании Amazon — «максимально быстрый и эффективный путь из точки А в точку Б». Дроны являются крайне чувствительными к метеоусловиям на маршруте доставки. В настоящее время речь идет о расстоянии до 10 км, но в ближайшем будущем можно ожидать существенное увеличение этого расстояния. Более того, «разнообразное практическое применение недорогих, коммерчески доступных воздушных и подводных дронов — это вопрос нескольких лет» [3].

Таким образом, остро встают вопросы метеорологического сопровождения дронов, образующих полноценную транспортно-логистическую систему, чувствительную к метеорологическим данным. Метеорологическое сопровождение транспортно-логистических систем обозначено как приоритетное направление развития РФ в «Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации», утвержденной Указом Президента РФ [<http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201612010007.pdf>]. В РФ метеоусловия контролируются посредством глобальной наблюдательной сети, обеспечивающей получение характеристик гидрометеорологических явлений и процессов, происходящих в крупном или планетарном масштабах, для глобальных потребностей [<https://pdf.standartgost.ru/catalog/Data2/1/4293848/4293848976.pdf>].

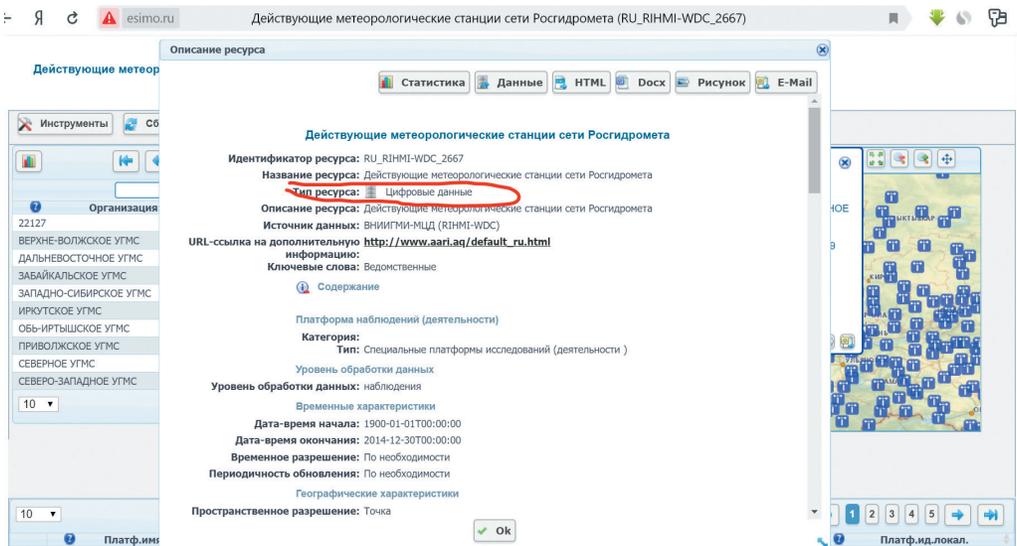


Рис. 1. Действующие метеорологические станции РФ.

Fig.1. Existing meteorological complexes Russian Federation.

Гидрометеорологической сетью называют совокупность учреждений, ведущих метеорологические и гидрологические наблюдения. В каждом субъекте РФ имеются управления Федеральной службой России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), которые руководят работой всех гидрометеорологических станций, обсерваторий, пунктов наблюдений, находящихся на обслуживаемой территории. К числу участников деятельности гидрометеорологической службы принадлежат организации наблюдательной сети (ОНС): в системе Росгидромета они являются основным организационным звеном государственной сети.

Информация с гидрометеорологических постов поступает на станции, где она кодируется и откуда передается в территориальные управления Росгидромета. В этих управлениях составляются прогнозы погоды, которые передаются потребителям гидрометеорологической информации.

Перечень действующих метеостанций, передающих данные в цифровом режиме, приведен на портале «Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане» (рис. 1).

Государственная наблюдательная сеть (далее Сеть) включает следующие наблюдательные сети [https://pdf.standartgost.ru/catalog/Data2/1/4293848/4293848976.pdf]:

- гидрологическая на реках и каналах;
- аэрологическая (радиозондирование);
- гидрометеорологическая на озерах и водохранилищах;
- метеорологическая радиолокационная (МРЛ);

- магнитная;
- метеорологическая;
- морская гидрометеорологическая;
- воднобалансовая;
- авиаметеорологическая;
- актинометрическая;
- агрометеорологическая;
- гелиогеофизическая;
- гляциологическая;
- ионосферная;
- гидрологическая на болотах;
- озонотрическая;
- селестоковая;
- теплбалансовая;
- снеголавинная;
- наблюдательные сети:
 - за испарением с поверхности воды, почвы, снега;
 - за атмосферным электричеством;
 - за уровнем загрязнения атмосферного воздуха;
 - за уровнем загрязнения морских вод и донных отложений;
 - за уровнем загрязнения поверхностных водных объектов по гидробиологическим показателям;
 - за уровнем загрязнения поверхностных вод суши;
 - за уровнем загрязнения почвы;
 - за уровнем радиоактивного загрязнения природной среды;
 - за уровнем загрязнения снежного покрова;
 - за фоновым состоянием окружающей среды (на специализированных фоновых станциях) и трансграничным переносом загрязняющих веществ;
 - за химическим составом осадков.

Оконечным оборудованием Сети являются метеорологические и гидрометеорологические станции. Эти станции, согласно действующим на сегодня нормативам, должны быть размещены на типичном для окружающей местности участке, к которому предъявляется ряд требований. Обслуживание и ремонт метеостанций могут занимать до 30 суток [<http://docs.cntd.ru/document/1200068361>]. Метеоданные снимает метеоролог с периодичностью от 3 до 7 часов. Стоит обратить внимание на то, что время и точность измерений могут непредсказуемо изменяться [6, 7].

В основе метеорологического сопровождения транспортно-логистических систем «Индустрии 4.0» лежат компьютерные модели климата и погоды [8]. Для составления надежных прогнозов необходима высокая достоверность предоставляемых метеоданных с периодичностью от нескольких минут до нескольких секунд [8]. Так, например, для моделей с горизонтальным шагом 50—100 км требуемая периодичность составляет 5—8 минут, а для моделей горизонтальным разрешением 15—20 км — не более 1—2 минут [7].

Весьма вероятным методом определения метеорологических параметров в ближайшем будущем станет использование моделей численного анализа погоды [6]. Этот метод требует предоставлять данные кинематических наблюдений в еще более жестком режиме — режиме реального времени.

Как видно из приведенных фактов, существует противоречие между требованиями потребителя в лице предприятий формата «Индустрия 4.0» к достоверности и оперативности предоставления метеорологических данных и текущими возможностями Сети. Данное противоречие может быть устранено, например, за счет интеграции Сети и частных метеокомплексов через Интернет вещей (IoT), а также специальных датчиков, сопровождающих перевозимые грузы и передающих информацию о погодных условиях на всем пути следования грузов с высокой точностью, создание сеточных массивов климатических данных [9], которые будут в основу цифровой карты Земли, отображающей погоду и климат в масштабе времени, близком к реальному.

Метеокомплекс — устройство для дистанционного измерения и передачи потребителю метеорологических данных. Старые метеокомплексы поставляли данные один раз в 3—7 часов, в то время как требования к современным — один раз в минуту. Следовательно, даже при сохранении объема измерений и числа станций объем передаваемых данных должен возрасти больше чем в 200 раз. Внедрение сеточных массивов для снятия метеоданных существенно увеличит и эту цифру. До появления Индустрии 4.0 Сеть работала с небольшим объемом данных и допускала задержки в передаче данных около суток и дольше. Сеть, необходимая Индустрии 4.0, должна снимать и передавать превышающий в 200 раз объем данных, и задержки при передаче не должны превышать 30 секунд.

Главное требование Индустрии 4.0 к Сети — высокая оперативность доставки достоверных данных до потребителя. Оперативность получения данных состоит из частоты получения данных и скорости передачи данных потребителю через Сеть. Если снятые данные не доставлены в срок, их актуальность утрачивается и данные могут считаться недостоверными. Будем считать, что достоверные данные — это данные, снятые в соответствии с существующими требованиями и доставленные в центр обработки данных или другому потребителю в заданный срок без искажений.

Качество и периодичность съема данных зависят только от окончного оборудования Сети, а на своевременную доставку данных до потребителя, обработку и хранение влияют другие элементы Сети и способ их связи между собой. Очевидно, если элемент Сети выходит из строя, то потребитель теряет данные не только отказавшего элемента, но и всех элементов, которые транслируют свои данные через него. Таким образом, потребитель не получает достоверных данных, и вероятность выполнения задачи всей Сетью становится меньше.

Таким образом, цель настоящего исследования — выбрать структуру Сети, максимизирующую вероятность выполнения задач Сетью, — является актуальной. Для достижения обозначенной цели используются методы теории вероятностей и теории графов.

Методы

Введем вероятность выполнения задачи, поставленной перед Сетью, как показатель, оценивающий качество Сети. Этот показатель оценивает пригодность Сети для решения поставленных задач по предоставлению требуемого количества и качества метеоданных в заданный срок:

$$P = \frac{\Omega}{\Omega^*},$$

где P — вероятность выполнения задачи, поставленной перед Сетью; Ω — количество предоставленных Сетью измерений с требуемым качеством (качество задается потребителем метеорологических данных); Ω^* — требуемое количество измерений требуемого качества.

Качество — свойство или совокупность свойств объекта, обуславливающих его соответствие назначению [10].

Эффективность — это комплексное операционное свойство (качество) целенаправленного процесса функционирования системы, характеризующее его приспособленность к достижению цели операции (к выполнению задачи системы).

Из приведенной формулы следует, что $P \rightarrow 1 \Leftrightarrow \Omega \rightarrow \Omega^*$. Поскольку Ω^* задается потребителем услуг Сети и зависит от требуемой точности прогноза [7], то считаем эту величину константой. Следовательно, достичь требуемой вероятности выполнения задачи возможно, только увеличивая величину Ω , которая зависит от многих факторов, в том числе от работоспособности Сети.

Принимая во внимание приведенное выше противоречие между требованиями к предоставляемым данным и реальностью, можно утверждать, что для некоторых сегментов Сети $\Omega \ll \Omega^* \Rightarrow P \rightarrow 0$. По этой же причине довольно сложно получить даже приблизительную оценку вероятности выполнения задачи, поставленной перед Сетью.

Повысить вероятность выполнения задачи, то есть увеличить Ω , возможно путем внесения в Сеть функциональной и/или структурной избыточности. Функциональная избыточность подразумевает расширение функционала приборов, а значит, требует доработать существующие метеоконплексы или создать новые. Это длительный и дорогой путь. Внесение структурной избыточности позволяет достичь требуемой вероятности (увеличить Ω), объединяя существующие государственные и частные метеоконплексы в Сеть. В настоящей работе исследованы пути внесения структурной избыточности.

Как частные, так и государственные метеоконплексы, образующие структуру Сети и являющиеся ее элементами, могут добавляться в Сеть или исчезать из нее случайным образом в силу разных причин. Чтобы сохранить способность решать поставленные задачи, Сеть должна быть живучей.

Живучесть автоматизированной системы (АС) — свойство АС, характеризующее способность выполнять установленный объем функций в условиях воздействий внешней среды и отказов компонентов системы в заданных пределах. Автоматизированная система (АС) — система, состоящая из персонала и комплекса

средств автоматизации его деятельности, реализующая информационную технологию выполнения установленных функций. Поскольку в Сети присутствует обслуживающий персонал, а метеокомплексы автоматизируют деятельность по получению метеорологических данных, то можем считать Сеть автоматизированной системой.

Законы распределения появления или исчезновения элементов Сети неизвестны, получить их не представляется возможным, поэтому показатель живучести Сети не должен зависеть от законов распределения, то есть не должен быть вероятностным. На момент написания статьи известен один такой показатель — d -инвариантность. Сравнение d -инвариантности с другими возможными показателями и ее преимущества рассмотрены в [11].

***D*-инвариантность**

Если применить предложенное выше определение живучести к структуре сети метеокомплексов, то можно сказать, что структурная живучесть характеризует способности структуры сети противостоять дестабилизирующим факторам. Дестабилизирующими факторами для сети метеокомплексов являются: естественный отказ, действия вандалов или злоумышленников, выход из строя в силу природных причин и т. д. На графе, моделирующем структуру сети, дестабилизирующие факторы отображаются посредством:

- 1) изменения степени вершин — числа связей, которые может образовать вершина;
- 2) удаления ребер;
- 3) удаления вершин.

Определение d-инвариантности

Пусть $G(V, E)$ — граф, где $V = \{v_i\}, i = \overline{1, N}$ — множество вершин и N — число вершин, а $E = \{e_i\}, i = \overline{1, L}$ — множество ребер и L — число ребер; $W = (w_i)$, $w_i \in [0; 1], i = \overline{1, N + L}$ — множество весов элементов графа, w_{v_i} — вес v_i -й вершины, w_{e_i} — вес e_i -го ребра, $w_v^* = \max_{1 \leq i \leq N} \{w_{v_i}\}$ — максимальный вес вершины в графе, $w_e^* = \max_{1 \leq i \leq L} \{w_{e_i}\}$ — максимальный вес ребра в графе. Тогда ***дестабилизиинвариантностью*** (далее d -инвариантностью) по вершинам называется величина

$$D_v = \prod_{i=1}^N \frac{w_{v_i}}{w_v^*},$$

а d -инвариантность по ребрам рассчитывается по формуле

$$D_e = \prod_{i=1}^L \frac{w_{e_i}}{w_e^*},$$

и D -инвариантность структуры есть

$$D_{ev} = D_e D_v.$$

Значимость элемента модели (вес вершины или дуги графа) может быть как субъективной, так и объективной. Субъективные веса назначаются экспертами: например, специальная метеостанция или метеостанция в особом месте более важна, чем обычная метеостанция. Объективными весами могут быть, например, степени вершин, число путей, проходящих через вершину или ребро. Один из возможных методов расчета значимости каждого элемента структуры с учетом большого числа показателей значимости приведен в работе [11].

Достоинства d -инвариантности заключаются в следующем:

- она пригодна для синтеза структуры живучей сети метеокомплексов, состоящей из разнородных элементов;
- возможен расчет без проведения статистических испытаний;
- может применяться при синтезе структуры живучей сети метеокомплексов в реальном масштабе времени, например в процессе самоорганизации. Так, структура может «собираться» из кусочков, устремляя к единице данный показатель каждый раз, как появляется новая информация о доступных или утраченных метеостанциях.

К недостаткам d -инвариантности относится необходимость значительных вычислительных мощностей для точного расчета d -инвариантности графов с большим числом вершин и дуг.

Свойства d -инвариантности

d -инвариантность имеет следующие свойства:

- показывает равномерность распределения весов (значимости) по элементам структуры. Если значимость всех ребер/вершин одинакова, то d -инвариантность равна единице, то есть структуре безразлично, какой элемент будет удален;
- область значений $[0; 1]$.

Следовательно, d -инвариантность показывает, насколько структура сбалансирована (симметрична) относительно воздействия дестабилизирующих факторов.

Качество структур

Живучесть структур предлагается оценивать d -инвариантностью. Если на заданных множествах V, E возможны несколько структур с одинаковой d -инвариантностью, то для сравнения структур между собой предлагается использовать показатель качества структуры, выявляющий структуру с наименьшим средним числом связей на одну вершину. Показатель качества рассчитывается следующим образом.

Пусть x_i — степень вершины v_p , а x_{cp} — средняя степень вершин:

$$x_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}.$$

Тогда качество структуры ищется в виде отношения d -инвариантности структуры к средней степени вершин:

$$J = \frac{D_{ev}}{x_{cp}}$$

Если граф вырожден, то есть состоит из одной вершины, считается, что ее степень и d -инвариантность равны единице, а значит, $x_{cp} \geq 1$, $D_{ev} \in [0;1]$, и, следовательно, $J \in [0;1]$.

Результаты

Подробно d -инвариантность и качество наиболее распространенных структур, таких как полносвязная структура, звезда, гиперкуб, кольцо, решетка, шина, тор, а также перспективные структуры-циркулянты, рассмотрены в [11].

Таблица 1

Полносвязная структура и звезда
Fully connected structure and star

N	Звезда				Полносвязная структура			
	4	5	6	16	4	5	6	16
D_v	0,1250	0,0256	0,0041	0,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
D_e	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
D_{ev}	0,1250	0,0256	0,0041	0,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
x_{cp}	1,5000	1,6000	1,6667	1,8750	4,0000	5,0000	6,0000	16,0000
J	0,0833	0,0160	0,0025	0,0000	0,2500	0,2000	0,1667	0,0625

Нет противоречия опытным данным о том, что самая живучая структура — полносвязная. Поскольку в данной структуре все элементы соединены друг с другом попарно, то все возможные связи уже образованы, а значит, она содержит максимально возможное число колец. Однако с увеличением числа вершин возрастает число избыточных связей, поэтому уменьшается качество структуры. Приведенные выкладки относятся к любой сети, структура которой описывается графами.

Из табл. 1 понятно, что в смысле d -инвариантности более живучи звезды с меньшим числом лучей. Это подтверждается опытом *практической эксплуатации* компьютерных и телекоммуникационных сетей.

Из табл. 2 видна зависимость: чем больше элементов в шине, тем меньше ее живучесть. Это соответствует *практическому опыту эксплуатации* сетей, построенных на базе шины. Используя данные этой таблицы, можно сказать, что структуры, содержащие кольца, более живучи.

Из данных, приведенных в табл. 3, следует неожиданный вывод. Ячейка имеет вершины с наибольшей степенью, но обладает самой маленькой живучестью, то есть качество такой структуры минимально.

Таблица 2

Общая шина (линейка) и кольцо
Bus (rule box) and ring

N	Кольцо				Шина			
	4	5	6	16	4	5	6	16
D_v	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,3600	0,1914	0,1483	0,0007
D_e	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,5625	0,4444	0,2439	0,0014
D_{ev}	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,2025	0,0851	0,0362	0,0000
x_{cp}	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	1,5000	1,6000	1,6667	1,8750
J	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,1350	0,0532	0,0217	0,0000

Таблица 3

Решетка, тор, гиперкуб и циркулянт (см. рис. 2 и 3)
Mesh, torus, hypercube and circulant (see fig. 2 and 3)

N = 16

N	Гиперкуб	Решетка	Тор	Ячейка
D_v	1,0000	0,0667	0,2978	0,0504
D_e	1,0000	0,0079	0,1428	0,0000
D_{ev}	1,0000	0,0005	0,0425	0,0000
x_{cp}	4,0000	3,0000	3,5000	4,1250
J	0,2500	0,0002	0,0122	0,0000

Для всех циркулянтов $D_v = 1$, $D(16;1,6)$ является менее живучей, чем $D(16;1,7)$, в смысле d -инвариантности.

Необходимо отметить, что поскольку d -инвариантность не является вероятностным показателем, то перечень оптимальных в смысле d -инвариантности структур не изменится, если изменять законы распределения дестабилизирующих факторов, воздействующих на сеть метеостанций.

Для синтеза конкретной структуры живучей сети метеостанций можно воспользоваться методом, предложенным в [12], либо методами управления роом.

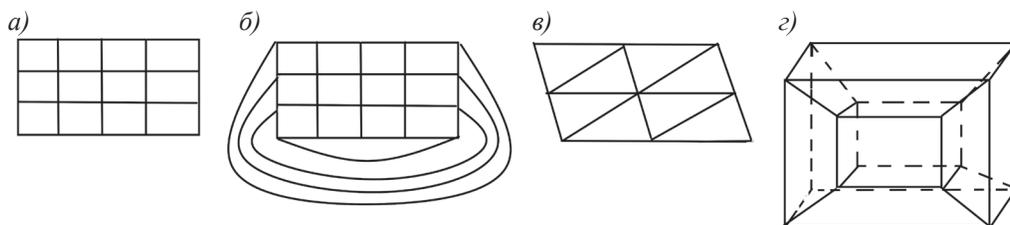


Рис. 2. Типовые структуры информационно-вычислительных систем.

a — решетка, б — тор, в — ячейка, z — гиперкуб.

Fig.2. Structural models of information computation system.

a — grid, б — torus, в — mesh, z — hypercube.

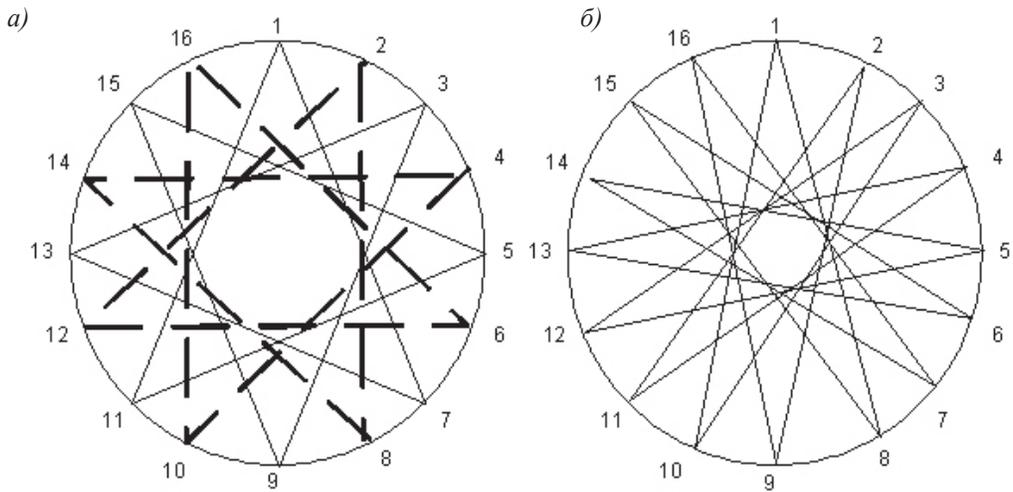


Рис. 3. Циркулянты.

a — циркулянт (16; 1, 6), *б* — циркулянт (16; 1, 7).

Fig. 3. Circulants.

a — circulant (16; 1, 6), *б* — circulant (16; 1, 7).

Выводы

Таким образом, цель, поставленная в исследовании, достигнута, и задача метеорологического сопровождения транспортно-логистических систем, обозначенная в [<http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201612010007.pdf>] как стратегическая для РФ, может быть решена посредством внесения структурной избыточности. Наиболее оправдано создание сети метеоконплексов, имеющей живучую структуру, — циркулянт. Однако в силу того, что метеостанции размещаются в специальных местах, выбор конкретной структуры живучей сети метеоконплексов зависит от возможностей разместить метеоконплексы на местности, в воздушном или водном пространстве и организовать связи между ними. Применение *d*-инвариантности и качества структуры позволит выбрать максимально живучую структуру из всех допустимых вариантов, а значит, обеспечить максимально возможные значения Ω и P .

Список литературы

1. Cyber-Physical Systems – Are Computing Foundations Adequate? Edward A. Lee Department of EECS, UC Berkeley Position Paper for NSF Workshop on Cyber-Physical Systems: Research Motivation, Techniques and Roadmap, October 16–17, 2006, Austin, TX https://ptolemy.berkeley.edu/publications/papers/06/CPSPPositionPaper/Lee_CPS_PositionPaper.pdf. [Электронный ресурс]. Дата обращения 11.12.2019.
2. Кара-Сал А., Левченко М. Концепция цифровой цепочки поставок // Электронный научно-практический журнал «Молодежный научный вестник». 2018. [Электронный ресурс]. http://www.mnvnauka.ru/2018/06/06_2018.pdf#page=69. Дата обращения 11.12.2019.

3. Шваб К. Четвертая промышленная революция World Economic Forum. 2016. АНО ДПО «Корпоративный университет Сбербанка», 2016.
4. Иванов Д.А., Иванова М. А., Соколов Б.В. Анализ тенденций изменения принципов управления предприятиями в условиях развития технологий Индустрии 4.0. DOI 10.15622/sp.60.4 SPIIRAS Proceedings. 2018. Issue 5(60). <http://proceedings.spiiras.nw.ru/index.php/sp/article/view/3796/2233>
5. Свистунова И.Г., Боговиз А.В., Попкова Е.Г. Инновационная модель агропромышленного воспроизводства в условиях индустрии 4.0: особенности и перспективы // АПК: экономика, управление. 2018. № 5. С. 4—10.
6. Антонович К.М., Фролова Е.К. Обзор современных методов получения метеорологической информации для использования в ГИСС технологиях // ГЕО-СИБИРЬ. 2006. № 2. С. 70—74.
7. Вербицкая Е.М. Современные методы и технологии прогнозирования метеорологических параметров. Хабаровск, 2018. 87 с.
8. Kristine C. Harper. Weather by the Numbers: The Genesis of Modern Meteorology. MIT Press, 2008. 320 p.
9. Гасников О.А., Гусева В.И., Костенич А.В., Мастрюков С.И., Соболева М.Н., Ставров К.Г. К вопросу о создании системы статических баз показателей фоновых условий природной среды для информационной поддержки морских радиоэлектронных средств // Навигация и гидрография. 2018. № 51. С. 63—70.
10. Петухов Г.Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. М.: МО СССР, 1989.
11. Грызунов В.В. Оценивание живучести неоднородных структур // Вестник СибГУТИ. 2011. № 1. С. 28—35.
12. Грызунов В.В. Метод динамического формирования пулов в информационно-вычислительных системах военного назначения // Информационно-управляющие системы. 2015. № 1. С. 13—20. doi:10.15217

References

1. Cyber-Physical Systems — Are Computing Foundations Adequate? Edward A. Lee Department of EECS, UC Berkeley Position Paper for NSF Workshop on Cyber-Physical Systems: Research Motivation, Techniques and Roadmap October 16—17, 2006 Austin, TX https://ptolemy.berkeley.edu/publications/papers/06/CPSPPositionPaper/Lee_CPS_PositionPaper.pdf. [Electronic resource]. Accessed 11.12.2019.
2. Kara-Sal A., Levchenko M. Concept of digital supply chain. *Elektronnyj nauchno-prakticheskij zhurnal «Molodezhnyj nauchnyj vestnik»*. Electronic Scientific and Practical magazine «Youth scientific vestnik». 2018, June. http://www.mnvnauka.ru/2018/06/06_2018.pdf#page=69. [Electronic resource]. Accessed 11.12.2019. [In Russian].
3. Shvab K. The fourth industrial revolution World Economic Forum® 2016. *ANO DPO «Korporativnyj universitet Sberbanka»*. ANO DPO «Corporate University for Sberbank Russia», 2016. [In Russian].
4. Ivanov D.A., Ivanova M.A., Sokolov B.V. Analysis of transformation trends in enterprise management principles in the era of Industry 4.0 technology. DOI 10.15622/sp.60.4. *Trudy SPIIRAN*. SPIIRAS Proceedings. 2018, 5(60). <http://proceedings.spiiras.nw.ru/index.php/sp/article/view/3796/2233> [In Russian]
5. Svistunova I.G., Bogoviz A.V., Popkova E.G. Innovative model of agro-industrial reproduction in the conditions of the industry 4.0: features and prospects. *APK: ekonomika, upravlenie*. APK: economy, management. 2018, 5: 4—10. [In Russian].
6. Antonovich K.M., Frolova E.K. Review of current methods of obtaining meteorological information for use in GISS technologies. *GEO-SIBIR'.* GEO-SIBERIA. 2006, 2: 70—74. [In Russian].
7. Verbiцкая Е.М. *Sovremennye metody i tekhnologii prognozirovaniya meteorologicheskikh parametrov. Metodicheskoe posobie po ispol'zovaniyu produkcii chislennykh prognozov pogody*. Modern meteorological forecasting methods and technologies. Methodological manual on the use of numerical weather forecast products. Khabarovsk, 2018: 87 p. [In Russian].
8. Kristine C. Harper. Weather by the Numbers: The Genesis of Modern Meteorology. MIT Press, 2008: 320 p.
9. Gasnikov O.A., Guseva V.I., Kostenich A.V., Mastryukov S.I., Soboлева M.N., Stavrov K.G. On the issue of creating a system of static databases of background environmental conditions for information

- support of marine radio-electronic means. *Navigaciya i gidrografiya*. Navigation and hydrography. 2018, 51: 63–70. [In Russian].
10. *Petuhov G.B. Osnovy teorii effektivnosti celenapravlennyh processov*. Fundamentals of the theory of the effectiveness. M.: MO USSR, 1989. [In Russian].
 11. *Gryzunov V.V.* The estimation of the survivability of heterogeneous structure. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta telekommunikacij i informatiki (SibGUTI)*. Vestnik SibGUTI. 2011, 1: 28–35. [In Russian].
 12. *Gryzunov V.V.* Dynamic Aggregation of Pools in Military Computing Systems. *Informacionno-upravlyayushchie sistemy*. Management information systems. 2015, 1: 13–20. doi:10.15217 [In Russian].

Статья поступила 17.04.2019

Принята после повторной доработки к публикации 16.03.2020

Сведения об авторах

Грызунов Виталий Владимирович, канд. техн. наук, кафедра информационных технологий и систем безопасности Российского государственного гидрометеорологического университета, e-mail: viv@a-tree.ru

Нестерова Ангелина Олеговна, студент, кафедра метеорологии, климатологии и охраны атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета, e-mail: lina01nesterova@mail.ru

Information about authors

Gryzunov Vitaliy Vladimirovich, PhD (Eng. Sci.), associate professor, Department of Information Technology and Security Systems, Russian State Hydrometeorological University

Nesterova Angelina Olegovna, Student, Department of Meteorology, Climatology and Atmosphere Protection, Russian State Hydrometeorological University