

УДК 004.75

DOI: 10.26102/2310-6018/2019.26.3.003

С.П. Воробьёв  
**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ СЕТЕВОЙ  
ИНФРАСТРУКТУРЫ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ КОРПОРАТИВНОЙ  
СИСТЕМЫ НА БАЗЕ ОБЛАЧНЫХ, ТУМАННЫХ И ГРАНИЧНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ**

*Южно-Российский государственный политехнический университет  
(НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия*

*В этой статье описывается постановка математической модели оптимизации структуры вычислительной сети распределенной корпоративной информационной системы на основе многоуровневой топологии. Многоуровневая топологическая структура позволяет представить структуру сети, которая включает детальное описание взаимосвязей между такими объектами сети, как активное оборудование, рабочие станции и серверы на различных уровнях модели, показать, как единое целое разнообразные аспекты управления передачей данных с поддержкой протоколов QoS, техническую и программную реализации, информационное пространство и менеджмент. В результате проектирование вычислительной сети корпоративной системы может быть выполнено как разработка единой сетевой инфраструктуры распределенных программно-аппаратных средств, которая включает взаимосвязанные и взаимодействующие между собой подсистемы, решающие функциональные задачи по управлению и планированию деятельностью предприятия в рамках единого подхода по достижению цели получения оптимальной архитектуры и отвечающих комплексу системных и функциональных требований по производительности, пропускной способности, надежности и др. Используется парадигма облачных, туманных и граничных вычислений, что позволяет строить современную сетевую инфраструктуру в рамках концепции промышленного IoT. Наиболее характерным примером использования данной парадигмы могут являться интеллектуальные сети электроснабжения, распределенные системы мониторинга транспортировки газа либо нефтепродуктов, распределенные системы промышленного предприятия. Для решения задачи предлагается использовать подход на основе модифицированного генетического алгоритма. Приводятся результаты экспериментов.*

**Ключевые слова:** многоуровневая топологическая структура, распределенная корпоративная система, вычислительная сеть, облачные вычисления, туманные вычисления, граничные вычисления, генетический алгоритм

**Введение.** В настоящее время острая необходимость оптимального проектирования распределенных корпоративных информационных систем обусловлена кардинальным усложнением технологических процессов на производстве, необходимостью создания единого информационного пространства управления предприятием и технологическим процессом производства, необходимостью сбора технологических и контрольных параметров в рамках достаточно обширного территориально распределенного комплекса, проведением контроля параметров в условиях неопределенности, при воздействии дестабилизирующих

факторов, а также тем фактом, что на производстве, управлении и в научных исследованиях применяются информационные системы, которые не в полной мере отвечают всем необходимым техническим характеристикам: оперативности, широкому диапазону исследуемых параметров, возможности контролировать комплекс определяемых параметров. Достаточно большое множество существующих информационных систем требуют решение задач повышения устойчивости к воздействию дестабилизирующих факторов, функционированию в условиях неопределенности, возможности выбора метода контроля, управления, мониторинга и изменения структуры информационной системы в рамках технологического процесса производства и реализации основных бизнес-процессов.

Характерными примерами территориально распределенного многофункционального информационного комплекса могут служить:

- интеллектуальные сети электроснабжения, которые отражают новый взгляд на использование информационных каналов и технологических аспектов сбора информации о производстве, передаче электроэнергии, а также энергопотреблении;
- территориально-распределенные системы транспортировки газа либо нефтепродуктов, которые обеспечивают: телеизмерение и трансляцию технологических параметров; телеконтроль состояния, телеуправление крановыми узлами, диагностику; архивирование и документирование информации и действий оператора;
- распределенные корпоративные системы предприятия, которые обеспечивают создание единого интегрированного информационного пространства бизнес-процессов управления предприятием и управления технологическим процессом производства.

Современные тенденции проектирования и разработки распределенных информационных систем многофункциональных комплексов предполагают с учетом предлагаемых преимуществ технологий IoT построение на основе архитектурных решений облачных, туманных и граничных вычислений.

Облачные вычисления (cloud computing) – это концепция построения распределённой системы с предоставлением возможности сетевого доступа к масштабируемому и эластичному множеству общих физических или виртуальных ресурсов. Туманные вычисления (fog computing) – это структура, которая располагается в архитектуре общей сети между конечными устройствами (датчиками и устройствами измерительной системы) и центрами обработки данных, что позволяет повысить качество обслуживания, время задержки и уменьшить объём трафика через сети

общего пользования. Граничные вычисления (edge computing) выступают дальнейшим развитием технологий в котором инфраструктура вычислений еще больше приближается к конечному клиенту, и большая часть операций выполняется именно в граничной сети конкретного клиента. Если в туманных информационных системах вычисления производятся в узле недалеко от места сбора данных, то граничные позволяют обрабатывать данные там же, где они получены, что позволяет обеспечить мгновенный отклик, т.к. в этом случае используется программируемый логический контроллер, который может входить в систему управления производственными или технологическими процессами. Он осуществляет контроль конечных устройств и имеет возможность мгновенно обрабатывать полученные данные.

Проектирование оптимальной структуры сложного взаимосвязанного комплекса программно-технических решений облачных, туманных и граничных вычислений может быть реализовано средствами многоуровневого представления топологии вычислительной сети [1,2].

**Математическая постановка задачи оптимизации.** Постановка задачи оптимизации многоуровневой топологии вычислительной сети распределенной корпоративной информационной системы с точки зрения парадигмы облачных, туманных и граничных вычислений уровней также может предусматривать задачу распределения серверов и функциональных подсистем, а также необходимых информационных ресурсов по уровням «облака», «туманной и граничной» систем.

В этом случае для описания распределенной корпоративной системы  $S$  с помощью многоуровневого подхода задается пара  $(O^{(l)}, T^{(l)})$ , которая состоит из множества объектов системы  $O^{(l)}$ , а  $T^{(l)}$  – семейство подмножеств множества  $O$ , которые задают описание топологической структуры системы  $S$  на  $l$ -ом уровне  $l=\{el, fl, cl\}$ , соответственно для уровней граничных, туманных и облачных вычислений. Для задания элементов функциональной и информационных компонент системы задается множество, которое описывает функциональные подсистемы  $FSS = \{FSS_i, i=\overline{1, m}\}$ ; множество информационных ресурсов для  $FSS_i$   $IM^i = \{IM^i_j, j=\overline{1, kir}, i=\overline{1, m}\}$ ; множество серверов распределенной корпоративной системы  $SR = \{SR_j, j=\overline{1, ks}\}$ . Объем транзитного трафика на  $l$ -уровне задается при помощи программно определяемой функции  $FTR(O^{(l)}, T^{(l)})$ .

На уровне граничных вычислений следует найти множество  $T_{i_{opt}}^{(el)}$ , которое описывает месторасположение серверов, сервисов, подсистем и их ресурсов оптимальным образом с точки зрения критерия

$$g^{(el)}(T_{i_{opt}}^{(el)}, SR^{(el)}, FSS^{(el)}, IM^{(el)}) \rightarrow \min_{i_{opt}} \max. \quad T_{i_{opt}}^{(el)} = \{T^{(el)}\}$$

при выполнении ограничений  $h_j^{(el)}(T_{i_{opt}}^{(el)}, SR^{(el)}, FSS^{(el)}, IM^{(el)}) \leq H_j^{(el)}, j = \overline{1, m^{(el)}}$ , где  $m^{(el)}$  - количество ограничений топологической структуры вычислительной сети на уровне граничных вычислений выбранной модели.

На уровне туманных вычислений следует определить подмножество  $T_{i_{opt}}^{(fl)}$  из семейства  $T^{(fl)}$ , которое задает вхождение объектов, соответствующих активному сетевому оборудованию  $X^{(fl)}$  в распределенную структуру, а также серверов и информационных ресурсов подсистем при

$$g^{(fl)}(T_{i_{opt}}^{(fl)}, SR^{(fl)}, FSS^{(fl)}, IM^{(fl)}) \rightarrow \min_i \max$$

с соблюдением как ограничений сетевого стандарта, так и функциональных ограничений

$$h_j^{(fl)}(T_{i_{opt}}^{(fl)}, SR^{(fl)}, FSS^{(fl)}, IM^{(fl)}) \leq H_j^{(fl)}, j = \overline{1, m^{(fl)}}$$

На уровне облачных вычислений множество  $X^{(cl)}$  рассматривается активное сетевое оборудование, а также серверы, сервисы и информационные ресурсы и требуется определить подмножество  $T_{i_{opt}}^{(cl)}$  при оптимальном значении критерия

$$g^{(cl)}(T_{i_{opt}}^{(cl)}, SR^{(cl)}, FSS^{(cl)}, IM^{(cl)}) \rightarrow \min_i \max$$

при соблюдении ограничений, включая ограничения и по качеству обслуживания

$$h_j^{(cl)}(T_{i_{opt}}^{(cl)}, SR^{(cl)}, FSS^{(cl)}, IM^{(cl)}) \leq H_j^{(cl)}, j = \overline{1, m^{(cl)}}$$

Детализация математической модели предусматривает множество рабочих станций  $WS = \{WS_i, i = \overline{1, n_{ws}}\}$ , где  $n_{ws}$  - количество рабочих станций; множество элементов активного сетевого оборудования (коммутаторы, маршрутизаторы и т.д.)  $SW = \{SW_i, i = \overline{1, n_{sw}}\}$ , где  $n_{sw}$  - количество элементов активного сетевого оборудования; множество серверов  $SR = \{SR_i, i = \overline{1, n_{sr}}\}$ ,  $n_{sr}$  - количество серверов; множество систем хранения  $SS = \{SS_i, i = \overline{1, n_{ss}}\}$ ,  $n_{ss}$  - количество систем хранения. В результате множество объектов сети  $O = WS \cup SR \cup SW \cup SS$ .

Для построения модели вводятся следующие переменные:

$$x_{O_i}^{el} = \begin{cases} 1, & \text{если } i - \text{элемент множества } O \text{ принадлежит уровню} \\ & \text{граничных вычислений } T^{el} \\ 0 & - \text{ в противном случае} \end{cases} ;$$

$$x_{O_i}^{fl} = \begin{cases} 1, & \text{если } i - \text{ элемент множества } O \text{ принадлежит} \\ & \text{уровню туманных вычислений } T^{fl} \quad ; \\ 0 & - \text{ в противном случае} \end{cases}$$

$$x_{O_i}^{cl} = \begin{cases} 1, & \text{если } i - \text{ элемент множества } O \text{ принадлежит уровню облачных вычислений } T^{cl} \\ 0 & - \text{ в противном случае} \end{cases} ;$$

Для реализации распределенной структуры информационной системы вводятся следующие условия и ограничения:

каждый элемент принадлежит только одному уровню

$$\sum_{O_i} (x_{O_i}^{el} + x_{O_i}^{fl} + x_{O_i}^{cl}) = 1$$

Рабочая станция может быть подключена к только к одному коммутатору  $SW_j$

$$\sum_{j=1}^{n_{sw}} x_{ws_i sw_j} x_{sw_j}^{el} = 1, i = \overline{1, n_{ws}}$$

где

$$x_{ws_i sw_j} = \begin{cases} 1, & \text{если рабочая станция } WS_i \text{ подключена к коммутатору } SW_j \\ 0 & - \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

Подключение активного сетевого оборудования уровня граничных вычислений к уровню туманных вычислений с учетом наличия резервных соединений

$$\sum_{j=1}^{n_{sw}} x_{sw_i sw_j} x_{sw_i}^{el} x_{sw_j}^{fl} \geq 1, i = \overline{1, n_{sw}}$$

где

$$x_{sw_i sw_j} = \begin{cases} 1, & \text{если коммутатор } SW_i \text{ подключен к коммутатору } SW_j \\ 0 & - \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

Серверы могут быть подключены к активному сетевому оборудованию уровня туманных вычислений

$$\sum_{j=1}^{n_{sw}} x_{sr_i sw_j} x_{sw_j}^{fl} = 1, i = \overline{1, ks}$$

где

$$x_{sr_i sw_j} = \begin{cases} 1, & \text{если сервер } SR_i \text{ подключен к коммутатору } SW_j \\ 0 & - \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

Подключение активного сетевого оборудования уровня туманных вычислений к уровню облачных вычислений

$$\sum_{j=1}^{n_{sw}} x_{sw_i sw_j} x_{sw_i}^{fl} x_{sw_j}^{cl} \geq 1, i = \overline{1, n_{sw}}$$

Серверы могут быть подключены к активному сетевому оборудованию уровня облачных вычислений

$$\sum_{j=1}^{n_{sw}} x_{sr_i sw_j} x_{sw_j}^{cl} = 1, i = \overline{1, ks}$$

В рамках физической топологии должна быть обеспечена связность вычислительной сети

$$conn(o_i, o_j) = 1, o_i \in WS \cup SR \cup SS, i \neq j$$

где  $conn()$  – функция, которая равна единице, если существует путь между объектами сети  $o_i$  и  $o_j$ .

Эффективность реализуемой топологической структуры определяется следующей формулой

$$FT(x_{o_i}^{el}, x_{o_i}^{fl}, x_{o_i}^{cl}, x_{ws_i sw_j}, x_{sr_i sw_j}, x_{ss_i sw_j}, x_{sw_i sw_j}, x_{sw_i}^{el}, x_{sw_j}^{fl}, x_{sw_j}^{cl}) \rightarrow \min \max$$

**Алгоритм решения.** Учитывая достаточно большую размерность определенных информационных систем, процесс их проектирования требует решения NP-полной задачи и целесообразно использовать генетические алгоритмы. Преимуществами этих алгоритмов является то, что они используют формализованный набор параметров, которые представляются аргументами целевой функции; в процессе процедуры поиска генетический алгоритм выполняет обработку нескольких точек поискового пространства одновременно, что позволяет исключить попадания в локальный экстремум полимодальной целевой функции; для генерации новых точек возможного решения генетический алгоритм может использовать вероятностные и детерминированные процедуры, что дает существенно больший эффект [3-6].

Применение генетического алгоритма требует разработки метода кодирования решения. Для реализации была предложена структура хромосомы которая представляет строку, состоящую из генов, определяющих взаимосвязи объектов сетевой инфраструктуры на уровнях облачных, туманных и граничных вычислений.

Генетический алгоритм включает следующие шаги:

- определяется начальная популяция из  $n$  хромосом, представляющих вариант решения – в результате объекты сетевой инфраструктуры случайным образом распределяются по уровням.

- производится вычисление коэффициента пригодности хромосомы и в соответствии с его значением создается популяция, которая включает наиболее приспособленные особи.
- пересчитывается распределение объектов сети для каждой популяции, используя наилучшую хромосому из текущей популяции.
- получаем новую сетевую инфраструктуру и алгоритм продолжается до достижения критерия останова.

В результате выполнения соответствующих генетических операторов формируется хромосома, представляющая собой возможный вариант решения. Во время исследования генетического алгоритма для решения задачи выбора оптимального варианта в распределённых информационных системах использовался ряд подходов и модификаций классического алгоритма, которые подразумевали, в частности, переменную мутацию, при которой вероятность мутации изменяется в зависимости от потребностей алгоритма.

**Результаты экспериментов.** На рисунке 1 приведены графики зависимости значения целевой функции от количества коммутаторов и рабочих станций для различных вариантов модификации генетического алгоритма, а также сравнение с результатами решения задачи методом ветвей и границ. Модифицированный генетический алгоритм позволяет получить отклонение значения целевой функции от оптимального в пределах 3–7 %.

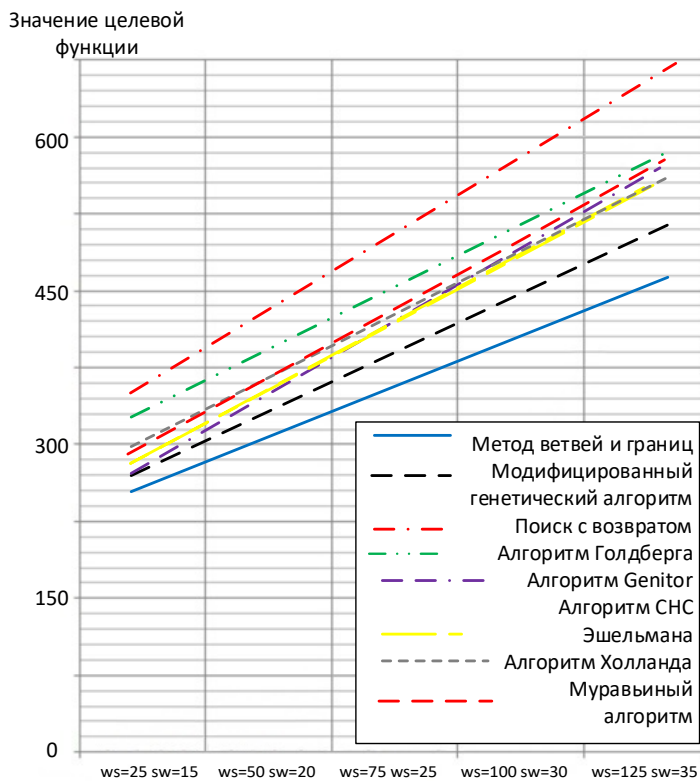


Рисунок 1 - Зависимость значения целевой функции от количества коммутаторов и рабочих станций для различных вариантов генетического алгоритма и метода ветвей и границ.

Учитывая масштаб современных распределенных многофункциональных измерительных систем при построении интеллектуальных сетей электроснабжения или систем мониторинга транспортировки газа либо нефтепродуктов целесообразным становится использование генетического алгоритма для определения рационального варианта инфраструктуры вычислительной сети. Также генетические алгоритмы следует использовать как инструмент управления сетью SDN измерительного комплекса.

**Заключение.** В результате распределенная корпоративная система может быть описана математической моделью в рамках многоуровневой топологической структуры вычислительной сети, объединяющей комплексы облачных, туманных и граничных вычислений в единую сетевую инфраструктуру. Это позволяет строить современную единую сетевую инфраструктуру в рамках концепции промышленного IoT, что в свою очередь обеспечивает виртуализацию производственных и технологических функций как в рамках мониторинга, так и в рамках управления, возможность анализа больших объемов данных с целью построения модели улучшения клиентского опыта и сокращению его затрат, построение новых эффективных бизнес-моделей, а также ускорение реакции на динамично изменяющиеся требования рынка и общей



тенденции сокращения жизненного цикла продукции. С другой стороны, унификация и стандартизация технологических подходов распределенных корпоративных систем на базе моделей облачных, туманных и граничных вычислений облегчают управление и делают инфраструктуру доступной для среднего и малого бизнеса в рамках общего направления цифровизации. Учитывая масштаб современных интеллектуальных сетей электроснабжения или систем мониторинга транспортировки газа либо нефтепродуктов, а также распределенных корпоративных систем предприятия целесообразным становится использование генетического алгоритма для определения рационального варианта инфраструктуры вычислительной сети. Также генетические алгоритмы следует использовать как инструмент управления сетью SDN корпоративной системы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. S. P. Vorobyev The mathematical model of building a multi-level topology of computer network for distributed corporate system based on the inverse problem // Journal of Engineering and Applied Sciences - 2016. - Vol. 11, Is. 6. - P. 1243-1247.
2. Воробьев С.П. Возможные направления использования концепции многоуровневой топологии и оптимизации распределенных корпоративных систем /Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. - 2009. - № 8. - С. 131-143
3. Гудман, Э.Д. Эволюционные вычисления и генетические алгоритмы. Обзор прикладной и промышленной математики / Э.Д. Гудман, А.П. Коваленко. – Т. 3, вып. 5. – М.: ТВП, 1966. – 760 с.
4. Back, T. Handbook of Evolutionary Computation / T. Back, D.B. Fogel, Z. Michalewicz. – Oxford University Press, New York, and Institute of Public Publishing, Bristol, 1997. – 1130 p.
5. Курейчик, В.М. Генетические алгоритмы и их применение / В.М. Курейчик. – 2-е изд., доп. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2002. – 242 с.
6. Goldberg, D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning / D.E. Goldberg. – Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1989. – 412 p.

S. P. Vorobyov

### **MATHEMATICAL MODEL OF OPTIMIZATION OF THE NETWORK INFRASTRUCTURE OF A DISTRIBUTED ENTERPRISE SYSTEM ON A CLOUD, MISTY AND EDGE TECHNOLOGIES**

*South-Russian state Polytechnic University (NPI) named after M. I. Platov,  
Novocherkassk, Russia*

*This article describes the formulation of a mathematical model to optimize the structure of the computer network of a distributed corporate information system based on a multi-level topology. Multi-level topological structure allows you to present the network structure, which includes a detailed description of the relationships between such network objects as active equipment, workstations and servers at different levels of the model, to show as a whole a variety of aspects of data transfer management with support for QoS protocols, technical and software implementation, information space and management. As a result, the design of the computing network of the corporate system can be performed as the development of a single network infrastructure of distributed software and hardware, which includes interconnected and interacting subsystems that solve functional tasks for the management and planning of the enterprise activities within a single approach to achieve the goal of obtaining an optimal architecture and meet the complex system and functional requirements for performance, bandwidth, reliability, etc. The paradigm of cloud, foggy and boundary calculations is used, which allows to build a modern network infrastructure within the framework of the industrial IoT concept. The most typical example of the use of this paradigm can be intelligent power supply networks, distributed monitoring systems for the transportation of gas or oil products, distributed systems of an industrial enterprise. To solve the problem, it is proposed to use an approach based on a modified genetic algorithm. The results of the experiments are presented.*

**Keywords:** multi-level topological structure of distributed corporate system, computer network, cloud computing, fuzzy computing, edge computing, genetic algorithm

## REFERENCES

1. Vorobyev S. P. The mathematical model of building a multi-level topology of computer network for distributed corporate system based on the inverse problem // Journal of Engineering and Applied Sciences - 2016. - Vol. 11, Is. 6. - P. 1243-1247.
2. Vorobyev S.P. Possible directions of using the concept of multilevel topology and optimization of distributed corporate systems /Issues of modern science and practice. University them. V. I. Vernadsky. - 2009. - № 8. - P. 131-143
3. Goodman, E. D. Evolutionary computation and genetic algorithms. Review of applied and industrial mathematics / E. D. Goodman, A. P. Kovalenko. – Vol. 3, vol. 5. – Moscow: TVP, 1966. – 760 p.
4. Back, T. Handbook of Evolutionary computing / T. Back, D. B. Fogel, Z. Michalewuz. Oxford University Press, New York, and Institute of Public Publishing, Bristol, 1997. – 1130 p.
5. Kureychik, V. M. Genetic algorithms and their application / V. M. kureychik. – 2nd ed. extra – Taganrog: Publishing house TRTU, 2002. – 242 p.
6. Goldberg, D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning / D.E. Goldberg. – Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1989. – 412 p.