

ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РЕКОНФИГУРАЦИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С МНОГОКАНАЛЬНЫМИ СВЯЗЯМИ

М. Хайдер

Жешувский политехнический институт
35-959 Rzeszów, ul. W.Pola 2, Pologne
факс: +48 17 865 1260, тел.: +48 17 865 1106, E-mail: mhajder@prz.rzeszow.pl

В работе рассматриваются вопросы проектирования распределенных вычислительных систем с многоканальными связями. Описывается структура задачи проектирования системы связей, определяются целевые функции проектирования и реконфигурации. Для решения проектной задачи предлагается новый подход, основанный на теоретико-множественном подходе к учету неопределенности. Работа завершается вычислительным примером.

Введение

Одним из наиболее результативных способов повышения эффективности функционирования вычислительных систем (ВС), является применение многоканальных связей. Многоканальность позволяет реализовать топологическую иерархию, суть которой заключается в одновременном использовании двух типов взаимосвязанных топологических построений: физической и логической топологии [1, 2]. Физическая топология, с использованием физических каналов передачи, связывает физические узлы. Все ее элементы имеют реальный характер, т.е. они построены на основе технических средств. Основным элементом логической топологии, является логическая дорожка. Логической дорожкой (i, j) , будем называть виртуальный канал передачи, связывающий два логических узла i и j . Соединение двух различных логических узлов в рамках одного и того же физического узла называется внутренней логической дорожкой. Если логическая дорожка связывает логические узлы, размещенные в различных физических узлах, то она называется внешней. На всей протяженности логической дорожки, преобразование формы представления информационного сигнала не выполняется. Логическая топология определяет способ связывания логических узлов с использованием логических дорожек. Соотношения между физической топологией, логическими дорожками и логической топологией показано на рис. 1.

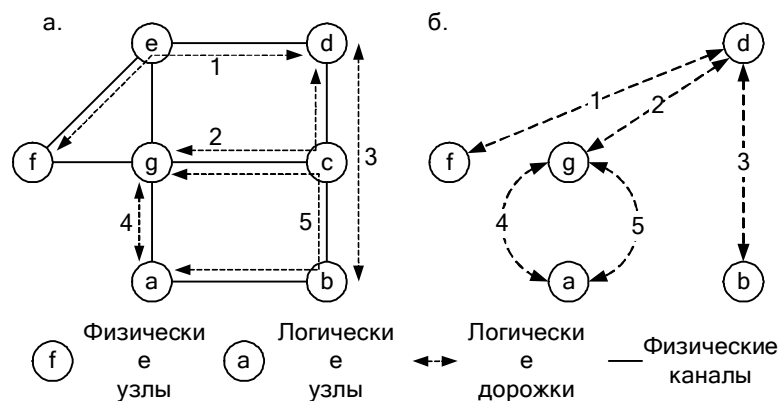


Рис.1. Логическая топология и ее элементы: а. – физическая топология вместе с логическими дорожками; б. – логическая топология.

На рис. 1 логические каналы передачи, представлены двунаправленными штриховыми линиями, каждая из которых описана числовым идентификатором. Физические каналы это непрерывные, неориентированные отрезки. Множество V_L узлов ЛТ является подмножеством множества V_F узлов физической топологии. Логическая топология из рис. 1, б, перенесена для иллюстрации на граф ФТ, показанный на рис. 1, а. Используя метод виртуализации топологии, на основании произвольных физических топологий, можно строить различные ЛТ, такие как: бинарные деревья, решетки, тороиды, различные гипертопологии и др. В зависимости от потребностей, ЛТ может быть регулярной либо нерегулярной. Основным достоинством проекции, является возможность динамической настройки (реконфигурации)

топологии в соответствии с текущими потребностями пользователей. При этом граничные параметры ЛТ будут определять параметры физической топологии. Например, если логическая топология охватывает все узлы физической, то диаметр D_L ЛТ будет не меньше диаметра D_F физической топологии.

1. Проблема проектирования и реконфигурации многоканальных связей

Высокая сложность применения известных методов проектирования для создания вычислительной системы с многоканальными связями, главным образом, является результатом топологического дуализма. Топологический дуализм, связан с сосуществованием, в рамках одной и той же системы, двух топологических организаций: физической и логической (виртуальной). Хотя реальные элементы появляются исключительно на физическом уровне, расходы построения, генерируются преимущественно на логическом уровне. Многоканальные, дуальные вычислительные системы состоят из четырех основных компонентов: физических и виртуальных каналов и узлов. При этом характеристики построения физических каналов, полностью определяются на уровне физической (реальной) архитектуры и практически не зависят от количества логических каналов образованных в рамках ФК. С другой стороны, способы построения узлов зависят, прежде всего, от количества логических каналов инцидентных к узлу (т.е. логической степени s^l физического узла). Влияние количества физических каналов подключенных к узлу, на проектирование на логическом уровне, является минимальным. Сложность проектирования связана также с фактом, что на сегодняшний день нет однозначных принципов выбора целевой функции проектирования многоканальной ВС. Часто, применение различных критериев проектирования требует использования, сильно отличающихся методов создания архитектуры ВС. Кроме этого, целевые функции не проявляют однозначного влияния на все характеристики проектируемой системы. Обычно оптимизация одного параметра (т.е. использование одного критерия), приводит к существенному изменению других характеристик, необязательно в сторону их ухудшения. Проектирование архитектуры многоканальной вычислительной системы производится преимущественно на уровне логических компонентов, в частности логической топологии [1, 2], [7].

Целевые функции проектирования ЛТ, предлагается разделить на три основные группы: первая – критерии, связанные с улучшением экономических показателей эффективности системы, вторая – с совершенствованием показателей эффективности использования доступной пропускной способности каналов, третья – с улучшением динамических характеристик системы. Предложенная классификация представлена на рис. 2.

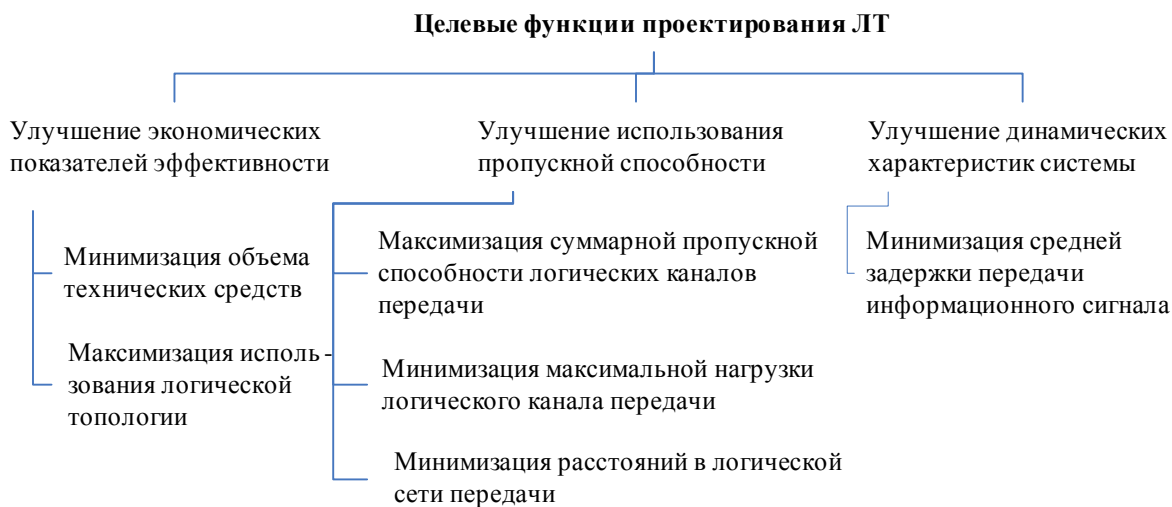


Рис. 2. Классификация целевых функций проектирования ЛТ

Применение в процессе проектирования однокритериальной оптимизации, является неэффективным и поэтому для решения задач данного класса широкое применение находит многоцелевая оптимизация (МО), обеспечивающая одновременный учет нескольких показателей качества. В МО, рассматривается множество оптимальных решений, которые не доминируют над всеми остальными решениями из данного множества, но доминируют над решениями находящиеся вне этого множества. Множество оптимальных решений определяется термином *множество Парето* и является предметом дальнейших исследований.

В течение жизненного цикла вычислительной системы ее организация существенно изменяется на этапах проектирования и реконфигурации. Для обслуживания этих этапов используются различные целевые функции либо их множества. Рассмотрим пример целевой функции этапа проектирования.

Для шага проектирования, наиболее эффективным критерием считается минимизация максимальной нагрузки λ_{\max} каналов передачи (так называемой перегрузки канала). Минимизация значения λ_{\max} связана с определением максимального количества логических дорожек для известного множества требований по отношению к трафикам. Она приводит к минимизации требуемого количества логических каналов, необходимых для реализации системы связей, чего результатом является также минимизация суммарного

количества приемно-передаточных устройств и, в конечном счете, уменьшение стоимости построения системы связей. Практическая реализация критерия требует использования нелинейного выражения позволяющего минимизировать максимальные трафики для произвольной логической дорожки. Для упрощения модели считается, что пропускные способности всех логических каналов идентичны и равны P . Тогда, целевая функция описывается выражением

$$\min \left[\max \left(\sum_{s,d} \lambda_{\|i,j\|}^{s,d} \right) \right] \approx \left\{ \frac{P}{\min \left[\max \left(\sum_{s,d} \lambda_{\|i,j\|}^{s,d} \right) \right]} \right\} \quad \forall i, j, \quad (1)$$

где: λ_{ij}^{sd} – трафик между узлами s и d использующий логический канал $\|i, j\|$.

Если в процессе проектирования допустимо одновременное использование многих критериев, то второй целевой функцией является минимизация объема необходимых технических средств (т.е. минимизация стоимости построения). Однако в виду вышесказанного, при минимизации λ_{\max} используется минимизация средней задержки передачи информационного сигнала.

Как будет показано далее, в отличие от проектирования, при реконфигурации, применение многокритериальной оптимизации менее обосновано. На этапе реконфигурации, желательна не только максимизация пропускной способности сети, но также минимизация количества вносимых изменений. Так как, каждое изменение архитектуры логических дорожек связано с необходимостью проведения трудоемкой перестройки логических каналов, требование минимизации количества изменений в ЛТ, связано с необходимостью минимизации времени недоступности связей. Нетрудно заметить, что максимизация пропускной способности и минимизация количества вносимых изменений противоречивы. Примерно, если целью процедуры проектирования, является минимизация среднего расстояния в хопах, отнесенного к канальным трафикам, количество изменений обратно пропорционально к значению расстояния. Поэтому, если при реконфигурации используются две целевые функции, то одну из них следует установить неизменной и минимизировать (максимизировать) вторую. Это позволяет получить наилучшую приемлемую реконфигурацию. Вышеприведенные рассуждения не ограничивают возможности применения многокритериальной оптимизации для одной из целевых функций реконфигурации.

Рассмотрим пример. Пусть в процессе реконфигурации связей используются две целевые функции: минимизация среднего расстояния в сети отнесенного к трафикам и минимизация количества изменений в логической топологии. Данная процедура требует выполнения двух шагов. Первый из них это выбор одной целевой функции реконфигурации при неизменности остальных, второй это минимизация выбранной функции. Данный подход, гарантирует исключительно одно, не доминирующее решение на фронте Парето. При этом получаемое решение, в значительной степени зависит от исходной точки решения и для него не возможно предусмотреть положения результата на фронте Парето.

2. Задача многокритериальной оптимизации

Рассмотрим более подробно проблему многокритериальной оптимизации, эффективное решение которой необходимо в процессе проектирования и реконфигурации многоканальной вычислительной системы. Пусть Y – множество решений проектной задачи, а y ($y \in Y$) – ее частное решение. Предполагается, что качество решения y , оценивается некоторым множеством, состоящим из n скалярных показателей $f = (f_1, f_2, \dots, f_n)$. Обычно множество показателей интерпретируется с помощью некоторого вектора эффективности F . Цель процесса проектирования – поиск в заданном множестве решений Y , наилучшего в определенном смысле решения \bar{y} . Данную постановку задачи проектирования описывает математическая модель векторной оптимизации:

$$F(\bar{y}) = \text{opt } F(y), \quad \text{для } F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}, \quad (2)$$

где: opt – оператор оптимизации вектора эффективности, определяющий принцип предпочтения вариантов решений.

Описанная задача лишь внешне аналогична задаче скалярной оптимизации. При ее решении, прежде всего, возникает проблема определения понятий лучшее и оптимальное решение, т.е. определение принципа оптимальности. В задаче скалярной оптимизации, показатель эффективности каждому варианту $y \in Y$ решения сопоставляет конкретное значение его эффективности на числовой оси f . При этом, совокупность всех возможных значений эффективности, представляет собой упорядоченное множество $\bigcup_{y \in Y} f(y) \in R_1$, являющееся отрезком $[f_{\min}, f_{\max}]$ на числовой оси f .

Заданная упорядоченность предопределяет один естественный принцип оптимальности и единственное наилучшее решение $\bar{y} \in Y$. В задаче описанной выражением (2), аналогичное множество представляет собой в пространстве n компонент, неупорядоченный пучок векторов $F(y)$ эффективности, которых концы образуют область $F = \bigcup_{y \in Y} F(y) \in R_n$. На границе этой области существуют подмножества F_0^{\min} и F_0^{\max} векторов эффективности, не улучшаемых одновременно по всем компонентам (смотри рис. 3).

Названные подмножества, соответствуют точкам f_{\min} и f_{\max} на оси f в задаче скалярной оптимизации и выделяют на множестве Y области Парето оптимальных решений Y^{\min} и Y^{\max} . Таким образом, появляется неоднозначность выбора решения $\bar{y} \in Y^{\min}$ либо $\bar{y} \in Y^{\max}$. Для однозначности выбора вводится дополнительный принцип, конкретизирующий компромисс между показателями f_1, f_2, \dots, f_n . В математическом смысле, такое правило является функционалом компонент вектора эффективности, т.е.:

$$F = \varphi[f_1, f_2, \dots, f_n], \quad (3)$$

где: $\varphi \in \Phi$ – способ свертывания показателей f_1, f_2, \dots, f_n .

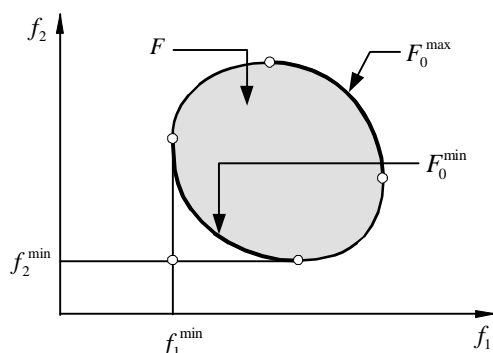


Рис. 3. Графическая иллюстрация процесса оптимизации

Введение правила свертывания φ преобразовывает вектор эффективности в скалярный функционал и приводит процесс выбора решений в условиях множественности показателей их качества к формальной процедуре оптимизации. К числу наиболее распространенных способов свертки следует отнести линейную свертку компонент f_1, f_2, \dots, f_n в скалярный критерий:

$$F(y) = \sum_{i=1}^n a_i f_i(y), \quad (4)$$

где a_i – весовые компоненты, которые моделируют принятую систему предпочтений и удовлетворяют условиям

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1 \quad a_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, n. \quad (5)$$

Данные условия в пространстве весовых компонентов, выделяют некоторую совокупность, которая интерпретируется как множество неопределенности в оценке эффективности. На рис.4. а в плоскости $a_1 a_2$, эти множества показаны для трех случаев $a_1 \approx a_2$, $a_1 \leq a_2$, $a_1 \geq a_2$.

Для данного способа свертывания показателей и случая, когда минимизации подлежат показатели f_1, f_2, \dots, f_n , наилучшим решением является точка касания гиперплоскости $\sum_{i=1}^n a_i f_i(y)$ к поверхности F_0^{\min} . Для случая $n = 2$ это точка касания прямой $a_1 f_1 + a_2 f_2$ и кривой F_0^{\min} , что показано на рис. 4, б.

Соотношение коэффициентов a_1 и a_2 определяет наклон анализируемой прямой и описывает суть компромисса между показателями f_1 и f_2 . Согласно описанному подходу, проблема выбора решения сводится к назначению лицом принимающим решение (ЛПР) определенных значений коэффициентов $a_i \in [0, 1]$ и тогда свертка отражает множество возможных отношений к неопределенности оценки эффективности.

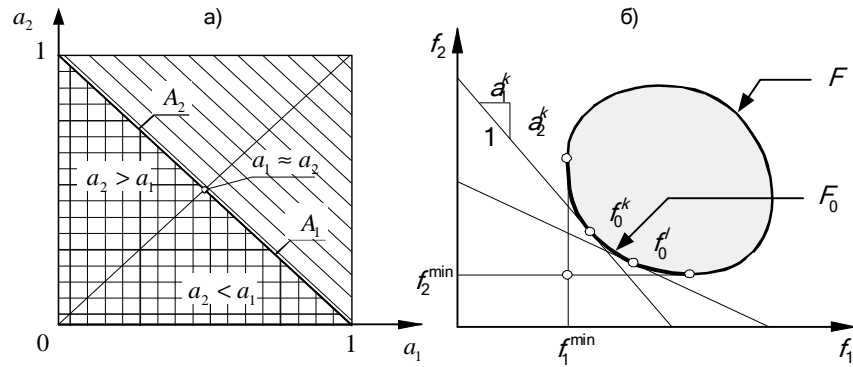


Рис. 4. Графическая иллюстрация учета скалярных показателей

Суть предложенного метода, сводится к оптимизационной процедуре, определяющей единственное решение $\bar{y} \in Y^{\min}$, а проблема выбора решений преобразуется к проблеме выбора способов свертывания $\varphi \in \Phi$. И так, путем строгого ранжирования показателей эффективности и точного задания всех количественных характеристик процедуры (весовых коэффициентов, ограничений и др.) полностью устраняется неоднозначность либо неопределенность при оценке уровня эффективности. С методологической точки зрения, такой подход соответствует известным попыткам замены неопределенностей одним номинальным случаем. Однако, эквивалентная замена исходного множества, как правило, не существует и тем самым полное устранение неопределенности не всегда корректно. Отмеченная проблема может решаться с использованием метода экспертных оценок, которые основаны на использовании высоко-сложных процедур согласования и выявления предпочтений. Из-за этого, их применение для проектирования и реконфигурации вычислительных систем строго ограничено.

3. Предлагаемый метод решения задачи

В виду неэффективности известных методов, в настоящей работе рассматривается теоретико-множественный подход к оценке эффективности в условиях неопределенности, обеспечивающий корректный учет множества неопределенностей в моделях оценки эффективности [3, 4].

В рассматриваемом подходе, как и в случае неопределенности задач, принципы определения общей эффективности F , на основе совокупности частных показателей f_1, f_2, \dots, f_n , сводятся к одному из представленных видов:

$$F(x, y) = \frac{1}{\Omega} \int_A a^T f(x, y) da, \tag{6}$$

где $\Omega = \int_A da$ – мера области весовых коэффициентов $a = (a_1, \dots, a_n)$, при интегральном подходе:

$$F(x, y) = \max(a^T f(x, y)) \tag{7}$$

при гарантирующем. Здесь $f = (f_1, f_2, \dots, f_n)$ – вектор функция частных показателей; $a = (a_1, \dots, a_n)$ – вектор весовых коэффициентов, которого компоненты удовлетворяют неравенству (5); A – множество неопределенностей весовых коэффициентов, определяемое выражением (5) и используемой системой предпочтений:

$$\begin{aligned} a_i &\geq a_j, f_i \succ f_j \\ a_i &\leq a_j, f_i \prec f_j. \end{aligned} \tag{8}$$

Кроме этого, в ряде задач проектирования существует возможность задания допустимых показателей значений диапазонов, т.е.

$$f_i \in [f_i^{\min}, f_i^{\max}] \quad \text{для } i = 1, 2, \dots, n. \tag{9}$$

Также для значений весовых коэффициентов, можно определить некоторые ограничения значений, т.е.

$$a_i \in [a_i^{\min}, a_i^{\max}] \quad \text{для } i = 1, \dots, n, \tag{10}$$

которые удовлетворяют системе неравенств (5) и (8).

Тем самым, проблема учета неопределенности при оценке эффективности, а также выбор соответствующего решения сводятся к построению множества A неопределенностей и интегрированию или максимизации произведения $a^T f(x, y)$. Формальное описание множества A с учетом общих свойств выпуклых

многогранников и выражений (5), (8) и (10) алгоритмически сводится к определению координат вершин элементарных тетраэдров, вписанных в многогранник A .

Благодаря двум важным свойствам весовых коэффициентов, т.е. $1 \geq a_i \geq 0$, для $i=1, \dots, n$ и $\sum_{i=1}^n a_i = 1$, возможным становится геометрическое описание множества A в n -мерном пространстве. Действительно, первое из неравенств выделяет единичный гиперкуб, второе – его диагональную гиперплоскость, т.е. вершины всех возможных векторов $a \in A$ согласно этим свойствам, лежат на гиперплоскости, проходящей через вершины ортов и заключенной между координатными плоскостями пространства этих векторов. Для случая $n=2$ на рис. 3. показаны: множество A , как отрезок между вершинами $(a_1=1, a_2=0)$ и $(a_2=1, a_1=0)$ единичного квадрата (его диагональ), а также множества $A_1 = \{a | a_1 \geq a_2, a_1 + a_2 = 1\}$ и $A_2 = \{a | a_2 \geq a_1, a_1 + a_2 = 1\}$ – отрезки диагонали единичного квадрата при соответствующих предпочтениях.

Для случая $n=3$, множеству весовых коэффициентов A соответствуют координаты точек, размещенных в треугольнике с вершинами $(a_1=1, a_2=a_3=0)$, $(a_2=1, a_1=a_3=0)$ и $(a_3=1, a_1=a_2=0)$ расположенными на осях координат этого пространства.

Разработанная на этой основе, процедура вычисления функционала (3), обеспечивает оперативность вычисления оценки эффективности, достаточную для организации не только перебора альтернативных вариантов решений, но и для выполнения шага сравнения в методах оптимального поиска в качестве аналога процедуры вычисления целевой функции, позволяя встраивать ее в численные методы оптимизации. При этом обеспечивается поиск решения как при гарантирующем, так и интегральном подходе к оценке эффективности в исходной задаче (2).

4. Вычислительный эксперимент

Основная цель проводимых научно-технических исследований – создание эффективных способов проектирования и реконфигурации вычислительных систем, основанных на многоканальных связях и топологическом дуализме. В частности, необходимым стало определение целесообразности использования конкретных критериев проектирования, их влияние на качество проекта в целом, а также установление последствий объединения критериев в рамках одной задачи многокритериального проектирования.

Проведенный вычислительный эксперимент основан на применении методов прямого поиска и относится к распределенным вычислительным системам, описанным в [5, 6]. Выбранные результаты процесса проектирования представлены на рис. 5.

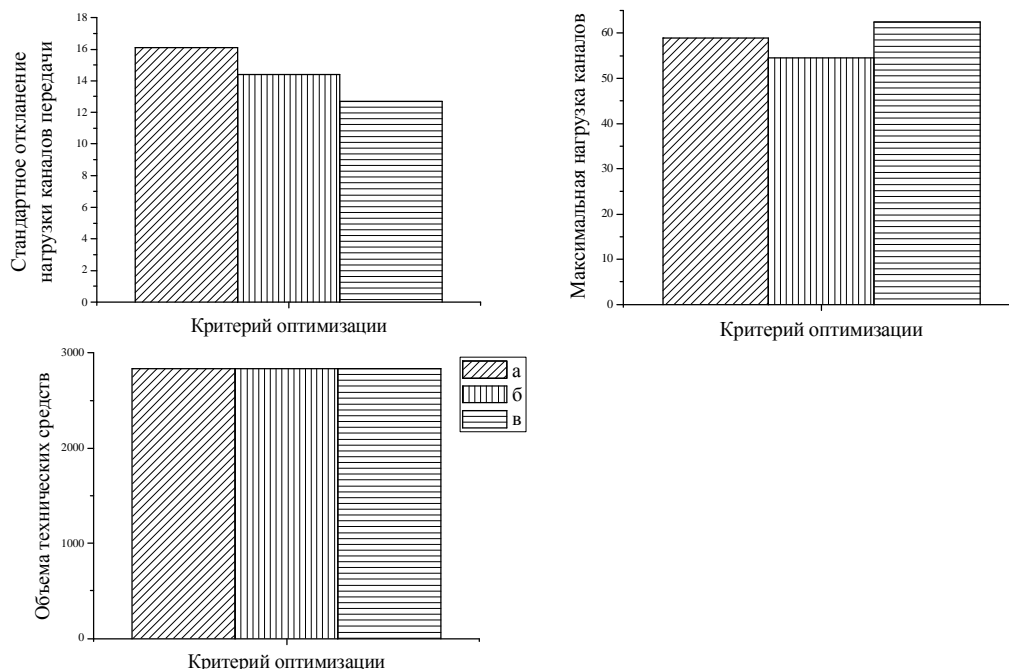


Рис. 5. Выбранные результаты проектирования многоканальной, распределенной вычислительной системы. Целевые функции: а. – минимизация объема технических средств; б. – минимизация объема технических средств и максимизация нагрузки каналов передачи; в. – минимизация объема технических средств и стандартного отклонения нагрузки каналов передачи

В эксперименте приняты следующие предположения: плотность логических каналов в физическом канале передачи – 16; размер переключателей логических каналов – 64×64; стоимость физического канала единичной длины – 1; стоимость транспарантного усилителя физического канала – 2; стоимость регенератора

физического канала – 10; стоимость приемно-передаточного устройства – 0,5; стоимость переключателя логических каналов – 25; расстояние, обслуживаемое транспарантным усилителем – 60 км; расстояние, обслуживаемое регенератором – 180 км.

Итоги и дальнейшие работы

Выполненные научно-исследовательские работы, ограничены к задаче проектирования вычислительной системы. Они показали, что зависимость характеристик создаваемой распределенной вычислительной системы от используемых критериев проектирования не является значительной. Однако в ряде случаев, выбор критериев играет существенную роль, в частности при попытках обеспечения высокой эффективности функционирования вычислительной системы. Попытка использования предложенного способа решения задачи оптимизации, в градиентных методах потребовала значительных вычислительных ресурсов, недоступных автору на данный момент. Дальнейшие работы направлены на кластеризацию процесса проектирования и расширение диапазона использования разработанного метода.

1. *Hajder M., Bolanowski M., Paszkiewicz A.* Design of improvement efficiency of multi-channel optical communication system criteria optimization. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska – Informatica. Lublin.* – vol. 1, P. 271-276, 2003.
2. *Hajder M., Mazurek M., Dymora P.* Designing of multichannel optical communication systems topologies criteria optimization. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska – Informatica. Lublin.* – vol. 1, P. 277–284, 2003.
3. *Пиявский С.А., Брусов В.С., Хвилон Е.А.* Оптимизация параметров многоцелевых летательных аппаратов // *Машиностроение*. М., 1975.
4. *Брусов В.С., Баранов С.К.*: Оптимальное проектирование летательных аппаратов – многоцелевой подход // *Машиностроение*, М., 1989.
5. *Hajder M., Dymora P., Mazurek M.* Projektowanie topologii transparentnych sieci optycznych. Konferencja: *Polski Internet Optyczny: technologie, usługi i aplikacje*; Poznań. – 2002., – S.183–195.
6. *Hajder M., Mazurek M., Dymora P.*: Topologie wirtualne wielowęzłowych sieci rozległych. Konferencja: *Polski Internet Optyczny: technologie, usługi i aplikacje*, Poznań. – 2002., – S. 197–211.
7. *Hajder M.*: Wybrane aspekty projektowania i symulacji metropolitalnych sieci komputerowych. *Krajowe Sympozjum Telekomunikacji. Bydgoszcz.* – 1995, tom C. – S. 272–280.