

11. Székely, G. J. Hierarchical clustering via Joint Between-Within Distances: Extending Ward's Minimum Variance Method [Text] / G. J. Székely, M. L. Rizzo // Journal of Classification. – 2005. – Vol. 22, Issue 2. – P. 151–183. doi: 10.1007/s00357-005-0012-9
12. Залунина, О. М. Структурирование ключевых экономических показателей информационного поля строительного сектора Украины [Текст] / О. М. Залунина // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2014. – № 1. – С. 52–59.
13. Ивахненко, А. Г. Применение самоорганизации для разбиения множества данных на заранее заданное число кластеров [Текст] / А. Г. Ивахненко, Ю. В. Коппа, С. А. Петрухова, Н. А. Ивахненко // Автоматика и телемеханика. – 1985. – № 5. – С. 9–16.
14. Браверман, Э. М. Структурные методы обработки эмпирических данных [Текст] / Э. М. Браверман, И. Б. Мучник. – М.: Наука, 1983. – 464 с.
15. Миркин, Б. Г. Группировки в социально-экономических исследованиях. Методы построения анализа [Текст] / Б. Г. Миркин. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 223 с.
16. Ивахненко, А. Г. Объективная компьютерная кластеризация. Теоретические вопросы [Текст] / А. Г. Ивахненко, С. А. Петрухова, Н. А. Ивахненко // Автоматика и телемеханика. – 1986. – № 3. – С. 3–11.

УДК 004.051: 519.876

## ОБОБЩЕНИЕ МЕТОДА ВИРТУАЛЬНОГО ОБЪЕКТА НА РАСЧЕТЫ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

**Л. В. Бовнегра**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра компьютерных методов  
проектирования в машиностроении\*  
E-mail: dlv5@ukr.net

**Т. В. Лысенко**

Доктор технических наук, профессор  
Кафедра технологии и  
управления литейными процессами\*  
E-mail: tvl12@list.ru

**А. А. Становский**

Кафедра компьютерных  
интеллектуальных систем и сетей\*  
E-mail: redlinenorma@mail.ru

\*Одесский национальный политехнический университет  
пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044

*Показано, що сучасне автоматизоване проектування та управління потребує нових інтелектуальних методів оптимізації, які дозволяють розв'язувати задачі в on-line режимі із залученням математичного апарату віртуального об'єкта. Розроблені математичні основи методу, виконана класифікація віртуальних об'єктів та обґрунтована їхня придатність для механічних, електричних та гідравлічних систем*

*Ключові слова: складні системи, проектування, управління, оптимізація в on-line режимі, метод віртуального об'єкта*

*Показано, что современное автоматизированное проектирование и управление нуждается в новых интеллектуальных методах оптимизации, позволяющих решать задачи в on-line режиме с привлечением математического аппарата виртуального объекта. Разработаны математические основы метода, выполнена классификация виртуальных объектов и обоснована их применимость для механических, электрических и гидравлических систем*

*Ключевые слова: сложные системы, проектирование, управление, оптимизация в on-line режиме, метод виртуального объекта*

### 1. Введение

Деятельность современных автоматизированных систем проектирования и управления сложными объектами невозможно представить без многократного решения задач оптимизации их параметров, от результатов которых, в основном, и зависит эффективность функционирования таких объектов.

Однако, именно сложность последних заставляет проектировщиков и управленцев не только ускорять

расчеты за счет современных средств вычислительной техники, но и искать новые подходы к методам оптимизации, применяемые интеллектуальные математические модели, в частности, методам виртуального объекта.

Современные задачи оптимизации для целей проектирования и управления не могут быть разрешены «влоб» известными методами в приемлемое время, так как оптимизируемые объекты обладают большой размерностью и «неравномерностью»

свойств. Например, элементы с сосредоточенными параметрами (узлы) сочетаются с элементами с рассредоточенными (связи), протоколы работы отдельных узлов не согласованы во времени, и т. п. Каждая такая особенность резко усложняет расчетные модели объекта.

Виртуальный объект может некоторым образом предварительно упорядочить оптимизируемую систему, делая ее, с одной стороны, удобной для быстрой, on-line оптимизации в реальном времени проектирования и управления, а с другой, – сохраняет в себе информацию о выполненном упорядочивании, позволяя на любом этапе расчетов вернуть систему к исходному, неупорядоченному состоянию.

К сожалению, известное описание метода виртуального объекта [1, 2] может быть применено лишь к узкому кругу объектов, так как не содержит общей теории метода, его модели не обобщены на сложные системы, на электрические и гидравлические системы и пр.

Поэтому разработка теоретических основ интеллектуального метода оптимизации сложных систем с помощью виртуального объекта и его обобщение на широкий круг сложных систем представляется весьма актуальной.

---

## 2. Анализ достижений и публикаций в исследуемой области

---

Философия абстрагирует идею виртуальной реальности от её технического воплощения. Виртуальную реальность можно толковать как совокупность моделируемых реальными процессами объектов [3, 4], содержание и форма которых не совпадает с этими процессами. Существование моделируемых объектов сопоставимо с реальностью, но рассматривается обособленно от неё – виртуальные объекты существуют, но не как субстанции реального мира. В то же время эти объекты актуальны, а не потенциальны. «Виртуальность» (мнимость, ложная кажимость) реальности устанавливается по отношению к обуславливающей её «основной» реальности. Виртуальные реальности могут быть вложены друг в друга. При завершении моделирующих процессов, идущих в «основной» реальности, виртуальная реальность исчезает [5].

Примерами виртуальной реальности, широко используемыми в науке, являются пространства с размерностью больше трех [6], дробномерные пространства [7], дробные производные [8] и многое другое.

Сложная система – система, состоящая из множества взаимодействующих составляющих (подсистем), вследствие чего сложная система приобретает новые свойства, которые отсутствуют на подсистемном уровне и не могут быть сведены к свойствам подсистемного уровня. Строгое определение сложной системы ещё не найдено, но к некоторым чертам сложной системы относят:

- отсутствие математического описания или алгоритма;
- «зашумленность», выражающаяся в затруднении наблюдения и управления, обусловленная не

столько наличием генераторов случайных помех, сколько большим числом второстепенных для целей управления процессов;

- «нетерпимость» к управлению – система существует не для того, чтобы ею управляли;

- нестационарность, выражающаяся в дрейфе характеристик, изменении параметров, эволюции во времени;

- невозпроизводимость экспериментов с ней [9].

Именно в сложных системах наиболее ярко проявляется такой системный эффект, как эмерджентность или синергия [10] – наличие у какой-либо системы особых свойств, не присущих её элементам, а также сумме элементов, не связанных особыми системообразующими связями; несводимость свойств системы к сумме свойств её компонентов.

---

## 3. Цель и задачи работы

---

Цель работы – повышение эффективности проектирования и управления сложными механическими, электрическими и гидравлическими системами за счет снижения временной сложности оптимизационных расчетов путем разработки теоретических основ интеллектуального метода виртуального объекта и обобщение его на широкий круг сложных систем.

Задачи работы – формализация и классификация виртуальных объектов, расширение метода на сложные объекты различной физической природы и разработка информационной технологии практической реализации метода.

---

## 4. Математические основы метода виртуального объекта

---

Оптимизация сложных систем для целей проектирования и управления представляет собой поиск (расчет) параметров взаимодействия элементов систем, как между собой, так и с внешним миром. В зависимости от конкретных задач оптимизации одни и те же параметры могут входить в группы свойств, ограничений или внешнего воздействия на объект.

Выполним формализацию кортежа <объект, внешнее воздействие> для систем различной физической природы. Для начала рассмотрим взаимодействующую с внешним миром сложную механическую систему  $S_m(x, \lambda, q)$ , описываемую векторами параметров конфигурации (размеров)  $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$  и механических свойств (модуль упругости)  $\lambda \in \Lambda$ . На внешнее механическое воздействие  $\mathbf{q} \in \mathbf{Q}$  система отвечает реакцией  $\mathbf{r}$  (рис. 1, а):

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(\mathbf{x}; \lambda; \mathbf{q}), \quad (1)$$

которая представляет собой напряженно-деформированное состояние (НДС) объекта, где  $\mathbf{X}$ ,  $\Lambda$  и  $\mathbf{Q}$  – множества, в пределах которых при оптимизации системы допускаются изменения, соответственно,  $\mathbf{x}$ ,  $\lambda$  и  $\mathbf{q}$ .

У электрических систем  $S_e(x, \rho, u)$ , кроме общего вектора конфигурации,  $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$ , имеем, соответственно, векторы электрических свойств  $\rho \in \mathbf{P}$  и электрической

нагрузки  $u \in U$ , на которые система отвечает реакцией  $i$  (токами в ее цепях) (рис. 1, б):

$$i = i(x; p; u). \tag{2}$$

Гидравлические системы  $S_r(x, \mu, p)$ , кроме общего вектора конфигурации,  $x \in X$ , описываются, соответственно, векторами гидравлических свойств  $\mu \in M$  (плотность, вязкость) и гидравлической нагрузки  $p \in P$  (давление), на которые система отвечает реакцией  $\eta$  (поток, расход) (рис. 1, в):

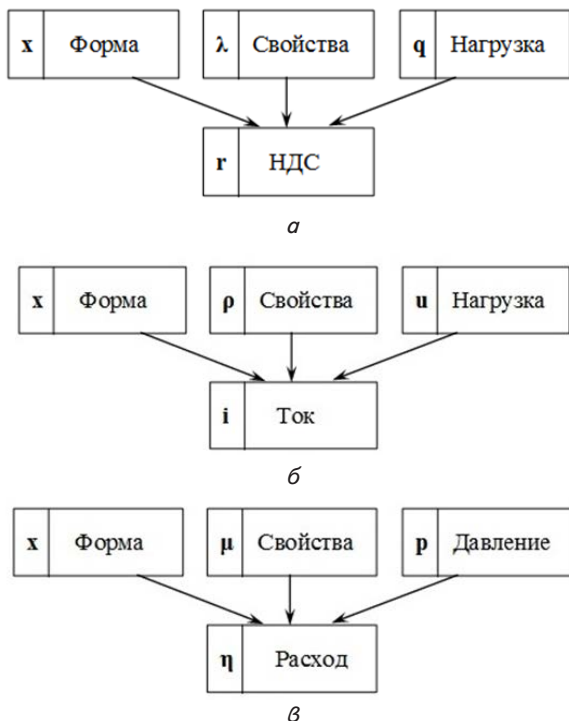


Рис. 1. Схема взаимодействия векторов кортежа <объект, внешнее воздействие>: а – для механических систем; б – для электрических систем; в – для гидравлических систем

$$\eta = \eta(x; \mu; p). \tag{3}$$

Вычислительная сложность и точность определения реакций  $r, i, \eta$  определяются конкретными математическими моделями объектов проектирования и управления, а также принятыми методами моделирования. Расчеты по (1)–(3) относятся к прямым решениям, когда по причинам –  $(x, \lambda, q), (x, p, u)$  и  $(x; \mu; p)$  ищут следствия –  $r, i$  и  $\eta$ , которые всегда однозначны. В то же время, у каждой прямой задачи (1)–(3) есть три обратные:

– для механических систем: по известной реакции  $r$ , свойствам  $\lambda$  и воздействию  $q$  рассчитать конфигурацию  $x$ ; по известной реакции  $r$ , конфигурации  $x$  и воздействию  $q$  рассчитать свойства  $\lambda$ ; по известной реакции  $r$ , свойствам  $\lambda$  и конфигурации  $x$  рассчитать воздействие  $q$ ;

– для электрических систем: по известной реакции  $i$ , свойствам  $\rho$  и воздействию  $u$  рассчитать конфигурацию  $x$ ; по известной реакции  $i$ , конфигурации  $x$  и воздействию  $u$  рассчитать свойства  $\rho$ ; по

известной реакции  $i$ , свойствам  $\rho$  и конфигурации  $x$  рассчитать воздействие  $u$ ;

– для гидравлических систем: по известной реакции  $\eta$ , свойствам  $\mu$  и воздействию  $p$  рассчитать конфигурацию  $x$ ; по известной реакции  $\eta$ , конфигурации  $x$  и воздействию  $p$  рассчитать свойства  $\mu$ ; по известной реакции  $\eta$ , свойствам  $\mu$  и конфигурации  $x$  рассчитать воздействие  $p$ .

В практике проектирования машиностроительных и прочих объектов чаще всего приходится решать первые обратные задачи, т.е. оптимизировать конфигурацию деталей, так как свойства их материала и внешние воздействия гораздо меньше зависят от воли конструктора. Прямая задача используется, в основном, при анализе вариантов проекта. При проектировании сложных объектов результат расчета не всегда очевиден, и оптимальное решение получается только после генерирования и отвергания нескольких промежуточных вариантов.

В практике управления актуальными являются третьи задачи по оптимизации внешних целенаправленных воздействий на объект (собственно управлений).

Виртуальные объекты могут быть представлены четырьмя видами:

- существование таких объектов в реальной жизни невозможно в принципе;
- объекты содержат элементы с запредельными относительно реальной практики параметрами;
- объекты содержат элементы, изготовление которых возможно, но крайне неэкономично;
- объекты содержат элементы, изготовление которых возможно, но крайне нетехнологично.

Примеры виртуальных объектов перечисленных видов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Виды и примеры виртуальных объектов

№ п/п	Вид виртуальности	Примеры виртуальных объектов
1	Невозможность	Удельная электропроводность материала детали при нормальных условиях – выше $7 \cdot 10^8$ См/м К одной точке электрической цепи одновременно подведено разное напряжение
2	Запредельность	Диаметр вала редуктора – 2 м
3	Неэкономичность	Материал корпуса редуктора – платина
4	Нетехнологичность	Форма детали – полый шар Деталь с плавно переменными свойствами

Рассмотрим применение метода виртуальных объектов на примере механической системы. Пусть реакция  $r$  очередного варианта, рассчитанная по (1)–(3), признана проектировщиком недопустимо далекой от идеальной цели  $r_{ид}$ , и было принято путем решения первой обратной задачи изменить вектор конфигурации  $x$  на  $x^*$ , так чтобы вектор параметров реакции приобрел значение  $r^*$ .

$$r(x; \lambda; q) \rightarrow r^*(x^*; \lambda; q) \in r_{ид} \pm \delta/2, \tag{4}$$

где  $\delta$  – наперед заданный максимально допустимый «коридор», не обязательно с конечными границами в пространстве параметров, составляющих  $\mathbf{r}$ .

Решение задачи можно выполнить двумя методами, первый, непосредственный метод применим, когда преобразование  $\mathbf{X}$ , удовлетворяющее условию (4), разрешено. Тогда вектор  $\mathbf{x}^*$ , если он вообще существует, ищут, решая первую обратную задачу,

$$\mathbf{x}^* = \mathbf{x}(\mathbf{r}^*; \lambda; \mathbf{q}). \quad (5)$$

При решении любых обратных задач по группе параметров, включающих следствие  $(\mathbf{r}^*; \lambda; \mathbf{q})$ , ищут одну из причин, в данном случае – вектор параметров конфигурации  $\mathbf{x}^*$ . В классической постановке под следствием понимают некоторые параметры, измеренные экспериментально, в данном случае следствие есть принятие на данном этапе проектирования представление о «хорошем» объекте. Вычислительная сложность такого поиска весьма велика.

Обратные задачи относятся к классу некорректно поставленных. Для данного случая их формулировка выглядит следующим образом. Пусть проектируемая система характеризуется элементом  $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$ , недоступным для прямого определения, поэтому изучается некоторое его проявление  $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{r}$ ,  $\mathbf{r} \in \mathbf{f}(\mathbf{X})$ . Здесь  $\mathbf{f}(\mathbf{X})$  – образ множества  $\mathbf{X}$  при отображении  $\mathbf{f}$ . Уравнение  $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{r}$  имеет решение только для таких элементов  $\mathbf{r}$ , которые принадлежат множеству  $\mathbf{f}(\mathbf{X})$ . Оператор  $\mathbf{f}$  во многих случаях является таким, что обратный ему оператор  $\mathbf{f}^{-1}$  не является непрерывным.

В этом случае в качестве приближенного решения  $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{r}$  нельзя брать элемент  $\mathbf{x} = \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{r})$ , так как такого решения может не быть, поскольку  $\mathbf{x}$  может не принадлежать множеству  $\mathbf{f}(\mathbf{X})$ , т.е. не выполняется первое требование корректности по Адамару. Более того, даже если решение  $\mathbf{x}$  существует, оно не будет обладать свойством устойчивости, если оператор  $\mathbf{f}^{-1}$  не является непрерывным. Требования корректности [11] в данном случае сводятся к следующей формулировке. Необходимо найти решение по входным данным  $\mathbf{r}_{\text{ид}}$ ,  $\mathbf{x} = \mathbf{G}(\mathbf{r})$ , где  $\mathbf{G}$  – некоторый оператор. Если  $\mathbf{r}$  и  $\mathbf{x}$  принадлежат многообразиям  $\mathbf{X}$  и  $\mathbf{R}$ , для элементов которых определено понятие расстояния (метрика)  $\mathbf{g}_X(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$  и  $\mathbf{g}_R(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$ , где  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \in \mathbf{X}$ ,  $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2 \in \mathbf{R}$ , т.е.  $\mathbf{X}$  и  $\mathbf{R}$  – метрические пространства, то должны удовлетворяться следующие три требования:

– существования: для всякого  $\mathbf{r} \in \mathbf{R}$  существует решение  $\mathbf{x}$  из  $\mathbf{X}$ ;

– однозначности: решение определяется однозначно;

– устойчивости: решение должно непрерывно зависеть от входных данных, т.е. для всякого  $\varepsilon > 0$  можно указать такое  $d(\varepsilon)$ , что если  $\mathbf{g}_R(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) \leq \delta$  и  $\mathbf{x}_1 = \mathbf{G}(\mathbf{r}_1)$ ,  $\mathbf{x}_2 = \mathbf{G}(\mathbf{r}_2)$ , то  $\mathbf{g}_X(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \leq \varepsilon$ .

Если непосредственное преобразование (4) запрещено каким либо из перечисленных условий или иными причинами, то достичь  $\mathbf{r}^*$  можно с помощью метода виртуального объекта за счет введения дополнительной промежуточной операции – предварительного преобразования  $\lambda$  и (или)  $\mathbf{q}$ :

$$\mathbf{r}(\mathbf{x}; \lambda; \mathbf{q}) \rightarrow \mathbf{r}^*(\mathbf{x}; \lambda^*; \mathbf{q}) \in \mathbf{r}_{\text{ид}} \pm \delta/2;$$

$$\mathbf{r}(\mathbf{x}; \lambda; \mathbf{q}) \rightarrow \mathbf{r}^*(\mathbf{x}; \lambda; \mathbf{q}^*) \in \mathbf{r}_{\text{ид}} \pm \delta/2;$$

$$\mathbf{r}(\mathbf{x}; \lambda; \mathbf{q}) \rightarrow \mathbf{r}^*(\mathbf{x}; \lambda^*; \mathbf{q}^*) \in \mathbf{r}_{\text{ид}} \pm \delta/2. \quad (6)$$

Из (6) решаются вторая и третья обратные выражениям (1)–(3) задачи. В результате этого решения, вычислительная сложность которых также весьма велика, создается промежуточное дополнительное состояния системы –  $(\mathbf{x}; \lambda^*; \mathbf{q})$ ,  $(\mathbf{x}; \lambda; \mathbf{q}^*)$  или  $(\mathbf{x}; \lambda^*; \mathbf{q}^*)$ , называемое виртуальным объектом, так как реальная реализация этого состояния «в металле» не предполагается, и поэтому значения составляющих его параметров могут принимать любые, иногда чисто гипотетические величины. Так как задачи (6) также являются обратными, к ним необходимо отнести все перечисленные требования корректности.

Пусть  $\lambda^*$  и (или)  $\mathbf{q}^*$  существуют и на первом этапе метода виртуального объекта они найдены. Это значит, что удалось достичь желаемого  $\mathbf{r}^*$ , но не за счет требуемой оптимизации формы, а путем виртуального изменения свойств  $\lambda^*$  и (или) внешних воздействий  $\mathbf{q}^*$ . Перейдем теперь ко второму этапу, на котором  $\mathbf{x}^*$  ищется как функция от рассчитанных на первом этапе  $\lambda^*$  и (или)  $\mathbf{q}^*$

$$\mathbf{x}^* = \mathbf{f}(\lambda^*; \mathbf{q}); \mathbf{x}^* = \mathbf{f}(\lambda; \mathbf{q}^*); \mathbf{x}^* = \mathbf{f}(\lambda^*; \mathbf{q}^*). \quad (7)$$

Формулы (7) в явном виде или другие методы расчета по этим уравнениям определяются в каждом конкретном случае в зависимости от объекта проектирования, его физических моделей и принятых методов преобразований в его структуре и параметрах. Их вычислительная сложность на порядок меньше сложности решения обратных задач (5) и (6).

Как видим, в результате одного из преобразований (7) получается искомым вектор  $\mathbf{x}^*$ . Суммарная вычислительная сложность обоих этапов – (6) и (7) немногим отличается от сложности этапа (6). Именно на последнем и выгодно применять быстродействующие методы вычислений, накладывающие запрет на изменение  $\mathbf{x}$ .

С учетом схемы «обычного» проектирования (рис. 2, а) информационная технология применения метода виртуального объекта может быть организована, например, в соответствии со следующей схемой (рис. 2, б).

Получив техническое задание на проект, метод оценивает необходимый объем оптимизационных задач и их временную сложность. Если последняя оказывается чрезмерно большой, выполняется поиск возможности подстановки в эти задачи, вместо реального, виртуального объекта. Далее такой объект создается и выполняется его оптимизация.

Окончательно, выполняется обратное преобразование оптимизированного виртуального объекта в реальный, причем такой переход сопровождается окончательным расчетом параметров последнего. Рассмотрим примеры практического применения метода. Пусть в процессе проектирования был создан вариант машиностроительной детали, у которой  $\mathbf{x}$  – вектор размеров;  $\lambda$  – вектор механических характеристик материала детали;  $\mathbf{q}$  – вектор параметров внешнего механического нагружения; и  $\mathbf{r}$  – напряженно-деформированное состояние (НДС) детали.

Если  $\mathbf{r}$  не удовлетворяет проектировщика по соотношениям прочности, жесткости или материалоемкости, вариант проекта может быть доработан с целью получения НДС, соответствующего  $\mathbf{r}^*$ , т.е. близкого к заданному (или идеальному –  $\mathbf{r}_{\text{ид}}$ ).



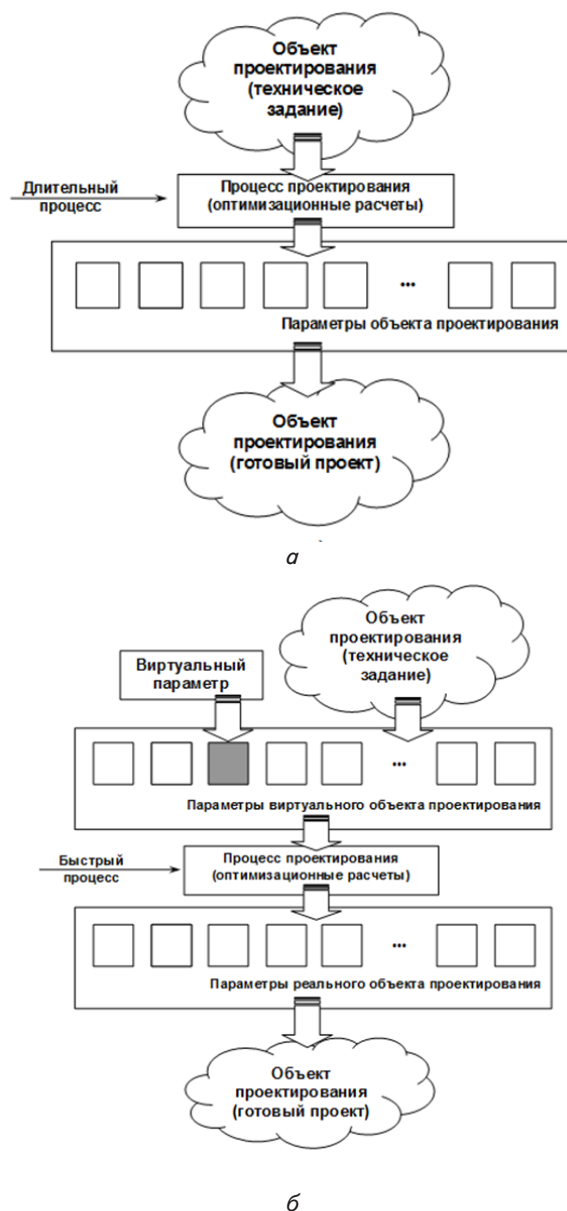


Рис. 2. Схемы проектирования: а – «обычного»; б – с помощью метода виртуального объекта

Таким же образом может осуществляться и доработка (оптимизация) конструкций уже существующих деталей. В общем случае оптимизация может быть осуществлена одним из описанных методов. Запрет на изменение  $x$  определяет необходимость применения только метода виртуального объекта.

## 5. Выводы

В результате выполненной работы реализована возможность быстрой оптимизации параметров сложных систем при их проектировании и управлении. Такое ускорение осуществляется за счет предварительного приведения модели этих систем к некоторому виртуальному состоянию, которое позволяет выполнить быструю оптимизацию с последующим возвратом к реальному состоянию объекта.

Технология метода виртуального объекта включает формализацию последнего с целью выявления его структурных и параметрических особенностей, выбор типа виртуального объекта, приведение к нему реальной системы и непосредственно оптимизацию. В конце метода осуществляется возврат к реальному объекту с соответствующим перерасчетом найденных при оптимизации параметров.

При проектировании конкретного объекта – компьютерной сети Одесского национального политехнического университета – установлено, что применение метода виртуального объекта позволило снизить время оптимизационного расчета ее параметров в 2,74 раза.

## Литература

1. Гончарова, О. Е. Нечувствительный к асимметрии численный метод оптимизации конструкций [Текст] / О. Е. Гончарова, В. Г. Максимов, А. Л. Становский // Труды Одесского политехнического университета. – 1999. – Вып. 2 (8). – С. 41–44.
2. Балан, С. А. Метод виртуального объекта в проектировании [Текст] / С. А. Балан, Т. П. Становская, О. Е. Гончарова // Труды Одесского политехнического университета. – 2000. – Вып. 1 (9). – С. 32–35.
3. Грицанов, А. А. Виртуальная реальность. Энциклопедия социологии [Текст] / А. А. Грицанов, В. Л. Абушенко, Г. М. Евелькин, Г. Н. Соколова, О. В. Терещенко. – Мн.: Книжный Дом, 2003. – 131 с.
4. Багдасарьян, Н. Г. Виртуальная реальность: попытка типологизации [Текст] / Н. Г. Багдасарьян, В. Л. Силаева // Философские науки. – 6 № – 2005. – С. 58–39.
5. Носов, Н. А. Манифест виртуалистики [Текст] : сборник / Н. А. Носов. – М.: Путь, 2001. – 246 с.
6. Грин, Б. Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории [Текст] / Общ. ред. В. О. Мальшенко; пер. с англ. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 288 с.
7. Колесникова, Е. В. Фрактальная размерность как мера трансформации серийной проектной деятельности в операционную [Текст] / Е. В. Колесникова, И. И. Становская // Праці Одеського політехнічного університету. – 2013. – Вип. 2 (41). – С. 282–288.
8. Чуриков, В. А. Внутренняя алгебра операторов дробного интегродифференцирования [Текст] / В. А. Чуриков // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314, № 2. – С. 12–15.
9. Лоскутов, А. Ю. Основы теории сложных систем [Текст] / А. Ю. Лоскутов, А. С. Михайлов. – М.: Ижевск: НИЦ «Регулярная и стохастическая динамика», 2007. – 612 с.
10. Жилин, Д. М. Теория систем [Текст] / Д. М. Жилин. – М.: УРСС, 2004. – 183 с.
11. Балан, С. А. Автоматизированная система управления торможением автотранспортных средств [Текст] / С. А. Балан, В. Г. Максимов, Т. П. Становская // Труды Одесского политехнического университета. – 1999. – Вып. 2 (8). – С. 95–97.