САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ТЕОРИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРОЙ

Кудряшов Александр Андреевич

Выпускная квалификационная работа бакалавра

Приоритеты в задачах многоцелевой оптимизации (на примере госкорпорации «РОСАТОМ»)

Направление 010900
Прикладные математика и физика

Научный руководитель,
доктор физ.-мат. наук,
профессор Колбин В. В.

Санкт-Петербург
2016

Содержание

1.Введение

В задачах экономической оптимизации (и, шире, в задачах принятия решений вообще) зачастую встречаются ситуации, в которых не обойтись единственным критерием оптимальности решения. Когда появляются несколько критериев, зачастую появляется и неоднозначность выбора направления оптимизации, откуда возникает необходимость каким-то образом ввести некоторую, хотя бы частичную, упорядоченность на множестве возможных альтернатив, чтобы грамотно осуществить поиск лучшего возможного решения задачи. Возникает задача выбора приоритетов, формализующих цели.

Госкорпорация «РОСАТОМ» (полное название – Государственная корпорация по атомной энергии «РОСАТОМ») – государственный холдинг, включающий в себя более 400 предприятий самого разного рода деятельности: эксплуатирующие единственный в мире атомный ледокольный флот, отвечающие за атомное оружие, поставляющие электроэнергию, обогащающие ядерное топливо, утилизирующие отработанное ядерное топливо, строящие АЭС. Официальный сайт[1] госкорпорации делится следующей информацией:

Госкорпорация «Росатом» является крупнейшей генерирующей компанией в России, которая обеспечивает 33% выработки электроэнергии в европейской части страны. Росатом занимает лидирующее положение на мировом рынке ядерных технологий, занимая 1 место в мире по количеству одновременно сооружаемых АЭС за рубежом; 2 место в мире по запасам урана и 3 место по объему его добычи; 2 место в мире по генерации атомной электроэнергии, обеспечивая 36% мирового рынка услуг по обогащению урана и 17% рынка ядерного топлива.

Большая часть деятельности корпорации связана с проектированием и строительством АЭС, а сами атомные электростанции есть основной продукт госкорпорации. В работе поставлена и решена задача многокритериальной оптимизации: для экономической модели строительства на основе проекта АЭС

«Куданкулам». Особое внимание при этом уделено приоритетам и различным стратегиям их выбора. В частности, в работе введен обобщенный критерий рисковости.

2.Постановка задачи

2.1. Задача многоцелевой оптимизации

Задача многоцелевой оптимизации в той форме, как она описана в [2], имеет следующий вид:

Определить оптимальный выбор элемента $x^0 \in X$ *по многоцелевому показателю* $f(x) = \{f(x|y)\}$, $y \in Y$, *где* X, Y *– множество допустимых элементов* $\{x \in \widetilde{X}\}, \{y \in \widetilde{Y}\}$, *и целевой функционал* $f \in F$.

Здесь $\tilde{X}$ – множество альтернатив, $\tilde{Y}$ – множество целевых термов, F – множество целевых функций. Чтобы задача была математически корректной, необходимо сформулировать правило, определяющее понятие оптимума по многоцелевому показателю, т.е. задать отношение приоритета на множестве Y по важности (значимости, предпочтительности), на компонентах многоцелевого показателя $f(\cdot\,|y)$ по значимости, а так же на значениях $f(x) \in \Phi$ многоцелевого показателя f при $x \in X$ по эффективности.

Определение отношения приоритета рождается из сравнения целевых термов $y \in Y$ в некоторой шкале важности C_Y, компонент $f(x|y)$ при $x \in X$ и фиксированном $y \in Y$ в шкале $C_{f(\cdot|y)}$ значимостей (предпочтительностей) количественных значений для качества y, и значений $f(x) \in \Phi$ в шкале C_F эффективности совокупности количественных значений $\{f(x|y)\}$ всех качеств $y \in Y$ при выборе $x \in X$. Формально шкалы вводятся на основе тех или иных практических соображений, соответствующих целям оптимизации. Понятно поэтому, что полностью объективно сделать это невозможно, т.к. цели известны лишь в самом общем виде и субъективны (получить прибыль, укрепить партнерские отношения со страной-заказчиком и т.д.) и не всегда могут быть формализованы. (Например, в случае, если постройка АЭС преследует в том числе политические цели.)

Под приоритетом в общем случае понимается задание приоритета на общей шкале $C_0 = C_Y \cup C_f \cup C_F$ на прямом произведении $O = Y \times f \times \Phi$. В случае, если какая-то из шкал не задана, общая шкала C_0 и прямое произведение O меняются соответствующим образом. В рамках решаемой в настоящей работе задачи в шкале значимостей $C_{f(\cdot|y)}$ количественных значений без потери общности считается, что чем больше значение по этой шкале для любых целевых качеств y, тем ближе решение к требуемому при прочих равных, т.е., если простым языком, чем больше значение показателя, тем лучше решение по этому показателю.

2.2. Принципы построения модели для дальнейшей многоцелевой оптимизации

Перед тем, как решить задачу многоцелевой оптимизации, требуется проанализировать доступные данные и выделить из них основу для построения модели. Понятно, что сделать это можно множеством способов. Далее в работе при моделировании используются принципы, выделенные в [3], а именно: к множеству альтернатив выдвигаются требования сопоставимости (необходимость оценки по каждому из используемых целевых термов), полноты (отношения размера исследуемого множества и множества всех возможных вариантов) и неизбыточности. Кроме этого, целевые термы, соответствующий целевой показатель которых не различает альтернативы (одинаков на всех альтернативах), также должны быть удалены. Задача, таким образом, состоит из:

1. Построения модели для многоцелевой оптимизаци

2. Постановки задачи многоцелевой оптимизации для этой модели

3. Решения задачи многоцелевой оптимизации с по-разному определенными приоритетами

На данный момент все АЭС по проектам Росатома строятся на основании двух различных типов реакторов – ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200.

Экономическая сторона строительства АЭС зависит от некоторого количества случайных факторов: цена на труд в регионе (в случае, если часть проекта отдается на выполнение местным подрядчикам), колебания курса рубля относительно доллара (от них в данном случае зависит себестоимость труда исполнителя и размер оплаты завершенного проекта, т.к. затраты идут по большей части в рублях, а доходы – в долларах), цена на электроэнергию на свободном рынке в регионе строительства (в случае, если Росатом входит в долю управляющей компании готовой АЭС), непредвиденные затраты при строительстве АЭС и многие другие факторы, причем их значимость может сильно колебаться от проекта к проекту. К этим не очень удобным для построения математической модели естественным ограничениям добавляется частое отсутствие детальной информации об особенностях определенного заключенного договора по строительству АЭС.

Перечисленные выше ограничения не позволяют полно исследовать весь портфель проектов Росатома на основании одной универсальной математической модели. Рассмотрим определенный проект, договор о строительстве которого уже подписан.

Для него есть неопределенность состояний среды (под средой понимается всё множество неконтролируемых факторов, влияющих на проект), в которой происходит строительство АЭС. Есть условия заключенного договора, и есть некоторое пространство для управленческих решений в рамках этого договора. Требуется это всё формализовать, чтобы полученная модель позволяла оптимизировать проект в соответствии с целями, потом поставить задачу оптимизации и решить её.

2.3. Задача многоцелевой оптимизации для АЭС «Куданкулам»

2.3.1. Фактическая основа модели

Проект этой АЭС включает в себя возведение двух энергоблоков типа ВВЭР-1000, причем один из них уже построен и эксплуатируется, а второй только строится. Также подписаны договора о возведении в будущем еще двух энергоблоков на той же инфраструктурной площадке.

Таблица 1. Приведённые капитальные затраты на проект АЭС "Куданкулам"

	проектное значение	нижняя граница	верхняя граница
Капитальные затраты для азиатского региона, млн $/кВт	1640	1500	1778
Электрическая мощность, МВт	1000		
коммерческий срок эксплуатации, лет	40	40	60
общий срок строительства, лет	6	6	18
распределение капитальных затрат по годам, %	10/15/20/25/20/10		
Структура капитальных затрат			
Материалы, конструкции, комплектующие, млн $/кВт	178,76	163,5	193,802
Заработная плата, млн $/кВт	86,92	79,5	94,234
Эксплуатация машин и механизмов, млн $/кВт	45,92	42	49,784
Накладные расходы, млн $/кВт	108,24	99	117,348
Сметная прибыль, млн $/кВт	55,76	51	60,452
Временные здания и сооружения, млн $/кВт	32,8	30	35,56
Оборудование, млн $/кВт	846,24	774	917,448
Доставка оборудования, млн $/кВт	37,72	34,5	40,894
Прочие, млн $/кВт	241,08	220,5	261,366
Непредвиденные расходы, млн $/кВт	4,92	4,5	5,334

Договор предполагает следующую модель финансирования: сперва «Росатом» за счет средств, взятых в коммерческом банке или у государства (в качестве прямых дотаций) в срок, предусмотренный договором, возводит АЭС, потом правительство Индии единовременным платежом передает Росатому вознаграждение, часть которого Росатом направляет на погашение кредитов, а остальным распоряжается по своему усмотрению. Кроме прочего это означает, что исполнителю заказа не требуется нести никаких затрат, кроме капитальных: затраты на обслуживание, покупку ядерного топлива, утилизацию отходов и вывод из эксплуатации несёт на себе управляющая компания, она же получает прибыль от продажи вырабатываемой электроэнергии. А капитальные затраты и их структура для проекта АЭС на основе ВВЭР-1000 известны [5] (Табл. 1).

Состояние среды сводится к следующему: во-первых, ограниченная возможность государства выделить финансирование (формализуется как $x0$ –

максимальная доля бюджетных средств в финансировании проекта), во-вторых, возможное увеличение сроков строительства АЭС (Первые два энергоблока «Куданкулам» строились 11 и 13 лет соответственно вместо проектных 6 из-за того, что часть работ «Атомстройэкспорт» поручил индийским подрядчикам), в-третьих, процентная ставка (предполагается, что кредит берётся единожды перед самым началом строительства).

В качестве целевых показателей проекта строительства этой АЭС берутся чистая приведённая стоимость (NPV) и максимальный дисконтированный период окупаемости maxDPP = max(DPP). (Чем больше maxDPP, тем больше возможностей для продления строительства, а значит, больше возможностей в случае неучтенных обстоятельств довести проект до конца), и показатель независимости от государства L, равный (L -- доля капитальных затрат, просубсидированных из бюджета). Содержательная часть этих показателей (точнее то, как они вводятся для модели) будет описана далее.

Множество возможных управленческих решений, на котором решается задача оптимизации, есть множество возможных способов получить финансирование: взять кредит в коммерческом банке, получить государственные дотации (которые ограничены возможностями бюджета), либо совместить то и другое.

2.3.2. Математическая модель

Обозначим капитальные затраты Q и через $\sigma(Q)$ СКО для капитальных затрат. Через P обозначим выплату за завершенный проект. Долю государственных субсидий в общем объеме финансирования обозначаем за x, ставку процента рублевого кредита за $y1$, ставку дисконтирования за d. NPV, maxDPP и L для проекта, завершенного за n лет, выглядят следующим образом:

$$NPV = Q(-x - (1 + y1)^n (1 - x))/(1 + d)^n + P$$

$$\sigma(NPV) = \sigma(Q)(-x - (1 + y1)^n (1 - x))/(1 + d)^n$$

$$maxDPP = \max\{NPV > 0\}$$

$$L = 1 - x$$

При этом P, Q, $\sigma(Q)$ известны.

Задача многоцелевой оптимизации для АЭС «Куданкулам» есть задача оптимизации по перечисленным выше целевым показателям, но с еще не введенными приоритетами. Приоритеты будут вводиться по-разному, соответственно разным подходам.

3.Обзор литературы

В фундаментальной работе [3] даётся теоретическая база решения многокритериальных оптимизационных задач, в том числе разбираются различные способы введения приоритетов и решения сопутствующих проблем. Практические примеры построения решений изучены по многим источникам. Для оценки рисковости проектов использовалась функция полезности, описанная в [4]. Популярный в настоящее время подход к оценке затрат на строительство АЭС через удельные капитальные затраты на 1 кВт·ч описан в [6].

4. Основная часть

4.1. Постановка задачи в нынешних экономических условиях

Начало строительства третьего и четвертого блоков АЭС «Куданкулам» запланировано на весну 2016 года. В России кризис, в бюджете нет денег на финансирование проекта, заемные средства выдаются под $y1\;=11{,}3\%$ годовых [8]. P = 4,2 млрд \$, Q = 3,28 млрд \$, $x0$=0,5. Согласно рекомендациям выбора ставки дисконтирования для проектов в области атомной энергетики[9] рассматриваем четыре различных сценария для четырех различных типичных значений ставки. Каждый сценарий характеризуется описанными ранее целевыми показателями:

$$NPV_{d,n}(x)\quad=\frac{3{,}28\big(-1-(1{,}113)^n(x-1)\big)}{(1+d/100)^n}+4{,}2, d\,\epsilon\,\{3{,}5{,}8{,}11\}$$

$$maxDPP_d(x)=\max\big\{n\colon NPV_{d,n}(x)>0\big\}, d\,\epsilon\,\{3{,}5{,}8{,}11\}$$

$$L=1-x$$

Целевые термы задачи оптимизации есть элементы множества $\{1{,}2{,}3\}$. Им соответствует многоцелевой показатель (NPV, $maxDPP$, L), а множество всех допустимых управленческих решений X есть множество всех таких решений, для которых L(x) ≥ $x0$, и $maxDPP\;\geq 6$ (проектное время постройки в годах). Это есть по сути множество {(n,x,d)}, где n ≥ 6, $x\in[a,x0]\subset[0,x0]$, $d\in\{3{,}5{,}8{,}11\}$. Для собственного удобства дополнительно ограничим это множество. Пусть множество возможных X = $\bar{\bar{\bar{X}}}$ = {(n,x,d)}, n ∈ $\{6{,}7{,}8\ldots 15\}$ (предполагается, что из чисто практических соображений стройка не растягивается более чем на 15 лет) , x ∈ $\{0{,}0.1{,}0.2{,}0.3{,}0.4{,}0.5\}$, $d\in\{3{,}5{,}8{,}11\}$.

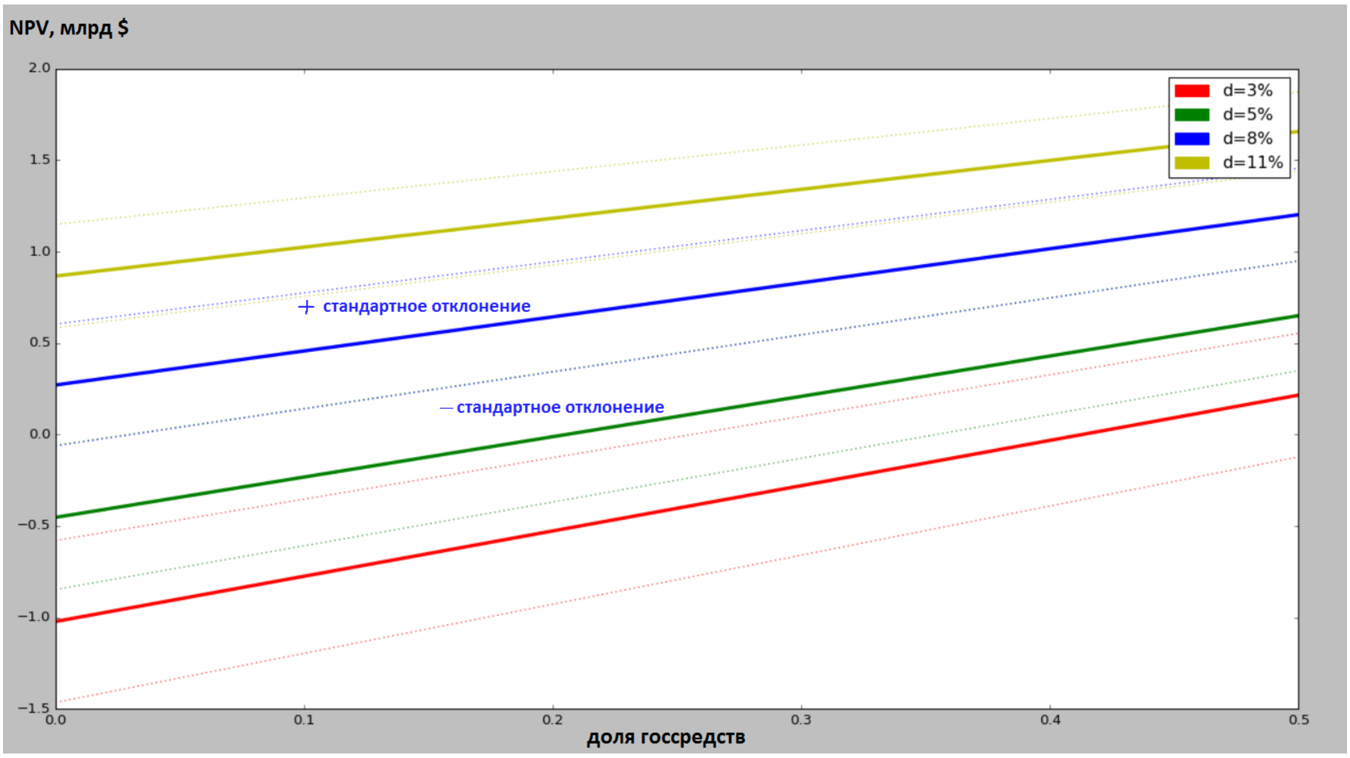

Рисунок 1. NPV для проекта, завершенного за шесть лет, в зависимости от доли госсредств в финансировании

Видно, что чем быстрее обесцениваются деньги, тем выгоднее вкладываться в проект. Также понятно, что $maxDPP$, характеризующий гибкость управленческого решения в смысле возможности увеличения срока строительства относительно проектного, т.е. показывающий, насколько максимум возможно нарушить проектные сроки и остаться всё равно хоть с какой-то прибылью, растёт с увеличением ставки дисконтирования и увеличением x, т.е. показатели NPV и $maxDPP$ в каком-то смысле говорят об одном и том же.

4.2. Приоритет на основе μ-критерия.

Рассмотрим ситуацию, в которой не задано ни шкалы важности, ни шкалы значимости, а также не задано приоритета. Тогда с помощью простого перебора, реализованного программно (приложение 1), находим компоненты вектора μ, задавая естественную нормализацию:

$$\mu 1(x) = \frac{NPV_{d,n}(x)}{\max\big(NPV_{d,n}(x)\big) - \min\big(NPV_{d,n}(x)\big)} = \frac{NPV_{d,n}(x)}{1{,}85}$$

$$\mu2(x) = \frac{maxDPP_{d,n}(x)}{\max(maxDPP_{d,n}(x)) - \min(maxDPP_{d,n}(x))} = \frac{maxDPP_d(x) - 6}{274}$$

$$\mu3(x) = (L(x) - 0.5)/0.5$$

Если, например, АЭС строится в новом месте и неопределенность состояний среды высока, а подрядчиков найти сложно, то разумно будет ввести лексикографический порядок {2,1,3}, выделяющий необходимость возможности увеличения сроков строительства в связи с непредвиденными обстоятельствами, и, кроме того, всё-таки ставящий целевой терм независимости от государственных вливаний на последнее место. Тогда ${\mu_{lex}}^0 = max\,\mu$ на множестве X^{lex}={ x: μ(x) $\geq$ (4-i) μ, i=1,3}, и, далее, ${\mu_{lex}}^0 = max\{\min\left[\frac{\mu_i(x)}{4-i}\right]\}$, причем максимум здесь ищется по всему множеству $\overline{\overline{X}}$. Отсюда снова простым перебором находится ${\mu_{lex}}^0$. Поскольку ${\mu_{lex}}^0$ зависит также от n и d, удобно представить решение также в координатах (n,d).

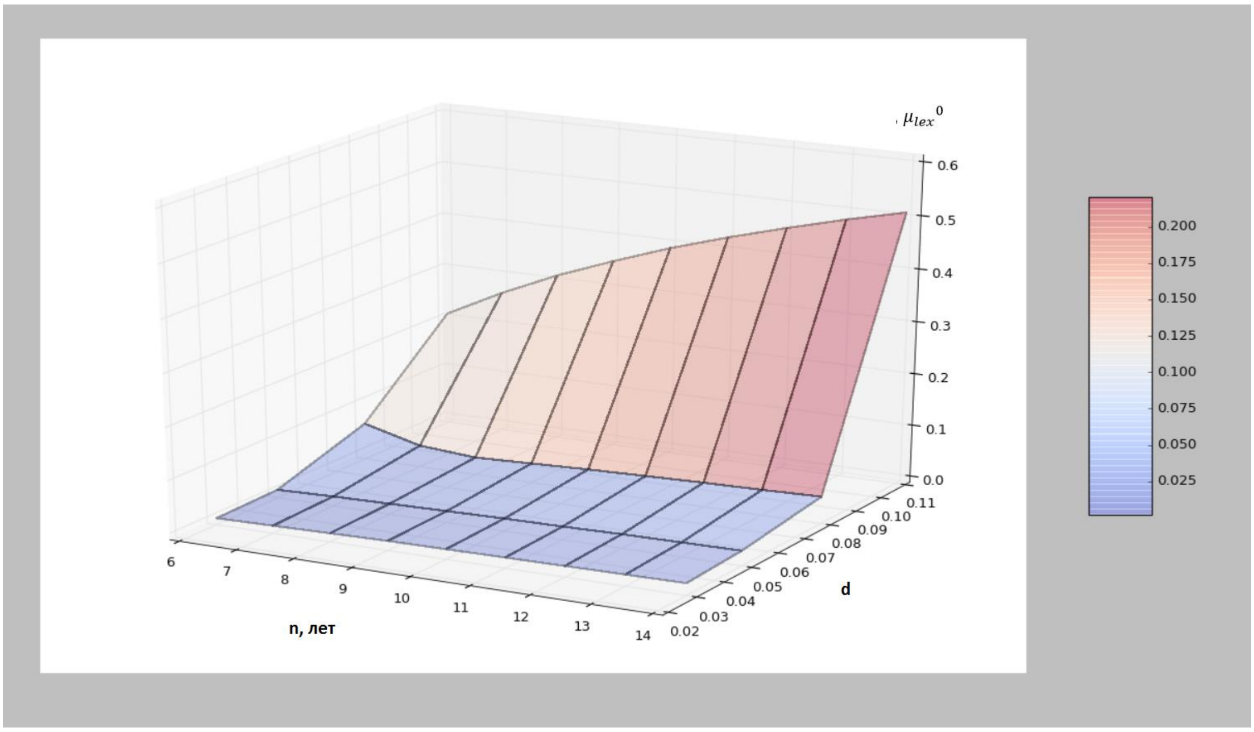

Рисунок 2. К поиску решения оптимизационной задачи согласно мю-критерию

Решению задачи оптимизации при таком подходе удовлетворяют x0, такие, что $\mu_i(x0) \geq (4-i){\mu_{lex}}^0$. Поскольку с увеличением x $\mu_3(x)$ уменьшается, а $\mu_1(x)$

и $\mu_2(x)$ увеличиваются, оптимальными будут решения, при которых $\mu_3(x) = \mu_{lex}{}^0(d,n)$, а $\mu_1(x) \geq 2\mu_{lex}{}^0(d,n)$ и $\mu_2(x) \geq 3\mu_{lex}{}^0(d,n)$, при условии что такие решения вообще существуют. А такие решения возможны, только если $\mu_{lex}{}^0 \leq 1/3$, как видно из рисунка 2, т.е. проект гарантированно может быть неубыточен лишь в случае, когда его строительство затягивается не более чем до 10 лет. Решение же оптимизационной задачи формулируется просто: брать все доступные деньги из бюджета. Оно было понятно интуитивно ещё на этапе конструирования лексикографического порядка на множестве целевых термов.

4.2. Применение μ-критерия для поиска коэффициентов линейной свертки.

Оптимальные по введенному выше μ-критерию весовые коэффициенты линейной свёртки могут иметь, в частности, следующий вид: $a_i = \frac{2(4-i)}{12} = (4-i)/6$.Тогда, если использовать тот же лексикографический порядок, что задан в п. 4.1., свертка будет выглядеть так: $g_\mu = \frac{1}{5}\mu_1(x) + \frac{3}{10}\mu_2(x) + \frac{1}{10}\mu_3(x)$. Задача оптимизации тогда представляется как поиск максимума этой функции на множестве допустимых значений x (Приложение 2). Решение этой задачи удобно представить в виде таблицы.

Таблица 2. Решения задачи МКО для свертки

Условия среды (d,n)	(3,6)	(3,7)	(3,8)	(3,9)	(3,10)	…	(3,15)
решение *x*	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	…	0.5
	…	…	…	…	…	…	
Условия среды (d,n)	(11,6)	(11,7)	(11,8)	(11,9)	(11,10)	…	(11,15)
решение *x*	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	…	0.5

С введением такого приоритета решение оптимизационной задачи тоже не зависит от условий среды и тоже сводится к тому, чтобы брать из бюджета как можно больше.

Попробуем теперь сделать свертку с равными коэффициентами: $g_\mu = \frac{1}{3}\mu_1(x) + \frac{1}{3}\mu_2(x) + \frac{1}{3}\mu_3(x)$. Результаты такой задачи оптимизации представлены в таблице.

Таблица 3.. Решения задачи МКО для свертки с равными коэффициентами

Условия среды (d,n)	(3,6)	(3,7)	(3,8)	(3,9)	(3,10)	…	(3,15)
решение *x*	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	…	0.5
	…	…	…	…	…	…	
Условия среды (d,n)	(11,6)	(11,7)	(11,8)	(11,9)	(11,10)	…	(11,15)
решение *x*	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	…	0.5

Снова ничего не поменялось. Попробуем теперь как-то так определить лексикографический порядок, чтобы оптимальные решения менялись в зависимости от условий среды. Предположим, что правительство задумало приватизацию «Росатома». Значит, скоро субсидий напрямую из бюджета не будет. Поэтому теперь «Росатом» должен в первую очередь стараться строить АЭС таким образом, чтобы перестраивать модель своей финансовой деятельности и не надеяться на государство. Из этих соображений вводится лексикографический порядок {3,2,1}, который ставит чистую приведенную прибыль на последнее место по значимости, наибольшее внимание уделяя хотя бы безубыточному строительству за собственные деньги. $g_\mu = \frac{1}{10}\mu_1(x) + \frac{3}{10}\mu_2(x) + \frac{1}{5}\mu_3(x)$.

Таблица 4. Решения задачи МКО для свертки с новыми коэффициентами

Условия среды (d,n)	(3,6)	(3,7)	(3,8)	(3,9)	(3,10)	…	(3,15)
решение *x*	0	0	0	0	0.5	…	0.5
Условия среды (d,n)	(4,6)	(4,7)	(4,8)	(4,9)	(4,10)	…	(3,15)
решение *x*	0	0	0	0	0	…	0.5
	…	…	…	…	…	…	
Условия среды (d,n)	(11,6)	(11,7)	(11,8)	(11,9)	(11,10)	…	(11,15)
решение *x*	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	…	0.5

Вот тут результаты уже интереснее. Как видно, только две точки из всего множества допустимых значений x приносят экстремумы. Интуитивно понятно, почему так происходит: в силу выбора целевых показателей, «тянущих» оптимизацию в противоположные стороны.

4.3. Рисковость

Во всех рассуждениях, сделанных ранее, не учитывалось то, что NPV определяется с некоторой неоднозначностью. Попробуем это учесть.

Возможно введение понятия рисковости на основе идей теории игр для выбора оптимальной стратегии управления. Управляющий имеет всего несколько стратегий выбора x, условий среды тоже конечное количество. Составим матрицу «игры с природой» в условиях некоторой неопределенности состояний среды, которая будет показывать рисковость выбора того или иного управленческого решения. В качестве рисковости возьмем вероятность того, проект не будет убыточным, если будет построен более чем за десять лет. (Поскольку на данный момент ни один завершенный зарубежный проект «Росатома» не строился быстрее, чем за десять лет, это в каком-то смысле реалистичный критерий). Проще говоря, мерой риска при принятии решения x и в условиях среды d будем считать вероятность того, что NPV(x,d,11)>0, NPV(x,d,12)>0, NPV(x,d,13)>0, NPV(x,d,14)>0. Значения элементов таблицы найдены методом Монте-Карло. (Приложение 3.)

Таблица 3. Матрица рисков

	d=3	d=5	d=8	d=11
x=0	1	1	0.92	0
x=0.1	1	0.99	0.75	0
x=0.2	1	0.99	0.42	0
x=0.3	1	0.98	0.09	0
x=0.4	1	0.92	0.03	0
x=0.5	0.99	0.64	0	0

Оптимальная согласно критерию минимума ожидаемого среднего риска стратегия выделена зеленым. Однако в реальных условиях ставка дисконтирования далеко не так сильно неизвестна, поэтому, например, вряд ли окажется, что ставка дисконтирования может быть с равной вероятностью как 11%, так и 3%, что дает в случае больших d уже практически одинаковые оценки для трех последних стратегий.

По таблице в очередной раз видно, что при такой постановке задачи оптимизации и совершенно без учета минусов госфинансирования проекта побеждать всегда будет стратегия получения наибольшего количества денег у государства. Чтобы учесть также положительные стороны независимости от госбюджета, рассмотрим также таблицу выигрышей игрока в соответствии с целевым показателем L.

Таблица 4. Матрица выигрышей

	d=3	d=5	d=8	d=11
x=0	1	1	1	1
x=0.1	0.9	0.9	0.9	0.9

x=0.2	0.8	0.8	0.8	0.8
x=0.3	0.7	0.7	0.7	0.7
x=0.4	0.6	0.6	0.6	0.6
x=0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Теперь в ситуации, когда, например, точно известно, что ставка дисконтирования для проекта большая (8-11%), критерий минимума ожидаемого среднего риска уже предлагает как минимум три оптимальных стратегии. Они выделены зеленым. При этом из этих трех выбирать стоит уже ту, что несет еще и дополнительные бонусы, т.е. стратегию x=0.4 или x=0.3. Случаи, которые при этом скорее всего произойдут, выделены желтым.

5. Выводы

В работе построена математическая модель финансирования проекта АЭС «Куданкулам» Росатомом, поставлена и решена задача многокритериальной оптимизации, при этом рассмотрено несколько очень разных подходов к выбору приоритета. У работы есть две слабых стороны:

1. Модель финансирования. Она недостаточно проработана и не учитывает очень много важных в действительности вещей. Например, она не учитывает того, что средства на строительство выделяются в рублях, а оплата потом приходит в долларах. Соответственно, если в стране кризис, это может играть на руку «Росатому», т.к. уменьшает издержки, повышает конкурентоспособность на международном рынке и без того неплохо конкурирующего продукта. Это всё может влиять на приоритеты задачи МКО. Еще пример того, что она не учитывает: то, что средства на строительство АЭС можно находить по мере строительства, а не сразу брать одним большим кредитом перед началом. Это позволяет, в свою очередь, не так сильно терять на процентах по кредитам, как предполагается в этой модели, что влечет за собой большую возможную гибкость по срокам, не критичную в смысле прибыли.

2. Целевые показатели. Несмотря на то, что их введено три, первые два из них в силу описанных в п. 1 проблем практически означают одно и то же.

3. Выбор оптимального решения всегда делался на основе множества конечных решений, которое на самом деле не покрывает множество всех возможных решений, а только приближает его равномерной сеткой.

4. Выбор подходящего приоритета можно было бы осуществить еще несколькими способами.

Однако в целом в работе достигнуты поставленные цели.

6.Заключение

В работе представлена модель финансирования строительства АЭС «Куданкулам» госкорпорацией «Росатом», потом поставлена для этой модели задача многокритериальной оптимизации и решена несколькими разными способами для разных приоритетов, введенных из разных соображений.

7. Список источников

1. О Госкорпорации «РОСАТОМ». http://www.rosatom.ru/aboutcorporation/

2. Колбин В.В. Теория принятия решений. СПб: Санкт-Петербургский государственный университет, 2013. 865 с.

3. С. В. Микони, В. П. Бураков, М. И. Гарина. Практическое освоение теории принятия решений студентами информационных специальностей. Известия Томского политехнического университета, 2008. Т. 313, №5.

4. Колбин В.В. Оценка и управление риском, 2014, 261 с.

5. Сколько стоит атомная энергия? http://energypolis.ru/portal/2013/1750-skolko-stoit-atomnaya-yenergiya.html

6. Экономика АЭС: фокус на кВт·ч. http://atomicexpert.com/content/ekonomika-aes-fokus-na-kvt-chs-na-kvt-ch

7. "Атомстройэкспорт" получит кредит от ВТБ в 7 млрд руб. на строительство АЭС "Куданкулам". http://tass.ru/tek/2661716

8. Особенности применения банковской процентной ставки и ставки дисконтирования в оценках коммерческой эффективности инновационных и инвестиционных проектов. http://energoru.net/article/bps_sd.pdf

9. Артемова Н., Харитонов В. Оценка конкурентоспособности проектов АЭС на мировом рынке // Экономические стратегии

8. Приложения

8.1. Приложение 1.

Листинг программы, реализующий перебор по всему множеству возможных условий среды. Использованный язык программирования – Python 3.4

```
import numpy as np
import matplotlib
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib import animation
from math import *
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
from matplotlib import cm
from matplotlib.ticker import LinearLocator, FormatStrFormatter


Q = 1640*2./1000
sigmaQ = (1778-1500.)/1000
P = 4.2
y1 = 11.3/100
x0 = 0.5

d=[3/100,5/100,8/100,11/100]
X = np.arange(0,0.51,0.1)
print(X)
n = np.arange(6,15,1)


def NPV(y,x,d,n,P=P,Q=Q):
    return Q*(-x-((1+y)**n)*(1-x))/((1+d)**n)+P

print(NPV(y1,x0,d[-1],n=6)-NPV(y1,0,d[0],n=6))
```

```
def sNPV(y,x,d,n,P=P,sQ=sigmaQ):
    return sQ*(-x-((1+y)**n)*(1-x))/((1+d)**n)


def maxDPP(y,x,d,P=P,Q=Q):
    t=1
    while NPV(y,x,d,t,P,Q)>0:
        t+=1
    return t-1


def I(x): return 1-x




minNPV = 10e10
maxNPV = 0
min_dpp = 10e10
max_dpp = 0
min_i = 10000
max_i = 0
for xxx in X:
    if min_i>I(xxx): min_i = I(xxx)
    if max_i<I(xxx): max_i = I(xxx)



for d_ in d:
    for X_ in X:
        for n_ in n:
            if 0<NPV(y1,X_,d_,n_)<minNPV: minNPV = NPV(y1,X_,d_,n_)
```

```
        if NPV(y1,X_,d_,n_)>maxNPV: maxNPV = NPV(y1,X_,d_,n_)
        if 6<=maxDPP(y1,X_,d_)<min_dpp: min_dpp = maxDPP(y1,X_,d_)
        if maxDPP(y1,X_,d_)>max_dpp: max_dpp = maxDPP(y1,X_,d_)

result1 = np.ndarray(shape = (len(d),len(n)))
result2 = np.ndarray(shape = (len(d),len(n)))
result3 = np.ndarray(shape = (len(d),len(n)))
result = np.ndarray(shape = (len(d),len(n)))


for i in range(len(d)):
    for j in range(len(n)):
        result1[i][j]=min([(NPV(y1,x,d[i],n[j])-minNPV)/2/maxNPV for x in X])
        result2[i][j]=min([(maxDPP(y1,x,d[i],n[j])-min_dpp)/3/max_dpp for x in X])
        result3[i][j]=min([(I(x)-min_i)/max_i for x in X])
        result[i][j]=max(result1[i][j],result2[i][j],result3[i][j]) #Здесь сохраняются результаты



fig = plt.figure()
ax = fig.gca(projection='3d')
n,d= np.meshgrid(n,d)
surf=ax.plot_surface(n,d,result,rstride=1, cstride=1,
alpha=0.3,cmap=cm.coolwarm,linewidth=1,antialiased=False)
fig.colorbar(surf, shrink=0.5, aspect=1)

plt.show()
```

8.2. Приложение 2.

Реализация поиска максимума функции свертки.

```
import numpy as np
import matplotlib
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib import animation
from math import *
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
from matplotlib import cm
from matplotlib.ticker import LinearLocator, FormatStrFormatter
Q = 1640*2./1000
sigmaQ = (1778-1500.)/1000
P = 4.2
y1 = 11.3/100
x0 = 0.5

d=[3/100,5/100,8/100,11/100]
X = np.arange(0,0.51,0.1)
n = np.arange(6,15,1)
#a = [1/5,3/10,1/10]
#a = [1/3,1/3,1/3]
a = [1/10,3/10,1/5]

def NPV(y,x,d,n,P=P,Q=Q):
    return Q*(-x-((1+y)**n)*(1-x))/((1+d)**n)+P



def sNPV(y,x,d,n,P=P,sQ=sigmaQ):
    return sQ*(-x-((1+y)**n)*(1-x))/((1+d)**n)

def maxDPP(y,x,d,P=P,Q=Q):
    t=1
```

```
    while NPV(y,x,d,t,P,Q)>0:
        t+=1
    return t-1

def I(x): return 1-x

minNPV = 10e10
maxNPV = 0
min_dpp = 10e10
max_dpp = 0
min_i = 10000
max_i = 0
for xxx in X:
    if min_i>I(xxx): min_i = I(xxx)
    if max_i<I(xxx): max_i = I(xxx)

for d_ in d:
    for X_ in X:
        for n_ in n:
            if 0<NPV(y1,X_,d_,n_)<minNPV: minNPV = NPV(y1,X_,d_,n_)
            if NPV(y1,X_,d_,n_)>maxNPV: maxNPV = NPV(y1,X_,d_,n_)
            if 6<=maxDPP(y1,X_,d_)<min_dpp: min_dpp = maxDPP(y1,X_,d_)
            if maxDPP(y1,X_,d_)>max_dpp: max_dpp = maxDPP(y1,X_,d_)

def svertka(n,d,x):
    result=a[0]*(NPV(y1,x,d,n)-minNPV)/maxNPV+a[1]*(maxDPP(y1,x,d)-min_dpp)/max_dpp+\
    a[2]*(I(x)-min_i)/max_i
    return result

def maximize(n,d):
```

```
    print([svertka(n,d,x) for x in X])
    result = max(svertka(n,d,x) for x in X)
    for x0 in X:
        if svertka(n,d,x0)==result:
            return x0

print(maximize(6,d[1]))
print(maximize(7,d[1]))
print(maximize(8,d[1]))
print(maximize(9,d[1]))
print(maximize(10,d[1]))
print(maximize(11,d[1]))
```

8.3. Приложение 3.

Вычисление матрицы риска с использованием метода Монте-Карло.

```
import numpy as np
import matplotlib
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib import animation
from math import *
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
from matplotlib import cm
from matplotlib.ticker import LinearLocator, FormatStrFormatter



Q = 1640*2./1000
sigmaQ = (1778-1500.)/1000
P = 4.2
y1 = 11.3/100
x0 = 0.5
```

```
d=[3/100,5/100,8/100,11/100]
X = np.arange(0,0.51,0.1)
n = np.arange(6,15,1)
#a = [1/5,3/10,1/10]
#a = [1/3,1/3,1/3]
a = [1/10,3/10,1/5]

def NPV(y,x,d,n,P=P,Q=Q):
    return Q*(-x-((1+y)**n)*(1-x))/((1+d)**n)+P



def sNPV(y,x,d,n,P=P,sQ=sigmaQ):
    return sQ*(-x-((1+y)**n)*(1-x))/((1+d)**n)

def maxDPP(y,x,d,P=P,Q=Q):
    t=1
    while NPV(y,x,d,t,P,Q)>0:
        t+=1
    return t-1

def I(x): return 1-x




minNPV = 10e10
maxNPV = 0
min_dpp = 10e10
max_dpp = 0
min_i = 10000
```

```
max_i = 0
for xxx in X:
    if min_i>I(xxx): min_i = I(xxx)
    if max_i<I(xxx): max_i = I(xxx)



for d_ in d:
    for X_ in X:
        for n_ in n:
          if 0<NPV(y1,X_,d_,n_)<minNPV: minNPV = NPV(y1,X_,d_,n_)
          if NPV(y1,X_,d_,n_)>maxNPV: maxNPV = NPV(y1,X_,d_,n_)
          if 6<=maxDPP(y1,X_,d_)<min_dpp: min_dpp = maxDPP(y1,X_,d_)
          if maxDPP(y1,X_,d_)>max_dpp: max_dpp = maxDPP(y1,X_,d_)

def svertka(n,d,x):
    result=a[0]*(NPV(y1,x,d,n)-minNPV)/maxNPV+a[1]*(maxDPP(y1,x,d)-min_dpp)/max_dpp+\
    a[2]*(I(x)-min_i)/max_i
    return result

def maximize(n,d):
    print([svertka(n,d,x) for x in X])
    result = max(svertka(n,d,x) for x in X)
    for x0 in X:
        if svertka(n,d,x0)==result:
            return x0

print(maximize(6,d[1]))
print(maximize(7,d[1]))
print(maximize(8,d[1]))
print(maximize(9,d[1]))
```

```
print(maximize(10,d[1]))
print(maximize(11,d[1]))
```