

Разработка модели для систем поддержки решений по управлению процессом инвестирования информационных технологий

В. А. Лахно, В. П. Малюков, Н. П. Мазур, Л. В. Кузьменко, Б. Б. Ахметов, В. Н. Гребенюк

Запропоновано модель управління інвестиційним процесом, на прикладі інвестування в інформаційні технології (ІТ) з урахуванням багатфакторності даного процесу. Відмінність даної моделі від раніше розроблених полягає в тому, що, по-перше, вона розглядає інвестиційний процес як складну структуру, для якої недостатньо її моделювання як одно факторної категорії. По-друге, наша модель заснована на рішенні білінійної багатокрокової гри якості з декількома термінальними поверхнями. Рішення отримано в рамках схеми нового класу білінійних багатокрокових ігор, які описують взаємодію об'єктів в багатовимірному просторі. Розгляд інвестиційного процесу у такій постановці дає можливість адекватно описати процес пошуку раціональних стратегій гравців в ході інвестування в інформаційні технології. Проведене дослідження дозволило реалізувати програмний код моделі в середовищі імітаційного моделювання MatLab. Розроблено програмний продукт – система підтримки прийняття рішень «IT INVESTMENT». Математичне ядро СППР засноване на застосуванні нового класу білінійних диференціальних ігор. Запропоноване рішення дозволяє відшукувати оптимальні стратегії інвестування для потенційних інвесторів, а його застосування дозволило зменшити розбіжності даних прогнозування і реальної віддачі від інвестування, наприклад, в проекти у сфері ІТ. Отримане рішення дозволило графічно показати перевагу інвесторів в процесі інвестування в проекти у сфері ІТ з урахуванням багатфакторності у багатовимірному просторі. Показано, що такий підхід в сукупності з застосуванням комп'ютерного моделювання та СППР дає інвестору широкі можливості для аналізу і вибору раціональних фінансових стратегій.

Ключові слова: оптимальні стратегії інвестування, підтримка рішень, багатокрокова гра, програмний продукт

1. Введение

Не требует доказательства утверждение о том, что в настоящее время информационные технологии (ИТ) выходят на первое место в контексте выведения экономики любой страны на лидирующие позиции в мире. Понимание данного факта делает безусловной проблему все возрастающего инвестирования в различные направления ИТ, например, облачные вычисления, кибербезопасность, Data Mining, Big Data, Smart City и другое. Игнорирование данного обстоятельства [1, 2] может привести к существенному экономическому отставанию от других стран. Однако следует отметить, что на пути развития ИТ могут возникать риски, вызванные отсутствующей стратегией управления инвестици-

онным процессом. Это делает актуальной разработку моделей, а на их основе и программных продуктов [3, 4], которые посвящены сфере инвестиций в ИТ.

И, как уже отмечалось, успехи в сфере ИТ в большой степени определяются инвестициями в эту сферу. Инвестиционный процесс в ИТ характеризуется множеством факторов, например, как распределить финансовых ресурсов на приоритетные или не приоритетные ИТ, как учесть сложные взаимосвязи между финансовыми потоками инвесторов. Также, возможна ситуация, при которой условный инвестор – это группа инвесторов с несовпадающими интересами и т. п. Указанное обстоятельство приводит к тому, что проблема не может быть описана каким-либо одним фактором, что приводит к многомерности. Решение же многомерных задач, как правило, требует разработки инструментария, который не является идентичным инструментарию, разработанному для одномерного случая. Работы ученых, представляющих школы академиков Л. С. Понтрягина и академика Н. Н. Красовского, подтверждают это. При решении задач определения стратегий инвестирования возникают трудности, вызванные как сложностью разработанных моделей и подходов, так и отсутствием инструментария определения фактических значений при оценивании рисков. Отметим, что сложность моделей сильно затрудняет разработку алгоритмов и их реализацию в программных продуктах, таких как системы поддержки принятия решений (СППР) [4, 5].

Заметим, что в области разработки СППР в задачах инвестирования [4, 6] используемые программные продукты не дают возможности определить рациональные рекомендации и стратегии инвестирования ИТ.

Устранить данный недостаток можно за счет применения в СППР моделей, основанных на использовании теории многошаговых игр качества с несколькими терминальными поверхностями [7].

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В работах [6, 7] отмечалось, что для повышения результативности и эффективности оценивания подобных проектов, целесообразно задействовать потенциал различных компьютеризированных систем и, в частности, СППР. Однако для многих предметных областей, например, для задачи оценки инвестиций в ИТ, имеющиеся СППР не затрагивают случаи со множеством стратегий инвесторов.

По мнению авторов публикаций [8, 9], при анализе моделей и алгоритмов, используемых для оценки инвестиционных проектов в ИТ, целесообразно использовать не только традиционные методы и модели [10]. Например, в работах [11, 12] указывалось, что при всей своей привлекательности широко используемые в СППР метод иерархий (метод Т. Саати) [13] и экспертные методы [9, 10, 14] в большинстве случаев мало подходят для синтеза прогнозных оценок. Это особенно касается задач выбора инвестором рациональных стратегий вложения своих финансовых ресурсов в тот или иной проект ИТ. Последнее обстоятельство является недостатком метода Т. Саати.

В работах [7, 15, 16] были предложены модели для СППР, которые касаются анализа и оценивания стратегий инвесторов в контексте действий двух

сторон (игроков). В соответствии с [17, 18], общим подходом к модели, которая базируется на теории игр, является предположение, что одна из сторон инвестиционного процесса рассматривается как некая совокупность потенциальных угроз. Эти угрозы могут возникнуть в результате некомпетентных, несогласованных действий инвесторов. Это приведет к потере капитала, который затрачен на проект, в частности в сфере ИТ. Существующие СППР данный недостаток не устраняют.

В работах [16, 18] было отмечено, что применительно к данному классу задач наиболее адекватными моделями, описывающими поведение сложной системы, являются модели, базирующиеся на теории игр.

Как показал анализ исследований в данной области [12, 15], большинство моделей и алгоритмов, приведенных в работах [14, 17–20], не содержат реальных рекомендаций инвесторам в проекты, связанные с ИТ. Особенно это касается аспектов поиска рациональных стратегий взаимного финансового инвестирования в подобных проектах. В существующих СППР это обстоятельство не учитывается.

Также отметим, что описанные авторами [19–22] подходы не позволяют находить эффективные рекомендации и стратегии управления инвестициями в ИТ предприятий. Особенно принимая во внимание многофакторность данной задачи и достаточно большой разброс возможных рациональных стратегий, на которых необходимо сконцентрироваться инвестору.

В [5, 15, 17, 18, 23, 24] показано, что в задачах, в которых участвуют более двух лиц, принимающих решение, подходы теории игр являются наиболее эффективными. Это обусловлено тем, что именно они позволяют учитывать множество факторов, в первую очередь в плане информационной обеспеченности различного типа, таких как отсутствие информации о действиях другого игрока, отсутствие информации о состоянии другого игрока, о классах стратегий другого игрока и т. п. Кроме того, очень важна динамика, задающая движение объектов. Например, в случае динамики, которая имеется в рассматриваемой задаче, невозможно применить формулу Коши для нахождения решения дифференциального аналога данной системы, а значит, подходы школы Л.С. Понтрягина [23] здесь не применимы. А в случае использования неизмеримых противодействий игроком-противником здесь не применимы подходы школы Н.Н. Красовского [24].

Это обстоятельство позволяет утверждать, что целесообразно продолжить исследования по разработке новых моделей и программных продуктов, которые способны поддержать процедуры поддержки принятия решений в ходе поиска рациональных стратегий инвестирования. В частности, остается не решенной эта задача и для сферы ИТ, например, в контексте получения прогнозной оценки для реализуемости конкретной стратегии инвестора.

3. Цель и задачи исследования

Цель статьи – разработка модели для систем поддержки принятия решений по выбору рациональных стратегий взаимного инвестирования в информационные технологии с учетом многофакторности данного процесса.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать модель на базе теории многошаговых игр качества с несколькими терминальными поверхностями для системы поддержки принятия решений в ходе выбора рациональных стратегий инвесторами в области ИТ;
- выполнить вычислительные эксперименты в среде имитационного моделирования MatLab для подтверждения работоспособности модели;
- программно реализовать систему поддержки принятия решений в ходе выбора рациональных стратегий инвесторами с учетом многофакторности задачи.

4. Модель на базе теории многошаговых игр качества для системы поддержки принятия решений в ходе выбора рациональных стратегий инвесторами

При решении проблем, связанных с развитием той или иной отрасли экономики, одним из наиболее важных факторов является возможность финансовой поддержки инновационных и передовых технологий в данной отрасли. Не является исключением такая важнейшая отрасль, как область ИТ, определяющая в настоящее время место страны в мировой экономической иерархии. Однако проблема финансирования (инвестирования) любой сферы требует ее разумной реализации, так как любая величина финансовых ресурсов (ФР) может быть потрачена без должного эффекта. И здесь, на помощь в решении проблемы разумного финансирования ИТ приходится прибегать к уже проверенным методам нахождения решений. Среди таких методов можно выделить теорию игр, методы оптимального управления, методы оптимизации и другие. Одними из наиболее эффективных методов и моделей в задачах поиска рациональных стратегий инвесторов являются методы теории игр и, в частности, метод многошаговых игр качества. В рамках данного метода и будем рассматривать проблему финансирования ИТ за счет привлечения финансовых ресурсов (*FinR*) инвесторов. Применение аппарата многошаговых игр качества позволяет производить финансирование с учетом всевозможных факторов. В частности, с учетом множественности подходов к построению эффективных ИТ на предприятии. И это может дать возможность разрабатывать на основе игровых моделей СППР, например, программные продукты (ПП), которые позволяют принимать рациональные решения по вложению финансовых средств на развитие таких технологий.

В [7, 15, 23, 24] показано, что ситуации, которые описываются в работе, являются классическими игровыми ситуациями, и такие ситуации наиболее эффективно могут решаться только игровыми методами.

Модель, которая предлагается в данной работе, базируется на анализе процесса финансирования инвесторов в информационные технологии для случая их многофакторности.

Модель является продолжением работ [7, 15] и основана на решении билинейной многошаговой игры качества с несколькими терминальными поверхностями. Задача рассмотрена в постановке, стандартной для многошаговой игры качества с несколькими терминальными поверхностями.

Имеется динамическая система в многомерном пространстве, которой управляют два игрока (инвестора). Система задана системой билинейных многошаговых уравнений с зависимыми движениями. Задаются терминальные поверхности S_0 , F_0 и определяются множества стратегий (U) и (V) игроков. Цель первого игрока (далее $Inv1$) привести динамическую систему с помощью своих стратегий управления на терминальную поверхность S_0 как бы ни действовал второй игрок (далее $Inv2$). Цель $Inv2$ симметричная.

Сформулированная задача генерирует две задачи, с точки зрения первого игрока-союзника и с точки зрения второго игрока-союзника [15].

В работе рассматривается задача с точки зрения первого игрока-союзника. Задача с точки зрения второго игрока-союзника рассматриваться не будет, так как ее решение аналогично, вследствие симметричности. Решение заключается в нахождении множеств предпочтительности игроков W_1 и W_2 , т. е. множеств начальных состояний игроков и их стратегий, которые позволяют объектам привести систему на ту или другую поверхность.

В задаче 1 игрок-союзник трактуется для $Inv1$, игрок-противник трактуется для $Inv2$. И наоборот – в задаче 2 игрок-союзник трактуется для $Inv2$, а игрок-противник – для $Inv1$. Оба игрока стараются проинвестировать свои ФР в ИТ.

Считаем, что на заданный период времени $[0, T]$ (T – натуральное положительное число) у $Inv1$ имеется набор $h(0)=(h_1(0), \dots, h_n(0))$ финансовых ресурсов ($h_i(0)$ – ФР для развития i -ой ИТ). Соответственно, у $Inv2$ – $f(0)=(f_1(0), \dots, f_n(0))$ ($f_i(0)$ – ФР для развития i -ой ИТ). Эти наборы определяют прогнозную, в момент $t=0$, величину $FinR$ игроков каждой информационной технологии).

Опишем динамику изменения $FinR$ для игроков так:

$$h(t+1) = B_1 \times h(t) + [(A_1 + R_1) - E] \times U(t) \times h(t) - [(A_2 + R_2) - E] \times V(t) \times B_2 \times f(t); \quad (1)$$

$$f(t+1) = B_2 \times f(t) + [(A_2 + R_2) - E] \times V(t) \times B_2 \times f(t) - [(A_1 + R_1) - E] \times U(t) \times B_1 \times h(t); \quad (2)$$

здесь $h(t) \in R^n$, $f(t) \in R^n$, $U(t)$, $V(t)$ – квадратные матрицы порядка n с положительными элементами $u_i(t)$, $v_i(t) \in [0, 1]$, на диагоналях диагональных матриц $U(t)$, $V(t)$ соответственно; B_1 , B_2 – матрицы преобразования ФР $Inv1$ и $Inv2$ при их успешной реализации в ИТ, являющиеся квадратными матрицами порядка n с положительными элементами g_1^{ij} , g_2^{ij} , соответственно; A_1 , R_2 – диагональные матрицы с положительными элементами, характеризующие процентную плату $Inv2$ за финансовые инвестиции и доли возврата инвестиций $Inv2$ по отношению к инвестициям $Inv1$ в ИТ; A_2 , R_2 – диагональные матрицы с положительными элементами, характеризующие процентную плату $Inv1$ за финансовые инвестиции и доли возврата инвестиций $Inv1$ по отношению к инвестициям $Inv2$ в ИТ; E – единичная матрица.

Взаимодействие оканчивается при выполнении условий:

$$(h(t), f(t)) \in S_0, \quad (3)$$

$$(h(t), f(t)) \in F_0, \quad (4)$$

где

$$S_0 = \bigcup_{i=1}^n \{(h; f) : (h; f) \in R^{2n}, h \geq 0, f_i < 0\},$$

$$F_0 = \bigcup_{i=1}^n \{(h; f) : (h; f) \in R^{2n}, f \geq 0, h_i < 0\}.$$

В случае выполнения условия (3) считаем, что процедура финансирования в ИТ предприятия завершена. То есть у *Inv2* не хватило финансовых средств для продолжения процедуры инвестирования, по крайней мере по одной из информационных технологий.

В случае выполнения условия (4) также считаем, что процедура инвестирования ИТ предприятия завершена. То есть у *Inv1* не хватило финансовых средств для продолжения процедуры инвестирования, по крайней мере по одной из информационных технологий.

Если оба условия (3) и (4) не выполняются, полагаем, что процедура инвестирования продолжается.

Значения $(h(T), f(t))$ показывают результат процедуры инвестирования на плановом промежутке $[0, T]$.

Вышеописанный процесс рассмотрен в рамках схемы позиционной многошаговой игры с полной информацией [22].

Как уже отмечалось, вследствие симметричности ограничимся рассмотрением задачи с позиции *Inv1*. Вторая задача решается аналогично. Определение чистой стратегии и множества предпочтительности первого игрока было приведено в работах [12, 15].

Решение задачи 1 состоит в нахождении множеств «предпочтительности» *Inv1* и его оптимальных стратегий. Аналогично ставится задача с точки зрения *Inv2*.

Приведем условия, при которых находится решение игры, т. е. множества «предпочтительности» W_1 и оптимальные стратегии *Inv1*. Эти условия будут задаваться матричными неравенствами.

$$1) (A_1 + R_1) - E > 0, (A_2 + R_2) - E > 0;$$

$$2) (A_1 + R_1) - E > 0, (A_2 + R_2) - E \leq 0;$$

$$3) (A_1 + R_1) - E \leq 0, (A_2 + R_2) - E > 0;$$

$$4) (A_1 + R_1) - E \leq 0, (A_2 + R_2) - E \leq 0.$$

Все остальные варианты соотношений элементов данных матриц. Введем обозначения.

$$Q_1 = (A_1 + R_1) \times B_1, \quad D_1 = [(A_2 + R_2) - E] \times B_1;$$

$$F_1 = (A_2 + R_2) \times B_2, \quad S_1 = [(A_1 + R_1) - E] \times B_1;$$

$$Q_{k+1} = Q_k \times \{Q_k + D_k \times S_k\} \times B_1, \quad D_{k+1} = D_k \times \{F_k + Q_k \times D_k\} \times B_2;$$

$$F_{k+1} = F_k^2 + S_k \times D_k, \quad S_{k+1} = S_k \times Q_k + F_k \times S_k.$$

В рамках этих обозначений для случая 1) множество предпочтительности W_1 определяются следующим образом.

$$W_1 = \bigcup_{T=1}^{\infty} W_1^T; \quad (5)$$

$$W_1^T = \bigcup_{i=1}^T \left\{ \begin{aligned} & (h(0), f(0)) : (h(0), f(0) \in R_+^{2n}), Q_1 \times h(0) \geq \\ & \geq D_1 \times f(0), \dots, Q_T \times h(0) \geq D_T \times f(0), \\ & \{F_T \times f(0) < S_T h(0)\}_i \end{aligned} \right\} / W_1^{T-1}. \quad (6)$$

Оптимальной стратегией первого игрока будет $U^*(j)=E$ для $j=1, \dots, T$.

Для случаев 2) – 5) множества предпочтительности первого игрока и его оптимальные стратегии находятся аналогично. Точно также находится решение задачи и со стороны второго игрока-союзника.

5. Вычислительный эксперимент по поиску рациональных стратегий инвесторов

Вычислительные эксперименты были выполнены в среде MatLab. Они проводились на основе исходных данных, которые были взяты для расчетов в рамках гранта AP06751068 "Разработка системы поддержки принятия решений для выбора стратегий инвестирования в средства кибербезопасности критически важных компьютерных систем национального масштаба" (Республика Казахстан – РК), а также по инвестиционным проектам в сфере ИТ предприятий г. Киева и Киевской области (НИР "Информационное и программное обеспечение, математическое моделирование сложных систем" (№ г/р 0114U005430, Украина).

На рис. 1–3 приведены результаты моделирования множеств предпочтительности инвесторов. На рис. 1 изображена область предпочтительности первого игрока, т. е. множество начальных финансовых ресурсов, обладающих свойством, что если процесс инвестирования начнется из них, то процесс инвестирования закончится следующим образом: у первого игрока еще останутся финансовые ресурсы для инвестирования, а у второго – не останутся. На рис. 1–3 значения x (обозначено на рисунках как $H1$), y (обозначено как $H2$) – это финансовые ресурсы первого инвестора. Переменная z (обозначено как $W1$) – финансовые ресурсы второго инвестора.

Случай 1.

Пусть выполнены следующие предположения:

- первый инвестор представлен двумерным ФР;
- второй инвестор характеризуется одномерным ФР;
- первый инвестор выбирает все компоненты своей стратегии оптимальным образом.

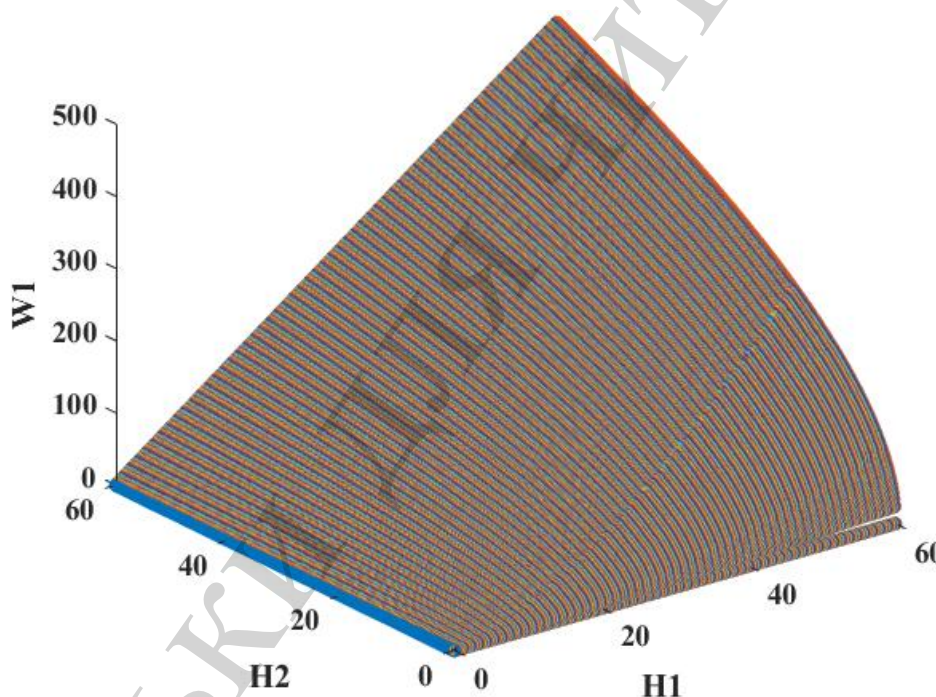


Рис. 1. Множество предпочтительности первого инвестора в случае 1

На рис. 1 область предпочтительности первого инвестора находится под приведенной поверхностью в положительном ортанте ($H1, H2, F$).

Случай 2.

Пусть выполнены следующие предположения:

- первый инвестор представлен двумерным ФР;
- второй инвестор характеризуется одномерным ФР;
- первый инвестор не «контролирует» вторую компоненту своей стратегии, т. е. значение второй компоненты может быть любое.

На рис. 2 изображен множество предпочтительности первого инвестора во втором случае.

$$x = X, y = 0.5 X, z = z$$

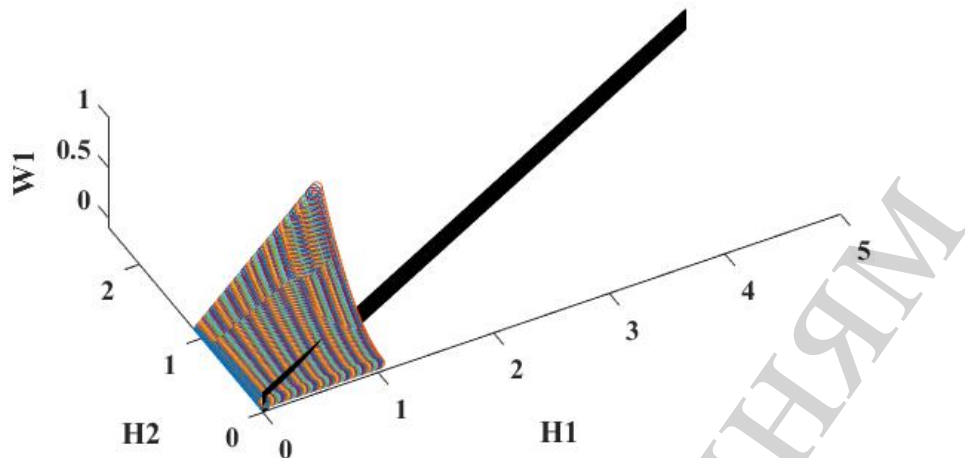


Рис. 2. Множество предпочтительности первого инвестора в случае 2

Во втором случае множество предпочтительности первого инвестора станет меньше (по включению одного множества в другое). В соответствии с постановкой задачи, для первого инвестора часть пространства, примыкающего к ортанту R_2^+ , является предпочтительной. Это обстоятельство наглядно иллюстрируется рис. 1, 2.

Случай 3.

Пусть выполнены следующие предположения:

- первый инвестор представлен одномерным финансовым ресурсом;
- второй инвестор характеризуется одномерным финансовым ресурсом.
- первый инвестор не «контролирует» первую компоненту своей стратегии, т. е. значение первой компоненты может быть любое.

На рис. 3 приведена траектория финансовых ресурсов сторон в случае 3.

$$x = Y, y = 0.5 Y, z = z$$

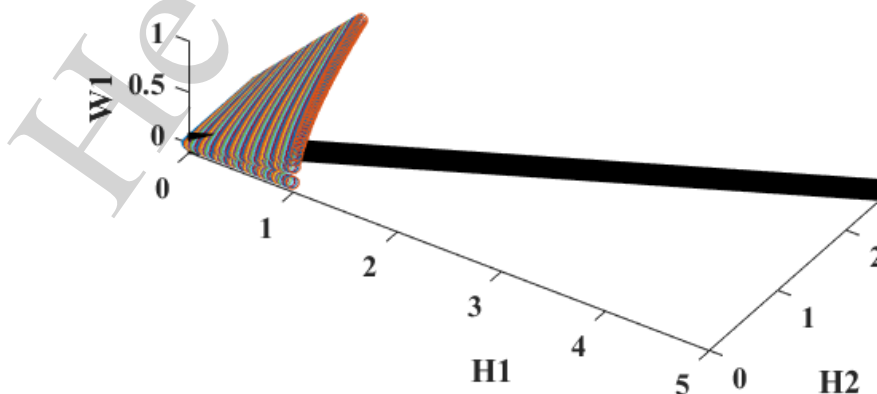


Рис. 3. Множество предпочтительности первого инвестора в случае 3.

В третьем случае множество предпочтительности первого инвестора станет меньше (по включению одного множества в другое).

6. Программная реализация системы поддержки принятия решений в ходе инвестирования в информационные технологии

Разработанная модель относится к классу таких моделей, которые позволяют конструктивно находить решение задачи в зависимости от соотношений параметров, определяющих проблему. Это дало возможность программно реализовать СППР в сфере инвестирования в ИТ. Кроме того, в СППР входят также модули, связанные с нахождением оптимальных стратегий инвестора для случаев:

- 1) взаимного финансового инвестирования;
- 2) не полной информации о финансовом состоянии второй стороны;
- 3) получения дополнительных данных первым инвестором;
- 4) с фиксированным временем окончания взаимодействия инвесторов;

и другие. Именно совокупность алгоритмов решения этих и других задач позволяет говорить о создании вычислительного ядра СППР.

Общий вид формы для задания исходных данных в СППР «Выбор рациональной стратегии инвестирования в информационные технологии» (IT INVESTMENT)» приведен на рис. 4. Данные, приведенные на рис. 4, выбраны таким образом, чтобы проиллюстрировать сложность рассматриваемой модели, а переменные на форме взяты из истории в базе данных СППР. Если решение, связанное с поиском области предпочтительности первого инвестора, не найдено, СППР выдаст соответствующее сообщение.

С помощью СППР «IT INVESTMENT» могут быть рассмотрены любые варианты действий инвесторов, допустимых в постановке проблемы. Заметим, что система себя может проявить лишь в том, что она дает на выходе. В частности, в виде графиков, указания значений оптимальных стратегий инвестирования и т. д.

Основные окна СППР с результатами расчета и визуализацией областей предпочтительности инвесторов показаны на рис. 5. СППР позволяет визуализировать результаты расчетов как в формате текстового вывода для инвестора, так и в виде 2D (см. рис. 5, а) или 3D графика (рис. 5, б, в).

СППР реализована в среде программирования Visual Studio 2019.

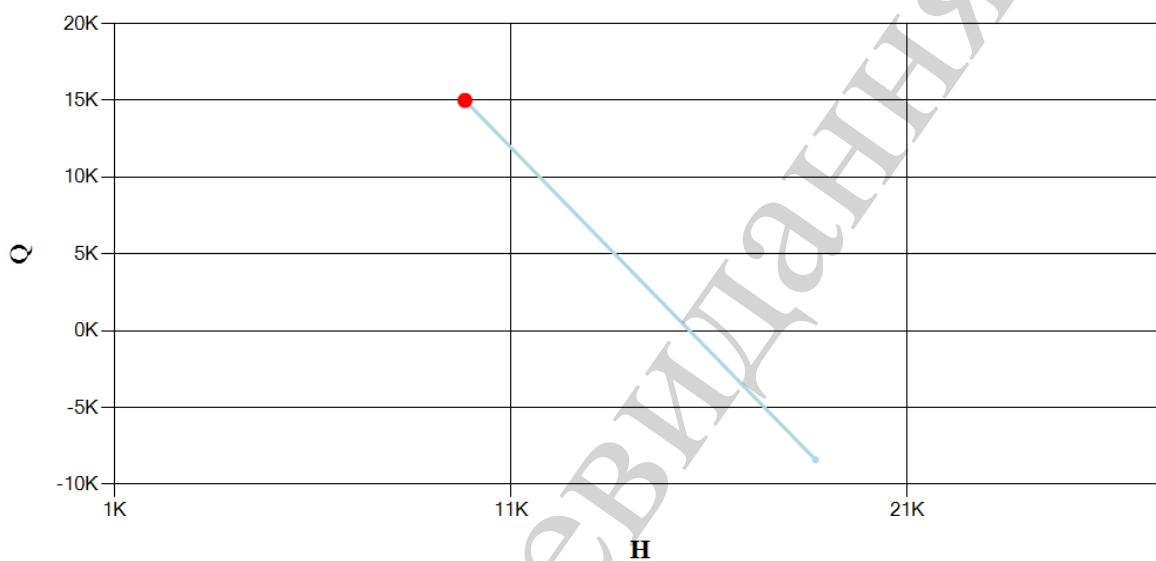
The screenshot shows a window titled "IT INVESTMENT" with a standard Windows title bar (minimize, maximize, close buttons). The interface is divided into two main sections. The left section contains a list of parameters with corresponding input fields: "Курс валют" (27), "Ресурсы", "Темп роста", "Погашение задолженности", "Процентная ставка", "Возвращаемые ресурсы", and "История". The right section is titled "Инвестор 1" and "Инвестор 2" and contains input fields for "Ресурсы", "Темп роста", "Погашение задолженности", "Процентная ставка", and "Возвращаемые ресурсы". At the bottom right, there are two buttons: "Построить 2D" and "Построить 3D".

Параметр	Инвестор 1	Инвестор 2
Курс валют	27	
Ресурсы	10000	15000
Темп роста	1,5	2
Погашение задолженности	0,2	0,3
Процентная ставка	0,8	0,8
Возвращаемые ресурсы	0,8	0,8

Рис. 4. Общий вид модуля СППР «IT INVESTMENT»

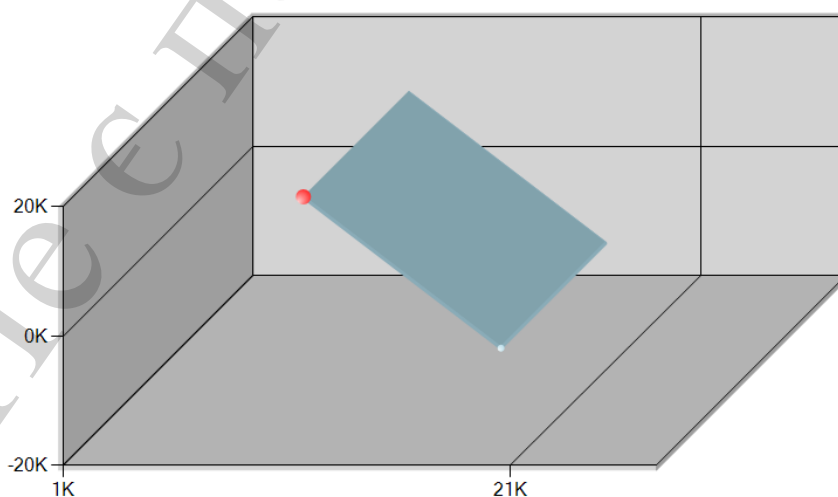
В ходе тестирования СППР «IT INVESTMENT» рассматривались ситуации, рассмотренные выше. Моделировались случаи, когда стратегии игроков выводят их на соответствующие терминальные поверхности. На плоскости ось абсцисс – финансовые ресурсы первого инвестора ($H1$). Ось ординат – финансовые ресурсы второго инвестора ($H2$).

В нижней части окна, рис. 5, показан вывод, сгенерированный СППР в процессе поиска рациональных стратегий инвесторами, а также области пересечения множества предпочтительности первого инвестора. Рациональная стратегия инвестора на рис. 5 показана серо-голубой линией для графика 2D или плоскостью для графика 3D.



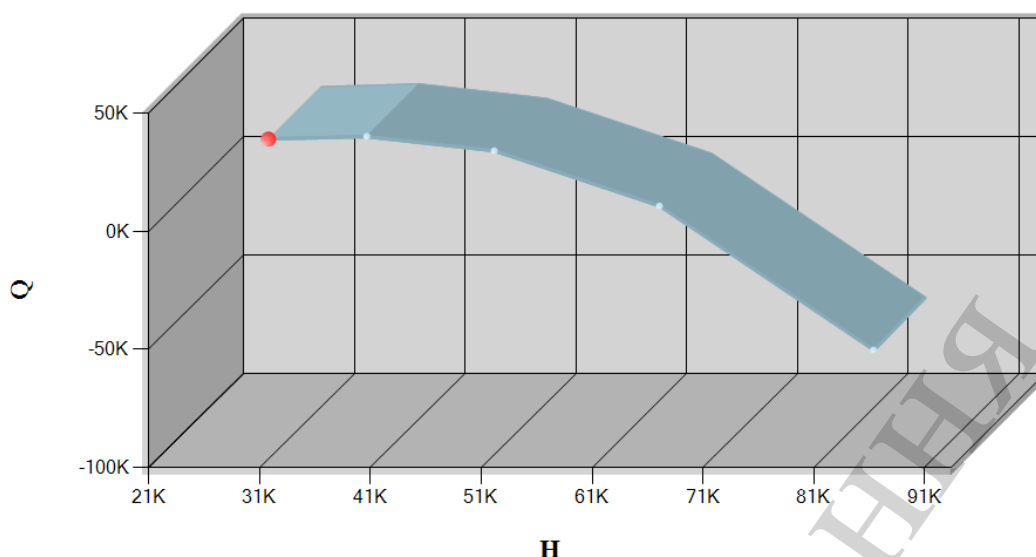
В данном случае, первый игрок, применяя свою оптимальную стратегию, добивается цели во взаимодействии. Это означает, что второй игрок потеряет свой финансовый ресурс, несмотря на его противодействие первому игроку.

а



В данном случае, первый игрок, применяя свою оптимальную стратегию, добивается цели во взаимодействии. Это означает, что второй игрок потеряет свой финансовый ресурс, несмотря на его противодействие первому игроку.

б



В этом случае, первый игрок, применяя свою оптимальную стратегию, добивается своей цели во взаимодействии, т.е. приводит второго игрока к потере финансового ресурса, несмотря на его оптимальное противодействие. При этом преимущество второго игрока в темпе роста дало ему возможность оказать первому игроку серьезное противодействие, что позволило ему даже нарастить свою величину финансового ресурса на некотором промежутке времени.

б

Рис. 5. Результаты работы СППР «IT INVESTMENT»: а – пример двухмерного графика; б – пример трехмерного графика для двух расчетных точек; в – пример трехмерного графика для пяти расчетных точек

Рис. 5 иллюстрирует ситуацию, когда первый инвестор имеет преимущество в соотношении начальных финансовых ресурсов, т. е. они находятся во множестве его предпочтительности.

Развитый аппарат нахождения оптимальных стратегий игроков существенно «облегчает» решение задачи выработки рационального поведения инвесторов. В частности, в случае, когда проблема описывается большим количеством параметров, что делает невозможным нахождение решения проблемы без использования СППР. Поэтому о нахождении модели, дающей более лучший результат, в данном случае говорить не приходится. Это и не являлось целью работы. Более лучший вариант может подходить для случая, когда имеется возможность находить решения для задачи в данной постановке с помощью других подходов. Если же этих возможностей нет, то тогда такой вопрос является риторическим.

В СППР реализована предложенная модель, базирующаяся на применении методов теории дифференциальных игр. Разработанная СППР, позволяет уменьшить расхождения данных прогнозирования и реальной отдачи от инвестирования в сфере ИТ.

7. Обсуждение результатов экспериментов по поиску рациональных стратегий инвесторов

Модель, предложенная в статье, является развитием работ [7, 15]. Однако подходы, предложенные в [7, 15] не позволяют найти решение модели, изложенной в данной работе, т. к. она является более сложной, чем те модели,

вследствие того, что учитывает дополнительные факторы (например, неполнота информации у инвестора, возможность задания вариантов, анализируемых ИТ с помощью нечетких множеств и др.), которые не учитываются в моделях [7, 15].

На рис. 1 приведено множество предпочтительности W_1 для первого инвестора в случае 1. Полученный результат, в данной постановке задачи, близок к результату, приведенному в [15]. Это подтверждает правильность решения при постановке задачи, рассмотренной в рамках этой статьи.

На рис. 2 область предпочтительности первого инвестора будет находиться как результат пересечения множества предпочтительности первого инвестора из рис. 1 (на рис. 2 это цветная поверхность) и гиперплоскости (на рис. 2 гиперплоскость отображена черным цветом). «Уменьшение» множества предпочтительности первого инвестора обусловлено предположением 3 в случае 2. Отметим, что во втором случае множеством предпочтительности первого инвестора является часть множества предпочтительности первого инвестора (из рис. 1), которая примыкает к оси ON_1 .

На рис. 3 область предпочтительности первого инвестора будет находиться в результате пересечения множества предпочтительности первого инвестора из рис. 1 (на рис. 3 это цветная поверхность) и гиперплоскости (на рис. 3 гиперплоскость отображена черным цветом). «Уменьшение» множества предпочтительности первого инвестора обусловлено предположением 3 в случае 3. Отметим, что в третьем случае множеством предпочтительности первого инвестора является часть множества предпочтительности первого инвестора (из рис. 1), которая примыкает к оси ON_2 .

Рис. 5, а–в иллюстрируют ситуацию, что, несмотря на преимущество второго инвестора над первым инвестором в темпе роста его финансовых ресурсов, соотношение параметров таково, что начальные финансовые ресурсы инвесторы находятся в области предпочтительности первого игрока. Следовательно, в соответствии с результатами данной статьи, у первого инвестора существует его оптимальная стратегия, которая приводит его контрагента-инвестора к потере его финансовых ресурсов. Это наглядно видно, как в двумерном, так и в трехмерном случаях. Полученный в «IT INVESTMENT» результат явно невиден из-за того, что задача сложная, многомерная. Однако наличие на форме интерпретации решения в виде текстовых подсказок для лица, принимающего решение, делает его трактовку более простой по сравнению с оперированием математическими понятиями, например, гиперплоскость или луч сбалансированности.

Результаты вычислительных экспериментов показывают эффективность предложенного инструментария для решения проблемы управления финансовыми ресурсами сторон с учетом многофакторности.

В сравнении с имеющимися моделями, которые описаны в [8, 12], предложенная модель улучшила показатели эффективности и прогнозируемости для инвестора в среднем на 8–11 %. Данное утверждение получено на основе сравнения с реальными расчетами по инвестиционным проектам в информационные системы в Украине и РК. На СППП было поучено свидетельство № 90553 про регистрацию авторского права.

Следует отметить, что рассматриваемая модель требует выполнения ряда ограничений, в частности важным является условие неотрицательности элементов матриц, задающих динамику процесса. В свою очередь, элементы матриц зависят от особенностей рассматриваемого объекта инвестирования и будут заведомо разными если, например, идет речь об инвестировании ИТ, связанных с кибербезопасностью (где необходимо учесть риски, уязвимости и угрозы), и инвестированием технологий Smart City (где необходимо учесть приоритет и порядок реализации информационных технологий).

Рассмотрение приведенных моделей является перспективным направлением для решения задач в сфере инвестирования, например, информационных систем и технологий, Смарт Сити, банковского и промышленного сектора экономики. В дальнейшем заслуживает внимания и определена как перспектива продолжения исследований, развертывание на базе данной модели полноценной СППР в задачах оценивания инвестиционных проектов в различных областях. Возможна апробация СППР не только на инвестиционных и финансовых проектах в области цифровой экономики, но и в смежных областях, например при выборе стратегий для групп инвесторов.

8. Выводы

1. Разработана математическая модель на базе теории многошаговых игр качества с несколькими терминальными поверхностями для системы поддержки принятия решений в ходе выбора рациональных стратегий инвесторами. В качестве примера, как объект исследования, выбрана задача финансирования информационных технологий и систем компании. Модель ориентирована на практическое применение в программно-алгоритмическом блоке систем поддержки принятия решений (СППР). Предложенная СППР будет полезна в ходе процедуры поиска инвесторами рациональных стратегий. Модель, используемая в математическом ядре СППР, базируется на инструментарии билинейных многошаговых игр качества с несколькими терминальными поверхностями. В статье, в отличие от существующих, впервые рассмотрен новый класс билинейных многошаговых игр. Полученное решение данного класса игр, позволило адекватно в многомерном пространстве графически отобразить множества предпочтительности инвесторов в процессе инвестирования в проекты в сфере ИТ с учетом многофакторности. Показано, что такой подход в совокупности с применением компьютерного моделирования и СППР дает инвестору более широкие возможности для анализа и выбора рациональных финансовых стратегий.

2. Проведено компьютерное моделирование в системе MatLab стратегий инвесторов и их множеств предпочтительности на основе разработанной модели. Компьютерная модель позволила уменьшить расхождения результатов прогнозной оценки стратегий для инвесторов и выбранных вариантов в среднем на 8–11 %.

3. Разработан программный продукт – система поддержки принятия решений «IT INVESTMENT», основанная на применении нового класса билинейных дифференциальных игр. СППР позволяет отыскивать оптимальные стратегии инвестирования для потенциальных инвесторов. Программный продукт реализован в среде программирования Visual Studio 2019. Развитый аппарат

нахождения оптимальных стратегий игроков с помощью «IT INVESTMENT» позволяет существенно облегчить стоящую перед инвесторами задачу выработки рационального поведения в случае, когда проблема описывается большим количеством параметров, что делает невозможным нахождения решения проблемы без использования СППР. Также, применение СППР позволило уменьшить расхождения данных прогнозирования и реальной отдачи от инвестирования, например, в проекты в сфере ИТ. Предложенное решение и СППР позволяют выбрать оптимальную финансовую составляющую стратегии инвестирования при любых соотношениях параметров, описывающих процесс.

Литература

1. Zuboff, S. (2015). Big other: Surveillance Capitalism and the Prospects of an Information Civilization. *Journal of Information Technology*, 30 (1), 75–89. doi: <https://doi.org/10.1057/jit.2015.5>
2. McArthur, D. (2002). Investing in digital resources. *New Directions for Higher Education*, 2002 (119), 77–86. doi: <https://doi.org/10.1002/he.74>
3. Madon, S., Krishna, S. (2018). *The Digital Challenge: Information Technology in the Development Context*. Routledge, 386. doi: <https://doi.org/10.4324/9781315196978>
4. Woodard, C. J., Ramasubbu, N., Tschang, F. T., Sambamurthy, V. (2013). Design Capital and Design Moves: The Logic of Digital Business Strategy. *MIS Quarterly*, 37 (2), 537–564. doi: <https://doi.org/10.25300/misq/2013/37.2.10>
5. Bai, C., Sarkis, J. (2016). Supplier development investment strategies: a game theoretic evaluation. *Annals of Operations Research*, 240 (2), 583–615. doi: <https://doi.org/10.1007/s10479-014-1737-9>
6. Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., Zorzi, M. (2014). Internet of Things for Smart Cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1 (1), 22–32. doi: <https://doi.org/10.1109/jiot.2014.2306328>
7. Akhmetov, B. S., Akhmetov, B. B., Lakhno, V. A., Malyukov, V. P. (2019). Adaptive model of mutual financial investment procedure control in cybersecurity systems of situational transport centers. *NEWS of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*, 3 (435), 159–172. doi: <https://doi.org/10.32014/2019.2518-170x.82>
8. Mithas, S., Tafti, A., Mitchell, W. (2013). How a Firm's Competitive Environment and Digital Strategic Posture Influence Digital Business Strategy. *MIS Quarterly*, 37 (2), 511–536. doi: <https://doi.org/10.25300/misq/2013/37.2.09>
9. Tiwana, A., Ramesh, B. (2001). E-services: problems, opportunities, and digital platforms. *Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. doi: <https://doi.org/10.1109/hicss.2001.926311>
10. Mazzarol, T. (2015). SMEs engagement with e-commerce, e-business and e-marketing. *Small Enterprise Research*, 22 (1), 79–90. doi: <https://doi.org/10.1080/13215906.2015.1018400>
11. Sedera, D., Lokuge, S., Grover, V., Sarker, S., Sarker, S. (2016). Innovating with enterprise systems and digital platforms: A contingent resource-based

theory view. *Information & Management*, 53 (3), 366–379. doi: <https://doi.org/10.1016/j.im.2016.01.001>

12. Mohammadzadeh, A. K., Ghafoori, S., Mohammadian, A., Mohammadkazemi, R., Mahbanooei, B., Ghasemi, R. (2018). A Fuzzy Analytic Network Process (FANP) approach for prioritizing internet of things challenges in Iran. *Technology in Society*, 53, 124–134. doi: <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2018.01.007>

13. Selçuk, A. L. P., Özkan, T. K. (2015). Job choice with multi-criteria decision making approach in a fuzzy environment. *International Review of Management and Marketing*, 5 (3), 165–172.

14. Kache, F., Seuring, S. (2017). Challenges and opportunities of digital information at the intersection of Big Data Analytics and supply chain management. *International Journal of Operations & Production Management*, 37 (1), 10–36. doi: <https://doi.org/10.1108/ijopm-02-2015-0078>

15. Akhmetov, B. B., Lakhno, V. A., Akhmetov, B. S., Malyukov, V. P. (2018). The Choice of Protection Strategies During the Bilinear Quality Game On Cyber Security Financing. *Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*, 3, 6–14.

16. Lakhno, V., Malyukov, V., Gerasymchuk, N., Shtuler, I. (2017). Development of the decision making support system to control a procedure of financial investment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (3 (90)), 35–41. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.119259>

17. Smit, H. T. J., Trigeorgis, L. (2010). Flexibility and Games in Strategic Investment. *Multinational Finance Journal*, 14 (1/2), 125–151. doi: <https://doi.org/10.17578/14-1/2-4>

18. Arasteh, A. (2017). Considering the investment decisions with real options games approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 1282–1294. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.043>

19. Gottschlich, J., Hinz, O. (2014). A decision support system for stock investment recommendations using collective wisdom. *Decision Support Systems*, 59, 52–62. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dss.2013.10.005>

20. Strantzali, E., Aravossis, K. (2016). Decision making in renewable energy investments: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 885–898. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.021>

21. Nagurney, A., Daniele, P., Shukla, S. (2016). A supply chain network game theory model of cybersecurity investments with nonlinear budget constraints. *Annals of Operations Research*, 248 (1-2), 405–427. doi: <https://doi.org/10.1007/s10479-016-2209-1>

22. Akhmetov, B., Balgabayeva, L., Lakhno, V., Malyukov, V., Alenova, R., Tashimova, A. (2019). Mobile Platform for Decision Support System During Mutual Continuous Investment in Technology for Smart City. *Studies in Systems, Decision and Control*, 731–742. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-12072-6_59

23. Nikol'skii, M. S. (2017). A Study of the Generalized Pontryagin Test Example from the Theory of Differential Games. *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics*, 299 (S1), 158–164. doi: <https://doi.org/10.1134/s0081543817090188>

24. Krasovskii, N. A., Tarasyev, A. M. (2018). Demand Functions in Dynamic Games. *IFAC-PapersOnLine*, 51 (32), 271–276. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.394>