

УДК 519.714.2

DOI 10.21661/r-467707

*S.S. Gusev*

**АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ПОДХОДОВ РЕШЕНИЯ  
ЗАДАЧ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА  
В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

*Аннотация:* в статье рассматривается анализ методов и подходов решения задач многокритериального выбора в условиях неопределенности. Приводится описание теории многомерной полезности, теории нечетких множеств Заде и метода анализа иерархий Саати о принятии решений в многомерных многокритериальных системах. Проводится анализ управления ядерными энергетическими установками на подкритическом уровне. В качестве методов управления ресурсами используется Парето-оптимизационный подход управления. Исследуется работа алгоритма оптимизации решений, состоящего из двух этапов.

*Ключевые слова:* идентификация, динамический объект, многомерные многокритериальные системы, ядерные энергетические установки.

*S.S. Gusev*

**ANALYSIS OF METHODS AND APPROACHES OF SOLVING PROBLEMS  
WITH MULTI-CRITERIA CHOICE IN CONDITIONS OF UNCERTAINTY**

*Abstract:* the article deals with analysis of methods and approaches solving problems with multi-criteria choice in conditions of uncertainty; describes the theory of multidimensional utility theory of fuzzy sets Zadeh and method of analysis of hierarchies Saaty decision-making in multiobjective multidimensional systems. The author has also provided the analysis of the management of nuclear power plants on the subcritical level. Pareto-optimization approach of control has been used as methods of resource management. It explores the work of the optimization algorithm solutions consisting of two stages.

**Keywords:** *identification, dynamic object, multidimensional multicriteria system, nuclear power plant.*

## 1. Введение

Проектирование сложной технической системы обычно включает в себя этап параметрической оптимизации [1]. В настоящее время при этом чаще всего используется многокритериальная оптимизация, при которой качество функционирования объекта проектирования определяется некоторым набором критериев оптимальности.

Методы решения задачи многокритериальной оптимизации чрезвычайно разнообразны. Существует несколько способов классификации этих методов, например, классификация, основанная на содержании и форме использования дополнительной информации о предпочтениях лица, принимающего решения. В соответствии с этой классификацией выделяются следующие классы методов решения задачи многокритериальной оптимизации:

- методы, основанные на предварительном построении аппроксимации множества Парето;
- априорные методы;
- апостериорные методы;
- адаптивные методы.

Для пользователя наиболее удобны методы, основанные на непосредственном использовании множества Парето (а, тем самым, и фронта Парето). В этом случае лицо, принимающее решение, выбирает компромиссное решение на фронте Парето не формальными методами, исходя только из своих предпочтений, а также из ряда заданных ограничений, ряда факторов, ограничивающих выбор критериев лица, принимающего решения. Основным недостатком методов этого класса, сдерживающим их широкое применение, является их высокая вычислительная сложность. Известно значительное количество методов и алгоритмов приближенного построения множества Парето [2; 3]. Новым и высокоэффективным классом таких методов являются методы на основе генетических алгоритмов.

Генетические алгоритмы принадлежат к классу эволюционных алгоритмов и обладают рядом характеристик, делающих их более предпочтительными, чем классические методы оптимизации. Так генетические алгоритмы применимы к задачам большой размерности и способны захватить Парето-оптимальные точки даже при однократном запуске алгоритма.

- метод VEGA (Vector Evaluated Genetic Algorithm);
- метод FFGA (Fonseca and Fleming's Multiobjective Genetic Algorithm);
- метод NPGA (Niched Pareto Genetic Algorithm);
- метод SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm).

В методе VEGA селекция производится по переключающимся частным критериям оптимальности. Для каждого из  $m$  частных критериев создается подпопуляция, содержащая  $N_p/m$  индивидов, где  $N_p$  – размер всей популяции. Индивиды в  $j$ -ю подпопуляцию отбираются с помощью пропорциональной селекции по критерию  $\Phi_j(X)$ . Далее подпопуляции смешиваются для получения популяции размера  $N_p$ , а затем по общей схеме осуществляются скрещивание и мутация.

Метод FFGA использует процедуру ранжирования индивидов, основанную на Парето-доминировании. При этом ранг каждого из индивидов определяется количеством доминирующих его других индивидов данной популяции (так что чем ниже ранг, тем индивид ближе к множеству Парето). Пригодность индивида вычисляется на основе величины, обратной его рангу. Для отбора индивидов в следующее поколение используется процедура турнирной селекции.

В методе NPGA, в отличие от методов VEGA, FFGA, существует механизм поддержания разнообразия популяции. Метод основан на формировании популяционных ниш.

Метод SPEA является самым сложным из числа рассматриваемых методов и, также, как метод FFGA, использует селекцию, основанную на Парето-доминировании. Для предотвращения преждевременной сходимости, метод использует популяционные ниши. Очень важным свойством метода SPEA является возможность априорного задания количества итоговых точек в искомой аппроксимации множества Парето.

В докладе исследуется работа специального алгоритма идентификации, учитывающего определенную информацию о параметрах объекта. Проводится анализ работы алгоритма принятия решений в условиях неопределенности на основе Парето-Нэш-УКУ-Шепли-комбинаций теории управления структурно-сложными системами. Анализируется связь точности идентификации и величины ошибки измерения.

В качестве методов оптимизации управления ресурсами рассмотрены динамические процессы принятия решений в условиях неопределенности с использованием стабильно-эффективных компромиссов (СТЭК) на основе Парето-Нэш-УКУ-Шепли-комбинаций теории управления структурно-сложными системами, дополненные и расширенные алгоритмами поиска стабильных решений на основе активных равновесий и векторного равновесия по Нэшу. К динамическим задачам принятия решений относятся задачи с неустойчивой во времени исходной информацией, то есть с течением времени изменяются состав и свойства альтернатив, набор критериев выбора, их относительная важность, а также предпочтительность альтернатив, критериев и исходов.

## *2. Методы принятия решений в задачах многокритериального выбора*

Для решения задач многокритериального выбора в условиях неопределенности предложено множество математических методов, классификация которых приведена в [4]. Методы прикладной теории принятия решений различаются способом представления и обработки информации. Подход к проблеме выбора может основываться на отношениях порядка среди альтернатив – классической модели принятия решений, в которой каждой альтернативе ставится в соответствие некоторое число, либо на отношениях включения – поведенческой модели принятия решений, основанной на принадлежности альтернатив к некоторому множеству. Среди методов классического подхода наибольшей универсальностью и теоретической обоснованностью обладают методы теории полезности [5], методы теории нечетких множеств [6; 7; 9] и метод анализа иерархий [8].

Теория многомерной полезности позволяет для задач в условиях риска и неопределенности получить функцию многомерной полезности, максимальное

значение которой соответствует наиболее предпочтительному варианту. Многомерная функция полезности обычно получается как аддитивная или мультипликативная комбинация одномерных функций, которые строятся на основании опроса экспертов и позволяют провести ранжирование возможных исходов без взаимного сравнения альтернатив. При этом делается допущение о взаимной независимости критериев по полезности [4]. Процедура построения функции полезности требует привлечения значительных объемов информации и является достаточно трудоемкой. Достоинством этого подхода является возможность оценки любого количества альтернативных вариантов с использованием полученной функции. В случае неустойчивой исходной информации применение методов теории полезности становится малоэффективным.

Теория нечетких множеств, предложенная Заде, позволяет представить знания о предпочтительности альтернатив по различным критериям с помощью нечетких множеств. Формирование нечетких множеств является более простой и менее трудоемкой процедурой, чем построение функций полезности. Для выявления лучших вариантов по совокупности критериев необходимо иметь в распоряжении информацию о важности критериев и типах возможных отношений между ними. Теория нечетких множеств предоставляет различные средства для учета взаимных отношений критериев: использование весовых коэффициентов, нечеткие отношения предпочтения, нечеткий логический вывод на правилах определения лучшей альтернативы и т. д. [6; 7; 9]. Широкие возможности представления знаний и простота вычислительных процедур делают эту теорию очень привлекательным инструментом для создания систем поддержки принятия решений. При этом требуется теоретическое и экспериментальное исследование получаемых системами результатов с целью проверки их адекватности, согласованности, надежности и т. д.

Метод анализа иерархий о принятии решений в многомерных многокритериальных системах (ММС), предложенный Саати, основанный на парных сравнениях альтернативных вариантов по различным критериям и последующим ранжированием набора альтернатив по всем критериям и целям.

Взаимоотношения между критериями учитываются путем построения иерархии критериев и применением парных сравнений для выявления важности критериев и подкритериев. Метод отличается простотой и дает хорошее соответствие интуитивным представлениям. Главным недостатком этого подхода является большое количество требуемой информации об объекте исследования, представляющей собой множество оценок предпочтительности, полученных в процессе парного сравнения альтернатив и критериев. Благодаря простоте метод хорошо подходит для решения динамических задач принятия решений.

### 3. Ядерная энергетическая установка и основные узлы ее сопряжения

Рассмотрим ядерную энергетическую установку (ЯЭУ), простейшая схема которой приведена на рис. 1 [4].

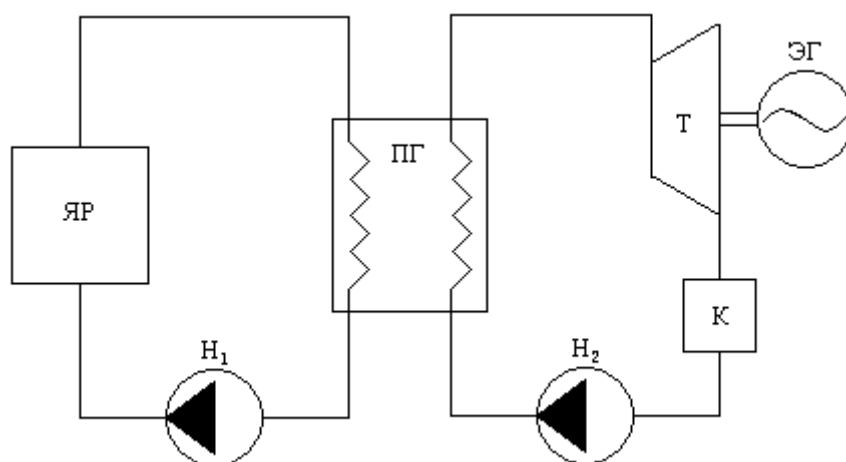


Рис. 1. Простейшая схема двухконтурной ЯЭУ с паротурбинным циклом

Основными элементами в ЯЭУ являются ядерный реактор (ЯР) и тепловое оборудование. Первый контур включает в себя ЯР, парогенератор (ПГ), циркуляционный насос  $H_1$ , трубопроводы горячего (от ЯР) и холодного (к ЯР) теплоносителя.

В теплосиловое оборудование второго контура ЯЭУ входят турбина (Т) с электрическим генератором (ЭГ), конденсатор отработанного пара (К), циркуляционный насос  $H_2$  и т. д.

Рассмотрим подробнее основные элементы конструкции ЯР, изображенного на рис. 2. Основными элементами конструкции ЯР являются: 1 – управляющие

стержни, 2 – боковой отражатель, 3 – теплоноситель, 4 – биологическая защита, 5 – активная зона (АЗ), 6 – замедлитель, 7 – ядерное топливо.

Аппаратура систем контроля, управления и защиты – это комплекс механизмов, приборов, регулирующих устройств, предназначенный для обеспечения безаварийной эксплуатации ядерной установки, то есть исключения самопроизвольного разгона ЯР или отклонений технологических параметров установки от заданных значений.

Основную роль в обеспечении безопасности эксплуатации ЯР призвана сыграть система управления и защиты (СУЗ), на которую возлагаются функции по управлению цепной реакцией при пуске, переходе с одного уровня мощности на другой и остановке ЯР, а также быстрому прекращению реакции деления в случае возникновения аварийной ситуации.

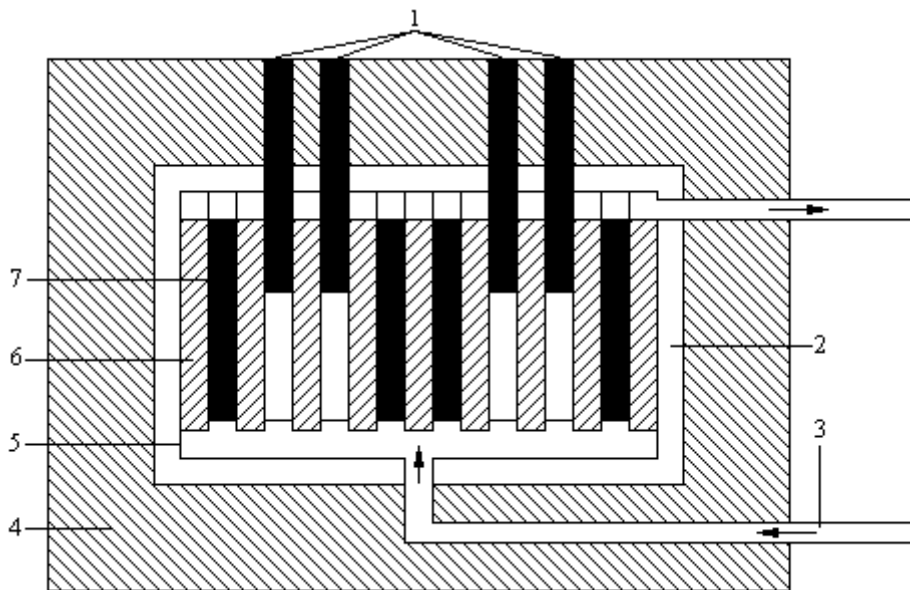


Рис. 2. Основные элементы ЯР

Конструкция АЗ и других систем, определяющих условия ее работы, должны исключать превышение пределов повреждения тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), устанавливаемых для нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации, включая проектные аварии.

Не допускается превышение пределов безопасной эксплуатации ни при одном из следующих нарушений нормальной эксплуатации (с учетом действия защитных систем):

- единичные отказы в системах управления реакторной установки;
- потеря энергоснабжения главных циркуляционных насосов (ГЦН);
- отключение турбогенераторов и потребителей тепла;
- потеря всех источников энергоснабжения нормальной эксплуатации;
- течи контура теплоносителя реактора, компенсируемые системами подпитки нормальной эксплуатации;
- неполадка предохранительных клапанов.

Конструкция и компоновка АЗ, реактора и другого оборудования первого контура (включая систему очистки теплоносителя) с учетом работы систем безопасности должны исключать при авариях, в том числе с разрушением или расплавлением топлива, образования объемов продуктов аварии, в которых может возникнуть самоподдерживающаяся цепная реакция.

Текущее состояние ЯР можно охарактеризовать эффективным коэффициентом размножения нейтронов  $k$  или реактивностью  $\rho$ , которые связаны следующим соотношением:

$$\rho = \frac{k - 1}{k} .$$

Для этих величин характерны следующие значения:

- $k > 1$  – цепная реакция нарастает во времени, реактор находится в надкритическом состоянии, его реактивность  $\rho > 0$ ;
- $k < 1$  – реакция затухает, реактор подкритичен,  $\rho < 0$ ;
- $k = 1$  – число делений ядер постоянно, реактор находится в стабильном критическом состоянии,  $\rho = 0$ .

Рабочие органы СУЗ, как наиболее эффективного органа аварийной защиты ЯР должны обладать достаточным быстродействием для перевода АЗ реактора в подкритическое состояние ( $k_{эфф} < 1$ ).

В случаях, если эффективность аварийной защиты недостаточна для длительного поддержания АЗ в подкритическом состоянии, когда  $k_{эфф}$  не должен превышать 0,98, то есть  $k_{эфф} < 0,98$ , должно быть предусмотрено автоматическое подключение другой системы остановки реактора, обладающей достаточной



эффективностью для поддержания АЗ в подкритическом состоянии с учетом возможного высвобождения реактивности.

Рассмотрим СУЗ, как основную систему защиты для вывода ЯР из надкритического состояния ( $k_{эфф} > 1$ ) в подкритический уровень ( $k_{эфф} < 1$ ), используя математический аппарат с использованием обратной связи. В качестве образной связи будут рассмотрены компенсирующие стержни, используемые для аварийных средств защиты, воздействие которых приводит к замедлению цепной реакции деления нейтронов и, в крайнем случае, – остановке реактора.

#### *4. Постановка задачи*

Рассмотрим две противодействующие и в то же время сдерживающие цепную реакцию деления нейтронов системы ЯР: АЗ и СУЗ.

Активными средствами АЗ будут выступать ядерное топливо (стержни, постоянно находящиеся в АЗ для производства реакции) и теплоноситель, пассивными средствами АЗ будут выступать регулирующие стержни, замедлитель, имитаторы ТВЭЛов, и боковой отражатель – сплошная графитовая кладка толщиной 0,65м. Активными средствами СУЗ будут выступать компенсирующие стержни быстродействующей аварийной защиты (БАЗ), скорость введения которых в водный раствор АЗ в случае аварийной защиты составляет  $< 0,9$  секунды с давлением 16 МПа. Пассивными средствами СУЗ будут выступать борный раствор и компенсирующие стержни медленной аварийной защиты (МАЗ) время ввода которых в АЗ для замедления цепной реакции деления и, в крайнем случае, остановки реактора не столь быстро по сравнению с БАЗ и составляет  $\sim 18$  секунд.

На рис. 3 приведена структура взаимодействия АЗ и СУЗ, где АС – совокупность активных средств коалиции, ПС – совокупность пассивных средств коалиции каждой из систем.

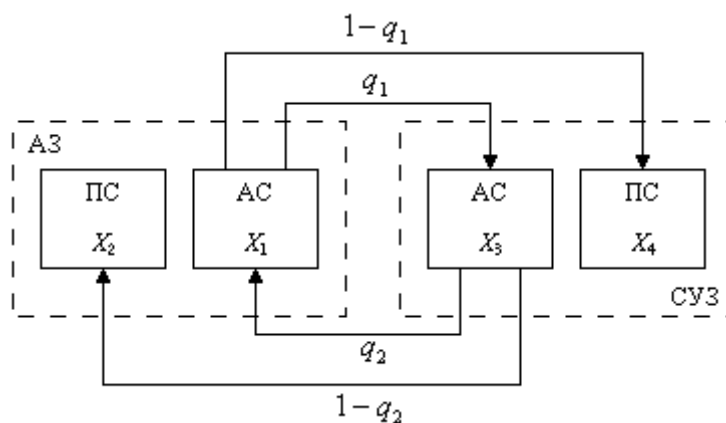


Рис. 3. Структура взаимодействия АЗ и СУЗ

Для упрощения решения задачи будем рассматривать только регулирующие (91), компенсирующие (9) и постоянно находящиеся (51) в АЗ стержни.

Система уравнений задается на основе динамики средних следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -P_{31} \cdot q_2 \cdot x_3 \cdot R(x_1) \\ \dot{x}_2 = -P_{32} \cdot (1 - q_2) \cdot x_3 \cdot R(x_2) \\ \dot{x}_3 = -P_{13} \cdot q_1 \cdot x_1 \cdot R(x_3) \\ \dot{x}_4 = -P_{14} \cdot (1 - q_1) \cdot x_1 \cdot R(x_4) \end{cases}, \quad (1)$$

где  $P_{ij}$  – эффективность воздействия одного объекта  $i$ -ого вида одной системы на один объект  $j$ -ого типа другой системы,  $0 \leq P_{ij} \leq 1$ ;  $q_i$  – доля АС воздействия одной коалиции на АС противодействующей коалиции,  $0 \leq q_i \leq 1$ ;  $(1 - q_i)$  – доля АС воздействия одной коалиции на АС противодействующей коалиции;  $x_i$  – текущая средняя численность объектов  $i$ -ого типа:

$$R(x_i) = \begin{cases} x_i, & x_i \leq 1 \\ 1, & x_i > 1 \end{cases}.$$

Рассмотрим теоретико-игровую модель кооперативного взаимодействия двух взаимосвязанных и взаимозависимых систем АЗ – СУЗ в пошаговом варианте событий, где шаг – конечный интервал времени и число шагов конечно ( $k = \overline{1, r}$ ). Каждое активное средство делает на шаге один ход. Шаг равен

$$\Delta T = \frac{T}{r}.$$

В пошаговом варианте система (1) имеет следующий вид:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) - P_{31} \cdot q_2 \cdot x_3(k) \cdot R(x_1) \\ x_2(k+1) = x_2(k) - P_{32} \cdot (1 - q_2) \cdot x_3(k) \cdot R(x_2) \\ x_3(k+1) = x_3(k) - P_{13} \cdot q_1 \cdot x_1(k) \cdot R(x_3) \\ x_4(k+1) = x_4(k) - P_{14} \cdot (1 - q_1) \cdot x_1(k) \cdot R(x_4) \end{cases},$$

где  $k = 1, 2, \dots$ ,  $0 \leq q_i \leq 1$  ( $i = 1, 2$ ),  $0 \leq P_{ij} \leq 1$  ( $i = 1, 3$ ;  $j = 1, 2, 3, 4$ ),  $x_i > 0$ ,  $x_i(k)$  – численность к началу  $k$ -ого шага.

В качестве показателя терминальных потерь ( $J$ ) выберем показатель, имеющий смысл суммарного перевеса по АС и ПС составляющим.

$$\begin{cases} J_{A3} = \alpha_{11} \cdot [x_3^2(T) - x_1^2(T)] + \alpha_{12} \cdot [x_4^2(T) - x_2^2(T)] + \alpha_{13} \cdot \int_{t_0}^T x_3 \cdot dt \\ J_{CV3} = \alpha_{21} \cdot [x_1^2(T) - x_3^2(T)] + \alpha_{22} \cdot [x_2^2(T) - x_4^2(T)] + \alpha_{23} \cdot \int_0^T x_1 \cdot dt \end{cases},$$

где  $J_{A3}$  – показатель потерь коалиции АЗ;  $J_{CV3}$  – показатель потерь коалиции СУЗ;  $\alpha_{ij}$  – весовые коэффициенты, определяющие целевой приоритет каждой из сторон в АС и ПС противоположных сторон (терминальная составляющая) или в увеличении интегральной скорости убывания АС противоположной стороны (интегральная составляющая) ( $0 \leq \alpha_{ij} \leq 1$ ,  $\alpha_{i1} + \alpha_{i2} + \alpha_{i3} = 1$ ,  $i = \{1, 2\}$ ), где значения коэффициентов задаются в зависимости от тактики каждой из сторон.

Используя алгоритм общего вида, базирующийся на определении двух противодействующих и в то же время взаимосвязанных и взаимозависимых сторон – угроз и контругроз (УКУ), сформируем алгоритм получения сетевых приближений для задач данного класса: двухкоалиционных, двухкритериальных.

Сетевой алгоритм на первом этапе, когда формируется двумерная ортогональная равномерная сеть, позволяет получить начальное приближение для поиска точного решения на втором этапе оптимизации, когда формируется множество оптимальных сетевых решений, которые можно использовать в качестве начальных приближений для получения оптимального управления ММС.

Даны исходные экспериментальные данные в виде таблицы 1.

Таблица 1

*Временные замеры работы сетевого алгоритма*

Глубина проникновения БАЗ в АЗ, мм	1350	–	–	–	–	–
Глубина проникновения МАЗ в АЗ, мм	270	540	810	1000	1200	1350
Время, с	1	4	8	12	16	18

Реализация сетевого алгоритма оптимизации осуществлена на алгоритмическом языке с использованием начальных условий.

### 5. Алгоритм идентификации

Рассмотрим задачу взаимодействия двух противодействующих объектов двухкоалиционной динамической системы. Цель каждой из системы состоит в преодолении и получении приоритета над противодействующей системой с целью сохранения баланса всего комплекса в целом, то есть удержания цепной реакции деления нейтронов на заданном уровне, в данном случае подкритическом уровне ЯР при  $k_{эфф} < 1$ .

Рассмотрим двухэтапный алгоритм получения УКУ-Шепли-оптимального управления прогнозом динамики конфликта [1] АЗ – СУЗ при следующих нулевых начальных условиях на первом такте. Исходные данные заданы условно, поэтому полученные оценки задачи не стоит рассматривать как результат решения исследовательской работы с практическим уклоном. Цель задачи состоит в определении Парето-УКУ-Шепли-оптимального вектора параметров при выведении элементов системы СУЗ из АЗ ЯР и ввода регулирующих стержней в АЗ ЯР для начала производства цепной реакции деления.

$$\begin{cases} x_1(0) = 51 \\ x_2(0) = 91 \\ x_3(0) = 0 \\ x_4(0) = 0 \end{cases}, \begin{cases} P_{31}(0) = 0,99 \\ P_{32}(0) = 0,99 \\ P_{33}(0) = 0,99 \\ P_{34}(0) = 0,99 \end{cases}, \begin{cases} \alpha_{11}(0) = 0,9 \\ \alpha_{12}(0) = 0,1 \\ \alpha_{21}(0) = 0,2 \\ \alpha_{22}(0) = 0,8 \end{cases}$$

$$\begin{cases} J_{АЗ} = \alpha_{11} \cdot [x_3^2(T) - x_1^2(T)] + \alpha_{12} \cdot [x_4^2(T) - x_2^2(T)] \rightarrow \min \\ J_{СУЗ} = \alpha_{21} \cdot [x_1^2(T) - x_3^2(T)] + \alpha_{22} \cdot [x_2^2(T) - x_4^2(T)] \rightarrow \min \end{cases}$$

На первом такте прогноза происходит определение значений вектора де-лежа Шепли на основе Парето-Нэш-оптимизации и векторная оптимизация управления коалициями для минимизации отклонения от точки Шепли. Результатом оптимизации является точка сильной предпосылки игры (СТЭК при одно-тактовом прогнозе).

Результатом первого такта прогноза является определение Парето-УКУ-Шепли-оптимального вектора параметров:

$$\{q_1^{opt} = 0,496, q_2^{opt} = 0,573\}.$$

Вектор состояния к концу первого такта:

$$x_1 = 51, x_2 = 76, x_3 = 2, x_4 = 4,7.$$

Начальные условия второго такта:

$$\begin{cases} x_1(1) = 51 \\ x_2(1) = 76 \\ x_3(1) = 2 \\ x_4(1) = 4,7 \end{cases}, \begin{cases} P_{31}(1) = 0,99 \\ P_{32}(1) = 0,99 \\ P_{33}(1) = 0,99 \\ P_{34}(1) = 0,99 \end{cases}, \begin{cases} \alpha_{11}(1) = 0,9 \\ \alpha_{12}(1) = 0,1 \\ \alpha_{21}(1) = 0,2 \\ \alpha_{22}(1) = 0,8 \end{cases},$$

$$\begin{cases} J_{AB} = \alpha_{11} \cdot [x_3^2(T) - x_1^2(T)] + \alpha_{12} \cdot [x_4^2(T) - x_2^2(T)] \rightarrow \min \\ J_{CV3} = \alpha_{21} \cdot [x_1^2(T) - x_3^2(T)] + \alpha_{22} \cdot [x_2^2(T) - x_4^2(T)] \rightarrow \min \end{cases}$$

На втором такте прогноза происходит повторное определение значений вектора дележа Шепли на основе Парето-Нэш-оптимизации и векторная оптимизация управления коалициями для минимизации отклонения от точки Шепли. Результатом оптимизации является точка сильной предпосылки игры (СТЭК на двух тактах прогноза).

Парето-УКУ-Шепли-оптимальный вектор параметров на втором такте:

$$\{q_1^{opt} = 0,519, q_2^{opt} = 0,549\}.$$

Вектор состояния после двух тактов прогноза:

$$x_1 = 51, x_2 = 59, x_3 = 2, x_4 = 7.$$

На рис. 4 приведены изменения численностей и Парето-УКУ-Шепли-оптимального параметризованного управления.

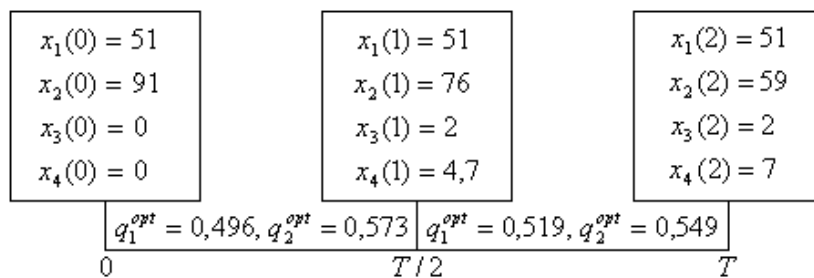


Рис. 4. Изменения численностей

На двух тактах формируется оптимальное управление активной и пассивной систем АЗ и СУЗ –  $q_1^{opt}$ ,  $q_2^{opt}$ .

На первом такте прогноза происходит изменение численностей АС и ПС СУЗ ( $x_3 = 2$ ,  $x_4 = 4,7$ ) и ПС АЗ ( $x_2 = 76$ ), тем самым, сохраняя баланс системы для вывода регулирующих стержней из АЗ и сброса компенсирующих стержней СУЗ БАЗ и МАЗ. Оптимальный вектор параметров для обеих систем становится равным:  $q_1^{opt} = 0,496$ ,  $q_2^{opt} = 0,573$ .

На втором такте численность регулирующих стержней АЗ и компенсирующих стержней СУЗ изменяются до значений:  $x_2 = 59$ ,  $x_3 = 2$ ,  $x_4 = 7$ , тем самым, продолжая сохранять баланс системы на подкритическом уровне, а оптимальный вектор параметров для обеих систем становится равным:  $q_1^{opt} = 0,519$ ,  $q_2^{opt} = 0,549$ . Результаты в конце второго такта соответствуют точке сильной предпосылки игры.

На рис. 5 показано окончательное Парето-УКУ-Шепли-оптимальное параметризованное управление АЗ и СУЗ на двух тактах прогноза.

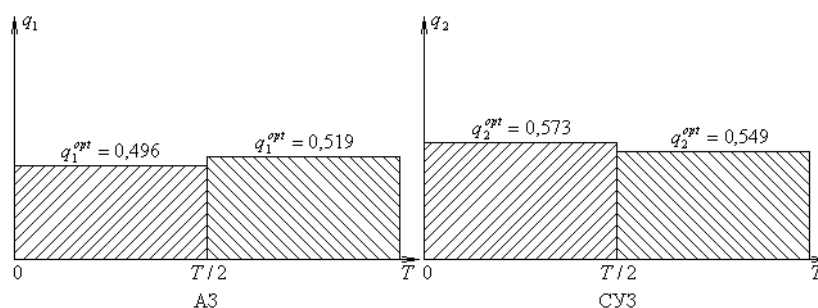


Рис. 5. Парето-УКУ-Шепли-оптимальное параметризованное управление АЗ и СУЗ на двух тактах

Применение полученных программных управлений обеспечивает Парето-Нэш-УКУ-Шепли-компромисс с двухтактным прогнозом. В общем случае повторение данной процедуры на следующем временном интервале ( $T$ ,  $2T$ ) с измеренным вектором  $x(T)$  позволяет получить программно-корректируемый закон управления (ПКЗУ).

## 6. Заключение

В докладе рассмотрен двухэтапный алгоритм получения УКУ-Шепли-оптимального управления прогнозом динамики взаимодействия двух противодействующих систем: АЗ – СУЗ в условиях неопределенности на основе Парето-комбинаций теории управления структурно-сложными системами. При использовании рассмотренного алгоритма возможно точное определение неизвестных параметров динамического объекта при условиях, которые найдены в докладе. Практическое применение полученных программных модулей управления многомерными многокритериальными системами обеспечивает возможность получения Парето-компромисс с двухтактным прогнозом.

### *Список литературы*

1. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: Учеб. для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 448 с.
2. Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. – М.: Дрофа, 2006. – 175 с.
3. Подиновский В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 256 с.
4. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник: В 5-и т. Т. 1: Теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 744 с.
5. Борисов А.Н. Диалоговые системы принятия решения на базе мини-ЭВМ. Информационное, математическое и программное обеспечение / А.Н. Борисов, Э.Р. Вилюмс, Л.Я. Сукур. – Рига: Зинатне, 1986.
6. Кипи Р.Л. Принятие решений при многих критериях: замещения и предпочтения / Р.Л. Кипи, Х. Райфа. – М.: Радио и связь, 1981.
7. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. – М.: Наука, 1986.
8. Алексеев А.В. Интеллектуальные системы принятия проектных решений / А.В. Алексеев, А.Н. Борисов, Э.Р. Вилюмс [и др.]. – Рига: Зинатне, 1997.

9. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993.

### *References*

1. Norenkov, I.P. (2006). Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniia. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana.

2. Sobol', I.M., & Statnikov, R.B. (2006). Vybor optimal'nykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriiami. M.: Drofa.

3. Podinovskii, V.V., & Nogin, V.D. (2007). Pareto-optimal'nye resheniia mnogokriterial'nykh zadach. M.: FIZMATLIT.

4. (2004). Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniia. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana.

5. Borisov, A.N., Viliams, E.R., & Sukur, L.Ia. (1986). Dialogovye sistemy priniatii reshenii na baze mini-EVM. Informatsionnoe, matematicheskoe i programmnoe obespechenie. Riga: Zinatne.

6. Kipi, R.L., & Raifa, X. (1981). Priniatie reshenii pri mnogikh kriteriiakh: zameshcheniia i predpochteniia. M.: Radio i sviaz'.

7. (1986). Nechetkie mnozhestva v modeliakh upravleniia i iskusstvennogo intelekta. M.: Nauka.

8. Alekseev, A.V., Borisov, A.N., & Viliams, E.R. (1997). Intellektual'nye sistemy priniatii proektnykh reshenii. Riga: Zinatne.

9. Saati, T.L. (1993). Priniatie reshenii. Metod analiza ierarkhii. M.: Radio i sviaz'.

---

**Гусев Сергей Сергеевич** – соискатель ФГБУН «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН», Россия, Москва.

**Gusev Sergey Sergeevich** – Ph.D. student at V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russia Academia of Sciences, Russia, Moscow.

---