ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

На правах рукописи

Нгуен Ван Дык

МОДЕЛИ ИМИТАЦИОННОЙ АППРОКСИМАЦИИ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., профессор В. Р. Елохин

ИРКУТСК – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ 2
ВВЕДЕНИЕ 4
ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ИССЛЕДОВАНИЯХ РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ 9
1.1. Особенности теоретических исследований развития экономических систем . 9
1.2. Имитационное моделирование как средство реализации системных исследований 17
1.3. Принципы разработки имитационных систем 25
Выводы по первой главе 32
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ (ИМИТАЦИОННАЯ АППРОКСИМАЦИЯ) 33
2.1. Обоснование разработки статистического метода имитационной аппроксимации 33
2.2. Этапы статистического метода имитационной аппроксимации 38
Выводы по второй главе 61
ГЛАВА 3. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ИМИТАЦИОННОЙ АППРОКСИМАЦИИ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ 62
3.1. Постановка задачи на разработку программного комплекса 63
3.2. Структура программного комплекса и его особенности использования 67
Выводы по третьей главе 75
ГЛАВА 4. НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ИМИТАЦИОННОЙ АППРОКСИМАЦИИ В ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ВЬЕТНАМА 77
4.1. Краткий анализ состояния экономики Вьетнама 77
4.2. Моделирование социально-экономической системы Вьетнама (имитационная аппроксимация) 86

4.3. Согласование моделей одноуровневых отраслевых систем с помощью статистических зависимостей 108
Выводы по четвертой главе 117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 118
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 120
ПРИЛОЖЕНИЕ 131

ВВЕДЕНИЕ

При исследовании сложных экономических систем (далее ЭС), сельскохозяйственных, производственных и т.п. систем с той или иной интенсивностью в последние три десятилетия использовались машинные имитационные эксперименты, в основе которых лежат математико-статистические методы и методы решения специфических экстремальных задач. При реализации этих экспериментов осуществляются следующие основные этапы:

1) формулирование исходных проблем и соответствующих математических моделей;

2) планирование имитационного эксперимента;

3) проведение имитационного эксперимента с математическими моделями на ЭВМ;

4) анализ результатов этого эксперимента;

5) принятие решений.

Проблемы современной экономики иллюстрируют необходимость прогнозирования. Оно оказывается эффективным только при использовании математических методов – важнейшего направления совершенствования систем управления в экономике. Математические методы ускоряют проведение экономического анализа, способствуют более полному учету влияния различных факторов на результаты деятельности, повышению точности прогнозирования. Это находит выражение в увеличении количества экономических исследований, опирающихся на статистические данные, в которых используются математические модели.

Моделирование экономических систем изучает целостную макроэкономическую систему: национальную экономику, экономику региона – а также взаимодействие таких систем.

Среди основных этапов построения математической модели по анализу статистических данных можно выделить выбор структуры модели, оценивание неизвестных коэффициентов и планирование эксперимента.

В основе диссертации разработан статистический метод имитационной аппроксимации (СМИА), который представляет собой специальным способом ориентированный комплекс математико-статистических методов и моделей. Применение данного метода особенно важно на этап прогнозирования сложных экономических систем, когда происходит изучение влияния нескольких ключевых переменных (факторов) на функционирование моделируемой системы.

Согласно классификации моделирования экономических систем, они могут быть как многооткликовые, так и одноотклико вые. Одноотклико вая ситуация описана в достаточно большом количестве литературы, в том числе в работах следующих авторов: Н. Дрейпер, Г. Смит, А.Б. Успенский, В.Ю. Бурмин, Е.В. Маркова и др.

Многооткликовость – случай одновременного измерения нескольких выходных величин. В многооткликовом моделировании имеется значительное разнообразие возможных типов линейных моделей, которые могут быть использованы для описания поведения объекта исследования. Однако методы и алгоритмы многооткликового моделирования не достаточно хорошо исследованы.

Таким образом, актуальность диссертационного исследования обусловлена необходимостью разработки математических моделей экономических систем в случае одновременного измерения нескольких выходных величин.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка метода и моделей имитационной аппроксимации и на их основе прогнозирования экономической системы. Данная цель достигается путем решения следующих задач:

1) разработка схемы реализации статистического метода имитационной аппроксимации для экономических систем;

2) разработка математического метода для построения многоотликовой математической модели;

3) разработка способов проверки адекватности многоотликовой математической модели;

4) разработка программно-алгоритмического обеспечения статистического метода имитационной аппроксимации.

5) апробация статистического метода имитационной аппроксимации экономических систем на примере реальной экономики Вьетнама;

Научная новизна заключается в следующем:

1) предложена оригинальная многоотликовая математическая модель имитационной аппроксимации реальной экономической системы;

2) разработан метод определения коэффициентов многоотликовой математической модели имитационной аппроксимации экономической системы с использованием годовых таблиц экономической статистической отчетности;

3) предложены способы проверки адекватности многоотликовой математической модели имитационной аппроксимации экономической системы;

4) предложен алгоритм согласования одноуровневых отраслевых систем на основе статистических зависимостей;

5) разработан программный комплекс для многоотликового моделирования экономической системы. Программный комплекс создан в среде MATLAB.

Практическая значимость результатов исследования заключается в следующем:

1) разработан статистической метод имитационной аппроксимации экономических систем, в первую очередь в сфере макроэкономики, а также в других областях;

2) создан программный комплекс, позволяющий выполнять анализ имитационных экспериментов и прогнозирование развития экономических систем.

Объектом исследования является многооткликовая модель имитационной аппроксимации экономической системы.

Предметом исследования являются методы построения многооткликовых моделей имитационной аппроксимации экономических систем, численный метод их исследования и инструментальные средства поддержки моделирования.

Методы исследования. При выполнении исследования использовались методы математического и имитационного моделирования, теории вероятностей, математической статистики и системного анализа. Для реализации программного комплекса использована среда разработки MATLAB.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.13.18: п. 1 «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений», п. 4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента», п. 7 «Разработка новых математических методов и алгоритмов проверки адекватности математических моделей объектов на основе данных натурного эксперимента».

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования были представлены на следующих конференциях: VII Всероссийской научно-практической конференции «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов» (г. Томск, 2014 г.); на Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Винеровские чтения» Иркутского

государственного технического университета (2014 г.); на конференции «Ляпуновские чтения» ИДСТУ СО РАН (2014 г.); на XX Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Результаты диссертационного исследования неоднократно излагались на научных семинарах кафедры экономической теории и финансов Иркутского государственного технического университета (рук. к.э.н., доцент Г.Е Дыкусов).

Сведения о публикациях. Результаты диссертационного исследования представлены в 13 научных работах, из них 5 статей опубликованы в следующих изданиях, входящих в перечень ВАК: «Вестник ИрГТУ», «Современные технологии. Системный анализ. Моделирование», электронный научный журнал «Известия ИГЭА». Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617485 (2014 г.)

Личный вклад. Все выносимые на защиту результаты получены лично автором или при его непосредственном участии.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 105 наименований. Объем работы составляет 134 страниц, 25 рисунков и 16 таблиц.

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ИССЛЕДОВАНИЯХ РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

1.1. Особенности теоретических исследований развития экономических систем

На современном этапе развития общества экономические системы (ЭС) страны (региона, энергетики, промышленного производства, сельского хозяйства и т.п.) относятся к крупномасштабным социально-экономическим системам и являются чрезвычайно сложными объектами управления. Для таких систем характерно [19, 23, 24, 25, 36, 37, 38]:

– усложнение динамики объектов, экономических и производственных процессов;

– широкое использование векторных критериев принятия решений, ориентация на оптимальные, а в ряде случаев и предельные варианты развития систем и режимов их функционирования;

– принятие решений в условиях все более расширяющейся (по мере усложнения систем управления) зоны неопределенности, обусловленной неполнотой информации о свойствах сложного объекта управления, неоднозначностью целей управления и влияния внешних по отношению к системам условий;

– активное применение средств вычислительной техники для: оценки качества управления; создания компьютерных и многопроцессорных систем управления; реализации диалога «человек – ЭВМ»; повышения качества проектирования и исследования систем управления;

– разработка математических моделей объектов, систем управления, систем автоматизированного проектирования, человеко-машинных экспериментов;

– привлечение достижений других научных направлений для решения отдельных смежных и сопутствующих проблем.

Вместе с ростом масштабов производства, усложнением систем управления им, возрастает ответственность каждого лица, принимающего решения, и в этой связи важны критерии, учитывающие:

– увеличение народно-хозяйственных затрат, необходимых для реализации принимаемых решений, а также возможные негативные последствия принятия «неправильных» решений по развитию и функционированию ЭС;

– повышение эффективности функционирования ЭС и процессов управления ими;

– рост требований к системам управления, обусловленных экономическими, экологическими и политическими ограничениями, необходимостью оптимального распределения и использования истощаемых природных ресурсов, а также ограниченностью трудовых ресурсов.

Взаимосвязанное развитие составляющих ЭС диктует необходимость заблаговременной подготовки принимаемых решений. При этом следует отметить длительные сроки сооружения крупных экономических объектов, что порождает инерционность соответствующей сферы производства. С учетом этого временной период исследования развития ЭС страны в целом должен охватывать весьма длительную перспективу (до 30–40 лет), а возможно и более.

Актуальность прогнозных исследований, необходимых для обоснования решений по развитию каждой из отраслей экономики страны, особенно возросла в так называемые «постперестроечные» годы.

Из сказанного следует, что для исследования ЭС страны и ее подсистем в качестве инструмента пригодны такие методические, математические и вычислительные средства, которые:

– не применяют жесткую фиксацию состава и структуры функциональных моделей, а также степени агрегирования используемых в моделях технико-экономических показателей;

– способны опираться на «плохо структурированные» исходные данные;

– могут формировать решения при зачастую несогласованных требованиях, в том числе в условиях варьирования целевых установок и применяющейся системы предпочтений;

– позволяют достаточно детально исследовать процессы функционирования и развития ЭС и ее подсистем.

Основой для формирования структуры моделей и функциональных связей между ними, необходимых для описания объекта исследования, может служить теория иерархических систем [23, 44, 43], согласно которой полученные частные решения связываются между собой путем итеративного согласования как «по горизонтали» – на одном уровне иерархии, так и «по вертикали» – на разных иерархических уровнях (алгоритмы Данцига – Вульфа, Корнаи – Липтака и др.) [19, 30, 38, 45]. Однако такая структуризация отражает далеко не все особенности и связи реальной системы управления с такими сложными объектами, как ЭС страны, и поэтому окончательные решения требуют дополнительного эвристического анализа на соответствие их действительности.

Учету неполноты информации, связанному, как правило, с повышением точности исходных данных и разработкой специальных методов принятия решений (с ориентацией последних на минимально допустимую их заблаговременность), посвящено большое число работ (например, [19, 38, 45]). Так, игровой подход, разработанный для антагонистических игр двух лиц,

распространен на «игры с природой» [8, 34, 66, 82], где наряду с критерием минимальных затрат (критерием Вальда) для анализа неопределенных ситуаций используются критерии Лапласа (минимума средних затрат), Сэвиджа (минимального риска), Гурвица («пессимизма-оптимизма»). В простейших случаях при дискретном и конечном наборах возможных решений такой подход позволяет формализовать анализ неопределенных ситуаций и выбирать «рациональные» варианты. Для практических задач управления, имеющих непрерывное множество оптимизационных факторов, как правило динамического характера, разработаны и продолжают развиваться подходы, основанные на:

– «субъективных вероятностях», когда неопределенные условия сводятся к субъективному назначению вероятностей условий («состояний природы»); причем принятие решения осуществляется по критерию математического ожидания целевой функции;

– построении и последующем анализе «платежной матрицы», в которой при обеспечении сопоставимости альтернативных вариантов решений дается количественная оценка экономической ситуации, т.е. значений общих затрат на реализацию каждого варианта или риска, представляющего собой перерасход затрат, связанных с отклонением их от оптимального варианта; при этом общая задача ставится в «традиционных» постановках, принятых в математическом моделировании и программировании, а окончательное решение предполагает расчет «платежной» матрицы с использованием результатов вариантных решений и человеко-машинной схемой анализа;

– программной оптимизации по единому алгоритму с использованием в качестве целевой функции одного из критериев теории решений [8, 34, 66, 71] с последующим сопоставлением вариантов по ряду критериев одновременно;

– понятиях нечетких множеств и лингвистических переменных, наиболее предпочтительных с точки зрения практического применения [20]. В то же

время громоздкость реализации этих понятий и соответствующих им схем затрудняет решение реальных задач с учетом присущих им факторов нелинейности, динамики и т.п.

Необходимость все более глубокого рассмотрения хозяйственного механизма и организационных форм управления, а также других особенностей, требующих учёта при решении задач исследования развития таких крупномасштабных систем, как ЭС страны в целом, обуславливает использование системного подхода, суть которого состоит в[7]:

– формировании целей исследования и выяснении их иерархии до начала деятельности, связанной с управлением и, в частности, с обоснованием принятия решения;

– получении максимального эффекта в смысле достижения поставленных целей при минимальных затратах путём сравнительного анализа альтернативных путей и методов достижения поставленных целей;

– количественной и качественной оценке применяемых (разрабатываемых) методов достижения целей в рамках всестороннего анализа предполагаемых результатов функционирования ЭС.

В системном подходе к настоящему времени разработана достаточно развитая методология исследования сложных объектов, основанная на сочетании современного математического аппарата с количественными методами исследований и расчета на ЭВМ при определяющей роли эвристики, т.е. творческого начала и опыта специалистов, а именно:

– моделирование объектов, их внутренних и внешних производственных и экономических связей, процессов их развития;

– процесс развития ЭС описывается системой уравнений и неравенств (дифференциальных или алгебраических, линейных или нелинейных, стохастических и т.д.), а производительность объектов и связи выступают в виде

переменных – непрерывных или дискретных. Целевые установки системы определяются: а) функционалом, связывающим переменные модели, для которого известными методами ищется минимум или максимум (при оптимизационном моделировании); б) специально организованным процессом построения модели, который обычно выполняется при активном участии специалистов в диалоговом режиме с ЭВМ и реализует схему моделирования; в) сочетанием первого и второго пунктов;

– математическое моделирование является важнейшим инструментом системного подхода, который, прежде всего, отрицает возможность и целесообразность построения единой всеобъемлющей модели экономики, описывающей ее от стадии оперативно-диспетчерского управления до долгосрочного прогнозирования;

– моделирование сложных ЭС означает не только описание их технологических, экономических, производственных и пр. связей и структуры, но и моделирование процесса управления ими, т.е. деятельности органов управления экономикой.

И то и другое нельзя выполнить без прямого включения в процесс оптимизации определенных специалистов. Следовательно, речь идет о необходимости обеспечения специалистов экономико-математическими моделями, методами и вычислительными средствами для взаимного согласования решений, которые являются целью при управлении экономикой в рамках иерархии многокритериальных задач в условиях неопределенности.

Разумеется, используемые здесь методы и модели должны:

– отражать основные показатели, характеризующие технологию формирования и реализации экономических связей с учетом возможных изменений (многостадийность, межотраслевое и внутриотраслевое резервирование мощностей, комбинированные процессы по добыче, переработке

и транспорту сырья и продукции, взаимозаменяемость тех или иных материальных ресурсов у потребителей и т.п.) и определяющие технические и технологические возможности использования объектов ЭС и ее подсистем, а также необходимые народнохозяйственные затраты (капитальные вложения, материальные средства, трудовые ресурсы, эксплуатационные расходы и т.д.);

– учитывать внешние условия, связанные с направлениями развития всей экономики, ограничениями на лимитированные народно-хозяйственные средства, производственные мощности смежных отраслей и др.;

– обеспечивать возможность согласования полученных решений с результатами расчетов на других моделях, а также возможность оперативного учета дополнительных (текущих) факторов, технико-экономических показателей.

Функционально схема исследований должна быть ориентирована на:

– анализ существующих концепций, сценариев возможных направлений развития и формирование расчетных условий для сравнения и оценки альтернативных вариантов развития ЭС страны и ее подсистем между собой;

– учет народнохозяйственных и других ограничений вариантов развития ЭС страны;

– возможность реализации различных вариантов постановок задач отдельных этапов схемы исследования;

– обеспечение непротиворечивости и взаимосогласованности этапов исследований ЭС.

Общие требования к информационному обеспечению включают:

– возможность хранения, накопления и обработки как отдельных показателей, так и больших массивов исходных данных, промежуточных и окончательных результатов, а также санкционированный доступ к ним;

– организацию структурно и методически единой информационной базы для всех функциональных задач исследования;

– обеспечение эффективного проведения вычислительного эксперимента посредством оперативной обработки данных, изменения информационной базы, выдачи отдельных справок, надежного хранения данных.

Программные средства для исследований развития ЭС и ее подсистем должны создаваться в соответствии с общепринятыми современными требованиями [36, 37, 38, 45, 67, 68], включающими в себя такие характеристики, как универсальность, адаптивность, открытость и т.д. Применительно к исследованиям развития ЭС наиболее существенными являются:

– возможность управления вычислительным экспериментом, в том числе организация автономной работы с отдельными задачами и этапами функциональной схемы исследования за счет создания средств доступа к вычислительному аппарату с различных терминальных устройств, составления программ для «простого и удобного» задания управляющих факторов, а также обеспечения пользователей необходимой информацией о прогнозе хода выполняемых на ЭВМ расчетов;

– обеспечение режима диалога в процессе вычислительного эксперимента;

– возможность совершенствования функциональной схемы исследования посредством постановки новых задач, включения новых методов и моделей, а также развития «собственного» программного обеспечения в процессе исследовательской деятельности.

Технология проведения вычислительного эксперимента по всей функциональной схеме исследования предполагает следующие основные требования:

– инструмент исследования должен быть ориентирован на множество задач, определяемых функциональной схемой с возможной переориентацией на принципиально новые задачи, методы и модели;

– вычислительные средства должны обеспечивать наглядное и удобное представление необходимых данных, в т.ч. данных справочного характера и результатов исследования.

1.2. Имитационное моделирование как средство реализации системных исследований

Отмеченная выше сложность процессов управления в экономике делает невозможным их исследование с помощью традиционных экономико-математических методов и моделей. Процессы развития ЭС представляются в таких моделях, как правило, упрощенно и неполно, а сами модели ориентированы на изучение отдельных, относительно частных вопросов, а не на обоснование вариантов развития ЭС в целом, на территориальном и хозяйственном уровнях. Наиболее перспективным направлением математического моделирования, отвечающим сформулированным выше требованиям, как в теоретическом, так и в практическом аспектах, является имитационное моделирование [13–18, 24, 25, 27, 28, 65, 68, 80], которое обеспечивает возможности наиболее адекватного отображения процессов функционирования и развития отдельных экономических подсистем и ЭС в целом.

Предложим небольшой обзор рассуждений об имитационном моделировании (рисунок 1.1). Как и другие методы моделирования, имитация ставит многочисленные проблемы технического характера. В частности, Дж. Форестер называл метод имитационного моделирования «методом индустриальной динамики» и «методом системной динамики» [76]. Новаторство Дж. Форестера состояло в том, что он рискнул применить такую технику анализа сложных систем, которую начали использовать еще в 20-е годы XX века инженеры-радиотехники, когда им приходилось проводить анализ

многоконтурных схем. Причем он сделал это для анализа сложных социально-экономических систем на количественном уровне.

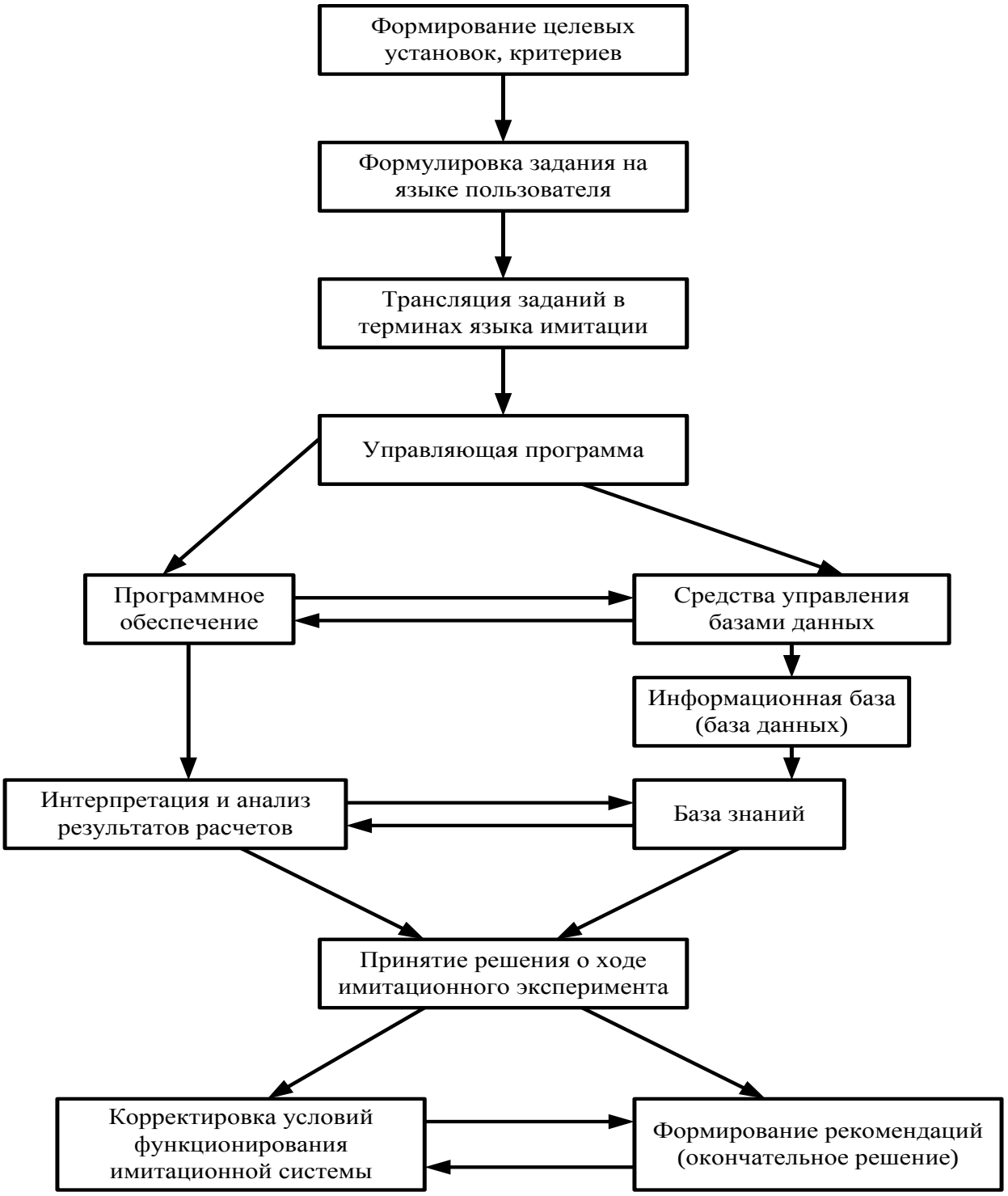

Рисунок. 1.1 – Общая схема функционирования имитационной системы

На сегодняшний день для случая, когда изучаемые системы существенно нелинейны, методы анализа статистических свойств множества траекторий, которые были бы действительно эффективны, отсутствуют. Единственный способ определения параметров такого множества, который мы можем назвать, это метод Монте-Карло, объединенный с численным решением задачи Коши [9, 65, 89]. Именно называя данные методы стали употреблять термин «имитация».

В последние десятилетия стал развиваться и формироваться в особую теорию метод планирования экстремальных и оптимальных экспериментов [47, 72, 73, 75], что позволило во многом существенно скорректировать отношение к имитационному моделированию. Особо следует отметить чрезвычайно важное понятие «рандомизация» (от англ. random – «случайный») – это случайная процедура, в которой решение принимается случайным образом. Сейчас имитационное моделирование считают даже методом, альтернативным аналитическим методам исследования и математическому программированию. А значит, для его применения нужно иметь достаточные основания. Такими основаниями могут быть следующие:

– не существует законченной математической постановки для данной задачи, т.е. еще не разработаны необходимые методы математического моделирования и программирования и соответствующие аналитические методы решения сформулированной задачи;

– методы имеются, однако применить их непросто, а имитационное моделирование может дать более простой способ решения тех или иных нестандартных вопросов.

Именно поэтому представляется очевидным, что изучение имитационного моделирования связано с исследованием его общих свойств и закономерностей. При этом ряд специалистов выделяют имитационное моделирование как особый метод научного исследования и управления, что обуславливает, в свою очередь,

появление методологической проблематики, относящейся к его разработке и практическому применению, однако решение подобных проблем в значительной степени связано с конкретизацией уже существующих общих философских представлений о научном познании, о закономерностях создания и применения его новых средств и методов. Имитационные методы дают исследователю представления о структуре и динамике сложной системы.

Адекватность (с точки зрения достижения некоторой цели) имитационной модели достигается за счет приближения части ее параметров к параметрам системы, причем модель оказывается не менее сложна, чем сама система. Такая модель реализуется на ЭВМ, представляя собой комплекс алгоритмов и программ с применением «блочного» принципа построения исходной системы в виде ряда слабо зависимых (условно) подсистем, модели которых могут быть верифицированы в отдельности до их включения в общую схему. Для использования имитационной модели необходима имитационная система [17, 18, 24, 25, 27, 65, 68], в которую входит модель, имитирующая работу объекта изучения, и средства внутреннего и внешнего математического обеспечения. Первые представляют собой комплекс устройств, алгоритмов и программ, обеспечивающий эффективный диалог между человеком и ЭВМ, вторые – совокупность упрощенных моделей функционирования ЭС, а также методов анализа этих моделей.

Очевидно, что понимание имитационного моделирования связывается зачастую с неоднозначно воспринимаемым и трактуемым понятием, а именно имитационной системой. Остановимся на этом более подробно.

Имитационная система (ИС) – инструмент глубокого системного анализа объекта изучения. Постоянное использование ИС предполагает, что взаимодействие с исследуемой ЭС должно быть легким: один эксперимент можно провести под контролем разработчиков имитационной системы, однако ее

постоянное использование подразумевает, что система передается пользователю, который мало знаком с особенностями системного программирования и построения моделей. Постоянное функционирование имитационной системы предполагает наличие службы информации, периодически обновляющей данные, используемые в ИС.

ИС должна быть системой, которая непрерывно развивается и с каждым временным этапом становится все «мощнее». При этом модели подвергаются необходимой модификации вплоть до их замены.

Необходимым элементом ИС является, конечно, модель изучаемого объекта, которую разумно хранить в виде программ расчета по отдельным подмоделям на некотором алгоритмическом языке. Эти программы принято называть модулями. Отдельные модули должны быть построены так, чтобы в случае необходимости их можно было бы объединить в те или иные сочетания. Отсюда первый необходимый элемент имитационной системы – это совокупность (система) моделей, или банк моделей.

Для того чтобы проводить имитационные эксперименты с моделями, необходимо иметь достаточно полный набор исходных данных для их реализации. Эти данные должны находиться в информационной базе – втором необходимом элементе ИС. В нее также вносятся и результаты расчетов, которые, в свою очередь, могут служить исходной информацией для других вычислительных экспериментов.

Поскольку речь идет о сложных объектах исследования, то и система моделей, и информационная база содержат большое число разнообразных элементов. Из-за этого необходимо создать специальную информационно-поисковую систему, в которой содержалась бы информация об имеющихся в наличии модулях и данных и которая давала бы возможность анализировать эти

сведения, вызывать из памяти необходимые данные или модули или вносить в нее новые.

Такая информационно-поисковая система – третий необходимый элемент имитационной системы [67, 68].

Чтобы ИС могла действительно применяться на практике, необходимо иметь следующее:

1) удобный вывод информации на терминальное устройство, графопостроитель;

2) быстрый и простой ввод данных с терминальных устройств;

3) режим диалога для взаимодействия человека с ЭВМ, предполагающий возможность оперативного вмешательства в процессе имитационного эксперимента.

Итак, в имитационной системе производится синтез двух групп методов, которые иногда противопоставляют друг другу, – имитационных и оптимизационных – что позволяет использовать их преимущества. Естественно, что для осуществления, например, оптимизационных расчетов в ИС нужно иметь блок оптимизационных моделей.

Следующая стадия изучения ЭС состоит в автоматизации планирования и проведении имитационного подхода, а значит, речь идет об имитационном программировании.

Последние 60 лет являются эпохой интенсивного развития языков программирования. Разработаны и реализованы сотни языков высокого уровня. К настоящему времени каждый из языков занимает свое место в семействе себе подобных и становится специализированным если не по замыслу разработчиков, то по предметной области применения. Изобилие языков находится в противоречии с практикой их применения, так как выбранный язык программирования оказывает существенное влияние на разработку проекта,

написания программ, их отладку и сопровождение. Вследствие этого появляются различные основания для установления языковых стандартов при разработке имитационной системы.

Итак, имитационная система как средство исследования ЭС обладает следующими свойствами: 1) ее основу составляет набор взаимосвязанных (функционально и структурно) моделей; 2) модели должны адекватно отражать объект исследования; 3) исследователи имеют возможность выбирать нужные им модели в соответствии со стоящими перед ними конкретными задачами; 4) развитие системы моделей идет путем функциональной «надстройки», «расширения» средств обеспечения и «углубления» ее методологической базы; 5) планирование имитационных экспериментов основывается на использовании методов математической статистики и методов решения экстремальных задач. В процессе осуществления таких экспериментов проводится несколько стадий работы: а) формирование исходных проблем и соответствующих математических моделей; б) планирование имитационных экспериментов с математическими моделями на ЭВМ; в) анализ результатов этих экспериментов.

Однако не следует слишком рассчитывать на возможности имитационного моделирования. Как у любого инструмента исследования, у методов имитации есть и недостатки, а именно:

– в некоторых случаях ИС весьма сложны, что вызывает необходимость в существенных стоимостных и временных затратах на проведение экспериментов, программирование, разработку и отладку моделей;

– как и реальная действительность, «имитационный мир» является трудно постигаемым, так как сложная имитационная модель приводит к такому числу различных исходов, что получаемые результаты нелегко интерпретировать;

– формализованный анализ результатов имитационного моделирования базируется на использовании математической статистики, причем для получения статистической достоверности результатов, которая была бы достаточной для обоснования выбора варианта управления или построения системы, необходимо многократное повторение имитационных экспериментов, что в ряде случаев предполагает существенные «внутренние» затраты;

– имитационное моделирование на данный момент не располагает принципами построения моделей для широкого класса сложных ЭС, которые были бы методически обоснованы, а потому каждый конкретный случай нуждается в специальной разработке;

– имитация нередко предъявляет к информационному обеспечению модели слишком высокие требования, причем чем точнее и подробнее модель, тем сложнее получить информацию для нее;

– решения носят конкретный (иногда так называемый «заявленный») характер, поэтому, чтобы определить устойчивые и объективные свойства исследуемого процесса, необходимо его неоднократное повторение с последующей статистической обработкой полученных данных.

Безусловно, все эти негативные факторы в определенной мере уменьшают энтузиазм по поводу безоговорочного применения имитационного моделирования. Тем не менее, взвешивая «за» и «против», можно считать, что имитационное моделирование сулит не только единение существующих методологий исследования сложных экономических систем (моделей), но и делает, по сути, «переворот» в мышлении теоретиков и практиков. Основой для этого может быть рассмотрение вычислительного процесса в целом как эксперимента, приспособляющегося к специфике каждой конкретной задачи и определенного алгоритма. Следовательно, от надежды на получение «оптимальных» программ для обработки данных на все случаи жизни нужно отказаться. Вместо этого

исследователя ждет каждодневная адаптация. Поэтому следует также отказаться и от иллюзии однозначности ответа: обработка данных всегда может дать множество ответов, нетождественных друг другу, и ряд процедур это уже предусматривают, например, процедура «ветвящаяся стратегия» в одном из методов планирования эксперимента – методе случайного баланса [41, 47]. Здесь одни и те же данные можно обрабатывать сколько угодно долго. Отметим еще одно важное достоинство имитационных моделей, состоящее в том, что язык таких моделей по существу совпадает с естественным языком, что открывает широкие возможности для включения человека в процесс моделирования. Вполне понятно, что сложные системы практически невозможно имитировать во всем их многообразии. При разработке моделей таких систем производится агрегирование (укрупнение) блоков системы, поведение которых недостаточно однообразно.

1.3. Принципы разработки имитационных систем

Создание имитационной системы (ИС), как уже отмечалось, требует много времени и средств. Такая задача под силу только большому коллективу специалистов: здесь необходимы знания и опыт прикладных математиков, программистов, технологов (специалистов проблемной области), экономистов, специалистов по организации управления и т.д.

Трудности стандартизации процесса разработки имитационных систем проявляются и в том, что существующие требования к разработке автоматизированных систем управления и ведению научных исследований не всегда точно соответствуют структуре и этапам построения имитационных систем. В рамках формирования ИС исследования развития ЭС лежат следующие основные

положения, которыми руководствуются при разработке имитационных моделей [9, 24, 25, 65, 67, 68, 80]:

– все исследования (с учетом динамики) представляются в виде набора переменных (факторов), параметров и взаимосвязей, которые в условиях поставленной задачи классифицируются как: зависимые и независимые, управляемые и неуправляемые, экзогенные и эндогенные, входные и выходные. Это те из переменных, которые в течение имитационных экспериментов должны корректироваться в рамках поставленной цели и с учетом меняющихся во времени условий и ограничений. Взаимосвязи между переменными делятся на те, которые описывают связи между производственной структурой и отдельными переменными моделей, а также на связи, которые существуют между отдельными блоками, группами переменных;

– формируются исходные предпосылки, условия, сценарии по отношению к переменным, параметрам и взаимосвязям, характеризующим объект исследования (в частности, возможные способы формализации отдельных зависимостей, шкала приоритетов по степени важности отдельных параметров и др.);

– определяется степень агрегирования при описании объекта в функциональных моделях, которая, сохраняя полное и точное представление о рассматриваемых аспектах исследования, обеспечивает работоспособность моделей и интерпретируемость получаемых результатов;

– построению имитационной модели в составе ИС должна предшествовать проверка ее информационной базы с точки зрения содержательности и достоверности. Понятно, что от этого зависит реализуемость поставленной экспериментом задачи. Основным средством оценки достоверности используемой информации служат соответствующие статистические критерии [12, 27, 40, 77, 103, 104];

– процесс имитационных исследований должен осуществляться в два этапа. На первом этапе выполняются вариантные расчеты с фиксированной структурой и составом переменных. Изменениям здесь подвержены лишь управляющие параметры. На втором этапе повторяются вариантные расчеты при измененных структуре и составе переменных, характеризующих рассматриваемый объект, в данном случае – модель. Полученные результаты многовариантных расчетов являются экспериментальной базой для дальнейшего анализа.

Двухэтапный характер исследований обусловлен требованиями технологии имитационного моделирования. Отдельные вариантные расчеты, как и их совокупность, выполненная только путем изменения управляющих параметров, могут раскрыть лишь одну из возможных траекторий (сценариев) функционирования (развития) рассматриваемого объекта. Для окончательного решения необходимо проанализировать весь спектр возможных сценариев. Планирование имитационного эксперимента при этом является неотъемлемым атрибутом исследований, а именно: планирование имитационных исследований определяется постановкой задачи, характером решений, которые обосновываются, типом пользователей, от которых, в конечном счете, зависит выбор модели. Классифицируя пользователей, участвующих в подготовке решений, можно выделить среди них три основные группы: эксперт, вырабатывающий рекомендации для принятия решения; исследователь (аналитик), обосновывающий решения на основе моделирования; разработчик имитационной системы (прикладной и системный программист).

Коллективный характер взаимодействия пользователей и разработчиков ИС предъявляет существенные требования к программному обеспечению в части его гибкости и адаптируемости к широкому набору запросов: взаимодействие пользователя ИС и ЭВМ должно предусматривать различные режимы – от пакетного до режима реального диалога, обеспечивая при этом максимальное

удобство пользователю (легкий доступ, быструю реакцию на ответ, наглядное представление результатов). По современным требованиям организации диалога имитационные системы могут (скорее, должны) быть диалоговыми системами.

Исходя из изложенного, ИС можно применять для: 1) экономического исследования и проектирования систем управления [9, 24, 25]; 2) обоснования управляющих (плановых) решений [9, 25]; 3) оценки процессов выполнения планов [24, 25, 67] и анализа процедур управления [23, 67].

Существенное различие в структуре, функциональное наполнение и принципы разработки ИС имеют свою методическую направленность (прикладную или исследовательскую). В ИС прикладного характера, предназначенных для использования в практике управления, как правило, не возникают проблемы, связанные с принципиальным и сравнительно частым изменением состава и содержания функциональных задач. Основное внимание здесь уделяется вопросам взаимодействия пользователя с ЭВМ, а также вписыванию разрабатываемой системы в действующую технологию управления.

Имитационные системы, предназначенные для исследовательских целей, должны обеспечить целостное представление поставленной задачи (с определенной мерой условности), а вместе с тем иметь возможность приложения полученных результатов к реальным процессам. Другая особенность таких систем связана с требованиями к набору имитируемых внешних условий (сценариев), воспроизводимых в процессе имитационных экспериментов. Обеспечение сопоставимости рассматриваемых вариантов, стратегий функционирования или развития объекта исследования, формирование (путем изменения одних переменных при фиксированных значениях других переменных) условий, соответствующих принципу «при прочих равных условиях», является одним из важнейших требований. Следует отметить, что имитационный подход может

представить для выполнения этих требований больше возможностей, нежели другие методы моделирования.

В настоящее время продолжается разработка имитационных систем как за рубежом, так и в России. Первые «эскизные проекты» таких систем в России появились еще в начале 70-х годов [9, 67, 68]. Постановка каждой задачи в системе в общем соответствует технологии поиска сбалансированного плана с минимально возможным снижением задания по выпуску конечной продукции (по сравнению с заявленным). Для реализации поставленной задачи используется метод последовательной оптимизации межотраслевого баланса [6, 18, 26, 82]. Алгоритм ориентирован на диалог специалиста с ЭВМ и обеспечивает достаточно быструю реакцию системы на изменение управляющих параметров.

Анализ обширного материала по созданию имитационных систем дает основание сформулировать следующие основные принципы их разработки:

– формирование функциональной системы ИС предшествует разработке средств обеспечения и осуществления данной системы, сформулированных в целях исследований;

– представление объекта исследования для вычислительного эксперимента предусматривает классификацию показателей, его характеризующих, на переменные, параметры и отношения, используемые для проведения целенаправленных вариантных расчетов;

– информационная база исследований должна создаваться в соответствии с принципами реляционных баз данных, структура которых формируется соответственно функциональной схеме исследования и структуре рассматриваемого объекта; информационная база должна быть ориентирована на поступление и хранение нерегулярной информации (экспертных оценок, избыточных данных и т.п.);

– программные средства, включающие в себя внешнее программное

обеспечение («штатные» средства решения функциональных задач), внутреннее программное обеспечение (специализированные средства для организации человеко-машинного эксперимента), должны быть ориентированы на многовариантные расчеты и создание максимально возможного удобства пользователю для работы с ЭВМ;

– формирование набора сценариев, предусматриваемых в имитационных исследованиях, определение рационального числа расчетных вариантов, а также подготовка рекомендаций и окончательного решения, которые не могут выполняться без использования аппарата математической статистики и методов анализа и планирования экспериментов; программная часть имитационной системы должна оснащаться широким арсеналом таких средств.

Процессы разработки ИС, проведение исследований с ее использованием требуют, как уже отмечалось, коллективных усилий и во многом зависят от взаимоувязки всех решений, принимаемых в процессе работы. Объясняется это, в частности, и тем, что формирование инструментария, создание продуктивно функционирующей ИС, разработка ее отдельных функциональных блоков, информационной базы, программного обеспечения осуществляется с широким использованием результатов анализа собственно всего процесса имитационных исследований, с оценкой пригодности разработанных средств.

Технология процесса разработки ИС включает в себя следующие взаимосвязанные этапы:

– качественный анализ условий функционирования и развития изучаемого объекта;

– формирование общей функциональной схемы исследования и разработка отдельных входящих в нее имитационных моделей;

– разработка внутреннего программного обеспечения и средств использования в имитационных экспериментах внешнего программного обеспечения;

– проведение человеко-машинного эксперимента;

– анализ полученных результатов, их интерпретация и формирование рекомендаций, в том числе и о степени пригодности ИС;

– уточнение, корректировка всех элементов ИС.

Первый и второй этапы связаны с выполнением анализа показателей, характеризующих развитие исследуемого объекта, а также определением общих целей исследования и требований к структуре и наполнению ИС. Последние четыре этапа исполняют роль обратной связи, поскольку создаваемая имитационная система по ряду заложенных в нее на начальных стадиях субъективных факторов заведомо неадекватна объекту исследования и требует итеративного уточнения.

Таким образом, можно отметить два основных типа ограничений, возникающих неизбежно на пути внедрения имитационных систем в практику экономических исследований. Первый тип ограничений связан с возможностями моделирования вообще и одной из принципиальных особенностей этого процесса – это достаточно жесткая привязка любой модели к определенной системе условий, гипотез и аксиом. При этом вне поля рассмотрения всегда остается множество неохваченных факторов, аспектов изучаемого явления. Второй тип ограничений обусловлен необходимостью комплексного использования принципиально различных моделей и инструментария для обоснованного принятия окончательного решения по рассматриваемой проблеме.

Несмотря на эти ограничения, отмеченные выше преимущества имитационного моделирования, по сравнению с другими подходами, служат исчерпывающим основанием дальнейшего развития этого направления. Кроме того, следует отметить, что возможность ликвидации «белых пятен» как в

методологии моделирования, так и в конкретных вопросах управления крупномасштабными системами позволит часть слабо структурированных проблем перевести в разряд поддающихся структурному анализу, и в ряде случаев они могут быть решены традиционными методами (математического моделирования и др.).

Выводы по первой главе

В первой главе даются общие понятия и определения, используемые в имитационном исследовании экономических систем. В главе даны основания системных исследований в экономике, изучены особенности имитационного моделирования сложных связей внутри экономической системы. Представлены принципы разработки имитационных систем с их преимуществами и недостатками, поставлены и сформулированы задачи диссертационного исследования.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ (ИМИТАЦИОННАЯ АППРОКСИМАЦИЯ)

2.1. Обоснование разработки статистического метода имитационной аппроксимации

Ни для кого не является секретом, что первая половина XXI века будет, как считается, переломным моментом в развитии и мировой, и отечественной экономики. В связи с этим для страны, ее отдельных регионов, появляется острая потребность в получении ответов на следующие вопросы: каковы должны быть оптимальная стратегия развития экономики, рост капиталоемкости производства, промышленности при кардинальной перемене образа жизни населения?

При этом важное значение имеет необходимость последующего развития научно-методической базы системных исследований ЭС, которые непосредственно зависит от общего уровня применения ЭВМ и математического моделирования.

В государстве существуют и проводятся разработки средств автоматизации исследований экономических систем, которые опираются, главным образом, на экономико-математические модели. Наиболее интенсивно такие исследования велись и ведутся относительно систем макроэкономики, например изучение оптимизации макроэкономического баланса страны, развития макроэкономических систем, управления макроэкономическими системами и т.д. Следует также отметить, что проведенные к данному моменту отечественными учеными работы по исследованию оптимальных стратегий долгосрочного развития экономики и продовольственного обеспечения страны выявили уязвимость применяемых методик. Стремление к нахождению оптимальной стратегии развития для экономики государства в целом делало результаты очень

шаткими, они стремительно теряли практическую ценность в случае изменения внешних экономических условий. При этом большое число вопросов изучения реальных экономических систем (например, задачи анализа динамических свойств какой-либо системы в условиях неопределенности) решается моделями, количество переменных и уравнений в которых варьируется в пределах сотен, тысяч и т.д. Эффективно осуществлять проверку адекватности исходной математической модели не удается в таких условиях. Достичь однозначности интерпретации полученных решений не представляется возможным, так как :

– имеет место значительная неопределенность сведений во всех звеньях цепочки процесса изучения определенной ЭС (в том числе вследствие известной субъективности сформированных характеристик модели);

– существует, как правило, большое число исследуемых технико-экономических показателей модели, т.е. уже сама модель становится как бы «вещью в себе».

Задача извлечения наибольшего числа сведений об анализируемых процессах в ЭС при небольших затратах (стоимостных и временных), как известно, была всегда очень актуальна. При этом интуиция экспериментатора – весьма ненадежная опора. Так, для определения числа разных состояний объекта (условий развития любой определенной экономической системы) необходимо произвести $n = u^k$ испытаний над соответствующей моделью (например, оптимизационной) (здесь u – количество уровней, т.е. число значений переменных в заданном диапазоне; k – количество рассматриваемых переменных, например, размер вектора потребностей в модели некой ЭС). Нетрудно увидеть, что простая система для 5 переменных на 4-ех уровнях имеет 625 состояний, а с 10 переменными на пяти уровнях их уже более миллиона.

Отказ от экспериментов, включающих все возможные опыты, оказывается очевидным, так как перебор слишком велик. При этом вызывает интерес, сколько

опытов и какие из них нужно включить в эксперимент, чтобы решить поставленную задачу? Отсюда возникает необходимость планирования эксперимента, которое позволяет обработать экспериментальные данные и оптимально организовать процесс исследования. Причем важно стремление к минимизации общего количества экспериментов, а именно варьирование всеми переменными, определяющими процесс, одновременно, по определенным алгоритмам; применение математического аппарата, который формирует многие действия экспериментаторов; определение четкой стратегии, благодаря которой можно прийти к объективным (с позиции исследователя) решениям после каждой группы экспериментов [21, 42, 47, 77]. Потому при изучении сложных ЭС в последние годы стали применять машинные имитационные эксперименты, которые основываются на методах решения специфических экстремальных задач и методах математической статистики. В основе настоящей работы представлена модификация статистического метода имитационной аппроксимации (СМИА), который является ориентированным особым образом комплексом статистических методов и вероятностных моделей (рисунок 2.1). Применение данного метода наиболее важно на уровне прогнозирования развития сложных ЭС при изучении влияния на поведение моделируемой системы нескольких ключевых факторов.

СМИА становится наиболее ценным инструментарием при анализе результатов осуществления региональных программ развития экономики. Имитационно-статистическая аппроксимация – важный элемент аппарата исследования зоны неопределенности ЭС и согласования их решений при неполноте исходных сведений. Определяющее назначение СМИА – построение имитационных моделей, которые позволяют исследовать объективные закономерности в экономике, тенденции энергосбережения и энергопотребления, ресурсо- и материалосбережения и т.п. при заданных стратегиях развития

национальной экономики. Задача имитационного моделирования инновационных процессов в биотехнологии, образовании также представляется актуальной.

Складывающиеся новые условия развития ЭС вообще предполагают наличие весьма громоздких методов и моделей для анализа механизма явлений, происходящих в какой-либо подсистеме ЭС и в самой ЭС, приводят, соответственно, к необходимости разработки и последующего активного внедрения СМИА. Определенные теоретические и прикладные аспекты известных имитационных методов находили (в 90-х годах XX века) ранее применение (хоть и недостаточно активное) в производственно-экономических системах, главным образом, на уровне государства. Однако отсутствие необходимого комплекса проработок по имитационному моделированию экономических систем на уровне регионов, предприятий и отдельных технологических процессов значительно снижало объективность и важность практических и научных результатов исследований. В этой связи была осуществлена большая работа по обобщению уже проведенных и ведущихся отечественных и зарубежных исследований в сфере имитационного моделирования, опубликованных в многочисленных научных работах, с целью устранить этот имеющийся пробел. Иными словами, после тщательной «отработаки» технологии моделирования на нижнем уровне иерархии с получением достоверных (как по формальным правилам, так и с учетом противоречивости результатов) данных, представляется логичным переход на моделирование следующего уровня иерархии и т.д. [23, 24, 25, 38, 45].

Рисунок 2.1 – Блок-схема СМИА

Таким образом, неотъемлемой составной частью имитационного моделирования и реализующего его аппарата являются математические средства статистической обработки данных. Ниже предлагаются подходы, посвященные изложению как общих, так и специальных вопросов и характеристик таких средств применительно к планированию машинных имитационных экспериментов для исследования ЭС. Опыт имитационных исследований, в свою очередь, привел к необходимости создания оригинального инструмента, который концентрирует в себе основные принципы и особенности имитационного моделирования, т.е. речь идет, в значительной мере, о продвижении в развитии методов математико-статистической аппроксимации.

Как и принято, в классической литературе по управлению системами, наделим некоторую экономическую систему (обозначим ее через S) свойствами иметь входы и выходы, т.е. рассматривать ее как некий структурированный объект (рисунок 2.2)

Рисунок 2.2 – Простейшая схема элемента системы

Система S может описываться некоторой функцией, определяющей связь между *x* и *y*. т.е.

$$y = \eta(x) \qquad (2.1)$$

2.2. Этапы статистического метода имитационной аппроксимации

2.2.1 Постановка задачи

Данный этап включает в себя следующие процедуры:

а) анализ проблемы, где рассматриваются: логическая структура проблемы, развитие проблемы во времени (в прошлом, настоящем и предположения о будущем), связи проблемы с другими проблемами, принципиальная разрешимость проблемы;

б) спецификация задачи, функциональное определение ЭС, выделение подсистем из общей ЭС, определение (уточнение) позиции исследователя в отношении целеполагания;

в) анализ структуры ЭС, где определяются уровни иерархии в рамках ЭС как сложной системы, дается спецификация процессов управления и каналов информации, подсистем, процессов (функций) текущей деятельности (рутинной) и развитие целевых;

г) формирование общей цели исследования и принятие критерия качества исходной модели ЭС, где определяются цели – требования подсистемы, уточняются общие цели, выбираются критерии декомпозиции задач, формулируется общий критерий из совокупности критериев (адекватности) подсистем;

2.2.2 Формирование совокупности входных и выходных переменных для математической модели экономических систем

Входные и выходные переменные определяются согласно пояснений к формуле (2.1).

2.2.3 Постановка задачи аппроксимации экономических систем

В данном случае исходную модель удобно анализировать, прибегая к ее аппроксимации на основе имитационного эксперимента некоторой регрессионной

моделью. В принципе, целесообразность использования регрессионных моделей в практике оптимального планирования сложных ЭС объясняется рядом их специфических особенностей: а) возможностью включения в модели относительно большого количества переменных, в том числе качественного характера; б) возможностью оценки значимости переменных на шумовом фоне; в) возможностью учета случайности (или неопределенности) в исходной информации; г) простотой и наглядностью интерпретации результатов расчета.

В настоящее время рассматриваются две разновидности аппроксимационных задач:

– аппроксимация сложных более простыми, например: детерминистская аппроксимация [2, 12, 27], рандомизированные эксперименты [27, 40, 41, 46–47, 102], классическая регрессия [2, 12, 88, 92], регрессионная модель второго рода [1, 16, 72];

– непосредственная аппроксимация (задача, типичная для эконометрии) [29, 32, 39, 81].

Ниже основное внимание уделяется первому классу задач, хотя используемый здесь формальный аппарат легко может быть применен и для непосредственной аппроксимации.

Дадим наиболее характерные для целей использования постановки задачи аппроксимации.

Детерминистская аппроксимация. Пусть $x_i \in R^r$ – факторы или входные переменные, $y_i \in \boldsymbol{R}^{\ell}$ – отклики или выходные переменные, и пусть они связаны известным соотношением $y = \varphi(x)$, которое попробуем заменить приближенным:

$$y_i = \eta(x_i, \theta) + \Delta(x_i, \theta),\ i = \overline{1, n}, \qquad (2.2)$$

где $\eta(x_i, \theta)$ – заданные функции;

n – количество наблюдений.

$\theta \in R^m$ – неизвестных коэффициентов;

Подсчитанные на исходной модели величины y_{ji} ($j=\overline{1,\ell}, i=\overline{1,n}$) будем называть результатами (или наблюдениями) имитационного эксперимента. Назовем множество опорных точек $\{x_i\}_{i=1}^n$, планом эксперимента. Оценки $\hat{\theta}$ для θ выбираются из условия минимизации какой-либо невязки, например, $\sum_{i=1}^n \|\delta(x_i,\theta)\|$ или $\max_i \|\delta(x_i,\theta)\|$, где $\|\cdot\|$ – знак нормы вектора.

Рандомизированные эксперименты. Хотя модель (2.2) – детерминистская, тем не менее, иногда оказывается целесообразным обратиться к статистическим моделям, а именно использовать массивы опорных точек, которые выбираются по некоторому планом. Планы, строящиеся таким способом, называются рандомизированными. Применение таких планов позволяет говорить о некоторых вероятностных свойствах оценок коэффициентов θ, например, об их дисперсиях, несмещенности, ковариациях и т.д., имея в виду, что все эти выводы делаются на вероятностном пространстве, которое порождено множеством рандомизированных планов и соответствующими появлениями каждого из них[40, 41, 99, 102].

Отметим, что до сих пор идеи рандомизации в имитационных экспериментах не использовались, хотя в натурных экспериментах они широко применяются со времен Р. Фишера. Более того, отсутствие в модели (2.2) естественной случайной помехи делает ее практически идеальным объектом Фишеровской идеи рандомизации с математической точки зрения.

Модель (2.2) удобно использовать в тех случаях, когда исходная модель содержит переменные, значения которых не определены точно (например, $\underline{x_\alpha} \le x_\alpha \le \overline{x_\alpha}$, $\alpha=\overline{1,k}$).

Классическая регрессия. Рассматривается модель аппроксимации вида

$$y_i = \eta(x_i, \theta) + \varepsilon_i,\ i = \overline{1,n}, \qquad (2.3)$$

где ε – случайные ошибки с нулевым математическим ожиданием $(E[\varepsilon_i] = 0)$ (E – операция усреднения) и дисперсионной матрицей $d(x_i\theta_i) = E[\varepsilon_i \varepsilon_i^T]$ при многооткликовой ситуации), которая может быть неизвестна [74, 86, 101].

Модель вида (2.3) целесообразно использовать в следующих случаях. Пусть функция $\Psi(x,z)$ описывает исходную систему. Составляющие вектора z либо известны неточно, либо случайны по своему характеру. И в том, и в другом случае переменные вектора z могут описываться некоторой функцией распределения $F(z)$. Пусть переменные векторы z – заведомо незначимые: на общее поведение отклика каждый из них не оказывает существенного влияния, но в совокупности они приводят к «размазыванию» откликов. Поэтому естественно описать усредненное поведение отклика:

$$\eta(x,\theta) = \int \Psi(x,z) dF(z) = E[\Psi(x,z)]$$

и соответствующий разброс

$$d(x,\theta) = E\left[(\Psi(x,z) - \eta(x,\theta))(\Psi(x,z) - \eta(x,\theta))^T\right].$$

Если под «наблюдением» понимать величину $y_i = \Psi(x_i, z_i)$, где z_i генерируется с помощью датчика случайных чисел [91], то приходим к (2.3).

Решение задачи регрессии (2.3) при известных дисперсионных матрицах $d(x_i)$ не представляет теоретических трудностей, однако конкретная числовая реализация поиска оценок для θ оказывается серьезной вычислительной проблемой. При неизвестной дисперсии (или дисперсионной матрице) $d(x_i)$ возникают и теоретические затруднения. В однооткликовой ситуации при *d(x) = const* по-прежнему удается оценить наилучшие линейные несмещенные оценки. В многооткликовом случае – это оказывается невозможным. На данный момент

получены асимптотические результаты [72, 74, 75, 86, 101], которые могут послужить ориентиром для соответствующих эвристических подходов. Ниже представлен многооткликовой случай оценки коэффициентов, где ряд функций $\eta(x,\theta)$ не имеют общих структур.

Регрессионная модель второго рода [27, 47, 73]. Предположим, что

$$y_{ji} = \eta(x_i, \theta, \mu_j) + \varepsilon_{ji},\ j = \overline{1,\ell},\ i = \overline{1,n}. \qquad (2.4)$$

Модель (2.4) является обобщением модели (2.3), а переменные μ_i по смыслу близки к переменным z_i. Однако модель (2.4) выделяется специально, так как в имитационных экспериментах часто имеют место ситуации, при которых переменные μ_j являются выходами из других систем, и их распределение $F(\mu)$ неизвестно, и, следовательно, μ_j не может быть получено непосредственно с помощью датчика случайных чисел [89]. При этом нередко становится необходимой оценка не только параметров вектора θ, но и некоторых характеристики распределения $F(\mu)$ (например, среднее значение параметров вектора μ и их дисперсионные матрицы).

Полезную информацию, содержащуюся «внутри» аппроксимирующей модели (например, информацию о значимости той или иной переменной *x*), можно выявить только в результате специального статистического анализа (этап 4) в рамках схемы СМИА на рисунке 2.1.

2.2.4 Математико-статистический анализ

Известно, что применение математико-статистических методов в различного рода технико-экономических исследованиях открывает возможности для более глубокого экономического анализа и решения сложных задач. В частности, в процессе моделирования все чаще используются математико-статистические

методы выбора структуры модели. Существуют различные методики решения данной проблемы. В случае с множественной регрессионной моделью можно отметит следующие методы:

1. Шаговая регрессия (прямой отбор, обратное исключение, последовательный отбор) [92, 93, 95];

2. Выбор с помощью Mallows's Cp;

3. Байесовское усреднение модели.

Шаговая регрессия

Цель шаговой регрессии заключается в отборе из многих предикатов небольшой подмножества переменных, вносящие наибольший вклад в вариацию откликов. Обычно этот процесс выполняет автоматизированная процедура, которая вводит или выводит предикаты из уравнения регрессии по очереди, основываясь на серии F-тестов, t-тестов или других подходах.

Основные подходы шаговой регрессии:

– прямой отбор. Сперва регрессионное уравнение не содержит предикатов. Они вводятся по одному, если удовлетворяют определенному критерию. Порядок включения переменных определяется вкладом предиката в объясняемую вариацию (схема метода показана на рисунке 2.3);

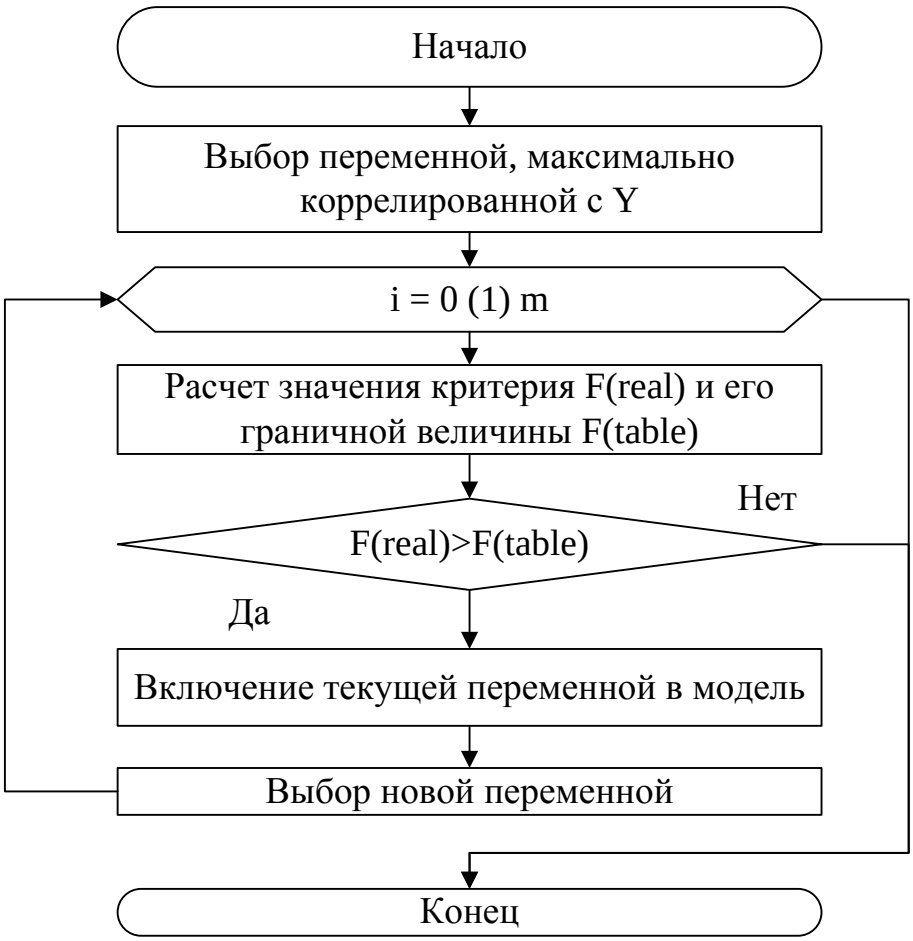

Рисунок 2.3 – Блок-схема метода прямого отбора

– обратное исключение. Вначале все предикаты входят в регрессионное уравнение. После они по очереди выводятся из уравнения, исходя из их соответствия критерию (схема метода показана на рисунке 2.4);

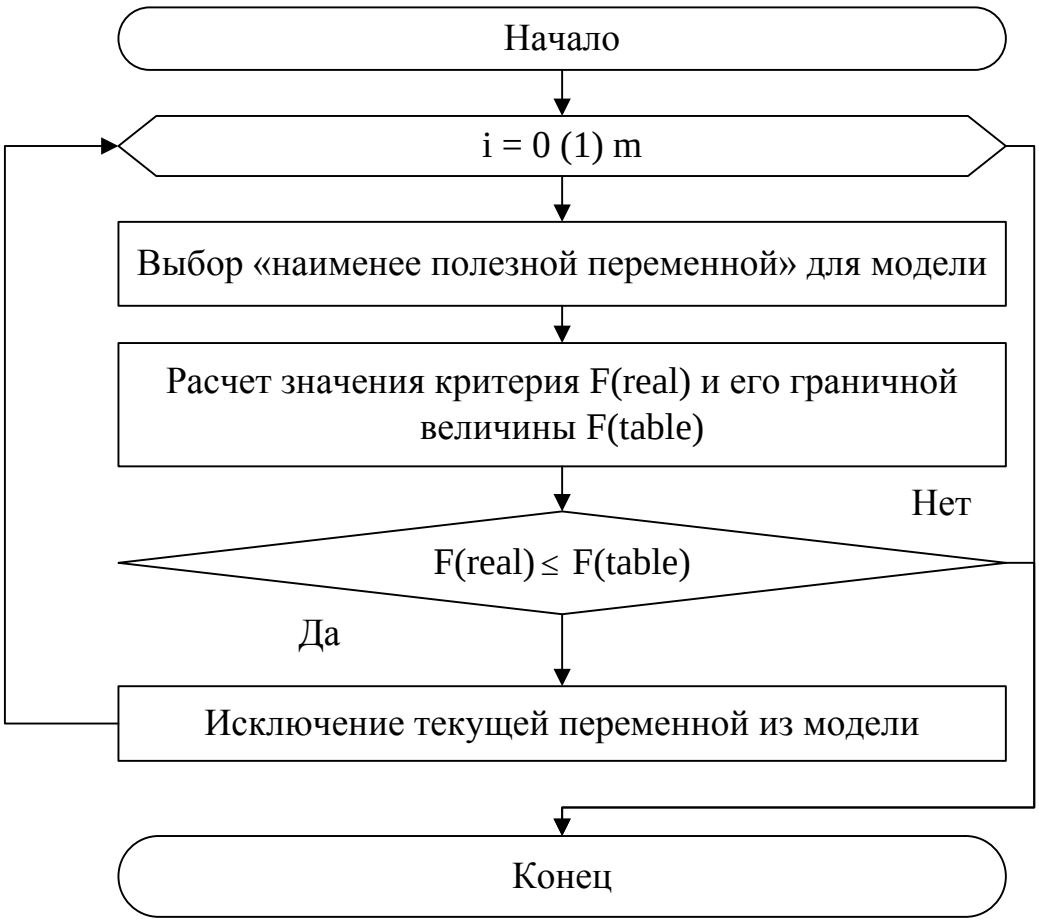

Рисунок 2.4 – Блок-схема метода обратного исключения

– последовательный отбор. На каждой стадии прямое включение проводят одновременно с исключением переменных, которые более не соответствуют конкретному критерию (схема метода показана на рисунке 2.5).

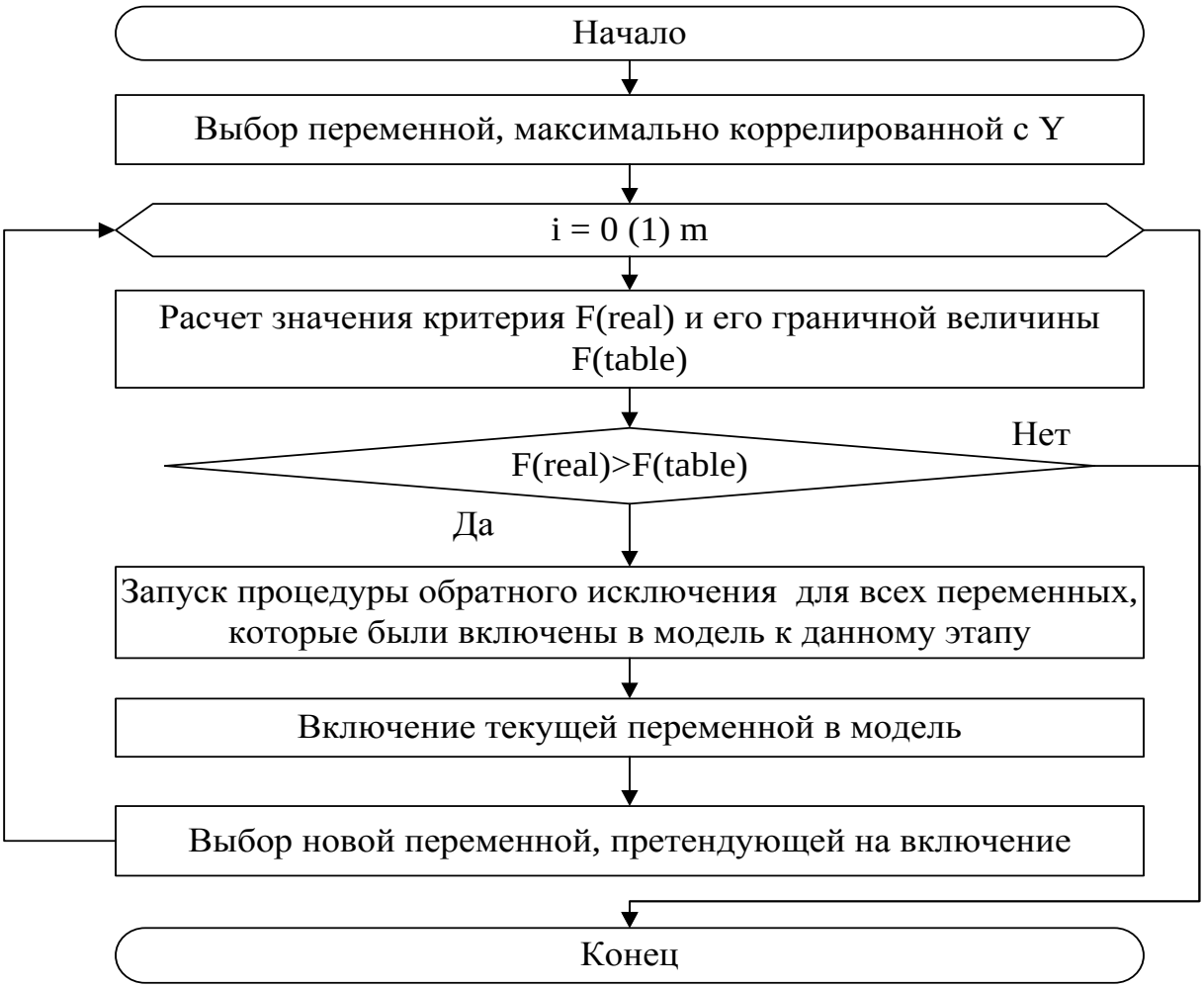

Рисунок 2.5 – Блок-схема метода последовательного отбора

Но в практике метод шаговой регрессии имеет несколько недостатков:

– он не позволяет выводить оптимальные регрессионные уравнения для вычисления наибольшего коэффициента детерминации R^2 для данного количества предикатов. По причине корреляций между предикатами важная переменная может быть не включена в уравнение, а второстепенные переменные будут введены в него. Чтобы вывести оптимальное регрессионное уравнение, желательно просчитать варианты, в которых анализируются все возможные комбинации. Однако заметим, что пошаговая регрессия эффективно используется, когда размер выборки велик по сравнению с числом предикатов;

– часто для выбора добавляемой или удаляемой переменной используется последовательность F-тестов Фишера, которые проводятся на одних и тех же данных, что приводит к проблеме множественных сравнений. Для борьбы с этим явлением разработано достаточно большое количество корректирующих критериев;

– P-Value зависит от результата предшествующих тестов, что усложняет их интерпретацию.

Выбор модели с помощью Mallows's Cp

В статистике Mallows's Cp используется для оценки качества регрессионной модели, которая была построена с использованием обычного метода наименьших квадратов [90, 97]. Он применяется при выборе модели, где число переменных доступно для прогнозирования некоторых результатов с целью найти лучшие модели, включающие подмножество этих предсказателей. В частном случае линейной регрессии Mallows's Cp эквивалентен информационному критерию Акаике. В Mallows's Cp рассматривается вопрос о переобучении, в котором значение статистики выборной модели, такой как остаточная сумма квадратов, всегда получится меньше, чем когда добавляются переменные в модель.

Если p регрессоров выбраны из набора k>p, C_p для конкретного набора независимых переменных определяется следующим образом:

$$C_p = \frac{RSS_p}{RMS_f} + 2p - n,$$

где SSE – суммы квадратов ошибок;

RMS_f – средняя квадратичная ошибка модели k регрессоров;

n – размер выборки.

C_p-статистика часто используется для остановки пошаговой регрессии. Мэллоус предложил статистическое качество как критерий для выбора среди многих подмножеств альтернативных регрессий. Если модель с p регрессорами

хорошая, то C_p почти равно p. Меллоус предположил, что если выбрать подмножество, имеющее C_p, приближающийся к P, можно получить список упорядоченного подмножества путем увеличения P. Считается, что для хорошей модели C_p-статистика Мэллоуса должна принимать значения, близкие к числу параметров модели (включая свободный член).

Байесовское усреднение модели

Байесовское усреднение модели [83, 85, 100] – алгоритм выбора многомерной модели. В нем каждая модель имеет свой вес.

Пусть имеется много моделей M_m, m=1...M с параметром θ_m.

Априорная информация: $\Pr(\theta_m \mid M_m), m = 1...M$.

Апостериорная вероятность – условная вероятность случайного события при условии того, что известны апостериорные данные, т.е. данные, полученные после опыта:

$$\Pr(M_m \mid Z) \propto \Pr(M_m) \cdot \Pr(Z \mid M_m).$$

Сравним две модели с помощью апостериорной вероятности:

$$\frac{\Pr(M_m|Z)}{\Pr(M_l|Z)} = \frac{\Pr(M_m)}{\Pr(M_l)} \cdot \frac{\Pr(Z|M_m)}{\Pr(Z|M_l)},$$

где $\frac{\Pr(Z|M_m)}{\Pr(Z|M_l)}$ – Байесовский фактор.

В методе Байесовского усреднения модели, вес модели является значением Байесовского информационного критерия.

Байесовский информационный критерий [84, 94] (Bayesian information criterion, BIC, иногда – Schwarz Criterion) – критерий выбора модели из класса параметризованных моделей, зависящих от разного числа параметров. Для оценки модели, как правило, используют метод нахождения максимума функции правдоподобия, значение которого можно увеличить посредством добавления дополнительных параметров. Однако это может стать причиной переобучения.

Байесовский критерий позволяет устранить проблему переобучения, штрафуя рост числа параметров модели. Он тесно связан с критерием Акаике, но в случае с Байесовским критерием увеличение параметров штрафуется строже.

Пусть:

$X = \{x_i\}_{i=1}^{n}$ – наблюдаемая часть выборки, где каждый объект характеризуется набором параметров $x_i = (x_{i1},...,x_{ik})$;

L – максимальное значение функции правдоподобия наблюдаемой выборки с известным числом параметров.

Тогда Байесовский информационный критерий определяется формулой

$BIC = -2\ln(L) + k\ln(n)$.

Итак, Байесовский критерий является аналогом критерия Акаике с более строгой функцией штрафа (функция штрафа зависит также от размерности модели).

В случае линейной регрессионной модели критерий выражается через SSE – сумму квадратов остатков:

$$BIC = n\ln\frac{SSE}{n} + k\ln(n).$$

В данном случае логарифмируется смещенная оценка дисперсии регрессионных остатков.

Из двух моделей предпочтительно выбрать с меньшим значением Байесовского критерия. Байесовский критерий представляет собой возрастающую функцию от числа параметров модели и от остаточной суммы квадратов ошибок модели. Изменение зависимых переменных и увеличение числа наблюдаемых увеличивает Байесовский критерий, в то же время уменьшение критерия означает уменьшение размерности модели.

После выполнения процедуры выбора структуры модели различными методами происходит объединение таких однооткликовых моделей с целью построения многооткликовой модели имитационной аппроксимации.

2.2.5 Построение многооткликовых моделей имитационной аппроксимации

Как было показано выше, многооткликовые регрессионные модели являются одним из наиболее естественных инструментов при имитационном экспериментировании над моделями сложных ЭС. Изложим вначале некоторые известные результаты для случая одновременного измерения нескольких выходных величин [13, 14, 74, 86].

В этой главе подробно исследована специфика статистических методов и многооткликовой ситуации. Описан способ построения многооткликовых моделей имитационной аппроксимации, который позволяет легко учитывать различные структуры откликов [51, 52, 54, 57, 58].

Предположим, что

$$y_i = \eta(x,\Theta) + \varepsilon_i, (i = \overline{1,n}), \qquad (2.5)$$

где $x_i^T = (x_{1i},\ldots,x_{ki})$ – независимые переменные;

$y^T = (y_1,\ldots y_\ell)$ – результаты измерений в точке x_l, или зависимые переменные (отклики);

$\Theta^T = (\theta_1,\ldots \theta_m)$ – неизвестные коэффициенты;

$\eta^T(x_i,\Theta) = \left(\eta_1(x,\Theta),\ldots,\eta_\ell(x,\Theta)\right)$ – заданные функции; (2.6)

ε – матрица ошибок измерений откликов размерности $n_x l$, удовлетворяющая стандартным требованиям, в соответствии с которыми строки матрицы ε имеют нулевое математическое ожидание и положительно определенную дисперсионную

матрицу $d(x_i)$ размерности lxl, а элементы различных строк матрицы ε некоррелированны. Это влечет некоррелированность их различных измерений:

$$E[\varepsilon_i] = 0, E[\varepsilon_i \varepsilon_i^T] = d(x_i),$$

$$E[\varepsilon_i \varepsilon_j] = 0,\ i \neq j, |d(x_i)| \neq 0. \qquad (2.7)$$

Пусть

$$\eta(x, \Theta) = F^T(x, \Theta), \qquad (2.8)$$

где

$$F(x) = (f_1(x), \ldots f_\ell(x)) = \begin{pmatrix} f_{11}(x) & \ldots & f_{1\ell}(x) \\ \ldots & \ldots & \ldots \\ f_{m1}(x) & \ldots & f_{m\ell}(x) \end{pmatrix}.$$

Здесь $f_{\alpha j} = (x)$ – непрерывные функции, $x \in X$, область X – компактная.

Чтобы оценки $\hat{\Theta}$ имели практическую ценность, они должны обладать, по возможности, такими свойствами, как состоятельность, несмещенность, эффективность.

Несмещенность. Оценки $\hat{\theta}$ несмещенные, если их математические ожидания равны истинным значениям параметров:

$$E[\hat{\theta}] = \theta_{ист}.$$

Состоятельность. Оценки $\hat{\theta}_N$ состоятельные, если они сходятся по вероятности к истинным значениям параметров:

$$\lim_{N->\infty} P[(\hat{\theta}_N - \theta_{ист})^T (\hat{\theta}_N - \theta_{ист}) \geq \varepsilon] = 0.$$

Здесь индекс N означает, что оценка $\hat{\theta}_N$ получена после N измерений; ε – любое наперед заданное положительное число.

Эффективность. Несмещенные оценки $\hat{\theta}$ эффективны, если имеет место неравенство

$$D(\hat{\theta}) \le D(\tilde{\theta}),$$

где $D(\hat{\theta})$ – дисперсионная матрица оценок $\hat{\theta}$;

$D(\tilde{\theta})$ – дисперсионная матрица любых других несмещенных оценок $\tilde{\theta}$.

Метод определения коэффициентов многоотликовой математической модели имитационной аппроксимации

Из формул (2.5) – (2.8) удается построить наилучшие линейные несмещенные оценки (НЛНО) [51]:

$$\hat{\Theta} = \mathrm{M}^{-1} Y, \qquad (2.9)$$

где $\mathrm{M} = n^{-1} \sum_{i=1}^{n} F(x_i) \omega_i F^T(x_i)$;

$$Y = n^{-1} \sum_{i=1}^{n} F(x_i) \omega_i y_i, \ \omega_i = d^{-1}(x_i).$$

Наилучшими линейными оценками функций $\eta_j(x, \Theta_j), (j = \overline{1, \ell})$ являются функции

$$\hat{\eta}_j(x) = \hat{\Theta}_j^T f_j(x).$$

Дисперсионная матрица оценок $\hat{\eta}_j(x)$ равна

$$D(x) = F^T(x) \mathrm{M}^{-1} F(x).$$

При довольно слабых ограничениях оценки (2.9) являются сильно состоятельными и асимптотически $(n \to \infty)$ нормально распределенными. Таким образом, различия между одноотликовыми и многоотликовыми случаями по способам построения и свойствам оценок коэффициентов регрессии при известных дисперсионных матрицах $d(x_i)$ несущественны.

Рассмотрим ряд частных, но важных в имитационных экспериментах вариантов модели (2.5).

Предположим, что различные отклики не имеют общих неизвестных коэффициентов. Ограничимся случаем линейной параметризации.

При этом

$$F(x)=\begin{pmatrix} f_{11}(x) & \vdots & \vdots \\ \dots & \dots & 0 \\ f_{m1}(x) & \vdots & \vdots \\ \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & f_{1\ell}(x) \\ 0 & \dots & \\ \vdots & \vdots & f_{m\ell}(x) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} & & \vdots \\ f_1(x) & \dots & 0 \\ & & \\ \dots & \dots & \dots \\ \vdots & & \\ 0 & \dots & f_\ell(x) \\ \vdots & & \end{pmatrix} \qquad (2.10)$$

Здесь $\Theta^T=(\Theta_1^T,\dots,\Theta_\ell^T)$, $\Theta_j^T=(\theta_{j1},\dots,\theta_{jm})$.

Предположим также, что дисперсионные матрицы $d(x_i)$, $(i=\overline{1,n})$ известны. Сформулируем ряд следствий.

Следствие I. При выполнении (2.10) в (2.9) имеем

$$M=(M_{jk}),\ j,k=\overline{1,\ell}, \qquad (2.11)$$

$$Y^T=(Y_1,\dots,Y_\ell),$$

где $M_{jk}=\sum\limits_{i=1}^{n}\sum\limits_{j=1}^{l}\sum\limits_{k=1}^{l}\omega_{jki}f_j(x_i)f_k^T(x_i)$;

$$Y_j=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{l}\sum_{k=1}^{l}\omega_{jki}y_{ki}f_j(x_i).$$

В реальных задачах число неизвестных коэффициентов $m=\sum\limits_{j=1}^{\ell}m_j$ велико и поэтому возникает проблема обращения матрицы M.

Следствие II. Если матрица $d(x_i)$ диагональна, то

$$\hat{\Theta}_j = M_{jj}^{-1} Y_j, \ j = \overline{1,\ell} \qquad (2.12)$$

где $M_{jj} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{l} \omega_{jji} f_j(x_i) f_j(x_i)$;

$$Y_j = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{l} \omega_{jji} y_{ji} f_j(x_i).$$

Таким образом, каждый из откликов может обрабатываться отдельно, что очевидно и из общих соображений.

Следствие III. Если $d(x_i) \equiv d$, то НЛНО имеют вид

$$\hat{\Theta}_j = \mu^{-1} Y_j, \qquad (2.13)$$

где $\mu = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{l} \sum_{k=1}^{l} f_j(x_i) f_k^T(x_i)$;

$$Y_j = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{l} \sum_{k=1}^{l} y_{ji} f_k(x_i).$$

Дисперсионная матрица оценок Θ равна $D(\hat{\Theta}) = d \otimes \mu^{-1}$ ($\otimes$ – символ кронекеровского произведения)[31, 71, 96]

В диссертационной работе исследование вопросов нелинейной параметризации дано в ограниченном объеме, так как, применяя известные методы преобразования переменных, несложно привести большинство уравнений регрессии к линейному виду [4, 11, 22].

2.2.6 Проверка адекватности многооткликовой модели имитационной аппроксимации

После того, как найдены оценки коэффициентов аппроксимирующих моделей, проверяется адекватность каждой конкретной функции $\eta(x, \Theta)$. Для этой цели используются *t*-, χ^2-, *F*-критерии, а также непараметрические критерии, не связанные с распределениями [12, 69, 70, 77], предполагающими, прежде всего, однооткликовую ситуацию.

Проверка качества модели основана на сравнении точности получаемого с помощью этих уравнений отображения результирующего показателя с точностью оценок при использовании среднего значения результирующего показателя.

Адекватность регрессионных моделей может быть установлена благодаря анализу остаточной последовательности; расчетные значения в этом случае вычисляются через подстановку в модель фактических значений всех включенных в нее факторов. Остаточная последовательность проверяется на выполнение свойства случайной компоненты временного экономического ряда: близость нулю математического ожидания, отсутствие автокорреляции и нормальность закона распределения, случайный характер отклонений.

Кроме того, о качестве регрессионных моделей можно судить по значению коэффициента детерминации. Чтобы оценить точность моделей регрессии применяют статистические критерии точности, что и для трендовых моделей, например среднюю относительную ошибку аппроксимации.

Автором предложены способы проверки адекватности многооткликовых моделей имитационной аппроксимации.

Оценим качество уравнения регрессии с помощью ошибки абсолютной аппроксимации.

а) Для однооткликовой модели

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^{n} |y_i - \hat{y}_i| : y_i}{n} \cdot 100\%, \qquad (2.14)$$

где $\overline{A}$ – ошибка аппроксимации;

y_i – фактические значения;

$\hat{y}_i$ – расчетные значения.

б) Для многооткликовой модели использовался аналог ошибки аппроксимации:

$$\overline{A} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{sum \mid y_i - \hat{y}_i \mid}{sum(y_i)}.100\%. \qquad (2.15)$$

Широко используется критерий, в соответствии с которым точность считается удовлетворительной, если ошибка аппроксимации меньше 15%. Если $\overline{A}$ меньше 5%, то модель обладает высокой точностью. Использовать модели с неудовлетворительной точностью для анализа и прогноза, т.е. когда $\overline{A}$ больше 15%, не рекомендуется.

Коэффициент детерминации (R^2 – R-квадрат) – это доля дисперсии зависимой переменной, объясняемая рассматриваемой моделью зависимости, т.е. объясняющими переменными. Иными словами, это единица минус доля необъясненной дисперсии (дисперсии случайной ошибки модели, или условной по факторам дисперсии зависимой переменной) в дисперсии зависимой переменной. Этот коэффициент считается универсальной мерой зависимости одной случайной величины от множества других.

Коэффициент детерминации вычисляют по следующим формулам:

а) для однооткликовой модели:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \qquad (2.16)$$

б) для многооткликовой модели использовался аналог коэффициента детерминации:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum trE_i{}^T \omega_i E_i}{\sum tr(E_i{}^0)^T \omega_i E_i{}^0}, \qquad (2.17)$$

где tr – след матрицы;

$E_i = \hat{y}_i - y_i$;

$E_i^0 = y_i - \bar{y}$.

Данный коэффициент позволяет определить долю изменения анализируемого признака, учтенную в модели. Иначе говоря, данный коэффициент определяет, какую часть изменения рассматриваемой переменной можно вычислить, исходя из изменений факторных переменных, включённых в модель, с помощью выбранного типа функции, связывающей анализируемый признак и факторные переменные в уравнении модели.

Коэффициент детерминации R^2 может иметь значения от 0 до 1. Чем ближе он к единице, тем лучше качество модели.

При изучении стабильности коэффициентов многооткликовой математической модели имитационной аппроксимации будем различать два вида массивов данных:

– данные, собранные в течение длительного отрезка времени;

– данные, собранные за короткое время.

В первом случае модель строится по наблюдениям, проведенным в течение продолжительного времени, следовательно, устойчивость коэффициентов можно проверить, строя модели для более коротких временных отрезков и сравнивая оценки. Если оцениваемые коэффициенты проявят определенную тенденцию, то применение уравнения, построенного по всем данным для целей предсказания, будет неразумным.

Во втором случае сначала разделить имеющийся массив данных на подмножества, а зачем использовать одну часть данных для построения предсказывающей модели, а оставшуюся часть – для проверки этой модели, т. е. для того, чтобы посмотреть, насколько хорошо она предсказывает.

Таким образом, если модель имитационной аппроксимации адекватна, то процесс аппроксимации заканчивается и необходимо переходить к этапу 7 – этапу использования такой модели для исследования реальных систем (рисунок 2.1). В противном случае следует перейти к этапу уточнения вида математической модели (этап 9).

2.2.7 Направления использования СМИА для исследования реальных экономических систем

Назначение данного этапа сводится в первую очередь к решению задачи интерпретации результатов моделирования, и решают эту задачу, как правило, в несколько приемов. Первый прием состоит в следующем. Устанавливается, в какой мере каждая из переменных оказывает влияние на параметр оптимизации. Величина оценки коэффициентов θ – количественная мера этого влияния. Чем больше оценка, тем сильнее влияет переменная. О характере влияния переменных говорят знаки оценки коэффициентов. Знак плюс означает, что с ростом значения переменной величина оптимизации увеличивается, а знак минус показывает, что эта величина убывает.

Интерпретация знаков при оптимизации зависит от того, что мы ищем: минимум или максимум функции отклика. Если $y \to \min$, то рост значений переменных с отрицательными оценками благоприятен, а переменных с положительными – неблагоприятен. Если же $y \to \max$, то, напротив, увеличение значений переменных с оценкой «плюс» благоприятно, а с оценкой «минус» – неблагоприятно. Далее выполняется процедура по расположению совокупности переменных в ряд по силе их влияния на параметр оптимизации. Переменные, оценки коэффициентов θ при которых незначимы, конечно, не интерпретируются.

Изменение интервалов варьирования приводит к изменению оценок коэффициентов регрессии. Инвариантными к изменению интервалов остаются знаки линейных оценок коэффициентов регрессии.

Достаточно детально некоторые вопросы использования СМИА изложены в четвертой главе.

2.2.8 Выдвижение новых гипотез о функционировании и развитии экономических системы

Вопрос о выдвижении новых гипотез является эвристическим, и эффективность его решения целиком зависит от требований и квалификации конкретного исполнителя работы. Существование этого этапа вызвано тем, что на заключительных стадиях исследований может возникнуть ситуация, когда построенные аппроксимирующие модели неадекватны в статистическом и (или) содержательном смыслах, либо условия, для которых строилась модель, изменились, и поэтому возникает необходимость описания изучаемых явлений системы некоторой другой (или принципиально другой) системой аппроксимирующих моделей. Это, очевидно, приводит к повторению определенных этапов аппроксимации, а чаще к переосмыслению всей методологической ситуации, связанной с исследованием ЭС.

2.2.9 Корректировка исходной математической модели экономической системы, уточнение исходной информации

Экономическая система представляет собой единое экономическое целое и является хозяйствующим субъектом. Управление ЭС может осуществляться в различных формах, начиная от классических иерархических форм управления,

например компаниями, и заканчивая рыночными формами управления экономикой.

Очевидно, что экономический процесс не может быть однозначно описан конкретным количеством входных и выходных переменных – это аксиома. Поэтому относительно корректировки исходной математической модели, исходя из опыта исследователя, можно предложить ряд других теорий, таких как:

1) теория личного потребления;

2) теория фирмы;

3) теория игр;

4) общие межотраслевые модели развития экономики.

В конечном итоге, выбор той или иной модели – достаточно субъективная позиция каждого исследователя, и общих правил способов корректировки исходных моделей не существуют.

Выводы по второй главе

Во второй главе представлена разработка статистического метода имитационной аппроксимации сложных экономических систем с большим количеством входов и несколькими выходами (откликами). Применение данного метода особенно важно на этап прогнозирования развития сложных ЭС, когда происходит изучение влияния нескольких ключевых переменных (факторов) на функционирование моделируемой системы. Ключевыми этапами его реализации являются: 1) математико-статистический анализ; 2) построение многооткликовых моделей имитационной аппроксимации; 3) проверка адекватности многооткликовой математической модели.

ГЛАВА 3. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ИМИТАЦИОННОЙ АППРОКСИМАЦИИ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Как уже упоминалось выше, имитация используется для построения некоторого идеального процесса функционирования системы, называемого имитационным процессом. Процесс функционирования реальной системы разделяется на ряд процессов функционирования отдельных объектов. Данные процессы протекают одновременно, или параллельно. Задача программной имитации – отображение параллельно протекающих процессов в одном вычислительном процессе. Это отображение, в зависимости от задач и показателей эффективности, может выполняться различными способами. Опыт имитационного моделирования показывает, что оно связано с большим объемом программирования. В данной главе описывается программный комплекс, использующийся для численного исследования многооткликовых моделей: построения, проверки адекватности и прогнозирования. Программный комплекс был использован для численного исследования многооткликовых моделей, построенных в главе 2. Программа создана в среде программирования MATLAB [48]. Комплекс программы зарегистрирован в Федеральной службе по интеллектуальной собственности [60, 61]. Благодаря панели инструментов и кнопкам, расположенным на окнах программного комплекса, пользователи могут экспериментировать с моделями с возможностью применения различных сценариев. Результаты выполнения программного комплекса представляются на графиках и в виде таблиц с возможностью импорта в файл MS Excel.

3.1. Постановка задачи на разработку программного комплекса

3.1.1 Задача

Необходимо разработать программного комплекса, обеспечивающую возможность моделирования экономической системы. В качестве базовой математической модели нужно использовать методику и модель, описанную в главе 2 настоящей работы.

3.1.2 Требования к программному комплексу

Разрабатываемый программный комплекс должна удовлетворять следующим требованиям:

- операционная система: Windows Vista, XP, 7 или 8;
- тип приложения: однодокументный интерфейс, графическое приложение;
- наличие системы интегрированной и контекстной справки.

3.1.3 Возможности программного комплекса

В разрабатываемом программном комплексе необходимо реализовать следующие основные функциональные возможности:

1) ввод данных экономической системы:
   - сохранение и загрузка всех данных эксперимента из файла;
   - добавление, редактирование данных эксперимента.
2) выбор структуры моделей:
   - отбор значимых факторов.
3) построение математической модели:

– расчет коэффициентов уравнений регрессии с фактическими данными;
– расчет коэффициентов уравнений регрессии с кодированными данными;
– расчет значений откликов по модели;
– график расчетных и фактических значений.

4) проверка адекватности модели:
– расчет коэффициента детерминации;
– расчет ошибки аппроксимации;
– расчет значения критерия Фишера.

5) прогнозирование:
– расчет прогнозных значений откликов при изменении значений факторов;
– расчет доверительного интервала прогноза;
– график прогнозирования.

6) экспорт всех видов отчетов в программы Excel.

3.1.4 Технологическая схема моделирования экономических процессов

Для реализации процесса моделирования экономической системы предлагается следующая технологическая схема, представленная на рисунке 3.1.

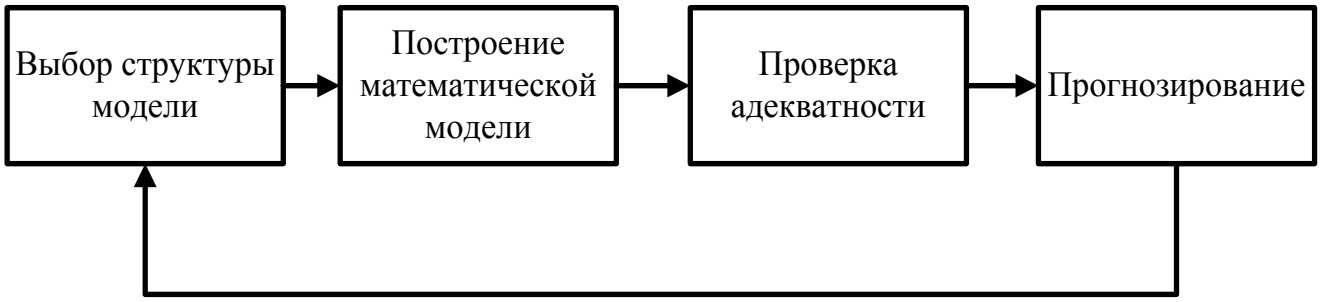

Рисунок 3.1 – Блок-схема процесса моделирования экономической системы

Согласно этой схеме процесса моделирования экономической системы моделирование распадается на четыре больших этапа.

Как видно из блок-схемы, с помощью процедуры построения математической модели определяются регрессионные уравнения экономической системы. Затем используются критерии для проверки адекватности регрессионных уравнений, полученные на этапе 1. Если модель адекватна, то её используют в процессе прогнозирования.

Ниже, на рисунке 3.2 подробно описана технологическая схема процесса моделирования экономической системы.

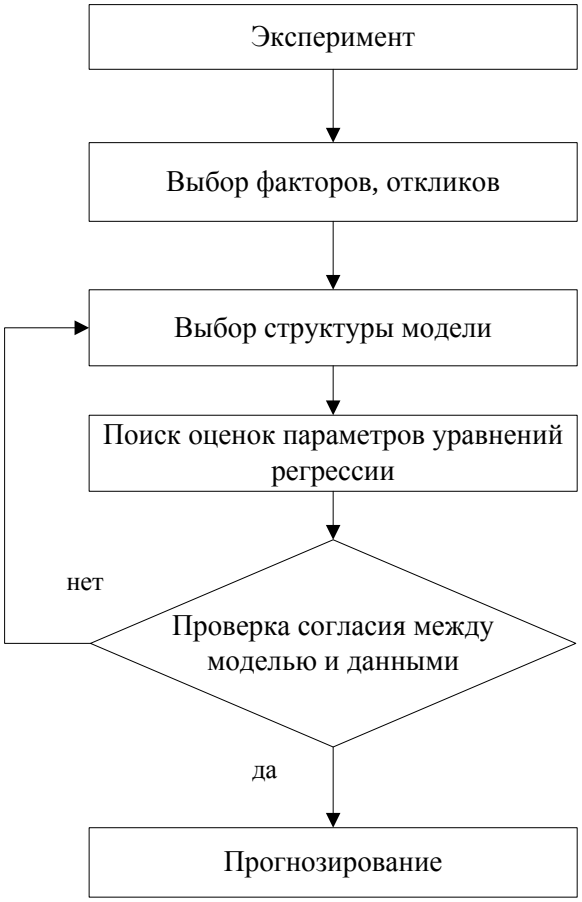

Рисунок 3.2 – Технологическая схема процесса моделирования экономической системы

Согласно построенной функциональной модели программного комплекса, её основной функцией является многооткликовое моделирование экономических процессов. Функциональная модель построена при помощи инструментария BPwin.

На рисунке 3.3 изображена декомпозиция функции «многооткликовое моделирование экономических процессов», которая была выделена при создании функциональной модели программного комплекса.

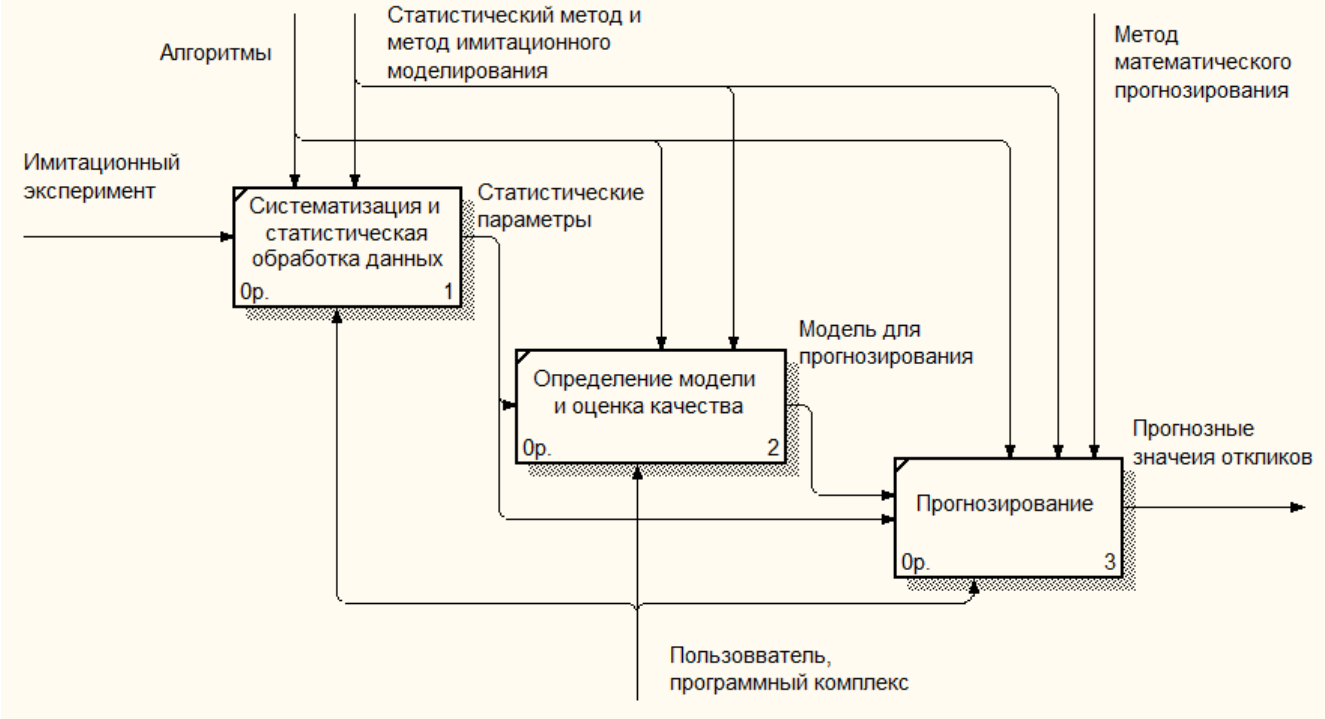

Рисунок 3.3 – Декомпозиция функции «многооткликовое моделирование экономических процессов»

3.1.5 Используемые программные средства

MATLAB [3, 48] – это высокопроизводительный язык для решения задач технических вычислений. Он представляет собой удобную среду для программирования и вычислений, где задачи и решения выражаются в форме, близкой к математической. MATLAB используется для создания алгоритмов,

математических вычислений, моделирования, анализа данных и их визуализации, разработки графического интерфейса и приложений, а также в научно-инженерной графике.

Слово MATLAB образовано от matrix laboratory, что означает «матричная лаборатория». MATLAB был написан с целью обеспечения легкого доступа к EISPACK и LINPACK – современным программным средствам для матричных вычислений [48].

Для работы с системой достаточно иметь компьютер PC 486 с оперативной памятью хотя бы 16 Mb и с установленными на нем системами Windows 95 и MATLAB 5.2. В действительности MATLAB может работать и с другими операционными системами, такими, например, как Macintosh, Unix и OS/2.

В MATLAB имеется богатый выбор готовых компонентов, функций для работы с файлами Microsoft Office и с графикой.

3.2. Структура программного комплекса и его особенности использования

Программный комплекс позволяет построить многоокликовые модели с графическим и численным представлением результатов, при этом используются следующие функции:

– fopen (): открытие файла на запись;

– Plot (x, y): построение графика при задании функции $y = f(x)$ в векторной виде или матриц;

– fwrite (): сохранение матрицы в файл;

– feval ('<имя_функции>', x1, ..., xn) позволяет выбрать функцию из списка;

– corrcoef (X) – функция, предназначенная для расчета матрицы парных коэффициентов корреляции R, выборок, представленных в виде матрицы X. Наблюдения располагаются построчно в матрице X, выборки – по столбцам;

– finv (P,V_1,V_2) позволяет определить значение квантили распределения Фишера со степенями свободы V_1, V_2, соответствующей P доверительной вероятности.

Программная реализация имеет модульную структуру, что обеспечивает удобство и относительную легкость редактирования отдельных модулей, не влияющих на работу остальных модулей, и добавление новых функциональных возможностей в комплекс:

1. Модуль ввода данных экономической системы.
2. Модуль выбора структуры данных.
3. Модуль построения математической модели.
4. Модуль проверки адекватности модели.
5. Модуль прогнозирования.

Главное окно программного комплекса изображено на рисунке 3.4.

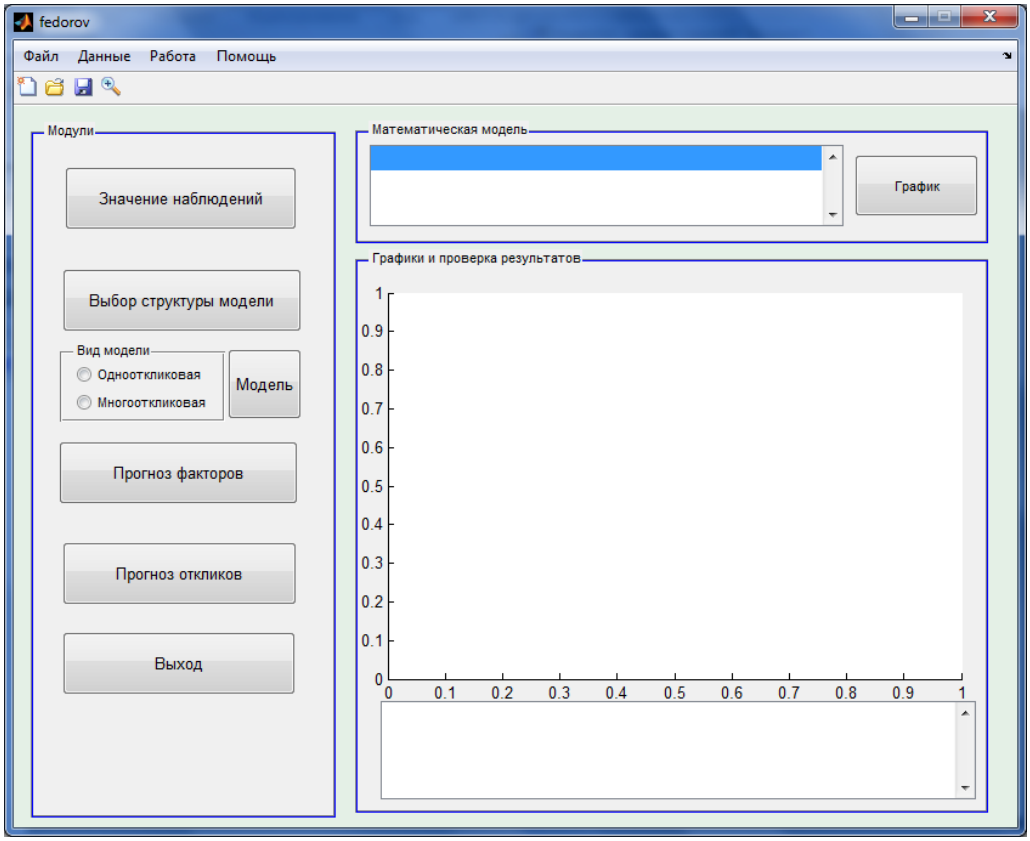

Рисунок 3.4 – Главный интерфейс программного комплекса

На рисунке 3.5 представлен модуль ввода данных. С помощью этого модуля программный комплекс позволит пользователям вводить данные экономической системы: количество входных переменных (факторов), количество выходных переменных (откликов), количество наблюдений и коэффициентов и данные эксперимента. Модуль предназначен для создания, загрузки из файла, изменения, и сохранения числовых данных. Данные сохраняются в виде txt- или excel-файла, в котором первая строка содержится список названия факторов и откликов, идентифицирующих соответствующий столбец данных. Все следующие строки должны содержать значения факторов и откликов, расположенные в соответствующих столбцах. В таблице 3.1 показана спецификация переменных модулей ввода данных.

Таблица 3.1 – Спецификация переменных модулей ввода данных

Имя	Назначение	Тип	ОДЗ
m1	Количество факторов	Число	1..200
l	Количество откликов	Число	1..200
N	Количество наблюдений	Число	1..2000
m	Количество коэффициентов	Число	от 0 до 20
dataK	Матрица данных	Массив чисел	Размер (m1+l).N
F	Регрессоры	Массив функций	Размер l.m

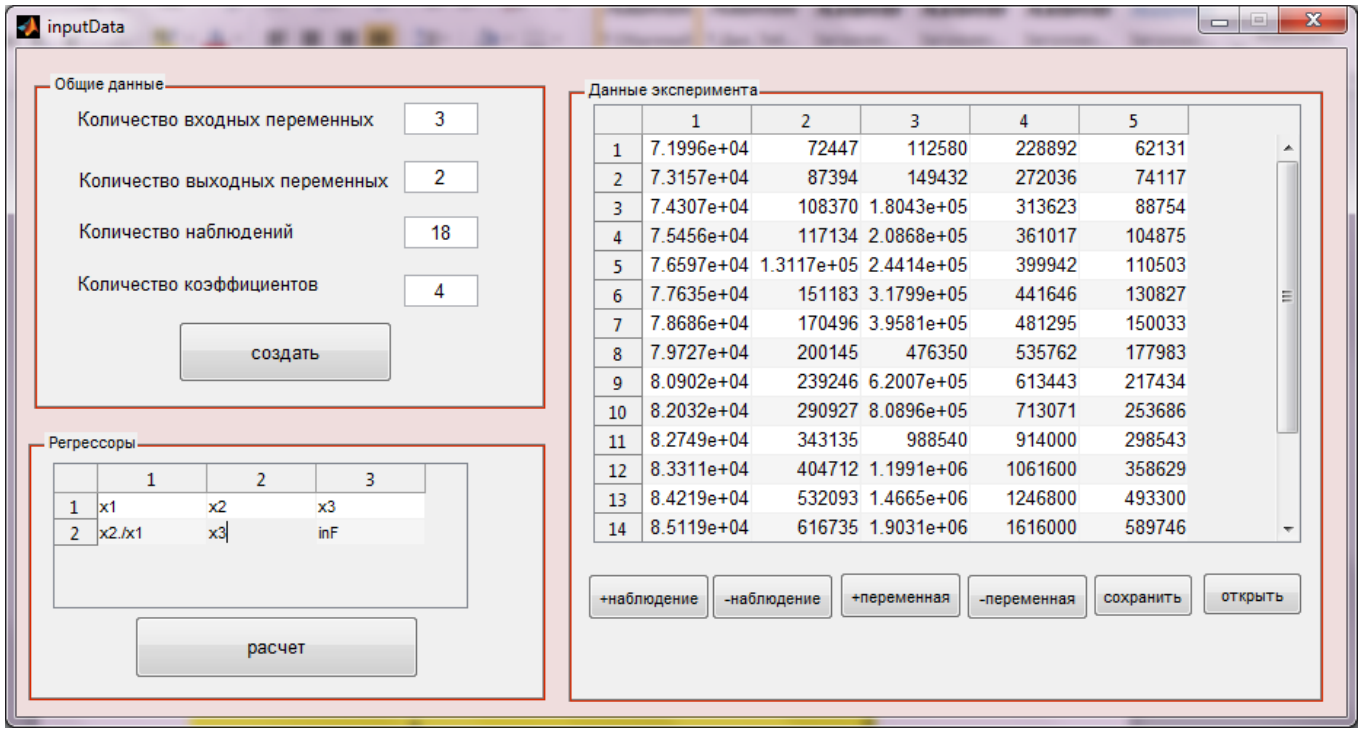

Рисунок 3.5 – Модуль ввода данных

Модуль «выбор структуры модели» изображен на рисунке 3.6. С помощью этого модули можно найти структуры модели для отклика.

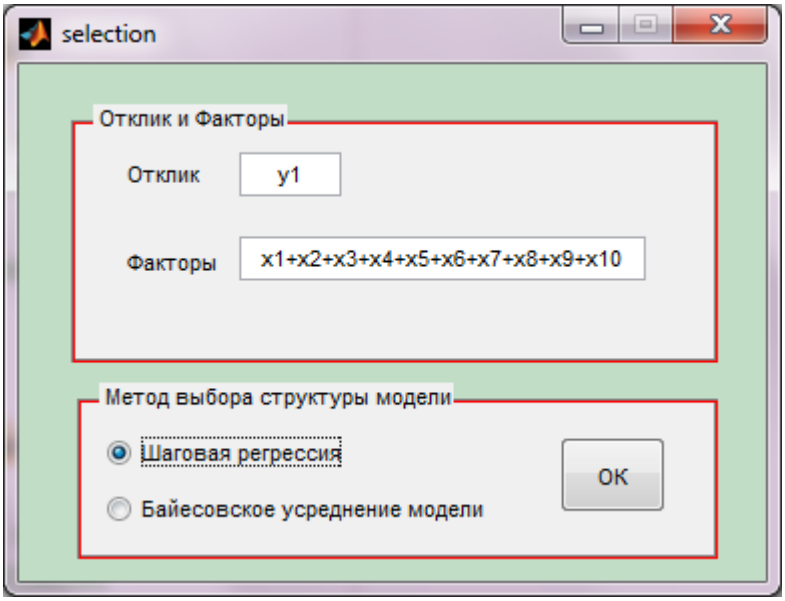

Рисунок 3.6 – Модуль выбора структуры модели

Модули «построение модели» и «проверка адекватности» изображены на рисунке 3.7. С помощью этих модулей можно найти оценки математической модели с фактическими и с кодированными данными, построить графики фактических и расчетных значений. Составить представление о качестве регрессионных моделей можно судить по значению коэффициента детерминации. Чтобы оценить точность регрессионных моделей, как правило, применяют статистические критерии точности, как и для трендовых моделей, например среднюю относительную ошибку аппроксимации. Проверка значимости регрессионной модели производится с помощью критерия Фишера. Спецификация переменных модулей «построение модели» и «проверка адекватности» показана в таблицах 3.2 и 3.3.

Таблица 3.2 – Спецификация переменных модулей построения математической модели

Имя	**Назначение**	**Тип**	**ОДЗ**
m1	Количество факторов	Число	1..200
l	Количество откликов	Число	1..200
N	Количество наблюдений	Число	1..2000
m	Количество коэффициентов	Число	от 0 до 20
dataK	Матрица данных	Массив чисел	Размер (m1+l).N
L	Регрессоры	Массив функций	Размер l.m

Таблица 3.3 – Спецификация переменных модулей проверки адекватности модели

Имя	**Назначение**	**Тип**	**ОДЗ**
y	Фактические данные	Массив чисел	Размер N. l
ym	Расчетные данные	Массив чисел	Размер N. l
err	Ошибка аппроксимации	Число	0-1
R	Коэффициент детерминации	Число	0-1
F	Значения Фишера	Число	

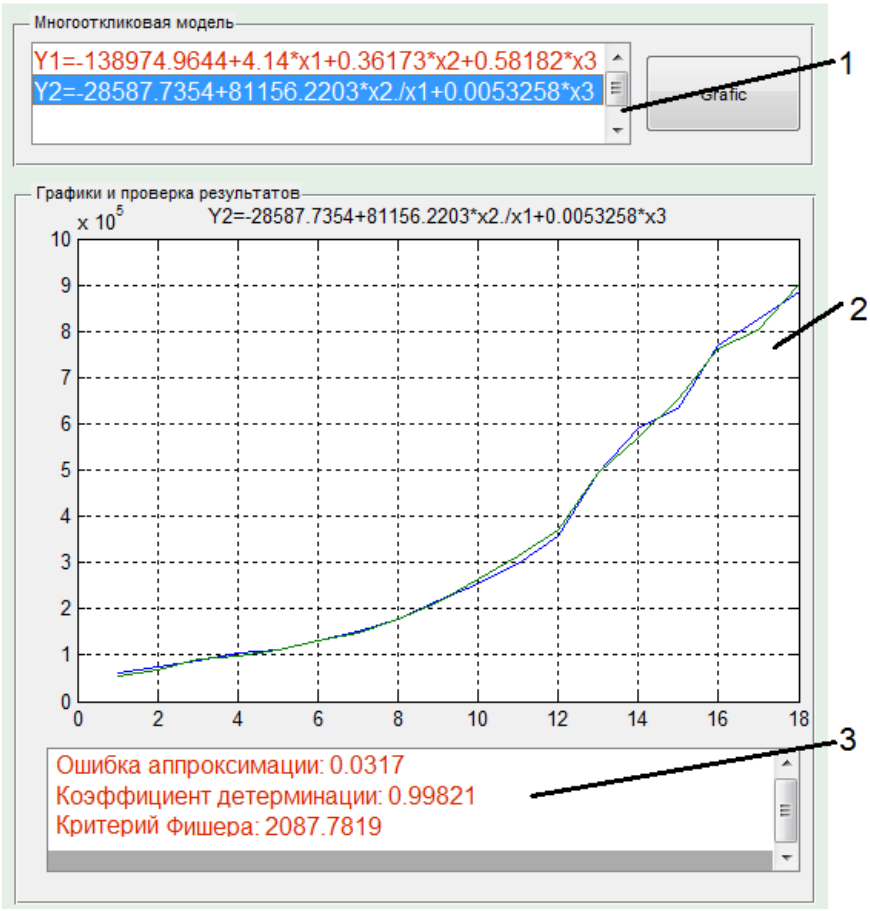

Рисунок 3.7 – Модуль построения модели и проверки адекватности: 1 – многооткликовая модель; 2 – график фактических и расчетных значений откликов; 3 – панель проверки адекватности

С помощью модуля «прогнозирование» программный комплекс позволит произвести расчет прогнозных значений откликов от изменения значений факторов, расчет доверительного интервала прогноза и построение их графиков. Модуль «прогнозирование» изображен на рисунках 3.8, 3.9. Спецификация переменных модулей прогнозирования показана в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Спецификация переменных модулей прогнозирования

Имя	Назначение	Тип	ОДЗ
Npr	Длительность прогноза	Число	Меньше $\frac{N}{3}$
dudoan	Прогнозные значения факторов	Массив чисел	Размер Npr.m
Ympr	Прогнозные значения факторов	Массив чисел	Размер Npr.l
interval	Доверительный интервал	Массив чисел	Размер l

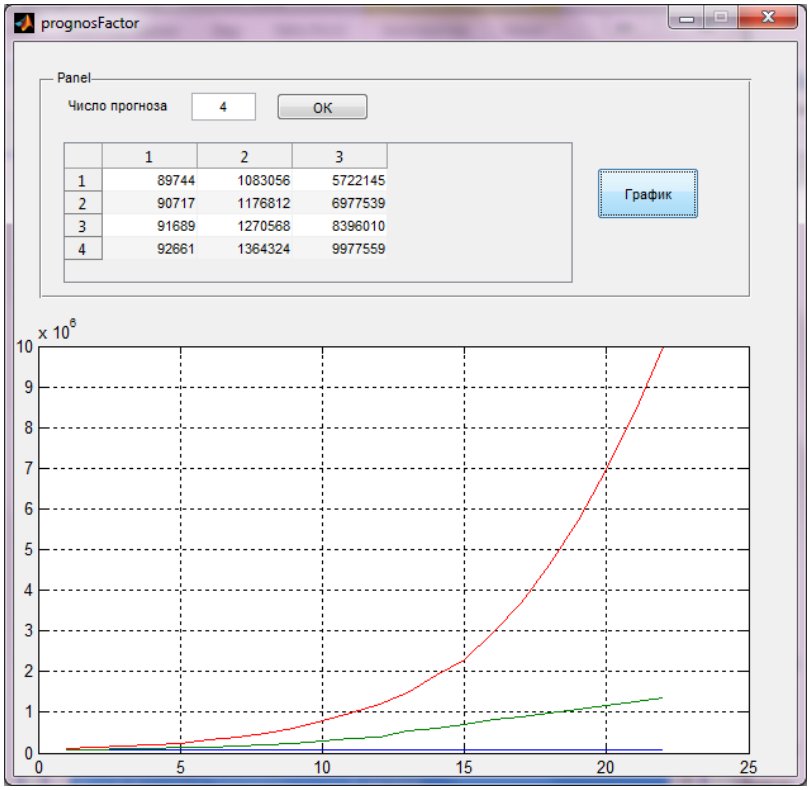

Рисунок 3.8 – Прогноз факторов

На рисунке 3.8 показаны отчетные и прогнозные значения факторов. Эти значения можно получить, применяя экстраполяционные методы, например, используя средние абсолютные приросты факторных признаков; также они могут

быть вычислены благодаря методам экспертной оценки или непосредственно заданы исследователем экономических процессов.

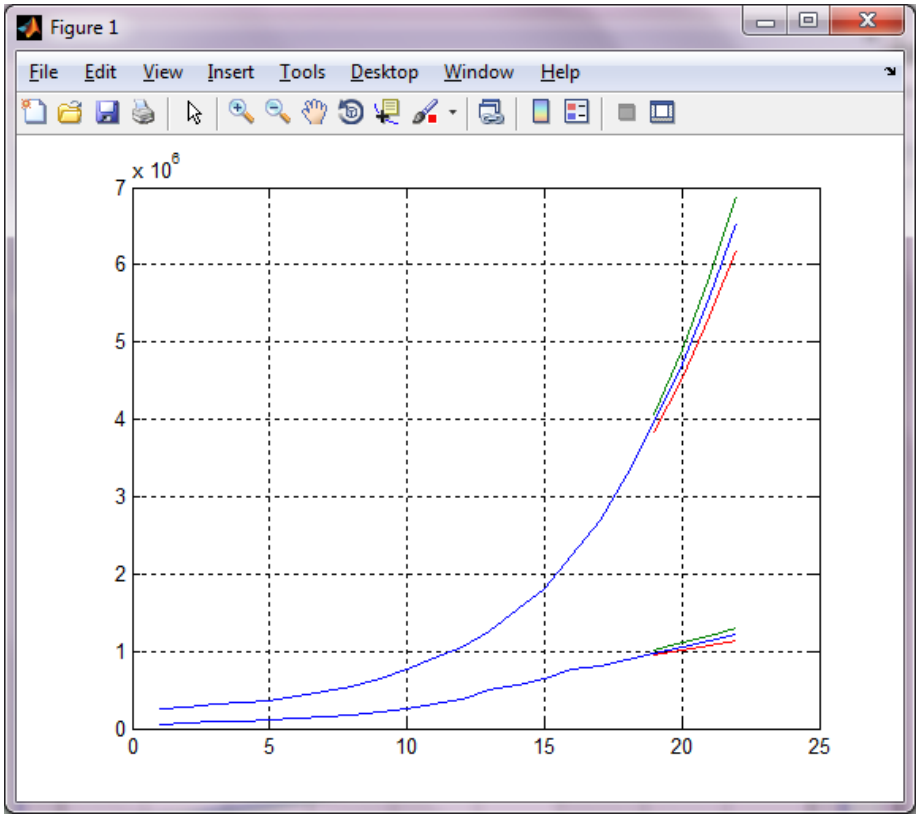

Рисунок 3.9 – Прогноз откликов

На рисунке 3.9 показана динамика откликов, в которых «истинное» среднее значение каждого отклика лежит в доверительных пределах.

Выводы по третьей главе

В данной главе получены следующие результаты.

Разработан программный комплекс для многооткликового моделирования экономических систем. Программный комплекс содержит четыре основных блока: выбор структуры модели, построение математической модели, проверка адекватности и прогнозирование.

Представлено описание программного комплекса. Он создан в среде MATLAB, имеет простой и интуитивно понятный интерфейс.

ГЛАВА 4. НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ИМИТАЦИОННОЙ АППРОКСИМАЦИИ В ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ВЬЕТНАМА

4.1. Краткий анализ состояния экономики Вьетнама

Социалистическая Республика Вьетнам – государство в Юго-Восточной Азии с населением 90,7 млн чел. (прирост с 1995 по 2014 год составил 1,05 %). Территория – 330 тыс. км^2. Столица – г. Ханой.

Во Вьетнаме реализована плановая экономика с большой долей элементов рыночных отношений. С 1992 г. в стране происходит разгосударствление промышленных предприятий. Положительно оценивается создание совместных предприятий и привлечение инвестиций из-за рубежа. В производстве товаров народного потребления, сфере услуг, торговле преобладают частные предприятия. Вьетнам является членом ВТО.

Быстрое и стабильное развитие экономики – это цель для всех стран, так как оно может разрешить экономические проблемы: увеличение уровни жизни, уменьшение безработицы, увеличение благосостояния народа. Из опытов исследования этого фактора во многих странах мира можно сделать такой вывод: чтобы анализировать и прогнозировать развитие экономики, необходимо построить математическую модель экономической системы страны.

Проблемы современной экономики вызывают необходимость прогнозирования. Оно оказывается эффективным только при использовании математических методов – важнейшего направления совершенствования систем управления в экономике. Математические методы ускоряют проведение экономического анализа, способствуют более полному учету влияния различных факторов на результаты деятельности, повышению точности прогнозирования.

Это находит выражение в увеличении количества экономических исследований, опирающихся на статистические данные, в которых используются математические модели.

Во Вьетнаме в настоявшее время проводиться широкомасштабная экономическая реформа. Перечислим основные ее направления:

– переход от централизованной плановой экономики, которая базируется на коллективной и всенародной собственности, к товарной экономике, предполагающей наличие различных форм собственности и функционирующей благодаря рыночному механизму, значительное место в котором занимает государственное регулирование. Таким образом, постепенно образуется модель рыночной экономики с социалистической ориентацией;

– укрепление международного партнерства и сотрудничества, проведение политики «открытых дверей».

Во Вьетнаме функционирует модель рыночной экономики с социалистической ориентацией [63, 64]. Ее основные элементы:

– различные формы собственности, которые можно отнести к государственному и негосударственному секторам. Первый имеет ключевое значение в развитии экономической системы страны. Активно проводится процесс модификации, реконструкции госпредприятий, учреждение мощных стратегических госкорпораций. Кроме того, негосударственный сектор интенсивно развивается. В нем образуется множество мест работ, постепенно формируется юридическая и экономическая база для развития частного предпринимательства, малого и среднего бизнеса;

– контроль над монополиями правительства, которое использует приемы государственного регулирования и инструменты рынка – бюджетное планирование, банковскую ставку, налоговую политику и т.д.;

– оптимальное сочетание рыночных и плановых механизмов – планирование на макростратегическом уровне; свободное и самостоятельное функционирование на уровне хозяйствующих субъектов.

За 1991–2000 годы более чем в 2 раза увеличился ВВП. За счет собственного производства полностью ликвидирован товарный дефицит, наблюдается уверенный рост экспорта – с 2,4 млрд в 1990 г. до 15,1 млрд долл. в 2001 г. Также можно отметить активное перемещение «центра тяжести» в структуре ВВП. Если в 1990 г. доли продукции промышленности, сельского хозяйства, сферы услуг в ВВП государства составляли 22.67, 38.74 и 38.59 %, то в 2001 г. имел место сдвиг в сторону промышленности и услуг – данные показатели стали составлять 23,3, 37,75 и 38,95 %. Это значит, что произведен переход от сельского к промышленному развитию. Кроме того, наблюдаются успехи в формировании и совершенствовании социально-экономической инфраструктуры [62].

Однако за последние 15 лет в модели экономики Вьетнама выявлены некоторые недостатки.

С 2000 года Вьетнам использовал модель экономики, в которой предполагалось развитие экономики на основе инвестиций. Объем инвестиций беспрерывно увеличивался и остается высоким. Доля инвестиций в ВВП возросла с 35,4 % в 2001 году до 41,9 % в 2010 году, в среднем в течение 2001–2010 гг. она составляла примерно 40%, по сравнению с 30,7 % за 1991–2000 гг. Вьетнам является одной из стран, имеющей высокую долю инвестиций в ВВП в Восточной и Юго-Восточной Азии. Темпы прироста макроэкономики и доли инвестиций в ВВП (1986–2010) представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Темпы экономического прироста и инвестиций в ВВП (1986–2010 гг.)

Годы	Прирост ВВП, %	Прирост доли инвестиций в ВВП, %
1986–1990	4,85	12,6
1991–1995	8,21	28,2
1996–2000	7,00	33,3
2001–2005	7,49	39,1
2006–2010	6,90	42,7

В течение многих лет темпы прироста инвестиционного капитала были гораздо выше, чем темпы прироста ВВП. За 2000–2010 гг. иностранные инвестиции увеличились в 5,1 раза, частные – в 3,5 раза, государственные – в 2,5 раза. Однако государственные инвестиции имеют наибольшую долю в инвестициях страны. Доля этого сектора уменьшилась с 59,8 % (2001 г.) до 38,1 % (2010 г.), но не из-за ограничения объемов государственных инвестиций, а по причине ускорения темпов роста других видов инвестиций. На рисунке 4.1 показана структура инвестиций за 2000–2010 гг.

Хотя государственные инвестиции за последнее десятилетие изменили техническую инфраструктуру, это вызвало экономический рост, способствовало повышению уровня жизни населения. Для оценки эффективности государственных инвестиций мы рассмотрим приростную капиталоемкость (ICOR).

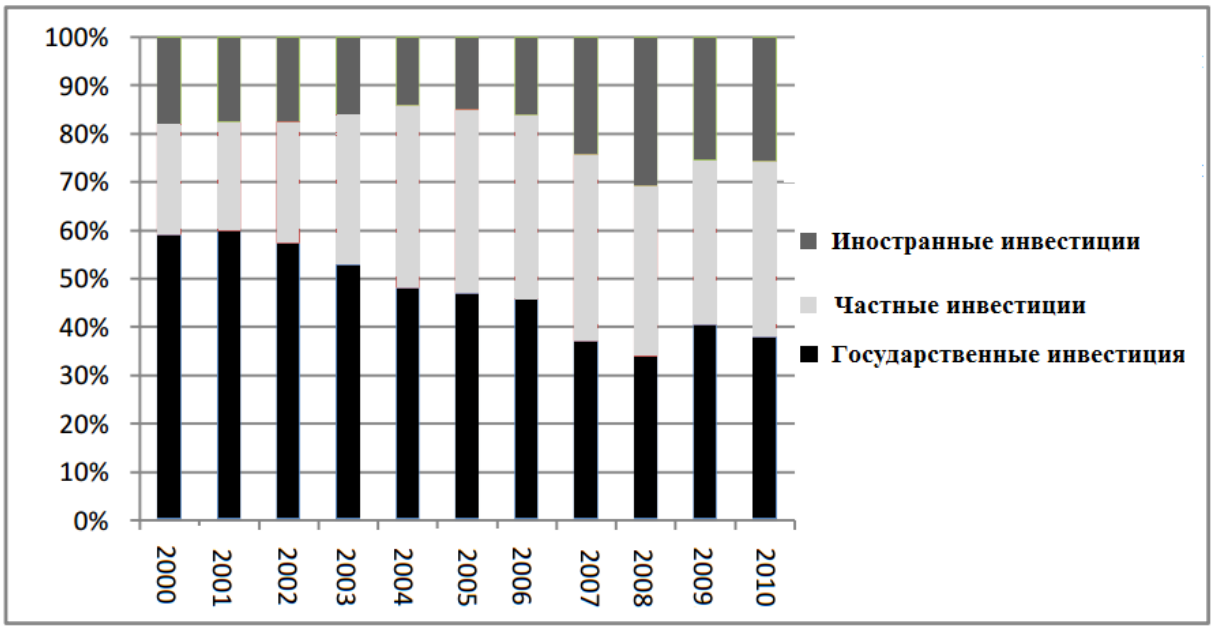

Рисунок 4.1 – Структура инвестиций за 2000–2010 гг.

Как видно из таблицы 4.2, эффективность инвестиций Вьетнама в 2000–2007 гг. была низкой. Между тем капиталоемкость других стран в стадии эквивалентного развития с Вьетнамом значительно ниже: Тайвань – 2,7 (1981–1990 гг.), Южная Корея – 3,2 (1981–1990 гг.), Япония – 3,2 (с 1961 по 1970 гг.), Китай – 4,1 (1991–2003 гг.) [105].

Таблица 4.2 – Показатель капиталоемкости 2000–2007 гг.

Инвестиции	Приростная капиталоемкость
Всего	5,2
Государственные	7,8
Частные	3,2
Иностранные	5,2

Инвестирование в экономике малоэффективно, в основном из-за государственных инвестиций: приростная капиталоемкость государственного сектора – 7,8, что выше общего среднего показателя капиталоемкости экономики,

составляющего 5,2. Низкая эффективность государственных инвестиций является результатом целого ряда факторов:

– разбросанные незапланированные инвестиции;

– капитал выделяется для слишком многих проектов, которым часто не хватает финансирования, и потому увеличивается срок их реализации, инвестиционные расходы, а это приводит к расточительности и коррупции;

– слабое управление и контроль инвестиций, из чего следуют потери капитала и снижение качества работы.

Начиная с 2000 года Вьетнам ориентирован на модель экономического роста на основе инвестиций, особенно государственных инвестиций. На протяжении многих лет государственные инвестиции быстро росли, составляя наибольшую долю в общем объеме инвестиционного капитала страны, но имели низкую эффективность. По этой причине изменение модели развития экономики является актуальным в настоящее время. Необходимо уменьшить долю государственных инвестиций в объеме инвестиций страны и повысить их эффективность и качество; создать справедливую среду для других источников инвестиций и эффективный механизм для максимального увеличения частного капитала [79, 105].

Стратегической целью социально-экономического развития Вьетнама является формирование к 2020 г. современного промышленного государства со стабильной экономикой. Для достижения данной цели необходимо внедрить модель индустриализации [35, 87].

Индустриализация – процесс создания крупного машинного производства во всех отраслях народного хозяйства и особенно в промышленности. Она обеспечивает преобладание в экономике страны производства промышленной продукции, превращение аграрной или аграрно-индустриальной страны в индустриально-аграрную или индустриальную.

Традиционное представление об индустриализации было признано во Вьетнаме в основном не отвечающим современным требованиям. Пришлось вырабатывать новую концепцию, которая должна преодолеть ранее широко распространенный взгляд на нее как на процесс, прямо не связанный с формированием рыночных отношений и институтов.

До конца 1980-х годов во Вьетнаме проводилась индустриализация социалистического образца. При этом делалась ставка на развитие тяжелой промышленности в госсекторе, т.е. командными методами без учета экономической эффективности и наличия финансовых ресурсов, ради обеспечения суверенитета. Капиталистическая индустриализация основана на ином принципе: развитие любой отрасли и выпуск любого продукта определяется независимым предпринимателем, а точнее рынком. Тем самым обеспечивается приток инвестиций в отрасли, обладающие сравнительными преимуществами и международной конкурентоспособностью. Правительство лишь создает необходимые условия и институты для функционирования основных субъектов экономики, эффективного распределения общественных ресурсов [78].

На VII съезде Коммунистической партии Социалистической Республики Вьетнам, состоявшемся в 1991 г., были сформулированы следующие цели проведения индустриализации во Вьетнаме (до 2020 г.) [87]:

– практически полная модернизация инфраструктуры промышленного развития страны;

– структура трудовой занятости: 70 % работающего населения занято вне сельского хозяйства;

– ВВП на душу населения: 4200 долл. на человека;

– высокий устойчивый темп роста ВВП, в среднем увеличение на 8 % в год;

– использование достижений научно-технической революции в мире: информационных технологий и биотехнологий;

– повышение индекса человеческого развития.

На рисунке 4.2 показано изменение структуры вьетнамской экономики по секторам общественного производства в 1995–2013 гг.

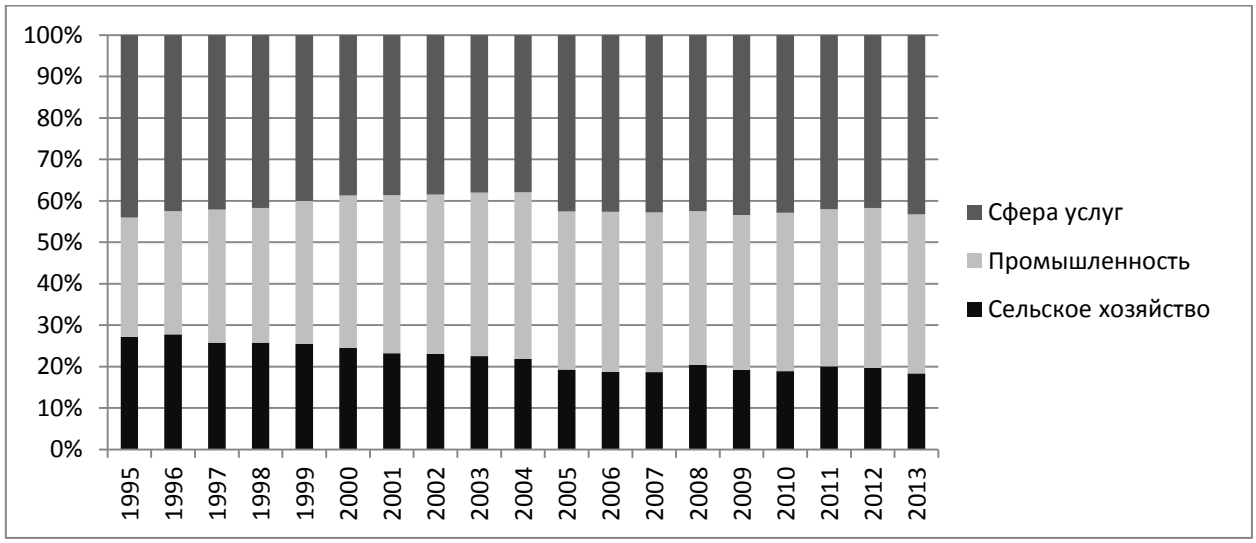

Рисунок 4.2 – Структура вьетнамской экономики по секторам общественного производства в 1995–2013 гг.

Рассмотрим подробную стратегию индустриализации экономики Вьетнама по отраслям.

Индустриализация в сельском хозяйстве:

– темпы роста сельском хозяйстве – 3% в год (растениеводство и животноводство – 2,7 %, лесное хозяйство – 2,2 % и особенно быстрый темп роста рыбоводства – 10,6 %);

– доля сельского хозяйства в ВВП уменьшается: 28 % в 1995 г., 19 % в 2010 г. и 10 % в 2020 г.;

– доля трудящихся в сельском хозяйстве уменьшается: 58 % в 2005 г., 50 % в 2010 г. и 30 % в 2020 г.;

– основные продукты: рис, кофе, перец, кешью, мясо, морепродукты.

Индустриализация в промышленности:

– темпы роста промышленности – 15% в год (добыча полезных ископаемых – 9,3 %, обрабатывающая промышленность – 16,1 % и электричество, газ, вода – 6,8 %);

– доля промышленности в ВВП: 28 % в 1995 г., 38 % в 2010 г. и устойчивые 44 % в 2020 г.;

– доля трудящихся в промышленности увеличивается: 18 % в 2005 г., 24 % в 2010 г. и 32 % в 2020 г.

Индустриализация в сфере услуг:

– темпы роста сферы услуг – 8 % в год;

– доля сферы услуг в ВВП увеличивается: 42 % в 2010 г. и устойчивые 46 % в 2020 г.;

– доля населения, занятого в сфере услуг, увеличивается: 25 % в 2005 г., 27 % в 2010 г. и 38 % в 2020 г.;

– развитие основных секторов сферы услуг: финансы и кредит, банки, информационные технологии и телекоммуникации, рынок технологий, рынок недвижимости, торговля, туризм.

При анализе состояния экономики Вьетнама можно сделать вывод, что он является развивающейся страной, и цель стать промышленным государством до 2020 г. будет трудно реализовать [98].

При этом видно, что модель развития экономки Вьетнама опирается на развитие промышленности и увеличение объемов инвестиций. Далее будет предложена модель имитационной аппроксимации социально-экономических показателей Вьетнама с использованием годовых таблиц экономической статистической отчетности за 1995–2014 гг. На основе математической модели построены прогнозные характеристики развития экономической системы.

Методика построения моделей имитационной аппроксимации экономической системы во Вьетнаме включает в себя ряд этапов.

Этап 1. Определение совокупности входных и выходных факторов (переменных).

Этап 2. Выбор структуры модели.

Этап 3. Построение многоотликовой математической модели имитационной аппроксимации экономической системы во Вьетнаме.

Этап 4. Проверка адекватности многоотликовой математической модели.

Этап 5. Прогнозирование развития экономических процессов.

4.2. Моделирование социально-экономической системы Вьетнама (имитационная аппроксимация)

Этап 1. Определение совокупности входных и выходных факторов (переменных).

К числу важнейших показателей, которые определяют развитие экономики любой страны, в соответствии со сложившимися представлениями является два показателя: валовой внутренний продукт (ВВП) и валовое накопление капитала (ВНК).

Главный показатель системы макроэкономических показателей – это ВВП. Он определяет стоимость конечных товаров и услуг, которые были произведены резидентами страны за конкретный временной период, за вычетом стоимости промежуточного потребления. ВВП исчисляется в рыночных ценах конечного потребления, т.е. в ценах, оплачиваемых покупателем, включая налоги на продукты и все торгово-транспортные наценки.

Валовое накопление охватывает накопление основного капитала, изменение материальных оборотных средств, а также чистое приобретение ценностей (предметов антиквариата, ювелирных изделий и т. д.), т.е. это вложения

резидентами средств в объекты основного капитала для получения нового дохода в будущем путем использования их в производстве.

Принципиально важным является вопрос грамотного и обоснованного учета всех существенных (значимых) переменных, воздействующих на систему. При этом нами выделяются следующие входные переменные: $x^T = (x_1,...,x_k)$ (k – предельное количество включаемых в эксперимент переменных), в том числе: x_1 – население, x_2 – валовая продукция промышленности, x_3 – количество работающих, x_4 – количество безработных, x_5 – уровень инфляции, x_6 – количество выпускников вузов, x_7 – количество вузов, x_8 – государственные инвестиции, x_9 – частные инвестиции, x_{10} – иностранные инвестиции, x_{11} – индекс потребительских цен (ИПЦ) и т.д.

Откликами $y^T = (y_1,...y_\ell)$ является y_1 – валовой внутренний продукт (ВВП), y_2 – валовое накопление капитала (ВНК).

В таблице 4.3 представлены исходные данные перечисленных показателей [10].

Таблица 4.3 – Исходные данные показателей

Год	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	y_1	y_2
1995	71995,5	112580	33030,6	6,08	12,7	58,5	129	30447	20000	22000	112,7	228892	62131
1996	73156,7	149432	33760,8	5,88	4,5	78,5	119	42894	21800	22700	104,5	272036	74117
1997	74306,9	180428,9	34493,3	6,01	3,6	74,1	132	53570	24500	30300	103,6	313623	88754
1998	75456,3	208676,8	35232,9	6,85	9,2	103,4	145	65034	27800	24300	109,2	361017	104875
1999	76596,7	244137,5	35975,8	7,40	0,1	113,6	156	76958	31542	22671	100,1	399942	110503
2000	77635,4	317991,2	36701,8	6,42	–0,6	162,5	178	89417	34594	27172	99,4	441646	130827
2001	78685,8	395809,2	38562,7	6,28	0,8	168,9	191	101973	38512	30011	100,8	481295	150033
2002	79727,4	476350	39507,7	6,01	4	166,8	202	114738	50612	34795	104	535762	177983
2003	80902,4	620067,7	40573,8	5,78	3	165,7	214	126558	74388	38300	103	613443	217434
2004	82031,7	808958,3	41586,3	5,60	9,5	195,6	230	139831	109754	41342	109,5	713071	253686
2005	82749,2	988540	42774,9	5,31	8,4	210,9	277	161635	130398	51102	108,4	914000	298543
2006	83311,2	1199139,5	43980,3	4,82	6,6	232,5	322	185102	154006	65604	106,6	1061600	358629
2007	84218,5	1466480,1	45208,0	4,64	12,63	234,0	369	197989	204705	129399	112,63	1246800	493300
2008	85118,7	1903128,1	46460,0	4,65	19,89	222,7	393	209031	217034	190670	119,89	1616000	589746
2009	86025	2298086,6	47743,6	4,60	6,52	246,6	403	287534	240109	181183	106,52	1809100	632326
2010	86932,5	2963499,7	49048,5	4,29	11,75	318,4	414	316285	299487	214506	111,75	2157800	770211
2011	87840	3695091,9	50352,0	3,60	18,58	398,2	419	341555	356049	226891	118,58	2779900	827032
2012	88772,9	4627733,1	51422,4	3,21	6,81	425,2	421	406514	385027	218573	109,21	3245400	884160
2013	89708,9	5469110,3	52207,8	3,59	6,2	406,3	428	440505	410532	240099	106,6	3584300	953124
2014	90728,9	6377539	52744,5	3,40	1,84	532,1	435	486800	468500	265400	104,09	3937900	1056600

Корреляция – стохастическая (случайная, вероятностная) связь двух или более случайных переменных (признаков). Количественной мерой степени тесноты линейной связи двух случайных переменных *x* и *y* служит коэффициент корреляции, который находится по формуле

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x * \sigma_y}, \qquad (4.1)$$

где $\sigma_x = \sqrt{\sum x_i^2 / n - \bar{x}^2}$ и $\sigma_y = \sqrt{\sum y_i^2 / n - \bar{y}^2}$ – стандартные отклонения случайных переменных *x* и *y* соответственно;

$\sigma_{xy} = \sum x_i y_i / n - \bar{x}\bar{y}$ – их ковариация.

В таблице 4.4 показаны коэффициенты корреляции между откликами и факторами.

Таблица 4.4 – Коэффициент корреляции откликов и факторов

	$\mathbf{x_1}$	$\mathbf{x_2}$	$\mathbf{x_3}$	$\mathbf{x_4}$	$\mathbf{x_5}$	$\mathbf{x_6}$	$\mathbf{x_7}$	$\mathbf{x_8}$	$\mathbf{x_9}$	$\mathbf{x_{10}}$	$\mathbf{x_{11}}$
$\mathbf{y_1}$	0,90	1,00	0,93	–0,92	0,21	0,97	0,89	0,99	0,99	0,95	0,31
$\mathbf{y_2}$	0,94	0,97	0,97	–0,94	0,31	0,96	0,95	0,99	1,00	0,99	0,40

Этап 2. Выбор структуры модели.

Существует множество методов регрессионного и факторного анализа [33], которые, однако, не всегда бывают эффективными с той или иной точки зрения. Например, метод всех возможных регрессий требует получения каждого из всех возможных регрессионных уравнений, которые содержат некоторое число переменных $(x_1,\ldots,x_k)$. Поскольку каждая переменная x_α может входить в уравнение либо не входить в него, то число наблюдений полного факторного плана очень большое (не менее 2^k, k = 11). По этой причине необходимо

исключить незначимые факторы из модели. Методы отбора значимых факторов показаны в пункте 2.2.5.

а) Отбор значимых факторов по методу Байесовского усреднения модели

С помощью метода Байесовского усреднения модели можно ранжировать структуры моделей для каждого отклика. На рисунках 4.3 показаны факторы и структуры моделей для откликов.

Из множества возможных вариантов ранжирования моделей в рамках настоящего исследования были выбраны только 5 моделей имитационной аппроксимации, отражающих принципиально линейную зависимость.

С помощью метода наименьших квадратов можно определить коэффициенты моделей (показаны в таблицах 4.5 и 4.6).

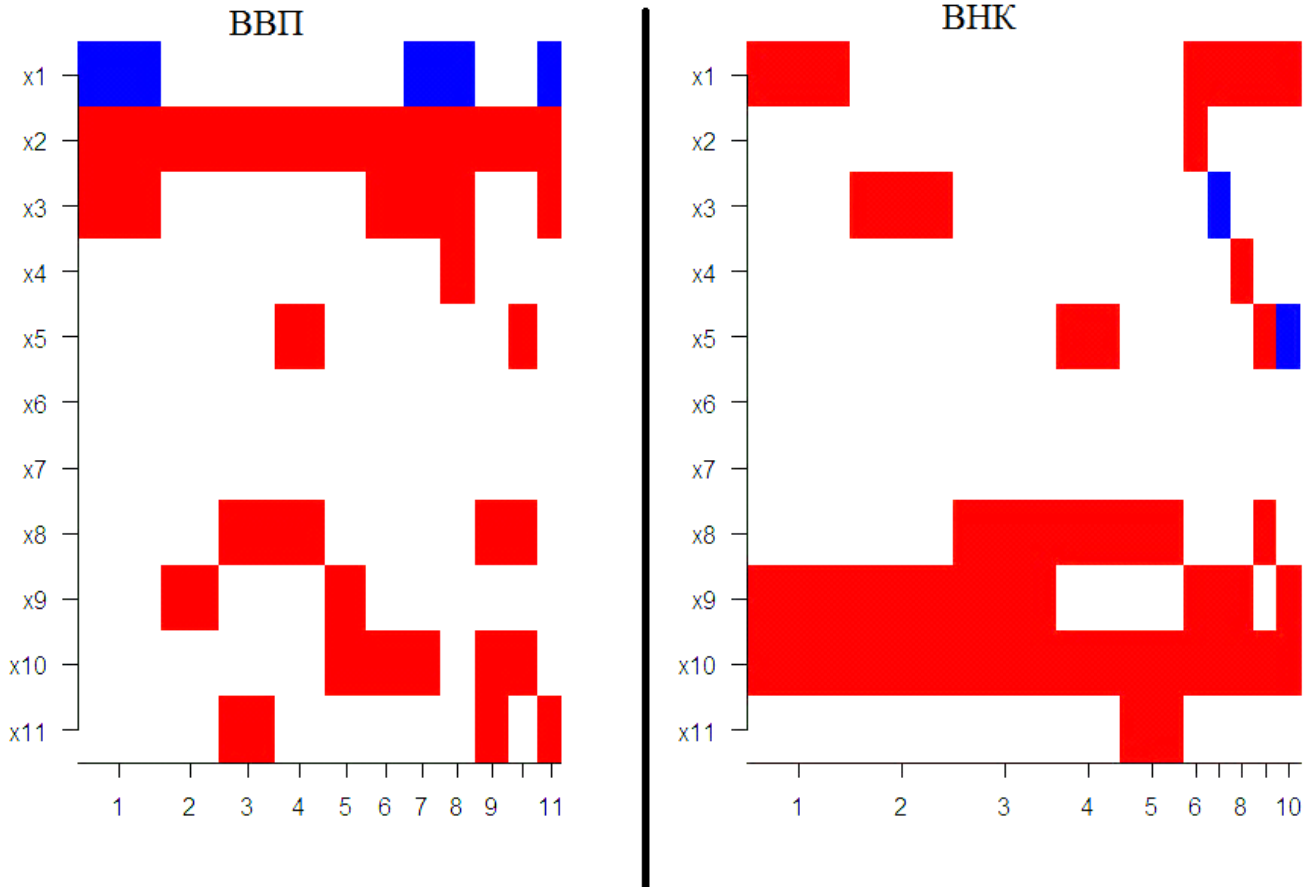

Рисунок 4.3 – Модели для каждого отклика

Таблица 4.5 – Коэффициенты моделей для Y_1

Свободный член	Модель 1	***Модель 2***	Модель 3	Модель 4	Модель 5
	$2.161*10^6$ (P-value 0.0508)	***$1.715*10^5$ (P-value $<10^{-5}$)***	$1.715*10^5$ (P-value 0.004)	35100 (P-value 0. 4644)	$1.711*10^5$ (P-value $<10^{-5}$)
$\mathbf{x_1}$	-71.82 (P-value 0.009)	–	–	–	–
$\mathbf{x_2}$	0.5006 (P-value $<10^{-10}$)	***0.4063 (P-value $<10^{-8}$)***	0.4383 (P-value $<10^{-7}$)	0,4449 (P-value $<10^{-7}$)	0.4222 (P-value $<10^{-8}$)
$\mathbf{x_3}$	98.31 (P-value 0.0008)	–	–	–	–
$\mathbf{x_4}$	–	–	–	–	–
$\mathbf{x_5}$	–	–	–	10010 (P-value 0,002)	–
$\mathbf{x_6}$	–	–	–	–	–
$\mathbf{x_7}$	–	–	–	–	–
$\mathbf{x_8}$	–	–	2.426 (P-value 0.0007)	2.375 (P-value 0,0009)	–
$\mathbf{x_9}$	–	***2.808 (P-value $<10^{-4}$)***	–	–	1.994 (P-value 0.019)
$\mathbf{x_{10}}$	–	–	–	–	1.031 (P-value 0.183)
$\mathbf{x_{11}}$	–	–	10370 (P-value 0.002)	–	–

Таблица 4.6 – Коэффициенты моделей для Y_2

Свободный член	Модель 1	Модель 2	***Модель 3***	Модель 4	Модель 5
	9475 (P-value 0.181)	–199000 (P-value 0.0016)	***–420500*** (P-value 0.0003)	–372900 (P-value 0.0001)	–43330 (P-value $<10^{-4}$)
$\mathbf{x_1}$	–	–	***6.011*** (P-value 0.0001)	–	–
$\mathbf{x_2}$	–	–	–	–	–
$\mathbf{x_3}$	–	6.618 (P-value 0.0003)	–	–	–
$\mathbf{x_4}$	–	–	–	–	–
$\mathbf{x_5}$	–	–	–	–	3222 (P-value 0.0002)
$\mathbf{x_6}$	–	–	–	–	–
$\mathbf{x_7}$	–	–	–	–	–
$\mathbf{x_8}$	0.6338 (P-value 0.0002)	–	–	1.506 (P-value $<10^{-11}$)	1.524 (P-value $<10^{-11}$)
$\mathbf{x_9}$	0.8575 (P-value $<10^{-4}$)	1.274 (P-value $<10^{-9}$)	***1.295*** (P-value $<10^{-10}$)	–	–
$\mathbf{x_{10}}$	1.326 (P-value $<10^{-8}$)	1.142 (P-value $<10^{-7}$)	***1.218*** (P-value $<10^{-7}$)	1.320 (P-value $<10^{-7}$)	1.310 (P-value $<10^{-7}$)
$\mathbf{x_{11}}$	–	–	–	3306 (P-value 0.0002)	–

P-значение (P-value) – это величина, которая используется при тестировании статистических гипотез. Фактически это вероятность ошибки при отклонении нулевой гипотезы (ошибки первого рода). Проверка гипотез с помощью P-значения является альтернативой классической процедуре проверки через критическое значение распределения.

Обычно P-значение равно вероятности того, что случайная величина с данным распределением (распределением тестовой статистики при нулевой гипотезе) примет значение, не меньшее, чем фактическое значение тестовой статистики.

Для каждой модели были вычислены значения критерия проверки адекватности (оценки ошибки аппроксимации, P-значение, коэффициент детерминации, F-критерий). В таблицах 4.7, 4.8 показаны значения проверки адекватности моделей, соответствующих откликам.

Таблица 4.7 – Проверка адекватности моделей первого отклика

Модель	Ошибка аппроксимации, %	P-значение	Коэффициент детерминации	F-критерий
Модель 1	7.07	удовлетворительно	0,99	2104 (3–16)
Модель 2	***5.92***	***очень хорошо***	***0,99***	***2777(2–17)***
Модель 3	6.7	очень хорошо	0,99	2014 (3–16)
Модель 4	6.55	удовлетворительно	0,99	2000 (3–16)
Модель 5	5.48	неудовлетворительно	0,99	1955 (3–16)

Таблица 4.8 – Проверка адекватности моделей второго отклика

Модель	Ошибка аппроксимации, %	P-значение	Коэффициент детерминации	F-критерий
Модель 1	4.56	удовлетворительно	0.99	5807 (3–16)
Модель 2	4.07	очень хорошо	0.99	5452 (3–16)
Модель 3	***3.01***	***очень хорошо***	***0.99***	***6028 (3–16)***
Модель 4	4.36	очень хорошо	0.99	5056 (3–16)
Модель 5	4.18	очень хорошо	0.99	5070 (3–16)

На основе полученных результатов был сделан вывод о том, что модель 2 (для первого отклика) и модель 3 (для второго отклика) имеют меньшую ошибку, меньшие Р-значения, большее значение Фишера и коэффициента детерминации, по сравнению с другими моделями, и поэтому перечень факторов, соответствующих этим моделям, будет принят в качестве лучшей выборки. Системы данных моделей представлены в следующей формуле:

$$y_1 = 171459 + 0.406x_2 + 2.808x_9$$
$$y_2 = -420465 + 6.001x_1 + 1.295x_9 + 1.217x_{10}. \quad (4.2)$$

б) Отбор значимых факторов по методу шаговой регрессии.

Цель шаговой регрессии заключается в отборе из многих предикатов небольшой подмножества переменных, вносящие наибольший вклад в вариацию откликов. Шаговая регрессия включает два основных шага: шаг Add (последовательное добавление признаков) и шаг Del (последовательное удаление признаков).

С помощью программного комплекса можно найти структуры моделей по методу шаговой регрессии модели для каждого отклика.

$$\begin{cases} y_1 \sim x_2 + x_9 \\ y_2 \sim x_9 + x_{10} + x_1 + x_8 \end{cases}$$

При сравнении результатов 2-х методов видно, что структура модели для первого отклика одинаковые, но для второго отклика разные (фактор x_8). Этот случай называется переобученным, который обычно возникает при использовании метода шаговой регрессии.

Этап 3. Построение многоотликовой математической модели имитационной аппроксимации экономической системы во Вьетнаме.

На данном этапе будет рассмотрен метод построения многоотликовой модели имитационной аппроксимации экономической системы во Вьетнаме [49, 50, 51, 53, 55, 56, 59, 54]. Данный метод относится к моделированию

макроэкономических показателей Вьетнама, построенная автором модель служит для решения задач анализа и прогнозирования развития экономической системы Вьетнама. Предложенная модель была верифицирована на базе статистических данных факторов развития экономической системы Вьетнама за период с 1995 по 2014 гг.

На этапе 2 получены структуры регрессоров для построения многооткликовой модели. В качестве откликов выбраны следующие показатели: y_1 – валовой внутренний продукт (ВВП, миллиард донгов), y_2 – валовое накопление капитала (ВНК, миллиард донгов).

В качестве факторов, влияющих на отклики, были выбраны следующие показатели: x_1 – население (тысяча человек), x_2 – валовая продукция промышленности (ВПП, миллиард донгов), x_9 – частные инвестиции, x_{10} – иностранные инвестиции.

Валовая продукция промышленности представляет собой общий результат промышленной производственной деятельности всех промышленных предприятий за определённый период в денежном измерении.

Население в демографии – совокупность людей, живущих на земле или в пределах конкретной территории – континента, страны, области и т. д.

Инвестиции в основной капитал представляют собой совокупность затрат, направляемых на приобретение, воспроизводство и создание новых основных средств. Существуют разные классификации инвестиций по форме собственности на инвестиционные ресурсы: частные, государственные и иностранные.

Многооткликовая модель регрессионного типа представлена уравнениями вида [5]:

$$y_i = \eta(x_i, \theta) + \varepsilon_i,\ i = \overline{1,n}; \qquad (4.3)$$

$x_i^T = (x_{1i}, \ldots, x_{ki})$ – независимые переменные (факторы),

где $y_i^T = (y_{1i},...y_{\ell i})$ – зависимые переменные (отклики);

$\eta^T(x_i,\theta) = (\eta_1(x_i,\theta),...,\eta_\ell(x_i,\theta))$ – функции зависимости; (4.4)

ε – случайные ошибки, которые удовлетворяют стандартным требованиям:

$E[\varepsilon_i] = 0$, $E[\varepsilon_i \varepsilon_i^T] = d(x_i)$;

$$E[\varepsilon_i \varepsilon_j] = 0, i \neq j, \left| d(x_i) \right| \neq 0, \quad (4.5)$$

в которых E – оператор усреднения;

$\theta^T = (\theta_1,...,\theta_m)$ – неизвестные коэффициенты.

При этом за основу дальнейших исследований взята модель

$$\begin{cases} y_1 = \eta(x,\theta) + \varepsilon_1 \\ y_2 = \eta(x,\theta) + \varepsilon_2 \end{cases},$$

или по другой формуле:

$$\begin{cases} y_1 = \theta_{11} f_{11}(x) + \theta_{12} f_{12}(x) + ... + \theta_{1m_1} f_{1m_1}(x) \\ y_1 = \theta_{21} f_{21}(x) + \theta_{22} f_{22}(x) + ... + \theta_{2m_2} f_{2m_2}(x) \end{cases}. \quad (4.6)$$

Пусть

$$\eta(x,\Theta) = F^T(x,\Theta),$$

где $F(x) = \left(f_1(x),...f_\ell(x)\right) = \begin{pmatrix} f_{11}(x) & ... & f_{1\ell}(x) \\ ... & ... & ... \\ f_{m1}(x) & ... & f_{m\ell}(x) \end{pmatrix}$

или

$$F(x) = \|f_1(x) f_2(x)\| = \begin{Vmatrix} f_{11}(x)\ f_{12}(x) \\ ... \\ f_{m1}(x)\ f_{m2}(x) \end{Vmatrix}$$

Здесь $f_{\alpha j} = (x)$ – непрерывные функции, $x \in X$, область X – компактная.

Теорема, приведенная в работе [1], для многооткликовой модели типа (4.3) в случае линейной параметризации при выполнении условий (4.4), (4.5) дает возможность построить наилучшие линейные оценки:

$$\hat{\Theta} = \mathrm{M}^{-1} Y, \tag{4.7}$$

где $\mathrm{M} = \sum_{i=1}^{n} F(x_i)\omega_i F^T(x_i)$;

$Y = \sum_{i=1}^{n} F(x_i)\omega_i y_i$;

$\omega_i = d^{-1}(x_i)$;

$$F(x) = \left\| \begin{array}{c|c} \begin{matrix} f_{11}(x) \\ \dots \\ f_{1m}(x) \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ \\ \end{matrix} \\ \hline \begin{matrix} \\ 0 \\ \\ \end{matrix} & \begin{matrix} \\ f_{l1}(x) \\ \dots \\ f_{lm}(x) \end{matrix} \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{c|c} \begin{matrix} F_1(x) \\ \\ \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ \\ \end{matrix} \\ \hline \begin{matrix} \\ 0 \\ \\ \end{matrix} & \begin{matrix} \\ F_l(x) \\ \\ \end{matrix} \end{array} \right\|. \tag{4.8}$$

Из нашей задачи получены значения.

Количество наблюдений: n = 20.

Количество коэффициентов уравнения: $m_1 = 3$, $m_2 = 4$.

Количество откликов: $l = 2$.

Функции $f_{11}(x) = 1, f_{12}(x) = x_2, f_{13}(x) = x_9, f_{14}(x) = 0,$

$f_{21}(x) = 1, f_{22}(x) = x_1, f_{23}(x) = x_9, f_{24}(x) = x_{10}$.

Следовательно

$$F(x)=\begin{Vmatrix} 1 & 0 \\ x_2 & 0 \\ x_9 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & x_1 \\ 0 & x_9 \\ 0 & x_{10} \end{Vmatrix}. \qquad (4.9)$$

При выполнении (3.9) в (3.6) получаем

$$M=\left(M_{jk}\right), j,k=\overline{1,2}; \qquad (4.10)$$

$$Y^T=(Y_1,Y_2),$$

где $M_{jk}=\sum_{i=1}^{20}\omega_{jki}f_j(x_i)f_k^T(x_i)$;

$Y_j=\sum_{i=1}^{20}\sum_{k=1}^{2}\omega_{jki}y_{ki}f_j(x_i)$.

В реальных задачах число неизвестных коэффициентов

$m=m_1+m_2=4+3=7.$

Имеется два случая рассмотрения дисперсионной матрицы.

Первый случай: дисперсионная матрица оценок совпадает для всех наблюдений $d(x_i)\equiv d$.

Тогда по формуле 2.13 получены такие коэффициенты модели, как

$$\theta_1=\begin{vmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \theta_{13} \\ \theta_{21} & \theta_{22} & \theta_{23} & \theta_{24} \end{vmatrix}=\begin{vmatrix} 171459 & 0.4063 & 2.8082 \\ -420465 & 6.0011 & 1.295 & 1.2176 \end{vmatrix}.$$

Отсюда получена форма модели

$$\begin{cases} y_1=171459+0.4063x_2+2.8082x_9 \\ y_2=-420465+6.0011x_1+1.295x_9+1.2176x_{10} \end{cases}. \qquad (4.11)$$

Видно, что модели (4.10) и (4.11) совпадают друг с другом. Отсюда можно сделать вывод о том, что при $d(x_i)\equiv d$ метод построения многооткликовых

моделей дает результат, совпадающий с результатами, полученными в процессе последовательности использования метода наименьших квадратов.

Второй случай: Дисперсионная матрица оценок не совпадает для всех наблюдений.

Значения результирующего показателя, взятые из таблицы 4.3, можно назвать фактическими, а значения, рассчитанные с помощью уравнений регрессии для фактических значений факторов, можно назвать расчетными. Из модели 2 можно определить расчетные значения откликов, показаны в таблице 4.9.

На практике, как правило, дисперсионная матрица ошибок $d(x_i)$ неизвестна. Но на основе модели (4.11) мы можем оценить $d(x_i)$ по формуле

$$d(x_i) = E[\varepsilon_i \varepsilon_i^T],$$

где $\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i$;

$\hat{y}_i$ – расчетные значения откликов (показаны в таблице 4.9).

Тогда по формуле 2.9 получены коэффициенты модели, такие как:

$$\theta_2 = \begin{vmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \theta_{13} \\ \theta_{21} & \theta_{22} & \theta_{23} & \theta_{24} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 156024 & 0.4445 & 2.4662 \\ -501073 & 7.1012 & 1.2272 & 1.2352 \end{vmatrix};$$

$$\begin{cases} y_1 = 156024 + 0.4445x_2 + 2.4662x_9 \\ y_2 = -501073 + 7.1012x_1 + 1.2272x_9 + 1.2352x_{10} \end{cases}. \quad (4.12)$$

Модель (4.12) называется многооткликовой моделью с учетом веса.

Таблица 4.9 – Расчетные значения откликов

Год	$\hat{y}_1$	$\hat{y}_2$
1995	273367	65032
1996	293395	75196
1997	313572	94863
1998	334316	98742
1999	359233	108461
2000	397812	124140
2001	440433	144812
2002	507138	166749
2003	632300	208882
2004	808364	265191
2005	939304	308132
2006	1091170	359753
2007	1342168	508566
2008	1554209	604555
2009	1779487	628345
2010	2216602	751299
2011	2672699	845111
2012	3133026	878131
2013	3546518	943010
2014	4078415	1055046

Видно, что факторы x_1, x_2, x_9, x_{10} измеряются в разных единицах: x_1 – тысяча человек, x_2 – миллиард донгов, x_9 – миллиард донгов, x_{10} – миллиард донгов. Поэтому, в частности, обычно не работают с истинными значениями факторов, а

проводят предварительно операцию кодирования факторов, представляющую собой линейное преобразование факторного пространства.

Для того чтобы осуществить операцию кодирования, нужно, в первую очередь, выбрать исходную область экспериментирования, т.е. задать нижние и верхние пределы изменения каждого фактора в процессе эксперимента: $x_{iмин}$, $x_{iмакс}$. Тогда данная операция будет сводиться к переносу начала координат факторного пространства в точку с координатами $x_{1ср}$, $x_{2ср}$, $x_{3ср}$, где

$$x_{icp} = \frac{x_{i\min} + x_{i\max}}{2},$$

и выбору для каждого фактора нового масштаба, такого, что значению $x_{iмин}$ будет соответствовать –1, а $x_{iмакс}$ – +1. Факторы в новом масштабе x_i, или, как мы их будем дальше называть, кодированные значения факторов, связаны с факторами в исходном натуральном масштабе (с истинными значениями факторов) очевидными соотношениями:

$$x_i^{(k)} = \frac{x_i - x_{icp}}{x_{icp} - x_{imin}} = \frac{x_i - x_{icp}}{x_{imax} - x_{icp}}.$$

После кодирования получаем данные, приведенные в таблице 4.10.

Отсюда получается модель с кодированными данными:

$$\begin{cases} y_1 = 2201062 + 1392616\ x_2^{(k)} + 553046\ x_9^{(k)} \\ y_2 = -553938 + 66514\, x_1^{(k)} + 275201\ x_9^{(k)} + 150324\ x_{10}^{(k)} \end{cases} \qquad (4.13)$$

Таблица 4.10 – Кодированные данные факторов

Год	$\boldsymbol{x_1^{(k)}}$	$\boldsymbol{x_2^{(k)}}$	$\boldsymbol{x_9^{(k)}}$	$\boldsymbol{x_{10}^{(k)}}$
1995	–1	–1	–1	–1
1996	–0.87603	–0.98824	–0.99197	–0.99425
1997	–0.75323	–0.97834	–0.97993	–0.9318
1998	–0.63052	–0.96932	–0.96522	–0.9811
1999	–0.50877	–0.958	–0.94853	–0.99449
2000	–0.39788	–0.93443	–0.93492	–0.9575
2001	–0.28574	–0.90958	–0.91745	–0.89486
2002	–0.17453	–0.88387	–0.86349	–0.89486
2003	–0.049089	–0.83799	–0.75747	–0.86606
2004	0.071477	–0.77769	–0.59976	–0.84107
2005	0.14808	–0.72036	–0.5077	–0.76087
2006	0.20808	–0.65313	–0.40243	–0.64171
2007	0.30494	–0.56779	–0.17634	–0.11751
2008	0.40105	–0.42839	–0.12136	0.38595
2009	0.49781	–0.30231	–0.018466	0.308
2010	0.59469	–0.089884	0.24632	0.58181
2011	0.69158	0.14367	0.49855	0.68357
2012	0.79118	0.4414	0.62777	0.61523
2013	0.8911	0.71	0.7415	0.7921
2014	1	1	1	1

Зависимость откликов от входных переменных показана на рисунке 4.4.

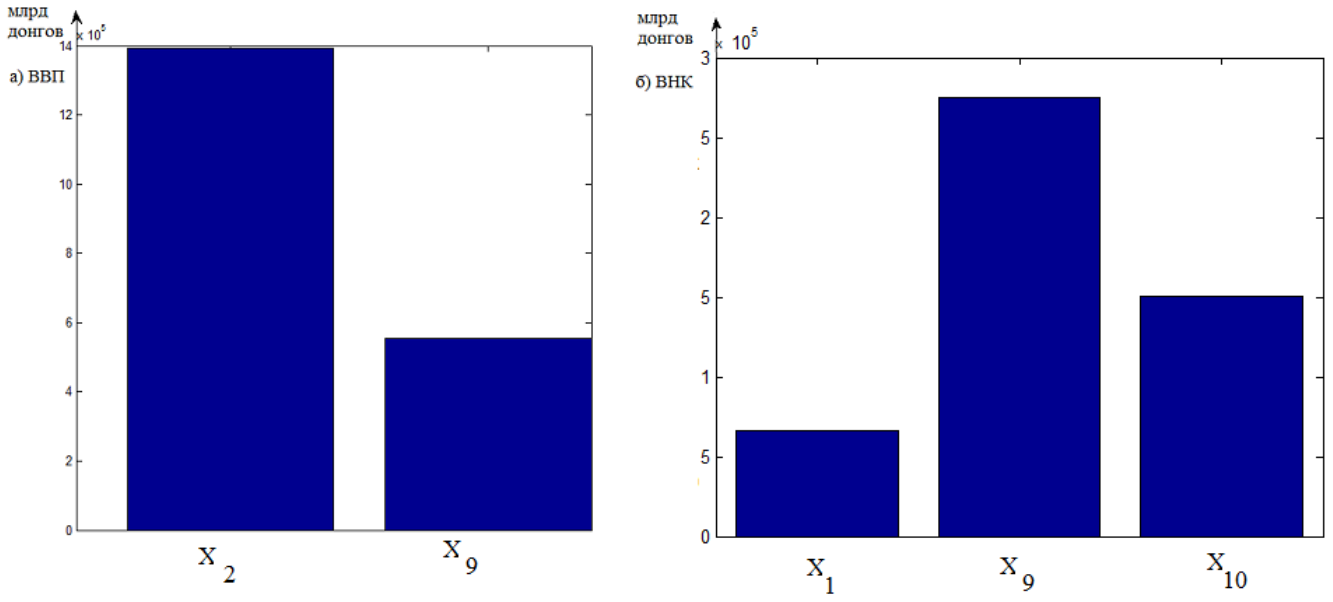

Рисунок 4.4 – Зависимость откликов от входных переменных

Из рисунка 4.4 можно сделать вывод о том, что ВВП зависит от ВПП и частных инвестиций. Причем зависимость от ВПП в 2,5 раз больше, чем от частных инвестиций. В свою очередь, ВНК зависит, соответственно, от количества населения, иностранных инвестиций и от частных инвестиций. Зависимость между данными тремя факторами следующая: количество населения – 14%, иностранные инвестиции – 30%, частные инвестиции – 56%.

За это время экономический рост обеспечивался, прежде всего, за счет промышленности, значительно обгонявшей остальные секторы экономки. Это эффективно для Вьетнама, т.к. Вьетнам является сельскохозяйственной страной. В следующих годах развитие промышленности играет большую роль в развитии экономики страны. Стратегической целью социально-экономического развития является формирование к 2020 г. современного промышленного государства со стабильной экономикой. Кроме промышленности, экономический рост Вьетнама во многом зависит от прироста инвестиций (в особенности частных и иностранных инвестиций). Это значит, что государственные инвестиции в эти года не были высокоэффективными. Стратегия развития экономики Вьетнама в

последующем будет рыночной, в которой будет увеличена доля частных и иностранных инвестиций, что повысит роль частных секторов.

Этап 4. Проверка адекватности модели.

Проверка качества модели основана на сравнении точности получаемого с помощью этих уравнений отображения результирующего показателя с точностью оценок при использовании среднего значения результирующего показателя.

Использование представленных методов при помощи средства программирования Matlab позволило получить коэффициенты регрессионных уравнений. Значения, рассчитанные с помощью уравнений регрессии для фактических значений факторов, можно назвать расчетными. На рисунке 4.5 изображён график расчетных значений откликов. Пунктирные линии соответствуют коридорам ошибок.

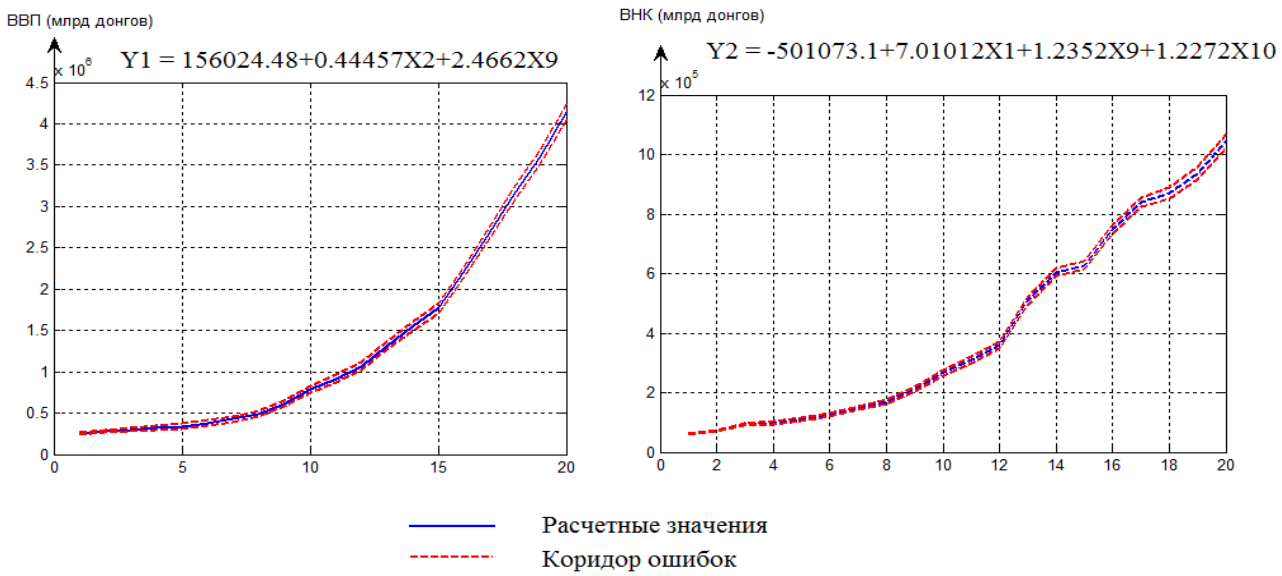

Рисунок 4.5 – Расчетные значения ВВП и ВНК

После изучения стабильности коэффициентов модели дает вывод, что все коэффициенты модели имитационной аппроксимации являются стабильными.

Для оценки точности многооткликовой модели использовался аналог ошибки аппроксимации:

$$\overline{A}_m = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{sum\,|\,y_i - \hat{y}_i\,|}{sum(y_i)}.100\%.$$

Для оценки качества всей модели использовался аналог коэффициента детерминации вида

$$R_m{}^2 = 1 - \frac{\sum trE_i{}^T \omega_i E_i}{\sum tr(E_i{}^0)^T \omega_i E_i{}^0},$$

где tr – след матрицы;

$E_i = \hat{y}_i - y_i$;

$E_i{}^0 = \hat{y}_i - \bar{y}$.

В таблице 4.11 показаны значения критерия проверки адекватности для многооткликовых моделей.

Таблица 4.11 – Проверка адекватности многооткликовых моделей

Модель	Ошибка аппроксимация	Коэффициент детерминации
Модель 4.11	5,2	0,99
Модель 4.12	5,0	0,99

Вывод: многооткликовая модель с учетом веса имеет ошибку аппроксимации меньше, чем многооткликовая модель без учета веса.

Этап 5. Прогнозирование развития экономических процессов.

Перейдем к вопросу экономического прогнозирования на основе многооткликовой модели имитационной аппроксимации. Предположим, что модель является достаточно точной и адекватной [1, 12, 29, 32]. При применении данной модели предполагается также, что взаимосвязи между переменными, существовавшие ранее, сохраняются и на период упреждения.

Чтобы прогнозировать отклики на T шагов, нужно знать прогнозные значения зависимых переменных (факторов), входящих в модель. Эти значения можно получить, применяя экстраполяционные методы, например, используя средние абсолютные приросты факторных признаков; также они могут быть вычислены благодаря методам экспертной оценки или непосредственно заданы исследователем экономических процессов. После ввода в модель прогнозных значений факторов получают значения прогноза изучаемого показателя.

На основании математической модели, указанной выше, можно прогнозировать значение ВВП, ВВК при заданных значениях факторов [50, 59].

При среднесрочном прогнозировании перечисленных показателей экономической системы предполагаются заданными:

а) отчетные значения факторов (x_1, x_2, x_3) и откликов (y_1, y_2), по реализации которых определяются численные коэффициенты функциональных зависимостей между ними;

б) прогнозные значения факторов, по которым с помощью найденных функциональных зависимостей дается прогноз откликов. При этом количество реализаций значений $\{x_i\}$ и $\{y_i\}$, т.е. продолжительность периода «обучения», должна быть значительно больше длительности собственно периода прогнозирования.

Как и в любой статистической модели, коэффициенты функциональной зависимости и, следовательно, значения прогнозных показателей могут быть получены в виде доверительных интервалов регрессии. Для линейной модели доверительный интервал рассчитывается следующим образом. Оценивается величина отклонения от линии регрессии (обозначим ее U):

$$U_p = t_\alpha S \sqrt{x_p^T (X^T X)^{-1} x_p}\,, \qquad (4.14)$$

где t_α – табличное значение t-критерия (Стьюдента) при заданной (обычно 95%-ной) доверительной вероятности;

$S = \sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-m-1}}$ – стандартная ошибка;

$x_p^T = (1, x_1, x_2, \ldots, x_m)$ – вектор прогнозных значений факторов с учетом их парного взаимодействия.

Из формулы 4.14 можно рассчитать значения откликов и их доверительных интервалов. На рисунке 4.6, а показаны отчетные и прогнозные значения факторов, а на рисунке 4.6, б показана динамика откликов, в которых «истинное» среднее значение каждого отклика лежит в обозначенных пределах.

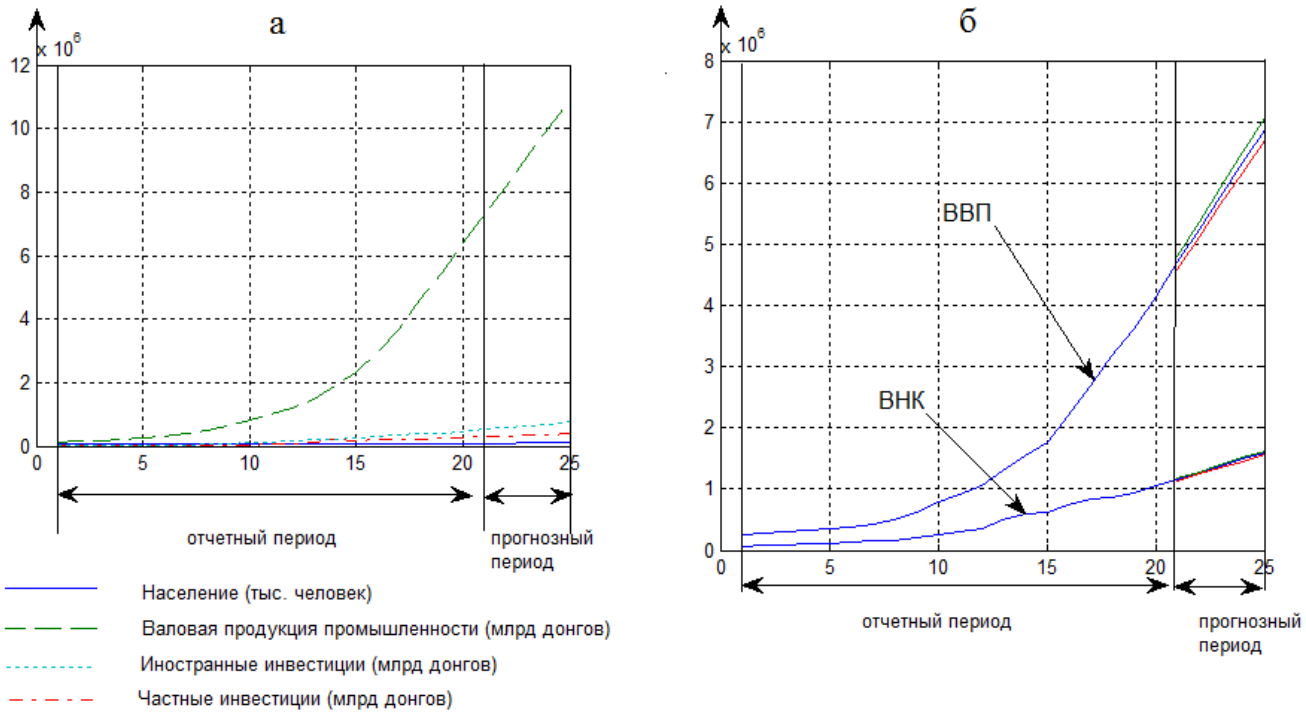

Рисунок 4.6 – Иллюстрация прогнозирования: а) динамика факторов; б) динамика откликов

4.3. Согласование моделей одноуровневых отраслевых систем с помощью статистических зависимостей

Всю совокупность социально-экономических систем можно представить в виде многоуровневой иерархической структуры. Обычно подразумевается три основных уровня иерархии социально-экономических систем.

Под первым уровнем понимается национальная экономика страны – сложная хозяйственная, социальная, организационная научно-технологическая система, каждый элемент которой находится во взаимосвязи и взаимозависимости с другими элементами. Национальная экономика является общей системой, включающей в себя остальные социально-экономические системы.

Вторым уровнем иерархии являются экономика регионов и комплекс отраслей хозяйства (например: промышленность, сельское хозяйство, транспорт и почтовые услуги, лесное хозяйство и т. д.).

Третьим уровнем иерархии является хозяйствующие субъекты, то есть юридические или физические лица, ведущие хозяйство от своего имени, экономические, хозяйственные операции.

Иерархия социально-экономических систем показана на рисунке 4.7

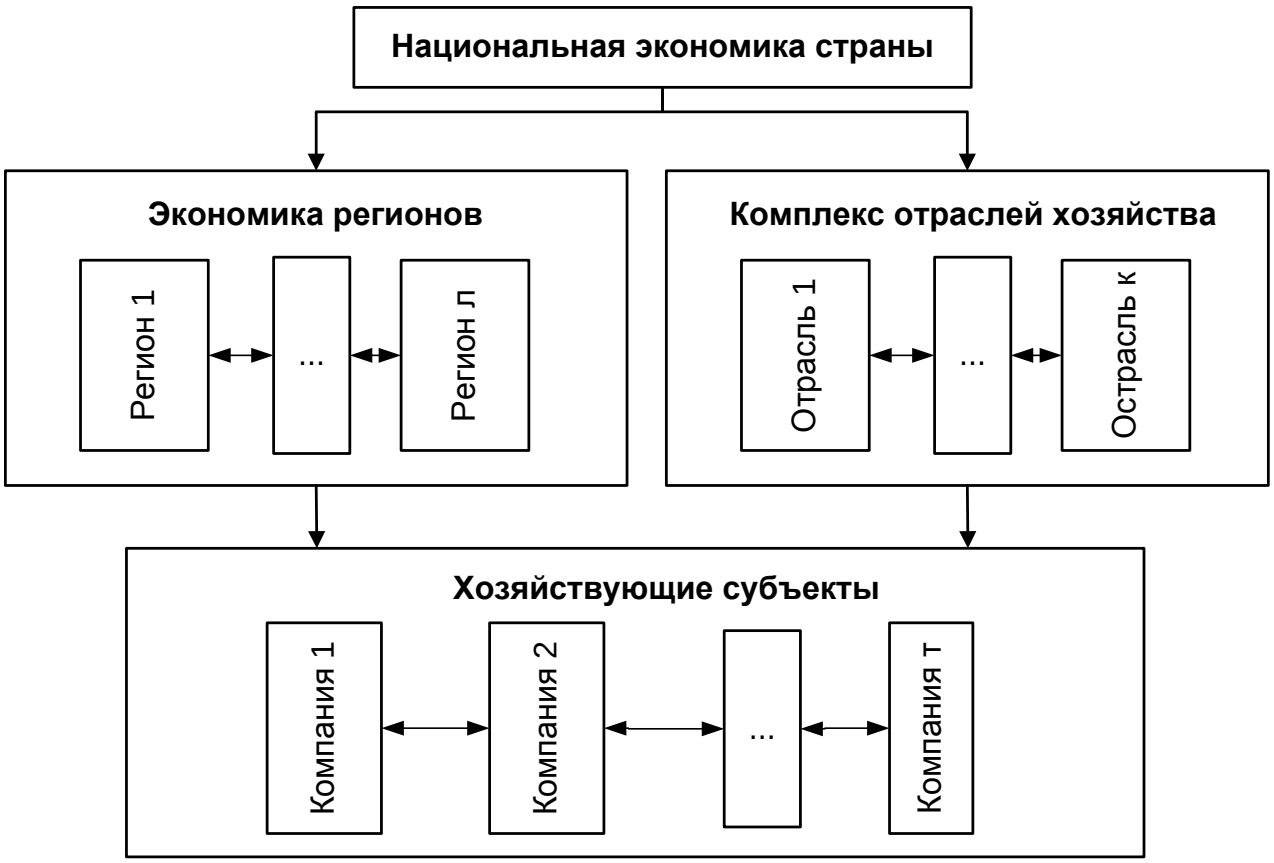

Рисунок 4.7 Иерархия социально-экономической системы

В иерархической структуре взаимодействуют между собой посредством совокупности горизонтальных и вертикальных связей, причем связи вертикали направлены от систем высших уровней иерархии к системам низших уровней, а горизонтальные связи осуществляются между системами одного уровня иерархии.

В данной работе поставлена задача согласования систем на одном уровне. Для этого существуют разные методы согласования. Предлагаемый подход позволяет, с использованием статистической зависимости, найти согласованное решение в условиях неполноты исходной информации.

Знание для каждой одноуровневой экономической системы статистических зависимостей между входными и выходными переменными (показателями) позволяет получить их согласованное решение без дополнительных расчетов оптимизационных математических моделей с учетом фактора неопределенности

исходной информации. Для проверки сходимости предложенного метода горизонтального согласования моделей был выполнен ряд экспериментальных расчетов. Схема взаимодействия экономических систем на одном иерархическом уровне путем непосредственного взаимодействия показана на рисунке 4.8.

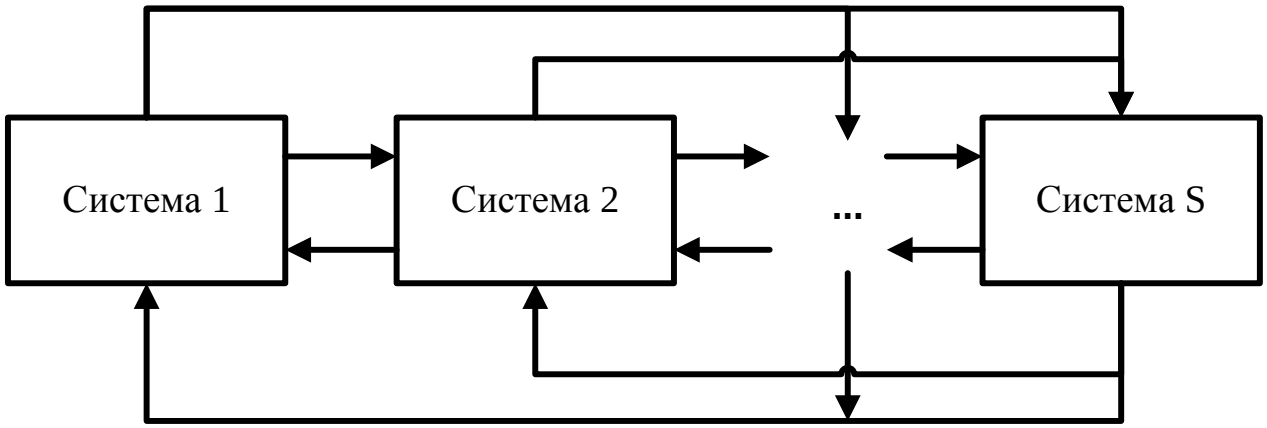

Рисунок 4.8 – Схема взаимодействия экономических систем на одном иерархическом уровне

Рассмотрим далее статистический подход к согласованной оптимизации моделей экономических систем одного иерархического уровня в условиях неполной информации и результаты их экспериментальной проверки на системе модели. Предположим, что имеется S систем, взаимодействующих на одном иерархическом уровне.

Согласование начинается с выявления для каждой из взаимодействующих систем зоны неопределенности ее оптимального развития. Знание таких зон позволяет получить для каждой системы две совокупности векторов:

а) совокупность входных обменных показателей:

$$\{U_S\}_{N_S} := \{U_S^{n_S} / U_S^{n_S} = (u_{s1}^{n_S},...,u_{sP_S}^{n_S}), \qquad n_s = 1,...,N_s\}; \tag{4.15}$$

б) совокупность выходных обменных показателей:

$$\{V_S\}_{N_S} := \{V_S^{n_S} / V_S^{n_S} = (v_{s1}^{n_S},...,v_{sL_S}^{n_S}), \qquad n_s = 1,...,N_s\}, \tag{4.16}$$

где P_S, L_S – количество соответственно входных и выходных обменных показателей системы s.[45].

Полученных совокупностей входных и выходных обменных показателей оказывается достаточно для организации процесса согласования моделей систем в условиях неопределенности. Ниже рассматривается лишь одна из имеющихся схем взаимоувязки – статистическая [14].

Для получения таких зависимостей по каждой системе $s \in \{1, 2, \ldots, S\}$ наборы сочетаний входных (4.15) и выходных (4.16) показателей обрабатываются методами регрессионного анализа. Результаты обработки представляют собой системы L_s уравнений (в общем случае – нелинейных) с p_S неизвестными:

$$\begin{aligned}
&\upsilon_{s1} = f_{s1}(u_{s1}, u_{s2}, \ldots, u_{sPs});\\
&\upsilon_{s2} = f_{s2}(u_{s1}, u_{s2}, \ldots, u_{sPs});\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
&\upsilon_{sLs} = f_{sLs}(u_{s1}, u_{s2}, \ldots u_{sPs}).
\end{aligned} \qquad (4.17)$$

Построенные тем или иным способом зависимости содержат всю информацию, необходимую для согласования моделей рассматриваемых систем. Взаимоувязка моделей одноуровневых отраслевых систем в этом случае представляет собой:

1) решение системы уравнений следующего вида:

$$\begin{aligned}
&\upsilon_{11} - \theta^1_{11}u_{11} - \theta^1_{12}u_{12} - \ldots - \theta^1_{1P_1}u_{1P_1} = \theta^1_{10};\\
&\upsilon_{12} - \theta^1_{21}u_{11} - \theta^1_{22}u_{12} - \ldots - \theta^1_{2P_1}u_{1P_1} = \theta^1_{20};\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
&\upsilon_{1L_1} - \theta^1_{L_11}u_{11} - \theta^1_{L_12}u_{12} - \ldots - \theta^1_{L_1P_1}u_{1P_1} = \theta^1_{L_10};\\
&-\theta^2_{11}u_{21} - \theta^2_{12}u_{22} - \ldots - \theta^2_{1P_2}u_{2P_2} + \upsilon_{21} = \theta^2_{10};
\end{aligned} \qquad (4.18)$$

$$-\theta_{21}^2 u_{21} - \theta_{22}^2 u_{22} - \ldots - \theta_{2P_2}^2 u_{2P_2} + \upsilon_{22} = \theta_{20}^2;$$

……

$$-\theta_{L_2 1}^2 u_{21} - \theta_{L_2 2}^2 u_{22} - \ldots - \theta_{L_2 P_2}^2 u_{2P_2} + \upsilon_{2L_2} = \theta_{L_2 0}^2.$$

Система (4.18) описана лишь для двух систем, но без труда может быть распределена и на случай S систем. В основу здесь положена линейная зависимость между входными и выходными показателями вида

$$\upsilon_{sl} = \sum_{k=0}^{Ps} \theta_{lk}^s u_{sk}, \quad s = \overline{1,S}, \quad l = \overline{1,L_S}. \qquad (4.19)$$

2) определение ε – окрестности найденного решения (U, V), обусловленной погрешностью алгоритма построения зависимостей и погрешностью исходных данных (рисунок 4.9); такой окрестности соответствует область, выделенная жирными линиями.

После получения областей равновесия входных и выходных показателей каждая система доводит в соответствии с общей схемой процесс принятия решений в условиях неопределенностей до конца.

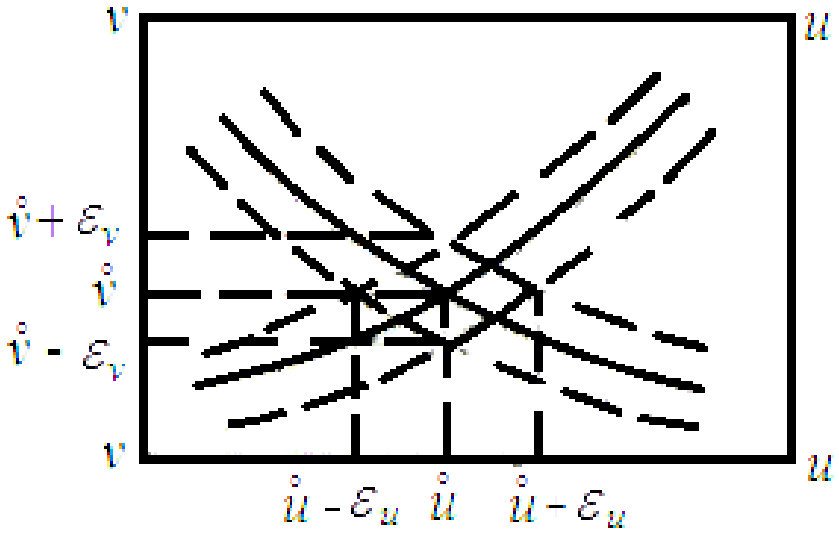

Рисунок 4.9 – Согласование обменных показателей с помощью статистических зависимостей

В процессе исследования реальных систем как единой модели были определены согласованные диапазоны изменения обменных показателей системы 1 и системы 2 (столбец 2, таблица 4.12), рассматриваемые в дальнейшем как эталон, а также соответствующий им дискретный набор входных и выходных обменных показателей, представляющих статистическую совокупность для построения статистических зависимостей.

На данной работе автор принимал метод согласования моделей одноуровневых отраслевых систем в определении согласованного диапазона двух систем отраслей экономической системы Вьетнама – «сельское хозяйство» и «транспорт и почтовые услуги». Принципиальная структура связей систем на одном иерархическом уровне показана на рисунке 4.10

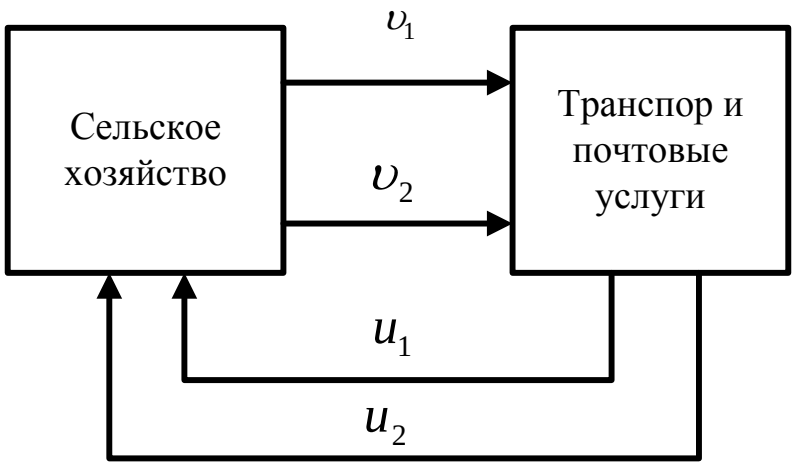

Рисунок 4.10 – Принципиальная структура связей систем «сельское хозяйство» и «транспорт и почтовые услуги» на одном иерархическом уровне

В качестве факторов выбраны следующие показатели:

v_1 – Количество ферм (штука),

v_2 – Валовая продукция сельского хозяйства (млрд донгов),

u_1 – Объем грузовых перевозок (тыс. тонн),

u_2 – Оборот транспорта и почтовых услуг (млрд донгов),.

Путем использования метода определения коэффициентов многооткликовых моделей (п. 2.2.5) были получены две системы линейных уравнений регрессионного типа:

$$\begin{aligned} v_1 &= 18895{,}4202 + 0{,}1764 \cdot u_1 - 0{,}1231 \cdot u_2, \\ v_2 &= 178400 - 1{,}142 \cdot u_1 + 17{,}85 \cdot u_2; \end{aligned} \qquad (4.20)$$

$$\begin{aligned} u_1 &= -69420 + 4{,}976 \cdot v_1 + 0{,}2194 \cdot v_2, \\ u_2 &= -15860 + 0{,}3497 \cdot v_1 + 0{,}06343 \cdot v_2; \end{aligned} \qquad (4.21)$$

и соответствующие характеристики разброса выходных обменных показателей (таблицу 4.12). В результате решения систем линейных уравнений

$$
\begin{aligned}
&-v_1 + 0{,}1764 \cdot u_1 - 0{,}1231 \cdot u_2 = -18895{,}4202,\\
&-v_2 - 1{,}142 \cdot u_1 + 17{,}85 \cdot u_2 = -178400,\\
&\text{———————————————————————}\\
&-u_1 + 4{,}976 \cdot v_1 + 0{,}2194 \cdot v_2 = 69420,\\
&-u_2 + 0{,}3497 \cdot v_1 + 0{,}06343 \cdot v_2 = 15860;
\end{aligned}
\qquad (4.22)
$$

удалось найти «точки равновесия» входных и выходных показателей моделей (столбец 3, таблица 4.12):

(v_1, v_2, u_1, u_2) = (1.02.10^5, 2.69.10^5, 4.99.10^5, 3.7.10^4)

Знание «точек равновесия» и показателей разброса выходных параметров вокруг их среднего значения позволяет в итоге найти согласованные диапазоны значений обменных показателей (столбец 5, таблица 4.12).

Таблица 4.12 – Результаты согласования моделей систем с помощью статистических зависимостей

Системы и обменные показатели	Исходные диапазоны значений обменных показателей	Согласованные значения обменных показателей	Показатели разброса выходных показателей (ε)	Согласованные диапазоны значений обменных показателей
1	2	3	4	5
Система 1				
Выходные показатели				
v_1	$0{,}57.10^5$-$1{,}71.10^5$	$1.02.10^5$	$\pm 0{,}36*10^5$	$0{,}66.\ 10^5$-$1{,}38.\ 10^5$
v_2	$1{,}29.10^5$-$6{,}87.10^5$	$2.69.10^5$	$\pm 1{,}82.10^5$	$1{,}29.\ 10^5$-$4{,}51.\ 10^5$
Входные показатели				
u_1	$2{,}24.10^5$-$8{,}86.10^4$	$4.99.10^5$	$\pm 2{,}2*10^5$	$2{,}79.10^5$-$7{,}19.10^5$
u_2	$1{,}1.10^4$-$8{,}31.10^4$	$3.7.10^4$	$\pm 2.38*10^4$	$1{,}32.10^4$-$6{,}18.10^4$
Система 2				
Выходные показатели				
u_1	$2{,}24.10^5$-$8{,}86.10^4$	$4.99.10^5$	$\pm 2{,}2*10^5$	$2{,}79.10^5$-$7{,}19.10^5$
u_2	$1{,}1.10^4$-$8{,}31.10^4$	$3.7.10^4$	$\pm 2.38*10^4$	$1{,}32.10^4$-$6{,}18.10^4$
Входные показатели				
v_1	$0{,}57.10^5$-$1{,}71.10^5$	$1.02.10^5$	$\pm 0{,}36*10^5$	$0{,}66.\ 10^5$-$1{,}38.\ 10^5$
v_2	$1{,}29.10^5$-$6{,}87.10^5$	$2.69.10^5$	$\pm 1{,}82.10^5$	$1{,}29.\ 10^5$-$4{,}51.\ 10^5$

Выводы по четвертой главе

В данной работе был применен статистический метод имитационной аппроксимации на примере реальной экономической системы.

Автором построена модель для решения задач анализа и прогнозирования макроэкономических показателей Вьетнама. Предложенная модель была верифицирована на базе статистических данных факторов развития экономической системы Вьетнама за период с 1995 по 2014 гг.

Использованы способы проверки адекватности для оценки качества полученной модели. На основании математической модели можно прогнозировать значение ВВП и ВНК при заданных значениях факторов.

Предложен подход к согласованию моделей одноуровневых отраслевых систем с помощью статистических зависимостей. На базе системы уравнений были найдены значения «точек равновесия» и показателей разброса вокруг их «среднего» значения, которые и определяют в итоге согласованные диапазоны значений обменных показателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты выполненного исследования в рамках диссертации состоят в следующем:

1) разработана схема реализации статистического метода имитационной аппроксимации, этапы которого, в отличие от известных подходов, рассмотрены с учетом многооткликовости;

2) предложена многооткликовая математическая модель имитационной аппроксимации экономической системы;

3) разработан метод определения коэффициентов многооткликовой математической модели имитационной аппроксимации экономической системы по результатам статистической отчетности; на основе предложенного метода и модели построены прогнозные характеристики развития экономической системы;

4) предложены способы проверки адекватности многооткликовой математической модели имитационной аппроксимации экономической системы;

5) предложен алгоритм согласования моделей одноуровневых отраслевых систем с помощью статистических зависимостей; на базе системы уравнений было найден их согласованное решение;

6) разработан оригинальный программный комплекс для многооткликового моделирования экономической системы. Программный комплекс создан в среде MATLAB.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ЭС экономическая система

СМИА статистический метод имитационной аппроксимации

ЭВМ электронная вычислительная машина

ВВП валовой внутренний продукт

ВНК валовое накопление капитала

ВПП валовая продукция промышленности

ОДЗ область допустимых значений

НЛНО наилучшие линейные несмещенные оценки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов / Т. Андерсон. – М.: Мир, 1976. – 760 с.

2. Афифи А. Статистический анализ: подход с использованием ЭВМ: пер.с англ. / А. Афифи, С. Эйзен. – М.: Мир, 1982. – 488 с.

3. Бадриев И. Б. Разработка графического пользовательского интерфейса в среде MATLAB: учеб. пособие / И. Б. Бадриев, В.В. Бандеров, О. А. Задворнов. – Казань: Казанский государственный университет, 2010. – 113 с.

4. Бард И. Нелинейное оценивание параметров / пер. с англ. В. С. Дуженко и Е. С. Фоминой. Под ред. и с предисл. В. Г. Горского. – М. : Статистика. 1979. – 349 с.

5. Бахвалов Н.И. Численные методы / Н.И. Бахвалов. – М.: Наука, 1982. – 650 с.

6. Бережная Е.В. Математические методы моделирования экономических систем: учеб. пособие / Е.В. Бережная, В.И. Бережной. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 368 с.

7. Блауберг И.В. Становление и сущность системного подхода / И.В. Блауберг, Э.Г. Юдин. – М.: Наука, 1973. – 257 с.

8. Блекуэлл Д. Теория игр и статистических решений / Д. Блекуэлл, М.А. Гиршик. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1958. – 374 с.

9. Бусленко В.Н. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем / В.Н. Бусленко. – М.: Наука, 1977. – 239 с.

10. Вьетнамский статистический ежегодник [Электронный ресурс]. – 1995–2014. – URL: http://www.gso.gov.vn/.

11. Демиденко Е. З. Линейная и нелинейная регрессии / Е. З. Демиденко. – М. : Финансы и статистика. 1981. – 304 с.

12. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ: в 2 кн. / Н. Дрейпер, Г. Смит; пер. с англ. Ю.П. Адлера, В.Г. Горского. – 2 е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика. – Кн. 1. – 1986. – 366 с.; Кн. 2. – 1987. – 351 с.

13. Елохин В.Р. Анализ, планирование и прогнозирование в условиях рынка (основные методы и модели и ряд их содержательных приложений) / В.Р. Елохин. – Апатиты: Изд-во Кольского науч. центра РАН, 2004. – 236 с.

14. Елохин В.Р. Аппроксимация моделей энергетических систем. Планирование и анализ регрессионных экспериментов / В.Р. Елохин, Б.Г. Санеев. – Новосибирск: Наука, 1985. – 150 с.

15. Елохин В.Р. Биогаз как альтернатива энергосбережения / В.Р. Елохин // Энергообеспечение Мурманской области. – Апатиты, 1992. – С. 43–62.

16. Елохин В.Р. Имитационные методы при анализе и планировании экспериментов (регрессионный анализ) / В.Р. Елохин. – Апатиты: Изд-во Кольского науч. центра РАН, 2003. – 135 с.

17. Елохин В.Р. Имитационный метод статистической аппроксимации / В.Р. Елохин, И.В. Елохин. – Апатиты: Изд-во Кольского науч. центра РАН, 2001. – 120 с.

18. Емельянов А.А. Имитационное моделирование экономических процессов: учеб. пособие / А.А. Емельянов, Е.А. Власова, Р.В. Дума; под ред. А.А. Емельянова. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 365 с.

19. Ерохина Е.А. Теория экономического развития: системно-синергетический подход. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1999. – 160 с.

20. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию решений / Л. Заде. – М.: Мир, 1980. – 120 с.

21. Зедгинидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И.Г. Зедгинидзе. – М.: Наука, 1976. – 390 с.

22. Эфрон Б. Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа / пер. с англ. Ю. П. Адлера, Ю. А Кошевника. – М. : Финансы и статистка. 1988. – 263 с.

23. Иерархия моделей для управления развитием энергетики и методы согласования их решений / А.А. Макаров [и др.]. – Иркутск: Изд-во СЭИ СО АН СССР, 1984. – 198 с.

24. Имитационное моделирование экономических систем / под ред. К.А. Багриновского. – М.: Наука, 1978. – 221 с.

25. Имитационные модели в экономике / А.А. Бакаев [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1978. – 304 с.

26. Интрилигатор М. Математические методы оптимизации и экономическая теория / М. Интрилигатор; пер. с англ. Г.И. Жуковой, Ф.Я. Кельмана. – М.: Айрис-Пресс, 2002. – 576 с.

27. Клейнен Дж. Статистические методы в имитационном моделировании / Дж. Клейнен. – М.: Статистика, 1978. – Вып. 1. – 222 с.; Вып. 2. – 228 с.

28. Кобелев Н.Б. Основы имитационного моделирования сложных экономических систем: учеб. пособие / Н.Б. Кобелев. – М.: Дело, 2003. – 336 с.

29. Колемаев В.А. Эконометрика: учеб. пособие / В.А. Колемаев. – М.: ИНФРА-М, 2005. – 160 с.

30. Корнаи И. Планирование на двух уровнях / И. Корнаи, Т. Липтак // Применение математики в экономических исследованиях. – М., 1965. –Т. 3. – С. 107–196.

31. Ланкастер П. Теория матриц / П. Ланкастер. – М.: Наука, 1978. – 280 с.

32. Лизер С. Эконометрические методы и задачи / С. Лизер. – М.: Статистика, 1971. – 141 с.

33. Лоули Д. Факторный анализ как статистический метод / Д. Лоули, А. Максвелл. – М.: Мир, 1966. – 144 с.

34. Льюс Р.Д. Игры и решения / Р.Д. Льюс, Х. Райфа. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. – 642 с.

35. Мазырин В. М. Экономическая модернизация во Вьетнаме от индустриализации к инновационному этапу / В. М. Мазырин // Идеология, история, культура, политика, экономика отдельных стран. – 2011. – С. 240–265.

36. Макаров А.А. Исследование зоны неопределенности оптимального развития сложных экономических систем / А.А. Макаров, А.С. Макарова, А.Н. Зейлигер // Экономика и математические методы. – 1970. – Т. 6, вып. 6. – С. 850–863.

37. Макаров А.А. Оптимизация отраслевых систем в условиях неопределенности / А.А. Макаров, А.С. Макарова, Б.Г. Санеев // Планирование отраслевых систем (методы и модели оптимизации) / под ред. А.Г. Аганбегяна, Л.А. Козлова, Д.М. Казакевича. – М., 1974. – С. 238–265.

38. Макаров А.А. Учет фактора неопределенности при оптимизации многоуровневых систем / А.А. Макаров, Б.Г. Санеев // Многоуровневые системы отраслевой оптимизации. – Новосибирск, 1975. – С. 44–51.

39. Маленво Э. Статистические методы эконометрики / Э. Маленво; пер. с фр. А. И. Гладышевского. – М.: Статистика, 1976. – 370 с.

40. Малолеткин Т.Н. Об алгоритмах выбора наилучшего подмножества признаков в регрессионном анализе / Т.Н. Малолеткин, Н.Н. Мельников, В.М. Ханин // Вопросы кибернетики. Теоретические проблемы планирования эксперимента (отсеивающие эксперименты). – 1977. – Вып. 35. – С. 110–144.

41. Малютов М.Б. О рандомизированном планировании в одной модели отсеивающих экспериментов / М.Б. Малютов // Планирование оптимальных экспериментов. – 1975. – Вып. 48. – С. 181–185.

42. Маркова Е.В. Планирование эксперимента в условиях неоднородностей / Е.В. Маркова, А.Н. Лисенков. – М.: Наука, 1973. – 220 с.

43. Месарович М. Общая теория систем: математические основы / М. Месарович, И. Такахара. – М.: Мир, 1978. – 312 с.

44. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. – М.: Мир, 1973. – 344 с.

45. Методы и модели согласования иерархических решений / под ред. А.А. Макарова. – Новосибирск: Наука, 1979. – 239 с.

46. Мешалкин Л.Д. К обоснованию метода случайного баланса / Л.Д. Мешалкин // Заводская лаборатория. – 1970. – Т. 36, № 3. – С. 316–318.

47. Налимов В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В.В. Налимов, М.А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 340 с.

48. Начало работы с Matlab [Электронный ресурс] / пер. с англ. В.В. Конюшенко. – 74 с.– URL: http://www.exponenta.ru/.

49. Нгуен Ван Дык. Имитационное моделирование экономических процессов во Вьетнаме / Г.Е. Дыкусов, В.Р. Елохин, Нгуен Ван Дык // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – №3. – С. 171–176.

50. Нгуен Ван Дык. Математическая модель и программная система для прогнозирования макроэкономических показателей во Вьетнаме / Г.Е. Дыкусов, В.Р. Елохин, Нгуен Ван Дык // Вестник ИрГТУ. – 2015. – №3 (98). – С. 12–17.

51. Нгуен Ван Дык. Методы построения систем многооткликовых аппроксимирующих моделей / Г.Е. Дыкусов, В.Р. Елохин, Нгуен Ван Дык // Вестник ИрГТУ. – 2014. – №6 (89). – С. 208–210.

52. Нгуен Ван Дык. Многооткликовая математическая модель экономических систем / Г.Е. Дыкусов, В.Р. Елохин, Нгуен Ван Дык // Вестник ИрГТУ. – 2014. – №8 (91). – С.170–174.

53. Нгуен Ван Дык. Многооткликовое моделирование при прогнозировании экономических систем / Нгуен Ван Дык // Известия ИГЭА [Электронный ресурс]. – 2015. – Т.6, №1. – URL: http://izvestia.isea.ru/.

54. Нгуен Ван Дык. Моделирование экономических систем в случае одновременного измерения нескольких выходных величин / Нгуен Ван Дык, В.Р. Елохин // Информационные и математические технологии в науке и управлении: тр. XX Байкальской Всерос. конф. (Иркутск, 30 июня – 7 июля 2015 г.). – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2015. – Т. 1. – С. 57–64.

55. Нгуен Ван Дык. О методе определения математической модели экономических процессов во Вьетнаме / Нгуен Ван Дык // Винеровские чтения : мат-лы Всерос. молодежной науч.-практ. конф. (Иркутск, 3-5 апреля 2014 г.). – Иркутск: ИрГТУ, 2014. – С.48.

56. Нгуен Ван Дык. Об одной математической модели экономической системы во Вьетнаме / Нгуен Ван Дык // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов Российских вузов : тр. VII Всерос. науч.-практ. конф. (Томск, 24–27 апреля 2014 г.). – Томск: ТПУ, 2014. – Т.3 – С. 446–452.

57. Нгуен Ван Дык. Оценка параметров многооткликовых аппроксимирующих моделей / В.Р. Елохин, Нгуен Ван Дык // Тезис на Ляпуновские чтения: (Иркутск, 1–3 декабря 2014 г.). ИДСТУ СО РАН, 2014. – С. 29.

58. Нгуен Ван Дык. Построение многооткликовых моделей экономических систем / Нгуен Ван Дык // Винеровские чтения : мат-лы Всерос. молодежной науч.-практ. конф. (Иркутск, 16–17 апреля 2015 г.). – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2015. – С.50.

59. Нгуен Ван Дык. Прогнозирование развития экономических процессов во Вьетнаме / В.Р. Елохин, Нгуен Ван Дык // Финансовая система РФ: проблемы и тенденции развития в период глобализации и интеграции мирового сообщества:

мат-лы IV регион. науч.-практ. конф. (Иркутск, 17 декабря 2014 г.). – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. – С.175–178.

60. Нгуен Ван Дык. Программа для многооткликового моделирования и прогнозирования экономических систем / Г.Е. Дыкусов, В.Р. Елохин, Нгуен Ван Дык // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015616208 от 03 июля 2015 г. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2015.

61. Нгуен Ван Дык. Программа для построения системы многооткликовых аппроксимирующих моделей / Г.Е. Дыкусов, В.Р. Елохин, Нгуен Ван Дык // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617485 от 23 июля 2014 г. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2014.

62. Нгуен Ван Минь. Вьетнамская экономическая реформа: достижения и проблемы / Нгуен Ван Минь // Проблемы теории и практики управления. – 2002. – № 5. – С. 27–32.

63. Нгуен Ки Тхань. Управление процессом производства в условиях переходного периода к рыночной экономике: на прим. Вьетнама: дис. … канд. экон. наук / Нгуен Ки Тхань. – М., 1998. – 196 с.

64. Нгуен Нгок Тхать. Интернационализация хозяйственных связей экономической системы социалистической ориентации: на примере Вьетнама: дис. … д-ра экон. наук / Нгуен Нгок Тхать . – М., 2004. – 359 с.

65. Нейлор Т. Машинные имитационные эксперименты с моделями экономических систем / Т. Нейлор. – М.: Мир, 1975. – 500 с.

66. Нейман Дж. Теория игр и экономическое поведение / Дж. Нейман, О. Моргенштерн. – М.: Наука, 1970. – 510 с.

67. Поспелов Г.С. Программно-целевое планирование и управление / Г.С. Поспелов, В.А. Ириков. – М.: Сов. радио, 1976. – 440 с.

68. Прицкер А. Введение в имитационное моделирование и язык СЛАМ II: пер с англ. / А. Прицкер. – М.: Мир, 1987. – 646 с.

69. Рао С.Р. Линейные статистические методы и их применения / С. Р. Рао. – М.: Наука, 1968. – 548 с.

70. Советов Б.Я. Моделирование систем: учеб. для вузов / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.

71. Таха Хемди А. Введение, в исследование операций / Хемди А. Таха. – 7-е изд. – М.: Вильямс, 2005. – 801 с.

72. Успенский А.Б. Вычислительные аспекты метода наименьших квадратов при анализе и планировании регрессионных экспериментов / А.Б. Успенский, В.В. Федоров. – М.: Изд-во МГУ, 1975. – 168 с.

73. Федоров В.В. Активные регрессионные эксперименты / В.В. Федоров // Математические методы планирования эксперимента. – Новосибирск, 1981. – С. 19–73.

74. Федоров В.В. Оценивание параметров регрессии в случае вектор-наблюдения / В.В. Федоров // Регрессионные эксперименты (планирование и анализ). – М., 1977. – С. 112–122.

75. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента / В.В. Федоров. – М.: Наука, 1971. – 312 с.

76. Форрестер Дж. Мировая динамика / Дж. Форрестер. – М.: Наука, 1978. – 167 с.

77. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1976. – 600 с.

78. Чан Конг Хьен. Индустриализация в СРВ: прошлое, современный опыт и перспектива: автореф. дис. … канд. экон. наук / Чан Конг Хьен. – М., 2000. – 26 с.

79. Чу Хао. Отчет макроэкономики 2014 / Чу Хао // Экономическая комиссия парламента Вьетнама – 2014. – 262с.

80. Шеннон Р. Имитационное моделирование – искусство и наука / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 420 с.

81. Эконометрика: учебник / И.И. Елисеева [и др.]. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 576 с.

82. Экономико-математические методы и прикладные модели: учеб. пособие / В.В. Федосеев [и др.]. – М.: ЮНИТИ, 1999. – 391 с.

83. Bayesian Model Averaging: A Tutorial / J.A. Hoeting, D. Madigan, A.E. Raftery, C.T. Volinsky // Statistical Science. – 1999. – Vol. 14, No 4. – P. 382–417.

84. Bhat H.S. On the derivation of the Bayesian Information Criterion / H.S. Bhat, N. Kumar // School of Natural Sciences [Электронный ресурс]. – 2010. – URL: http://nscs00.ucmerced.edu/.

85. Brown P. J. Bayes model averaging with selection of regressors / P. J. Brown, M. Vannucci, T. Fearn // Journal of the Royal Statistical Society. – 2002. – Part 3. – P. 519–536.

86. Box G.E.P. The Bayesian estimation of common parameters from several responses / G.E.P. Box, N.R. Draper // Biometrica. – 1965. – Vol. 52, № 2. – P. 355–363.

87. Đỗ Hoài Nam. Mô hình công nghiệp hóa (Модель индустриализации) / Đỗ Hoài Nam // Viện kinh tế Việt Nam (Экономическая академия Вьетнама) – 2010. – 375с.

88. Efroymson M.A. Multiple regression analysis / M.A. Efroymson // Mathematical methods for digital computers / A. Ralston (eds). – New York, 1970. – P. 137–140.

89. Forsythe G.E. Computer methods for mathematical computations / G.E. Forsythe, M.A. Malcolm, C.B. Moler. – New York: Prentise Hall, Inc. Englewood Cliffs, 1977. – 280 p.

90. Gilmour S.G. The interpretation of Mallows's Cp-statistic / S.G. Gilmour // Journal of the Royal Statistical Society. – 1996. – P. 49–56.

91. Hill P.D.H. A review of experimental design procedures for regression model discrimination / P.D.H. Hill // Technometrics. – 1978. – Vol. 20. – P. 15–21.

92. Hocking R.R. Criteria for selection of a subset regression: which one should be used? / R.R. Hocking // Technometrics. – 1972. – Vol. 14. – P. 967–970.

93. Hocking R.R. The analysis and selection of variables in linear regression / R.R. Hocking // Biometrica. – 1976. – Vol. 32, № 2. – P. 1–49.

94. Kass R.E. A reference Bayesian test for nested hypotheses and its relationship to the Schwarz criterion / R.E. Kass, L. Wasserman // Journal of the American Statistical Association. – 1995. – Vol. 90, № 431. – P. 928–934.

95. Li C.H. A sequential method for screening experimental variables / C.H. Li // Journal of the American Statistical Association. – 1962. – Vol. 57, № 298. – P. 455–477.

96. Mackae E.C. Matrix derivatives with an application to an adaptive decision problem / E.C. Mackae // The Annals of Statistics. – 1974. – Vol. 4, № 2. – P. 337–346.

97. Mallows C.L. Some Comments on CP / C.L. Mallows // Technometrics 15. – 1973. – Vol. 15, № 4. – P. 661–675.

98. Ngô Thắng lợi. Bàn về chủ đề “Đến năm 2020 Việt Nam về cơ bản trở thành nước công nghiệp” (Анализ задачи «Вьетнам будет промышленной страной в 2020») / Ngô Thắng Lợi, Nguyễn Quỳnh Hoa // Kinh tế & phát triển (Экономика и прогресс) – 2014. – №. 201. – P. 13–21.

99. Pope P.T. The use of F-statistics in step wise regression procedure / P.T. Pope, T.T. Webster // Technometrics. – 1972. – V. 14, № 2. – P. 327–341.

100. Raftery A.E. Bayesian Model Selection in Social Research /A.E. Raftery // Sociological Methodology. – 1995. – Vol. 25. – P. 111–163.

101. Rao C.R. Similtaneous estimation of parameters in different linear models and applications to biometrics problem / C.R. Rao // Biometrica. – 1975. – Vol. 31, № 2. – P. 545–554.

102. Satterfhwaite F.E. Random balance experimentation / F.E. Satterfhwaite // Technometrics. – 1959. – Vol. 1, №2. – P. 111–138.

103. Thompson M.L. Selection of variables in multiple regression. Part 1. A revive and evalution / M.L. Thompson // International statistical review. – 1978. – Vol. 46.– P. 1–19.

104. Thompson M.L. Selection of variables in multiple regression. Part 2. Chosen procedures, computations and examples / M.L. Thompson // International statistical review. – 1978. – Vol. 46. – P. 129–146.

105. Tô Trung Thành. Đầu tư công "lấn át" đầu tư tư nhân (Ущемление государственных инвестиций частными инвестициями) / Tô Trung Thành // Trung tâm nghiên cứu kinh tế (Центр исследования экономики) – 2012. – 16c.

ПРИЛОЖЕНИЕ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014617485

Программа для построения системы многооткликовых аппроксимирующих моделей

Правообладатель: ***федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Иркутский государственный технический университет» (RU)***

Авторы: ***Дыкусов Геннадий Ефимович (RU), Елохин Владислав Романович (RU), Нгуен Ван Дык (RU)***

Заявка № **2014615178**
Дата поступления **30 мая 2014 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***23 июля 2014 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015616208

Программа для многооткликового моделирования и прогнозирования экономических систем

Правообладатель: ***федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (RU)***

Авторы: ***Дыкусов Геннадий Ефимович (RU), Елохин Владислав Романович (RU), Нгуен Ван Дык (RU)***

Заявка № **2015612787**
Дата поступления **09 апреля 2015 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***03 июня 2015 г.***

Врио руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор

ФГБОУ ВО ИрНИТУ

_____ Н. П. Коновалов

"15" 04 2015

АКТ

об использовании программы, разработанной аспирантом

Иркутского Национального исследовательского технического университета

Нгуен Ван Дык

Настоящим подтверждается, что «Программа для построения системы многооткликовых аппроксимирующих моделей» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014617485), разработанная аспирантом Нгуен Ван Дык, внедрен в учебный процесс и использовался на кафедре Экономической теории и финансов в учебном курсе «Математические модели в экономике», а также при подготовке дипломных работ.

Программа позволяет построить математической модели экономических систем с выдачей результатов в графическом и текстовом виде. Она имеет простой и интуитивно понятный интерфейс, поэтому полезна для студентов, не имеющих опыта использования компьютеров. Главное окно программы отображает набор задач, которые можно решать с ее помощью. Полученные результаты отображаются с помощью графиков, что значительно облегчает восприятие материала и помогает студентам в понимании самого алгоритма.

Зав. кафедрой «Экономической теории и финансов», к.э.н., Г. Е. Дыкусов

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор

ФГБОУ ВО ИрНИТУ

_____ Н. П. Коновалов

"15" 04 2015

АКТ

об использовании программы, разработанной аспирантом

Иркутского Национального исследовательского технического университета

Нгуен Ван Дык

Настоящим подтверждается, что «Программа для многооткликового моделирования и прогнозирования экономических систем» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015616208), разработанная аспирантом Нгуен Ван Дык, внедрен в учебный процесс и использовался на кафедре экономической теории и финансов в учебном курсе «Эконометрика», а также при подготовке дипломных работ и магистерских диссертаций.

Использование созданной Нгуен Ван Дык программы для ЭВМ «Программа для многооткликового моделирования и прогнозирования экономических систем» позволяет решать различные задачи по моделированию и прогнозированию экономических систем в случае одновременного измерения нескольких выходных величин. Она имеет простой и интуитивно понятный интерфейс.

Зав. кафедрой «Экономической теории и финансов» к.э.н., Г. Е. Дыкусов