

3. ТЕХНОЛОГИИ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

3.1. Моделирование как инструмент поддержки принятия решений: сравнительный анализ методов

3.1.1. Общий алгоритм принятия решений в условиях многофакторности

Описание базовой ситуации принятия решений

Рассматривается следующая ситуация, типичная для ситуации стратегического планирования и управления.

Имеется некоторый агрегированный показатель (индекс), характеризующий уровень развития социально-экономической системы (например, страны) и используемый для оценки результативности государственного управления. Такие показатели, как правило, представляют собой сформированную по определенным правилам свертку частных показателей, отражающих развитие наиболее важных сфер жизни общества. Частные показатели зависят от достаточно широкого набора факторов, отражающих внешние (экзогенные) и внутренние (эндогенные факторы) условия функционирования социальной системы.

Задачей государственного управления является такое влияние на эти факторы, которое позволило бы в условиях ограниченности имеющихся в распоряжении государства ресурсов обеспечить оптимальный результат и добиться максимального (в имеющихся условиях) значения агрегированного показателя (АП)*. По существу, речь идет об оптимальном управлении, которое является стандартной задачей, хорошо исследованной и широко используемой в различных областях технических наук.

* В качестве такого агрегированного показателя может быть использован, например, «коэффициент жизнеспособности» (КЖС) [Национальная... 2009], являющийся мультипликативной сверткой показателей, которые в агрегированном виде отражают, насколько успешно и эффективно государство может наращивать людской, территориальный и управленческий потенциал. В соответствии с [Там же] компоненты «коэффициента жизнеспособности» характеризуют территорию, народонаселение и государственное управление.

Решение данной задачи включает в себя следующие этапы:

- 1) формулирование задачи оптимального управления;
- 2) определение состава факторов, влияющих на функционирование сложной системы;
- 3) формирование набора ключевых показателей, характеризующих функционирование сложной системы;
- 4) формирование целевой функции, характеризующей требуемое качество функционирования;
- 5) определение параметров управления, с помощью которых можно влиять на изменение факторов;
- 6) создание эвристической модели функционирования сложной системы, позволяющей количественно оценивать влияние факторов на значение целевой функции для различных стратегий управления;
- 7) определение критерия оптимальности;
- 8) решение задачи оптимизации, в результате которой определяются оптимальные (рациональные) стратегии управления сложной системой, позволяющие добиться наилучших результатов с использованием принятого критерия оптимальности и с учетом ограниченности имеющихся ресурсов.

В этом классе задач возникают подклассы, в частности управление при единой функции цели и при наличии нескольких явных функций цели, соотношение между которыми также является фактором государственного управления. Например, соотношения ценности человеческой жизни, стоимости ресурсов, экологических требований и т. п. в условиях мирного и военного времени могут существенным образом видоизменяться.

Использование известных методов оптимального управления применительно к задачам управления государством сталкивается с большим количеством трудностей, к основным из которых относятся следующие (соответственно для указанных выше этапов):

- A1) отсутствие политического понимания, что надо оптимизировать, для чего проводится оптимизация;
- A2) многофакторность задачи, тесная взаимосвязь факторов различной природы (экономических, политических, социальных, технологических, идеологических и т. п.), сложность их сопоставления и выделения наиболее значимых;

А3) сложность описания факторов конкретными количественными показателями в силу слабой формализуемости большинства факторов, их обобщающего характера;

А4) сложность формирования целевой функции, имеющей объективный характер;

А5) сложность априорной оценки результативности различных мер государственного управления, их влияние на изменение факторов;

А6) сложность логико-математического описания функционирования социальных систем, отражающего многообразие связей между факторами и учитывающего влияние управляющих воздействий;

А7) формальная и содержательная сложность определения критерия оптимальности. Содержательная сложность обусловлена высокой степенью идеологизированности оценки различными политическими силами целей развития государств. Формальная сложность обусловлена трудностью количественного описания критерия оптимальности при наличии большого числа факторов, имеющих качественный характер;

А8) сложность формального применения методов решения задачи оптимизации в условиях множества неопределенностей и качественных показателей.

Кроме указанных трудностей имеется ряд усложняющих обстоятельств:

– отсутствие статистических данных по отдельным факторам, низкая точность данных по ряду параметров;

– нелинейный характер социально-экономических процессов, сложный характер связей между факторами, что затрудняет количественное описание их взаимовлияния;

– возможность (в силу объективного наличия нелинейностей и неоднозначностей) различных трактовок причинно-следственных связей в наблюдаемых социальных явлениях, что создает почву для идеологизации их объяснений, сознательного и неадекватного упрощения в угоду политическим интересам.

Формализованная постановка задачи

В формализованном виде задача оптимального управления может быть представлена следующим образом.

Успешность государства характеризуется агрегированным показателем (например, КЖС [Национальная... 2009]), отражающим состояние наиболее важных характеристик его функционирования (имеющих свои макропоказатели Φ_i), на которые влияет значительное количество частных экзогенных и эндогенных факторов (описываемых показателями φ_{ij}). Целевая функция в задаче оптимизации – это выражение агрегированного показателя в виде функции управляющих воздействий. Соответственно целью управления является максимизация агрегированного показателя (целевой функции) при имеющихся ограничениях.

Будем считать, что КЖС может быть представлен в виде функции (свертки) указанных выше макропоказателей Φ_i :

$$КЖС = f(\Phi_i). \quad (1)$$

В свою очередь макропоказатели Φ_i являются функциями частных показателей φ_{ij} , характеризующих факторы, входящие в «дерево факторов»:

$$\Phi_i = \Phi_i(\varphi_{ij}). \quad (2)$$

На частные факторы государство может оказывать воздействие, осуществляя государственную политику. Если s_k – параметры государственного влияния, то:

$$\varphi_{ij} = \varphi_{ij}(s_k). \quad (3)$$

Таким образом,

$$КЖС = f(\Phi_i) = f(\Phi_i(\varphi_{ij})) = f(\Phi_i(\varphi_{ij}(s_k))) = F(s_k), \quad (4)$$

то есть КЖС есть функция управляющих воздействий s_k .

Считается, что управляющие воздействия подчиняются определенным ограничениям (нормативно-правовым, бюджетным, международно-договорным и т. п.), что может быть выражено как $s_k \subset S$, где S – область допустимых управляющих воздействий.

Тогда задача оптимизации может быть сформулирована таким образом:

– требуется найти множество управляющих воздействий (программных мероприятий) s_k для того, чтобы достигалась максимизация КЖС:

$$s_k = \arg \max КЖС = \arg \max F(s_k) \quad (5)$$

при ограничении: $s_k \subset S$. (6)

Способы решения задачи

Алгоритм решения задачи включает в себя построение «поверхности успешности» $F(s_k)$ в многомерном пространстве управляющих воздействий s_k и нахождение таких значений s_k , при которых величина КЖС была бы максимальной с учетом имеющихся ограничений. При такой формулировке задачи основной проблемой является построение «поверхности успешности» $F(s_k)$ на основе зависимостей (1)–(4) в условиях имеющихся неопределенностей и сложностей формализации связей между факторами.

Для построения «поверхности успешности» могут использоваться методы:

- статистические;
- логико-статистические;
- математическое моделирование;
- комбинация указанных методов.

Рассмотрение данных методов приведено ниже.

3.1.2. Методы построения «поверхности успешности»

Статистические методы построения «поверхности успешности»

Данные методы используются в случае, если, с одной стороны, отсутствует достоверная информация о виде зависимостей (1)–(4), но, с другой стороны, имеются достаточно представительные временные ряды параметров, характеризующих факторы, влияющие на КЖС. По существу, речь идет о модели типа «черный ящик», когда известны «входы» (ряды значений факторов φ_{ij}) и «выходы» (ряды значений КЖС), но неизвестны функциональные связи между «входами» и «выходами». В этом случае можно постараться выявить данные связи, используя богатый арсенал методов математической статистики: корреляционный, регрессионный, кластерный, факторный анализ и т. п. Эти методы позволяют найти уравнение, наилучшим образом описывающее связь между целевым показателем («выходом») и независимыми переменными («входом») на основании имеющихся рядов статистических данных. Обычно в первом приближении уравнение ищут в виде линейной комбинации независимых переменных (уравнение регрессии):

$$КЖС = F(s_k) = a_1s_1 + a_2s_2 + \dots + a_ms_m, \quad k = 1 \dots m, \quad (7)$$

однако можно добавлять и члены более высоких порядков, но тогда необходимо привлечение дополнительных (априорных) соображе-

ний о виде нелинейных членов (при этом следует помнить, что стремление к чрезмерной детализации этого описания из-за случайной ошибки делает невозможным обобщение результатов исследованной выборки на генеральную совокупность).

Использование статистических методов сталкивается с рядом проблем, к которым, в частности, относятся следующие:

а) статистические методы хорошо работают, когда размерность сложной системы относительно небольшая. В нашем случае размерность социальной системы высока;

б) как уже отмечалось, наличие нелинейных связей между факторами (что является типичным для социальных систем), с одной стороны, усложняет проведение статистического анализа, а с другой – требует привлечения дополнительных (априорных) соображений о конкретном виде нелинейных членов. По существу, речь идет о выходе за рамки чисто статистического анализа путем использования содержательного анализа и логических методов (об этом речь пойдет ниже);

в) для определения значений коэффициентов в уравнении регрессии (7) используется метод наименьших квадратов (МНК). При этом, как правило, данная процедура весьма чувствительна к изменению исходных данных (особенно при наличии нелинейных связей между факторами): даже небольшая коррекция исходных данных может привести к существенному изменению коэффициентов в уравнении регрессии, а следовательно, и к изменению «поверхности успешности»;

г) как показывает анализ, в социальных системах многие параметры одного уровня в иерархическом «дереве факторов» являются коррелированными, то есть возникает явление мультиколлинеарности. В этом случае обычно рекомендуется проводить факторный анализ и уменьшать размерность факторного пространства, переходя к меньшему количеству так называемых «латентных» факторов. Однако при этом анализ социальной системы теряет свою наглядность и интерпретируемость;

д) использование статистических методов дает хороший результат, когда связи между факторами неизменны во времени. В социальных системах если это и случается, то для достаточно ограниченных временных интервалов. Более типичными являются периоды социально-экономических трансформаций, в ходе кото-

рых может измениться не только вид связей, но даже их состав и структура. Также типичной ситуацией является то, что комплексные показатели верхних уровней иерархии (включая КЖС) могут зависеть не только от текущих значений факторов, но и от их значений в прошлые моменты времени (то есть от пройденной в фазовом пространстве траектории), что сложно учесть средствами статистического анализа;

д) следует также учитывать, что количество доступных статистических данных ограничивает число факторов, которые можно включить в одно уравнение «поверхности успешности». Так, если имеется N эмпирических точек, то максимально возможное число коэффициентов, которые можно определить в уравнении поверхности, также равно N (реально статистически достоверное число коэффициентов будет меньше из-за неизбежного наличия «шумов» и погрешностей данных).

Данные проблемы могут быть частично решены с помощью логико-статистических методов.

Логико-статистические методы построения «поверхности успешности»

Логико-статистические методы позволяют расширить возможности статистического анализа за счет привлечения дополнительной информации, получаемой в процессе изучения особенностей функционирования социальной системы. В результате появляется возможность:

а) выявления наиболее важных связей в системе и исключения из рассмотрения малозначимых;

б) предварительной оценки характера и вида связей между факторами, что облегчает их математическое описание;

в) учета иерархии связей в «дереве факторов», что позволяет лучше отобразить структуру системы;

г) оценки параметров слабоформализуемых факторов (например, на основе использования экспертных процедур).

При использовании логико-статистических методов система представляется уже не в виде «черного ящика», а в виде структуры, которую можно описать когнитивной схемой, отражающей логику взаимосвязей между факторами. Алгоритм построения «поверхности успешности» в этом случае следующий:

- 1) выделение наиболее значимых факторов, определяющих функционирование социальной системы;
- 2) оценка характера и интенсивности связей между факторами;
- 3) формирование когнитивной схемы рассматриваемой социальной системы;
- 4) формализованное описание когнитивной схемы в виде системы соотношений, отражающей структуру взаимосвязей между факторами;
- 5) использование полученных соотношений для построения «поверхности успешности».

Существует несколько подходов к использованию когнитивных схем для исследования динамики социальных систем, анализ этих подходов и ограничений их использования проведен ниже.

Построение «поверхности успешности» с использованием математического моделирования

При наличии достаточной информации о связях между факторами возможно построение отдельных зависимостей (1)–(3) на основе математического моделирования процессов, протекающих в социально-экономической системе. В настоящее время существует большое количество разнообразных моделей, описывающих различные аспекты социально-экономической динамики, однако для того чтобы они могли быть использованы при построении «поверхности успешности», необходимо проделать достаточно большую работу.

Дело в том, что модели всегда создаются для решения конкретной задачи. Невозможно создать универсальную модель, описывающую все стороны жизни общества, которую можно было бы использовать для всех ситуаций. Модель – это всегда система упрощений и ограничений, которые диктуются спецификой решаемой задачи. Применительно к проблеме построения «поверхности успешности» задача математического моделирования зависимостей (1)–(3) рассмотрена ниже.

Комплексный подход к построению «поверхности успешности»

Методическая сложность решения рассматриваемой задачи делает целесообразным использование всего арсенала изложенных выше методов для построения «поверхности успешности», при этом каждый метод должен использоваться для описания тех областей

«факторного дерева», для которых его применение дает наибольший эффект и позволяет достичь наилучшего (по отношению к другим методам) результата.

В тех случаях, когда имеются обширные и достоверные эмпирические данные, а связи между факторами достаточно прозрачны, хороший результат дают статистические методы.

В случаях, когда связи между факторами имеют принципиально нелинейный характер, определяемый логикой социально-экономических процессов, необходимо использовать модельные представления о характере взаимодействий и применять методы математического моделирования.

В тех случаях, когда связи между факторами и соответствующие показатели имеют сложноформализуемый качественный характер, целесообразно использовать экспертные процедуры, основанные на когнитивном моделировании.

3.1.3. Расчетная модель для сравнения методов построения «поверхности успешности»

Обработка, анализ особенностей, возможностей и ограничений практического использования изложенных выше методов построения «поверхности успешности» проводились на модельной задаче путем вычислительного эксперимента.

Суть вычислительного эксперимента заключалась в следующем.

Пусть имеется некоторая динамическая система, допускающая как социальные, так и физические интерпретации. На эволюцию системы можно влиять с помощью управляющих воздействий s_k , которые изменяют значения частных факторов $\varphi_{ij}(s_k)$, влияющих, в свою очередь, на изменение макропараметров системы $\Phi_i(\varphi_{ij})$. Мультипликативная свертка макропараметров Φ_i является агрегированной характеристикой развития системы и выступает аналогом ее КЖС.

Имеется некий Исследователь, который анализирует поведение системы в прошлые периоды и на основе имеющихся у него рядов статистических данных о величинах Φ_i , φ_{ij} , s_k в прошлом пытается:

- создать модель системы;
- построить «поверхности успешности» системы на основе этой модели;
- определить управляющие воздействия s_k , с помощью которых можно достичь максимизации КЖС системы в будущем.

Предполагается, что эволюция системы подчиняется строгим законам, но Исследователь этих законов не знает. На основе данных законов можно рассчитать истинную эволюцию системы в будущем и сравнить ее с модельными представлениями Исследователя. На основе этого сравнения можно оценить степень адекватности используемых Исследователем методов решения задачи оптимизации.

Описание динамической системы

Пусть система имеет три макропараметра – V , P , T , динамика которых описывается следующим образом:

$$V = W_v + \gamma_v \cdot P \cdot T + V_0 \quad (8)$$

$$\frac{dP}{dt} = \gamma_P \cdot \left(\frac{\rho \cdot N \cdot T}{V_0} - P \right) \quad (9)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\Delta N}{N} \cdot \left(\frac{E}{C} - T \right) - \frac{T - T_0}{\tau_T}, \quad (10)$$

где $\Delta N, E, W_v$ – частные факторы, влияющие на макропараметры.

При этом $N = \int_{t_0}^{t'} \Delta N dt$.

На величину частных факторов влияют управляющие воздействия s_E, s_N, s_V . Это влияние имеет следующий вид:

$$\Delta N = \sigma_N \cdot s_N \cdot Y^{0.5}, \quad (11)$$

$$E = \sigma_E \cdot s_E \cdot Y^{0.5}, \quad (12)$$

$$W_v = \delta \cdot (s_V Y^{0.5})^\alpha. \quad (13)$$

При этом имеется ресурсное ограничение:

$$s_E + s_N + s_V = 1, \quad (14)$$

а функция Y в общем случае имеет вид:

$$Y = Y_0 (1 + \alpha \cdot t). \quad (15)$$

КЖС системы представляет собой свертку макропараметров вида:

$$F(t) = P^{\alpha_P} \cdot T^{\alpha_T} \cdot V^{\alpha_V}. \quad (16)$$

Данной системе можно дать следующую социальную интерпретацию. Система (8)–(10) описывает государство, имеющее территорию V . Величина макропоказателя T в агрегированном виде характеризует уровень экономического развития системы, выраженный в ВВП на единицу территории. Величина макропоказателя P в агрегированном виде характеризует эффективность использования имеющихся ресурсов. Величина фактора ΔN отражает скорость воспроизводства ресурсов (демография, инфраструктура, инвестиции и т. п.). Величина фактора E отражает качество воспроизводимых ресурсов (образование, наука, технологии и т. п.). Управляющий параметр s_N – доля бюджета государства, расходуемая на увеличение фактора T . Управляющий параметр s_E – доля бюджета государства, расходуемая на увеличение фактора E . Управляющий параметр s_V – доля бюджета государства, расходуемая на военные расходы (то есть на сохранение/увеличение макропоказателя V). Сумма s_E, s_N, s_V равна единице.

Конечно, данная социальная интерпретация имеет очень условный характер, а сама система используется лишь в иллюстративных целях для более наглядного представления результатов анализа (реальные системы-аналоги описываются существенно более сложными системами уравнений).

Источник исходных данных для анализа системы

Как уже отмечалось, Исследователь не знает реальных законов динамики системы (8)–(10), но может попытаться выявить имеющиеся закономерности, используя данные об эволюции системы в предшествующий временной период (t_0, t') , где t' – текущий момент времени, а t_0 – момент времени в прошлом, начиная с которого имеются статистические данные о параметрах системы.

Цель управления

Целью управления является выбор такого соотношения между управляющими параметрами s_E, s_N, s_V , при котором агрегированный показатель КЖС, определяемый по формуле (16), достигнет в момент времени t'' максимального значения.

Алгоритм выбора параметров управления

Исследователь на основе имеющихся данных о прошлой эволюции системы и выбранного им способа обработки данных строит рас-

четную модель системы. На основе полученной модели Исследователь делает прогнозные расчеты динамики системы на момент времени t'' для набора сценарных условий, определяемого различными сочетаниями значений управляющих параметров s_E, s_N, s_V при заданных на них ограничениях. По результатам расчета строится «поверхность успешности» на момент времени t'' . В качестве оптимального выбирается такой сценарий (и соответствующее ему соотношение управляющих параметров s_E, s_N, s_V), при котором достигается максимум КЖС.

Ниже представлены результаты построения «поверхности успешности» и выбора параметров управления на основе изложенного алгоритма в случае использования статистического и нескольких вариантов логико-статистического методов (метод, основанный на математическом моделировании, в данном случае не рассматривается, поскольку он в вычислительном эксперименте используется как эталонный для анализа возможностей и ограничений статистического и логико-статистического методов).

3.1.4. Сопоставление методов на основе вычислительного эксперимента

Исходными данными для вычислительного эксперимента являются следующие. Имеются временные ряды данных, описывающих динамику системы в предшествующий период времени, равный 50 единицам, то есть от $t_0=0$ до $t'=50$ (где t' – текущий момент). Данные приведены на рис. 3.1.

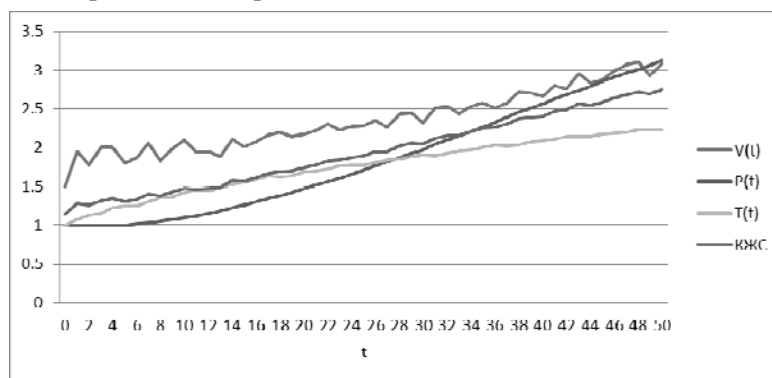


Рис. 3.1. Временные ряды, характеризующие динамику макропоказателей системы на интервале (t_0, t')

Эти данные получены путем расчета динамики системы по уравнениям (8)–(10) для следующих условий:

а) значения параметров:

$$\gamma_p = 0,5, \rho = 1,5, \sigma_N = 0,1, \sigma_E = 40, Y_0 = 1, \Delta t = 0,1,$$

$$\alpha = 0,5, w = 1, \gamma = 0,2, \delta = 1, \tau_T = 100, C = 1;$$

б) начальные значения переменных модели при $t_0 = 0$:

$$N(t_0) = 1, T_0 = 1, V_0 = 1,5;$$

в) фактическая динамика управляющих параметров, представленная на рис. 3.2;

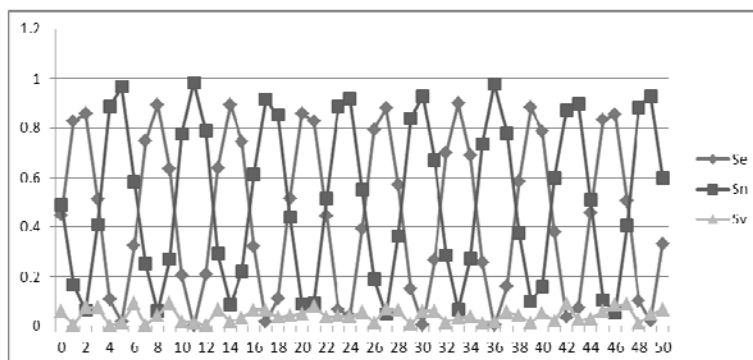


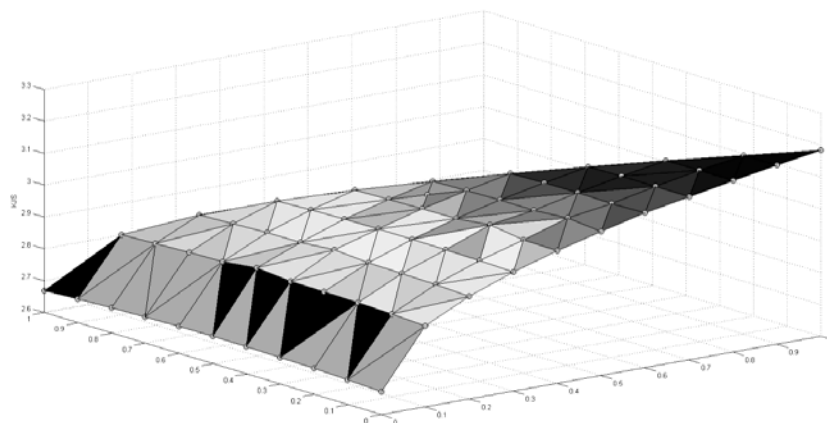
Рис. 3.2. Динамика управляющих параметров для периода времени (t_0, t')

г) функция КЖС, заданная уравнением (16), имеет параметры: $\alpha_p = 0,33, \alpha_T = 0,33, \alpha_V = 0,33$.

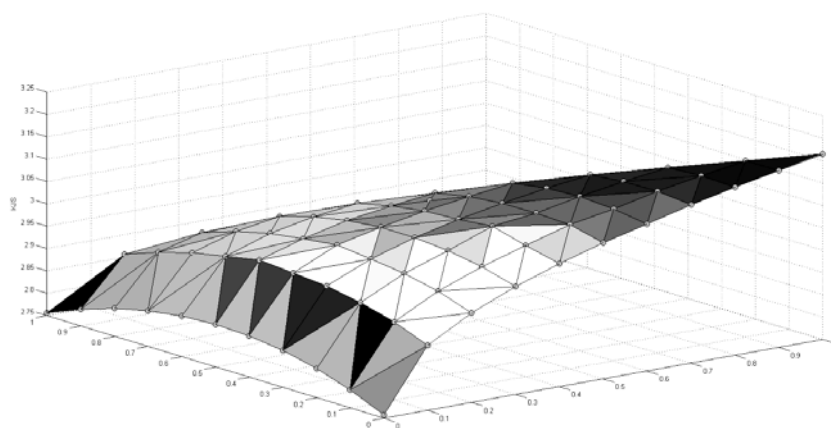
В ходе вычислительного эксперимента в соответствии с выбранным методом моделирования делается прогноз «поверхности успешности» на момент времени t'' в предположении, что в течение времени (t', t'') соотношение управляющих параметров не изменяется. При проведении эксперимента рассматривались значения t'' от 51 до 60.

Полученная «поверхность успешности» сравнивается с эталонной (истинной) «поверхностью успешности», рассчитанной на основе уравнений (8)–(10) при тех же соотношениях управляющих параметров. Эталонная «поверхность успешности» для разных значений t'' представлена на рис. 3.3 (ее размерность равна двум, по-

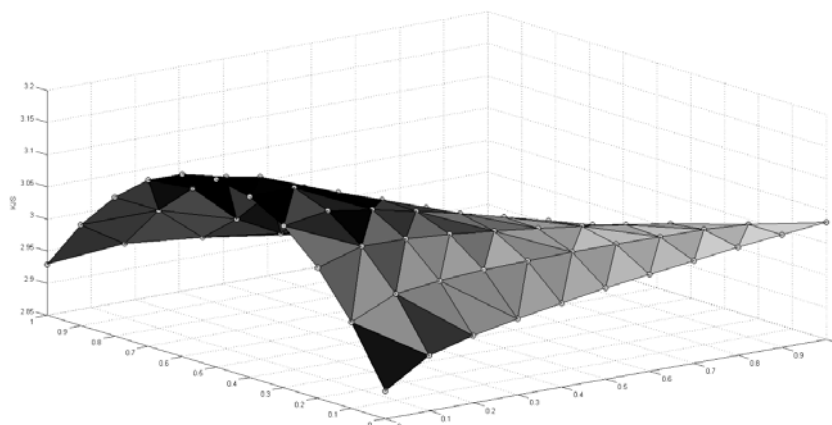
скольку управляющие параметры S_N , S_E и S_V связаны соотношением (14)).



а) Поверхность КЖС для 52 шага



б) Поверхность КЖС для 55 шага



в) Поверхность КЖС для 60 шага

Рис. 3.3. Эталонная двумерная «поверхность успешности» для разных моментов времени (показана зависимость КЖС от значений s_N и s_V)

3.1.4.1. Результаты расчетов при использовании статистического метода

Суть метода заключается в прямом определении зависимости КЖС от управляющих параметров на основе корреляционного анализа соответствующих временных рядов и использовании полученной зависимости для прогноза изменения КЖС в будущие периоды. Расчеты при использовании статистического метода проводятся в двух вариантах:

1) с использованием *линейной* множественной регрессии между темпами изменения КЖС и s_E , s_V : $\Delta\text{КЖС} = c_0 + c_1 \cdot s_E + c_2 \cdot s_V$;

2) с использованием *нелинейной* (квадратичной) множественной регрессии между темпами изменения КЖС и s_E , s_V :

$$\Delta\text{КЖС} = c_0 + c_1 \cdot s_E + c_2 \cdot s_V + c_3 \cdot s_E^2 + c_4 \cdot s_V^2 + c_5 \cdot s_E \cdot s_V.$$

Алгоритм расчетов следующий:

А) Определяются темпы изменения КЖС в период (t_0, t') (см. рис. 3.4).

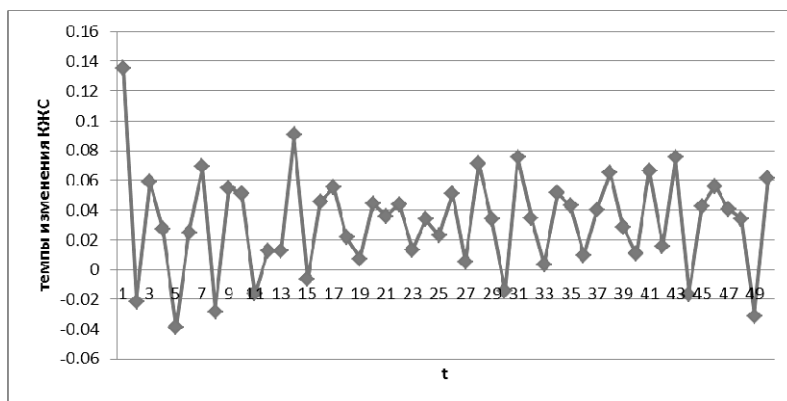
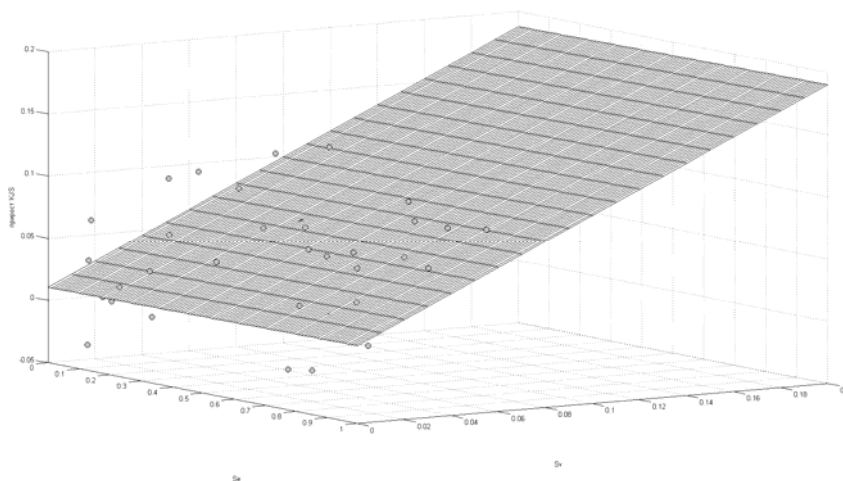


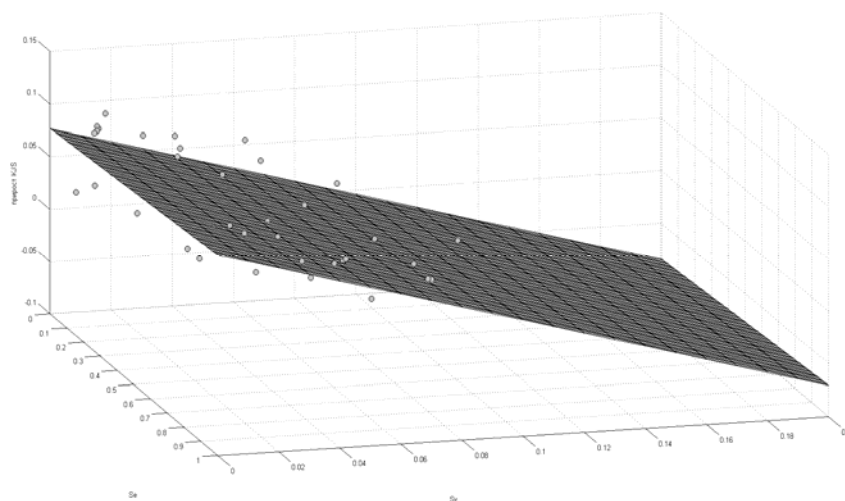
Рис. 3.4. Временной исторический ряд темпов изменения КЖС

Расчеты по варианту 1 (линейная регрессия)

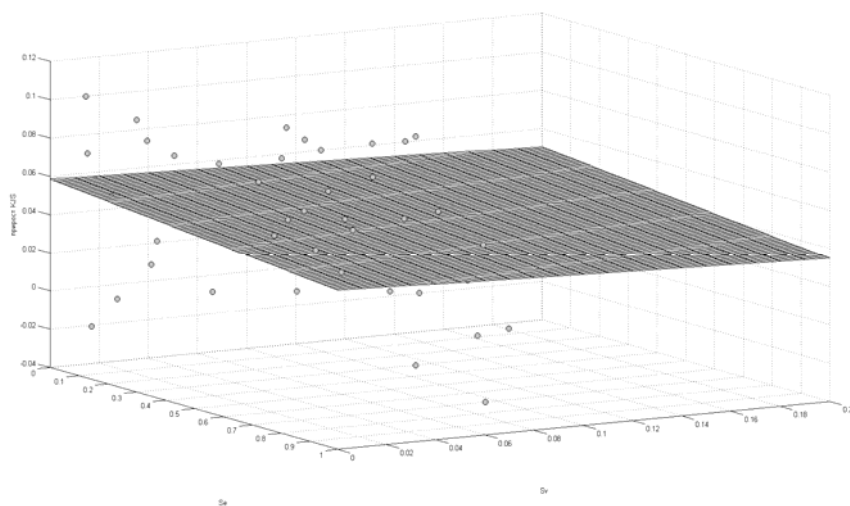
Б) На основе данных за период (t_0, t') определяется уравнение линейной множественной регрессии между темпами изменения КЖС и s_E, s_V для различных временных лагов (см. рис. 3.5).



а)



б)



в)

Рис. 3.5. Корреляционные диаграммы между темпами изменения КЖС и значениями s_E и s_V для различных временных лагов: а) лаг равен 0; б) лаг равен 1; в) лаг равен 2

Выбирается уравнение регрессии для значения лага, при котором невязка между полученной поверхностью и данными минимальна (в нашем случае это нулевой лаг).

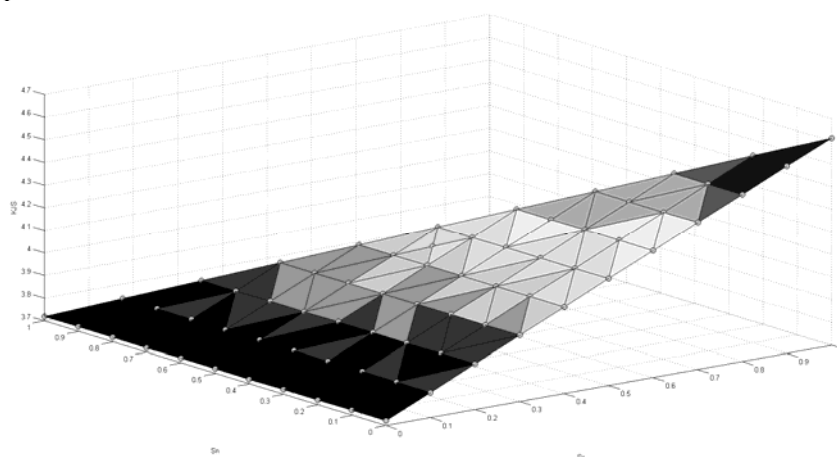
В) Полученная регрессионная связь между КЖС и управляющими параметрами используется для прогноза «поверхности успешности» в соответствии со следующим алгоритмом.

Сначала определяется «поверхность успешности» для 51 шага. Для этого по уравнению нелинейной регрессии определяется приращение КЖС на 51 шаге при различных значениях s_E . Полученные величины суммируются со значением КЖС на 50 шаге. Полученный числовой ряд представляет собой «поверхность успешности», то есть зависимость $КЖС(s_E)$ при $t'' = 51$.

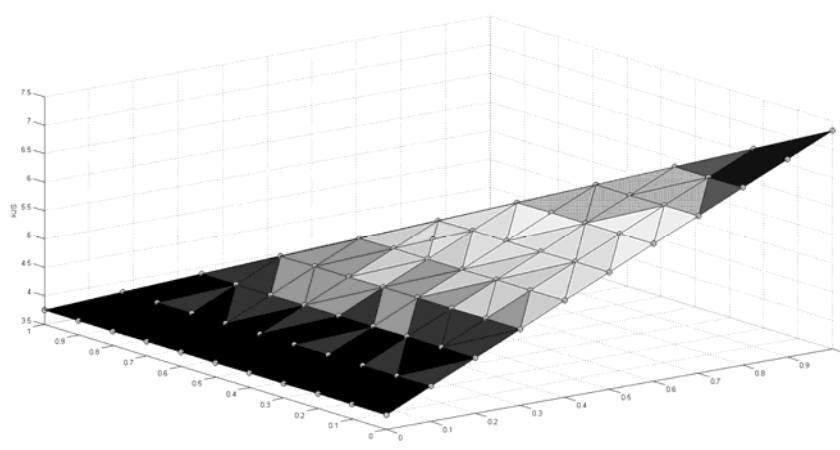
Для вычисления «поверхности успешности» на 52 шаге снова вычисляются приращения КЖС при различных значениях s_E , которые затем суммируются с соответствующими величинами $КЖС(s_E)$, вычисленными ранее для $t'' = 51$. Полученный числовой ряд представляет собой «поверхность успешности» для $t'' = 52$.

Для вычисления «поверхности успешности» на последующих шагах данная процедура повторяется соответствующее количество раз.

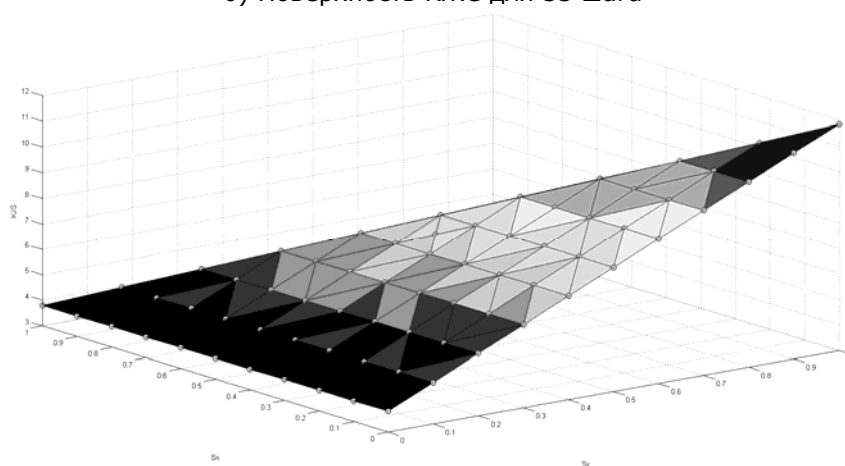
Результаты расчетов для трех значений t'' представлены на рис. 3.6.



а) Поверхность КЖС для 52 шага



б) Поверхность КЖС для 55 шага



в) Поверхность КЖС для 60 шага

Рис. 3.6. «Поверхность успешности» для разных моментов времени, полученная с использованием варианта 1 статистического метода (показана зависимость КЖС от значений S_N и S_V)

На основе полученной «поверхности успешности» определяется оптимальное значение управляющего параметра, при котором КЖС достигает максимальной величины (в нашем случае таким значени-

ем является $s_V=1$, $s_N=0$, $s_E=0$ для всех значений t'' от 51 и до 60 шага).

Г) Полученная «поверхность успешности» сравнивается с эталонной и определяется степень невязки для различных значений t'' (см. рис 3.7).

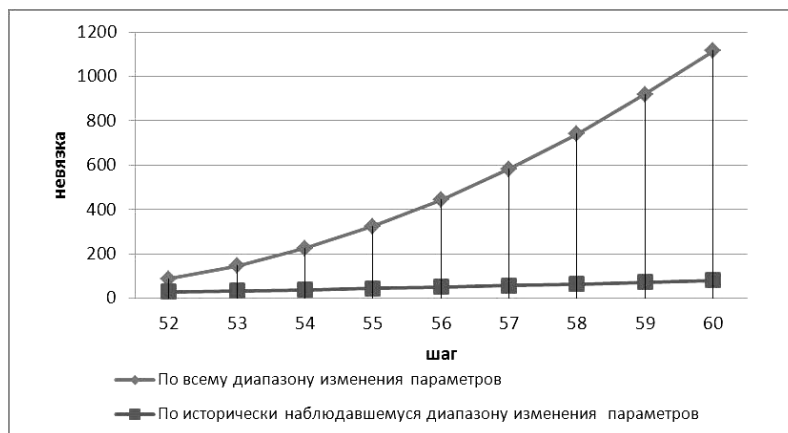


Рис. 3.7. Изменение невязки в зависимости от шага (для статистического метода)

Для этих же значений t'' сравниваются значения вычисленных оптимальных значений управляющих параметров и их истинных значений (см. рис. 3.8).

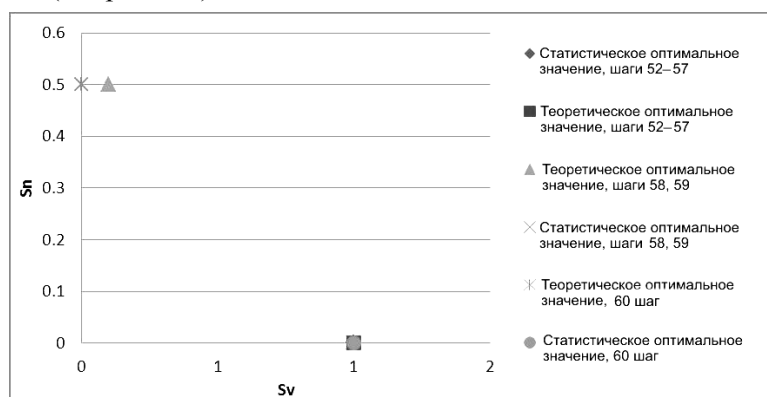
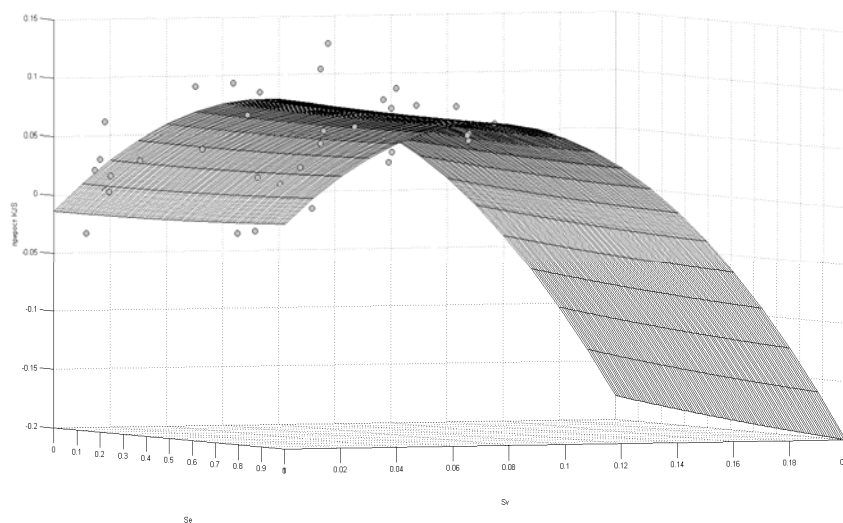


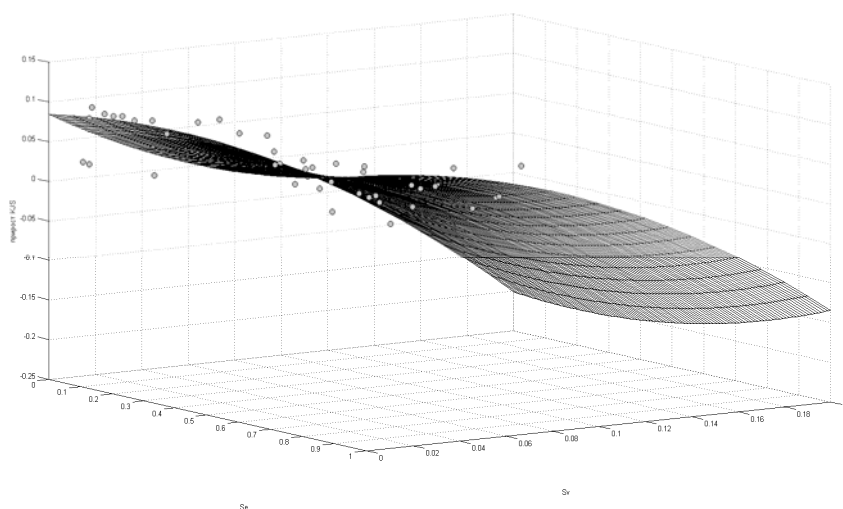
Рис. 3.8. Оптимальные значения параметров в зависимости от шага (для статистического метода)

Расчеты по варианту 2 (нелинейная регрессия)

Б) На основе данных за период (t_0, t') определяется уравнение нелинейной множественной регрессии между темпами изменения КЖС и s_E, s_V для различных временных лагов (см. рис. 3.9)



а)



б)

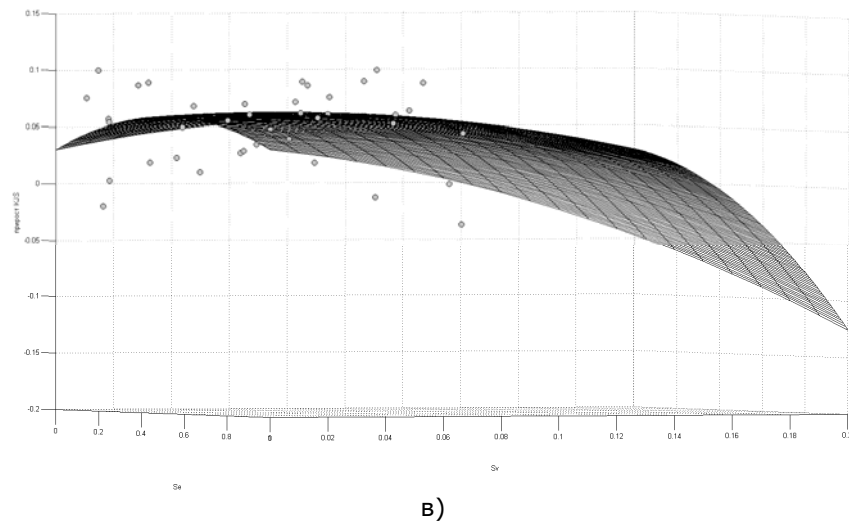
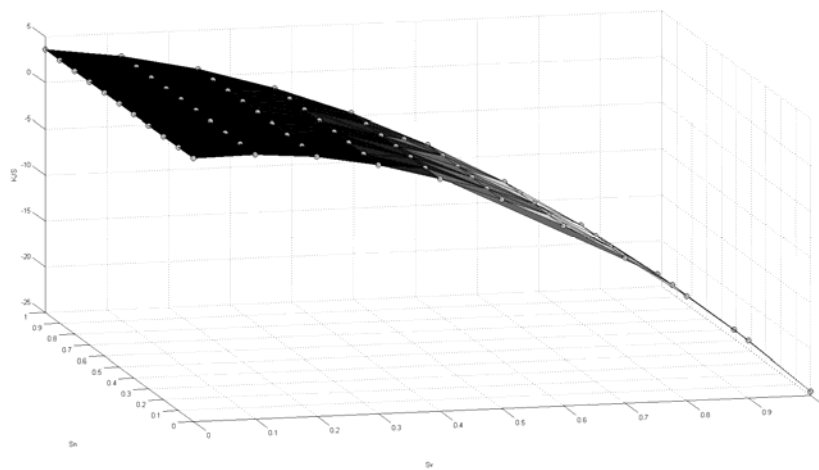


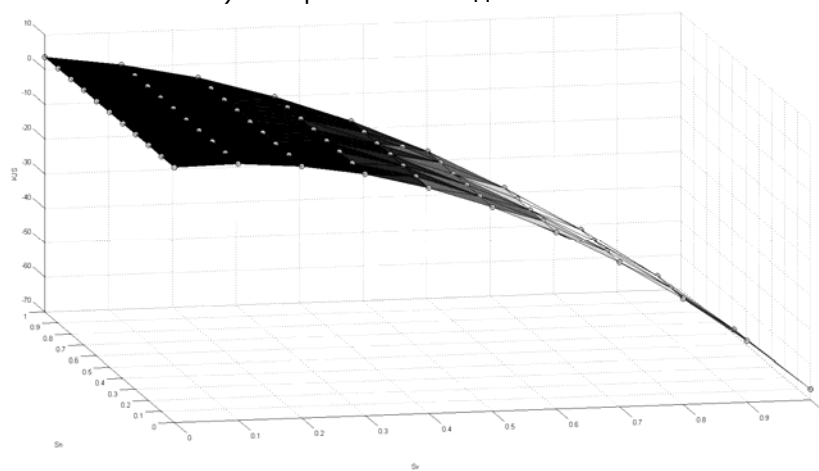
Рис. 3.9. Корреляционные диаграммы между темпами изменения КЖС и значениями s_E и s_V для различных временных лагов: а) лаг равен 0; б) лаг равен 1; в) лаг равен 2

Выбирается уравнение регрессии для значения лага, при котором невязка между полученной поверхностью и данными минимальна (в нашем случае это нулевой лаг).

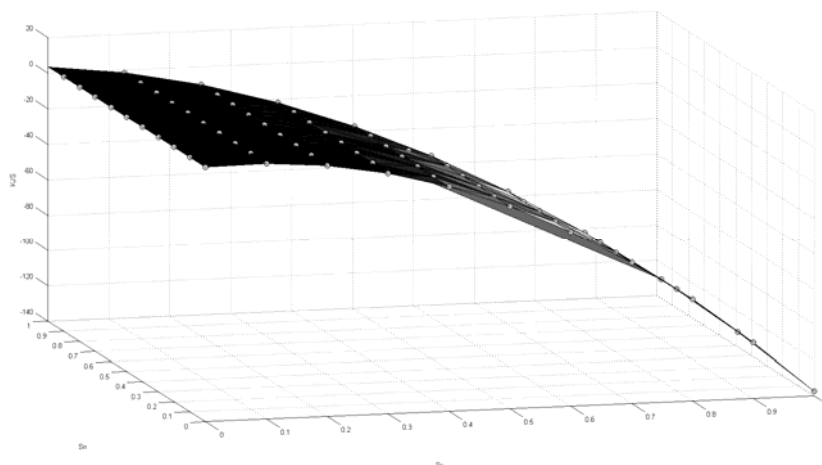
В) Полученная регрессионная связь между КЖС и управляющими параметрами в соответствии с алгоритмом, изложенным выше, используется для прогноза «поверхности успешности» при разных значениях t'' (см. рис. 3.10).



а) Поверхность КЖС для 52 шага



б) Поверхность КЖС для 55 шага



в) Поверхность КЖС для 60 шага

Рис. 3.10. «Поверхность успешности» для разных моментов времени, полученная с использованием варианта 2 статистического метода (показана зависимость КЖС от значений s_N и s_V)

Сравнивается полученная «поверхность успешности» с эталонной и определяется степень невязки для различных значений t'' (см. рис. 3.11).

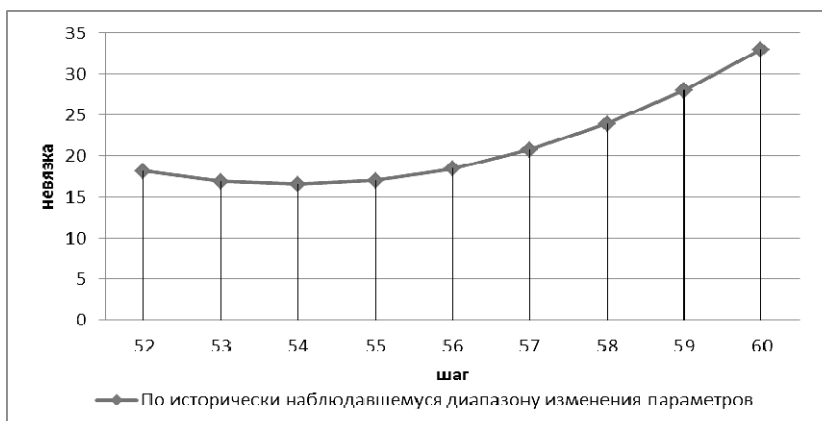


Рис. 3.11. Изменение невязки в зависимости от шага (для статистического нелинейного метода)

На рис. 3.11 приведена невязка только для исторически наблюдавшихся изменений параметров, так как невязка по всему диапазону не будет информативной (поверхность резко уходит в отрицательную область).

Для этих же значений t'' сравниваются значения вычисленных оптимальных значений управляющих параметров и их истинных значений (см. рис. 3.12).

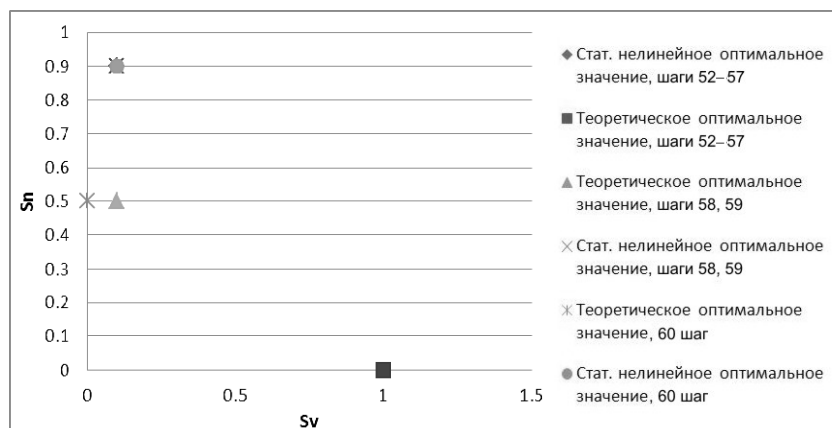


Рис. 3.12. Оптимальные значения параметров в зависимости от шага (для статистического нелинейного метода)

3.1.4.2. Результаты расчетов при использовании логико-статистического метода

Суть логико-статистического метода заключается в использовании *априорной информации* о системе при проведении анализа и прогноза ее динамики. Априорной информацией служат представления Исследователя о составе факторов и структуре связей между ними (наличие/отсутствие связей, их направленность и величина). При использовании логико-статистического метода анализируется влияние управляющих параметров на динамику переменных системы и уже потом на их основе вычисляется КЖС (при использовании статистического метода рассматривается лишь прямая корреляционная связь управляющих параметров с КЖС без анализа динамики переменных). Представления о структуре рассматриваемой динамической системы формализуются с помощью когнитивной схемы, пример которой приведен на рис. 3.13.

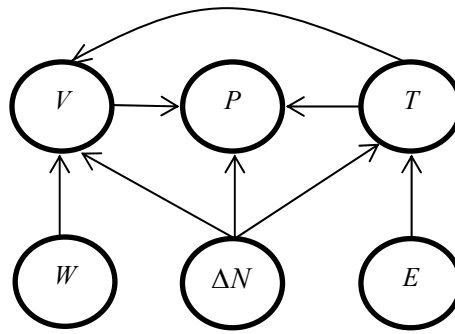


Рис. 3.13. Когнитивная схема динамической системы (8)–(10)

Рассмотрим версию логико-статистического метода, в котором описание связей в когнитивной модели рассматриваемой системы производится с учетом нелинейностей. Для определения величины связей между факторами используется множественная нелинейная регрессия со свободным членом, полученная в результате статистической обработки исторических рядов данных. В соответствии с когнитивной моделью (см. рис. 3.13) имеем систему вида:

$$\begin{cases} \Delta V = c_0 + c_1 \cdot \Delta N + c_2 \cdot T + c_3 \cdot P + c_4 \cdot \Delta N \cdot T + c_5 \cdot \Delta N \cdot P + c_6 \cdot T \cdot P + c_7 \cdot W_v & (17) \\ \Delta T = b_0 + b_1 \cdot \Delta N + b_2 \cdot E + b_3 \cdot \Delta N \cdot E & (18) \\ \Delta P = a_0 + a_1 \cdot \Delta N + a_2 \cdot T + a_3 \cdot V + a_4 \cdot \Delta N \cdot T + a_5 \cdot \Delta N \cdot V + a_6 \cdot N \cdot V. & (19) \end{cases}$$

Вычисления проводятся на основе следующего алгоритма.

А) На основе исторических данных соответствующих временных рядов в период времени (t_0, t') получаем коэффициенты a_k , b_k и c_k для уравнений множественной нелинейной регрессии. При этом выбирается оптимальный временной лаг между изменением независимых и зависимых переменных регрессии на основе сравнения значений соответствующих коэффициентов детерминации R^2 (в нашем случае этот лаг равен нулю).

Б) Получаем модель для прогнозирования, подставляя в систему (17)–(19) коэффициенты a_k , b_k и c_k , полученные в пункте А. Связь управляющих параметров с ΔN , W и E задается соотношениями (11)–(13).

В) Получаем ряды значений T , V и P для периода времени (t', t'') при различных величинах управляющих параметров.

Г) С использованием полученных рядов значений T , V и P и формулы (16) определяем «поверхности успешности» для различных t'' .

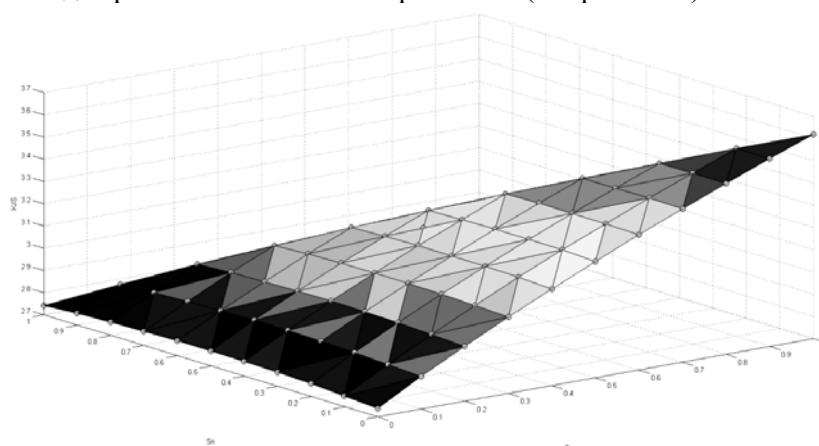
В соответствии с алгоритмом были получены значения коэффициентов:

$a_0 = -0,082$, $a_1 = 0,046$, $a_2 = 0,138$, $a_3 = -0,02$, $a_4 = 0,078$,
 $a_5 = -0,066$, $a_6 = -0,017$ для P . Данные коэффициенты достаточно хорошо описывают наш временной ряд; так, корреляция между историческим рядом P и P , построенным на основе нелинейной множественной регрессии, составляет $r = 0,99$;

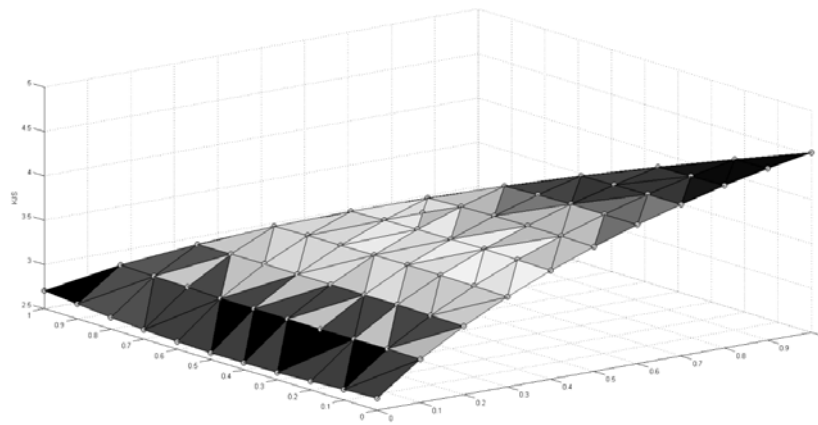
$b_0 = 0,172$, $b_1 = -1,68$, $b_2 = -0,004$, $b_3 = 0,045$ для T , где $r = 0,93$;

$c_0 = -0,732$, $c_1 = 2,528$, $c_2 = 0,02$, $c_3 = 1,079$, $c_4 = -2,254$,
 $c_5 = 0,869$, $c_6 = -0,41$, $c_7 = 3,339$ для V , где $r = 0,74$.

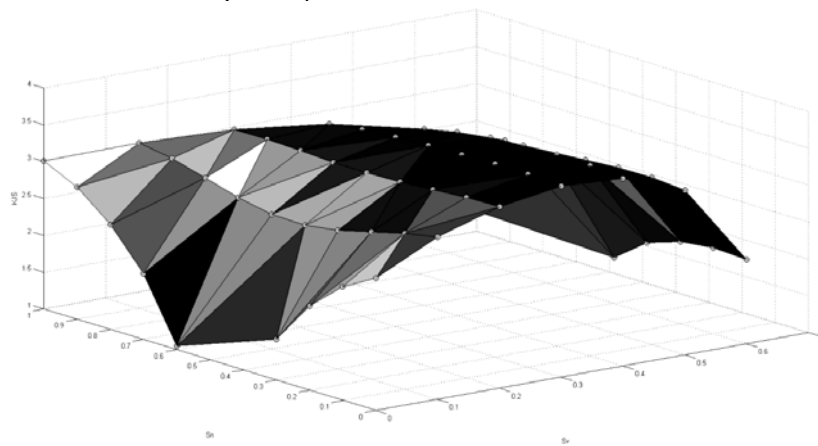
На основе данных вычислений была построена поверхность КЖС для различных моментов времени t'' (см. рис. 3.14).



а) Поверхность КЖС для 52 шага



б) Поверхность КЖС для 55 шага



в) Поверхность КЖС для 60 шага

Рис. 3.14. «Поверхность успешности» для разных моментов времени, полученная с использованием логико-статистического метода (показана зависимость КЖС от значений s_N и s_V)

На основе анализа «поверхности успешности» находим оптимальное значение управляющих параметров, максимизирующих КЖС в момент времени t'' .

Результаты сравнения полученной «поверхности успешности» с эталонной по шагам прогнозирования и степень невязки представлены на рис. 3.15.

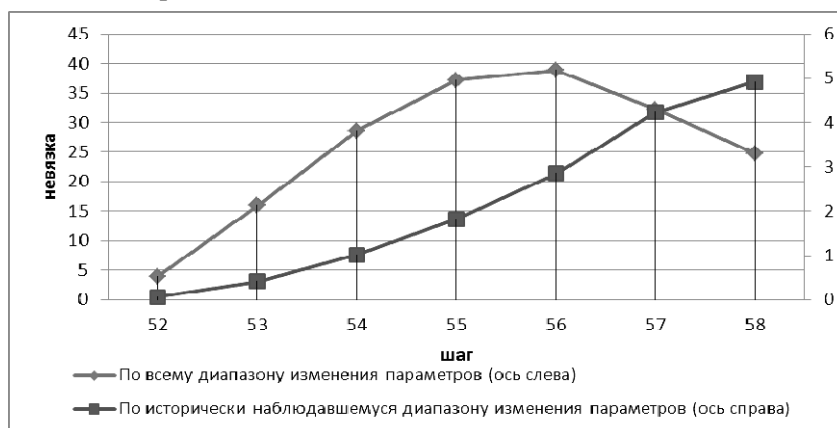


Рис. 3.15. Изменение невязки в зависимости от шага для логико-статистического метода

Для этих же значений t'' сравниваются значения вычисленных оптимальных значений управляющих параметров и их истинных значений (см. рис. 3.16).

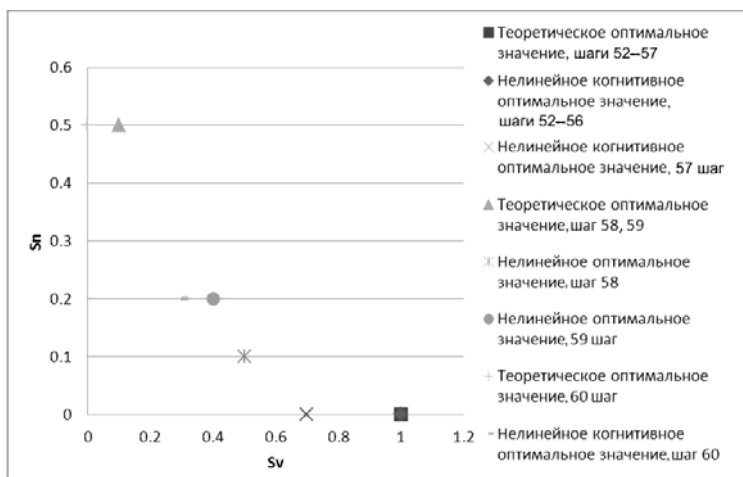


Рис. 3.16. Оптимальные значения параметров для логико-статистического метода для разных моментов времени

3.1.4.3. Результаты расчетов при использовании когнитивного метода

Данный метод развивается в работах Ф. С. Робертса, В. В. Кульбы и др.; он также строится на основе когнитивной схемы, которая представлена на рис. 3.13, но имеет ряд существенных отличий от логико-статистического метода. Считается, что система в начальный момент времени находится в равновесии. Затем на нее производится воздействие с помощью импульсного изменения значений параметров в вершинах орграфа. Для нашей модели импульсами являются параметры ΔN , W_v и E , они и воздействуют на нашу систему. В результате получаются новые значения макропараметров, которые зависят от их состояний до импульса и от состояния системы после получения импульса. На основе вышеизложенного имеем:

$$\begin{cases} V(t) = V(t-1) + F(V, T) \cdot (T(t-1) - T(t-2)) + \\ + F(V, W_v) \cdot W_v(t-1) + F(V, \Delta N) \cdot \Delta N & (20) \\ T(t) = T(t-1) + F(T, E) \cdot E(t-1) + F(T, \Delta N) \cdot \Delta N(t-1) & (21) \\ P(t) = P(t-1) + F(P, T) \cdot (T(t-1) - T(t-2)) + F(P, \Delta N) \cdot \Delta N(t) + \\ + F(P, V) \cdot (V(t-1) - V(t-2)). & (22) \end{cases}$$

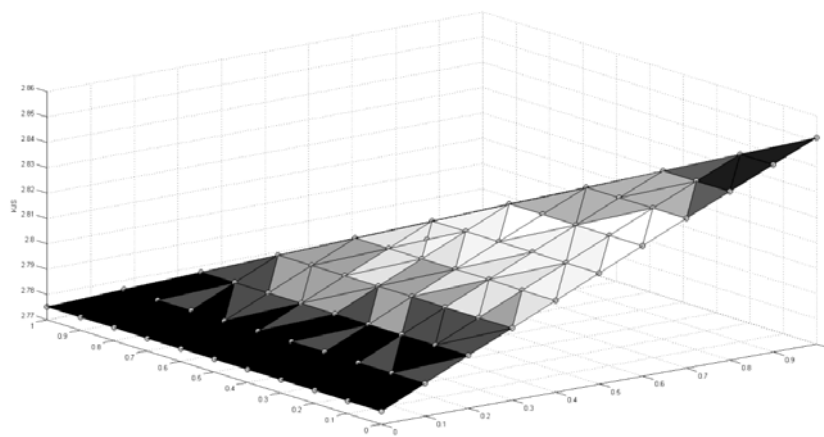
Вычисления проводятся в соответствии с описанным выше алгоритмом с учетом следующего:

– в качестве коэффициентов $F(V, T)$, $F(V, W_v)$, $F(V, \Delta N)$, $F(T, E)$, $F(T, \Delta N)$, $F(P, T)$, $F(P, \Delta N)$, $F(P, V)$ в уравнениях (20)–(22) используются коэффициенты корреляции между параметрами, которые указаны в скобках, полученные на основе сопоставления рядов значений этих параметров за период времени (t_0, t') .

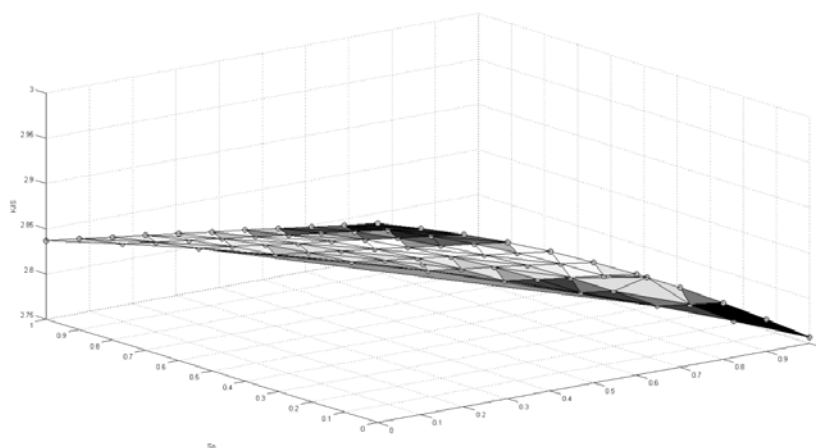
Полученные таким образом коэффициенты равны:

$$\begin{aligned} F(V, T) &= 0,94, & F(V, W_v) &= 0,271, & F(V, \Delta N) &= 0,125, \\ F(T, E) &= 0,002, & F(T, \Delta N) &= 0,165, & F(P, T) &= 0,95, \\ F(P, \Delta N) &= 0,166, & F(P, V) &= 0,97. \end{aligned}$$

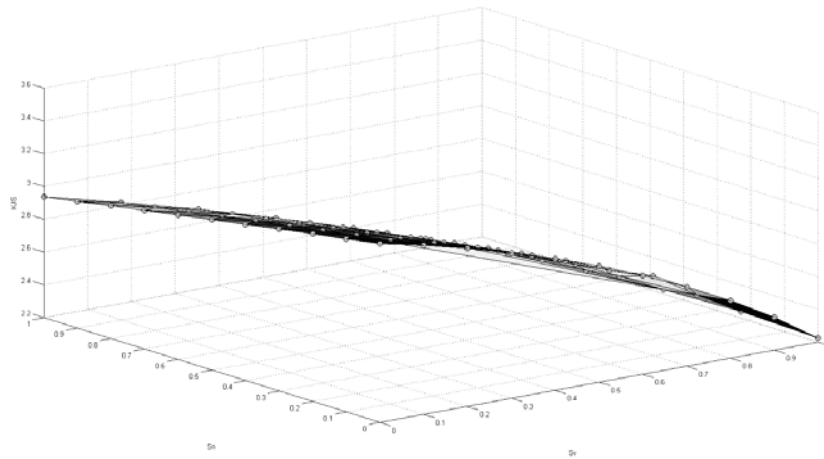
Результат построения «поверхности успешности» представлен на рис. 3.17.



а) Поверхность КЖС для 52 шага



б) Поверхность КЖС для 55 шага



в) Поверхность КЖС для 60 шага

Рис. 3.17. «Поверхность успешности» для разных моментов времени, полученная с использованием когнитивного метода (показана зависимость КЖС от значений s_N и s_V)

Результаты сравнения полученной «поверхности успешности» с эталонной по шагам прогнозирования и степень невязки представлены на рис. 3.18.

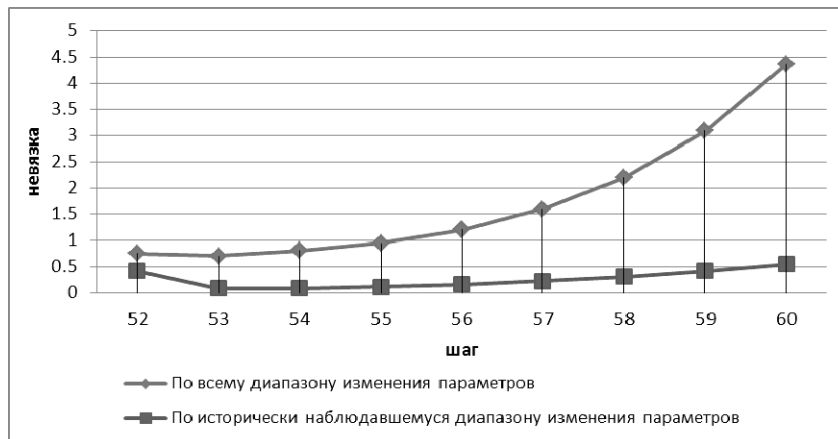


Рис. 3.18. Изменение невязки в зависимости от шага (для когнитивного метода)

Для этих же значений t'' сравниваются значения вычисленных оптимальных значений управляющих параметров и их истинных значений (см. рис. 3.19).

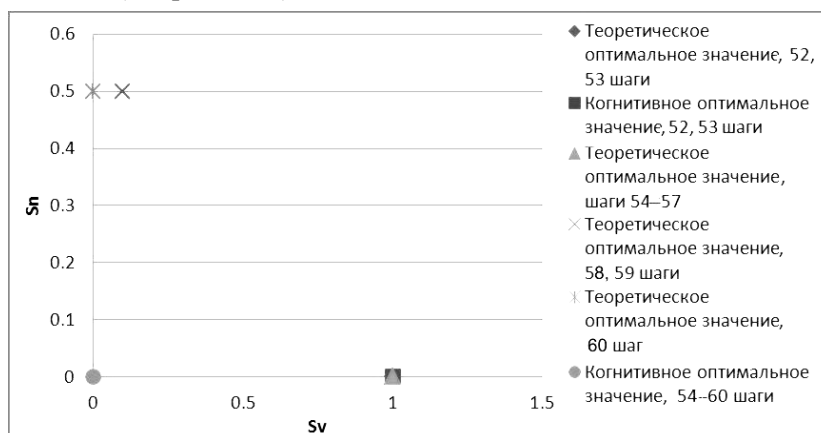


Рис. 3.19. Оптимальные значения параметров для когнитивного метода для разных моментов времени

Обращает на себя внимание, что линейные методы неадекватно отражают реальную ситуацию (при их использовании оптимальные значения управляющих параметров всегда оказываются на границах допустимых диапазонов). С другой стороны, нелинейные методы при долгосрочном прогнозировании неустойчивы и могут давать физически неправдоподобные результаты, например отрицательное значение КЖС (см. рис. 3.14в при больших значениях s_T).

3.1.5. Анализ результатов вычислительного эксперимента

Общими выводами вычислительного эксперимента являются следующие:

- использование линейных моделей дает неадекватные результаты (притом что линейные модели широко используются в практике социального моделирования);

- использование нелинейных моделей должно проводиться очень аккуратно, поскольку они сильно зависят от способа учета нелинейности, неустойчивы и при определенных значениях управляющих параметров (выходящих за пределы исторически наблюдавшихся значений) могут давать физически неверные результаты;

– при формировании когнитивных схем и соответствующих им логико-статистических и когнитивных моделей нужно различать запасовые и потоковые переменные (то есть те, которые накапливаются и не накапливаются с течением времени). Эти виды переменных должны по-разному входить в расчетные формулы (в противном случае результаты расчетов оказываются неверными);

– когнитивные модели в их традиционном виде дают неплохой результат на малых горизонтах прогноза, но становятся неадекватными на больших временах t'' . Это связано с теоретическими предпосылками, на которых они основаны. Поэтому на больших временных интервалах надо использовать логико-статистические модели;

– истинная форма «поверхности успешности» существенным образом зависит от горизонта прогноза (значения t'');

– результаты применения методов существенно зависят от количества учитываемых факторов. Статистический метод хорош в малоразмерных системах, но в многомерных его достоверность сильно снижается, что требует привлечения дополнительной информации и перехода к логическим и математическим моделям.

Литература

Национальная идея России. Программа действий (постановка задачи) / Ред. С. С. Сулакшин. М.: Научный эксперт, 2009.