



На правах рукописи  
*Каменский*

Каменский Дмитрий Павлович

**ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ АВТОМАТИЗАЦИИ  
АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ  
СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗДАНИЙ**

Специальность:

05.13.12 – Системы автоматизации проектирования (строительство)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

12 ЯНВ 2012

Москва – 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный строительный университет» (ФГБОУ ВПО «МГСУ»).

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент **Гаряев Николай Алексеевич**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Павлов Александр Сергеевич**

кандидат технических наук **Паночкин Денис Владимирович**

Ведущая организация:

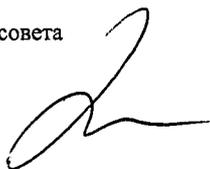
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет» (ФГБОУ ВПО «ВолГАСУ»).

Защита состоится 28 декабря 2011 года в 14.00 на заседании диссертационного совета Д212.138.01 при ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет» по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, КМК, НОЦ ИСИАС, ауд. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет».

Автореферат разослан 28 ноября 2011 года.

Ученый секретарь диссертационного совета



Куликова Е.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Известно, что высокая насыщенность инженерными коммуникациями, инфраструктурой и оборудованием новых зданий, а также высокая плотность строительства являются острыми проблемами крупных городов. Таким образом, перед проектировщиками зданий и сооружений строительная наука ставит новые задачи и предъявляет иные, ранее не возникавшие требования. В современных инновационных проектах используются передовые разработки в области строительных материалов с применением энергоэффективных и экологических технологий. С экономической точки зрения, при создании нового проекта, важно учитывать его эксплуатационные характеристики для оптимизации расходов. При обеспечении возможности работы с проектом в период его эксплуатации и ремонта, возрастает заметная коммерческая эффективность проекта.

Сказанное подчёркивает важность проблемы правильного подхода к эксплуатации систем жизнеобеспечения зданий. Ранее используемые методики и модели не в полной мере позволяют учитывать все современные особенности и множество параметров в системах жизнеобеспечения зданий. Данная проблема, безусловно, актуальна в нашей стране еще и в виду большой протяжённости коммуникаций и их подверженности физическому и моральному износу. В целях совершенствования подхода к эксплуатации систем жизнеобеспечения зданий важно использовать не только современные и инновационные строительные материалы, но и последние достижения в области аналитического, информационного и программного обеспечения строительства, которые позволяют анализировать любую систему жизнеобеспечения зданий.

Необходимость анализа проектных решений и создания модели синтеза с применением имитационного моделирования непосредственно в составе современных систем автоматизации проектирования (САПР) в области систем жизнеобеспечения зданий делает обозначенную тему диссертационного исследования актуальной научной проблемой, которая обладает достаточными признаками научной новизны. Это, в свою очередь, обусловлено и востребованностью полученных результатов диссертационной работы растущим сегментом рынка реального сектора экономики России, в рамках которого сформулирована практическая значимость исследования.

**Научно-техническая гипотеза** диссертации состоит в предложении возможности повышения эффективности процессов автоматизации анализа и синтеза проектных решений систем жизнеобеспечения зданий на основе использования оригинальных логико-математических имитационных моделей двух уровней.

**Цель работы** – создание единого подхода к автоматизации анализа и синтеза проектных решений систем жизнеобеспечения зданий на базе имитационных моделей.

Достижение цели обусловлено в диссертации постановкой и решением следующих **основных задач**:

- анализ создания имитационных моделей автоматизации систем жизнеобеспечения зданий;

- исследование процедур выработки проектных решений в процессе создания логико-математической имитационной модели системы жизнеобеспечения зданий;

- разработка методики автоматизации проектирования систем жизнеобеспечения и эксплуатации зданий на базе имитационного моделирования;

- разработка частной логико-математической имитационной модели систем жизнеобеспечения зданий в САПР;

- разработка единой логико-математической имитационной модели управления системами жизнеобеспечения зданий в САПР;

- разработка алгоритма использования статистических данных проектных имитационных моделей для принятия эффективных проектных решений на стадии реконструкции объекта (модернизация систем жизнеобеспечения);

- апробация и внедрение разработанной методики и логико-математических имитационных моделей при реализации проектов САПР;

- анализ возможности применения статистических данных проектных имитационных моделей при принятии эффективных проектных решений на стадии реконструкции объекта.

**Объектом исследования** – проектные решения систем жизнеобеспечения зданий всех уровней.

**Предмет исследования** – имитационные модели автоматизации анализа и синтеза проектных решений систем жизнеобеспечения зданий в САПР.

**Теоретические и методологические основы исследования** включают теорию построения систем автоматизации проектирования, системный анализ и синтез проектных решений САПР, теорию автоматического управления, тематические публикации и результаты исследований отечественных и зарубежных ученых и специалистов в области совершенствования практики разработки и применения строительных САПР.

**Достоверность результатов** обеспечена применением обоснованных теоретических и экспериментальных методов, аппарата имитационного моделирования, математического аппарата управления моделями, а также результатами использования единого подхода к автоматизации проектных решений систем жизнеобеспечения зданий на базе имитационного моделирования.

**Научная новизна** диссертационного исследования заключается в создании единого подхода к автоматизации анализа и синтеза проектных решений систем жизнеобеспечения зданий, состоящего в следующем:

- предложена методика автоматизации проектирования систем жизнеобеспечения и эксплуатации зданий на базе имитационного моделирования;

- разработана частная логико-математическая имитационная модель систем жизнеобеспечения зданий в САПР;

- разработана единая логико-математическая имитационная модель управления системами жизнеобеспечения зданий в САПР;

▪ создан алгоритм использования статистических данных проектных имитационных моделей для принятия эффективных проектных решений на стадии реконструкции объекта (модернизация систем жизнеобеспечения).

**Практическая значимость** диссертации заключается в создании и применении единого подхода к автоматизации проектных решений систем жизнеобеспечения зданий, в создании логико-математических имитационных моделей систем жизнеобеспечения, зданий объединённых единой моделью управления зданием, а также алгоритмом использования статистических данных проектных имитационных моделей для принятия эффективных проектных решений на стадиях строительства и реконструкции объекта.

**Апробация результатов исследования.** Основные теоретические и методические положения диссертации **доклаживались и апробированы** на Международных межвузовских научно-практических конференциях молодых ученых, аспирантов и докторантов «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (г. Москва, 2009–2011 гг.), секции Научно-методического совета по информационным системам и технологиям науки и образования в области строительства (НМС ИСТ) при Международной Ассоциации строительных вузов (АСВ) и Учебно-методическом объединении (УМО) вузов Российской Федерации в области строительства (2010, 2011 гг.), Международной научной конференции «Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании» (г. Москва, 2011 г.), заседаниях и научных семинарах кафедры Систем автоматизации проектирования (САПР) в строительстве и Информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве (ИСТАС) ФГБОУ ВПО «Московской государственной строительный университет» (г. Москва, 2009–2011 гг.).

**Внедрение результатов исследования.** Экспериментальная проверка и практическое внедрение результатов работы выполнено при реализации нескольких проектов в Некоммерческом партнерстве «Автоматизация зданий и системы управления инженерным оборудованием на базе протокола БАСнет» (НП «БИГ-РУ»).

Материалы диссертации **опубликованы** в 2009–2011 гг. в **5** научных работах, в том числе – в **2** работах в научных изданиях, входящих в действующий перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, утвержденный Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех основных глав, основных выводов и предложений, библиографического списка из 140 наименований и приложений.

**Содержание диссертации соответствует п.п. 3, 6 Паспорта специальности 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования (строительство).**

## ОСНОВНЫЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, а также выбран объект и предмет исследования. Сформулирована научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту. Кратко изложены положения по всем главам диссертации и рассматриваемые в них вопросы. Проанализированы программные теоретические средства решения поставленной задачи, рассмотрен отечественный и зарубежный опыт в аналогичных исследованиях.

В первой главе проведен анализ существующих проектных решений систем жизнеобеспечения зданий. Рассмотрен и учтён российский и зарубежный опыт в этом направлении. Подобраны теоретические, программные инструменты для решения выбранных задач и создания конечной методики в области систем жизнеобеспечения и эксплуатации зданий на базе имитационного моделирования. Для более точных исследований был проведён анализ всех узлов, параметров, характеристик систем жизнеобеспечения зданий, применён системный подход, который позволил рассматривать данную систему в качестве гомеостатического объекта (по проф. А.А. Волкову). Эти действия позволили определить уровень абстракции и адекватности создаваемой модели. В результате проведённого анализа был сделан вывод: адекватность модели прямо определяется мощностью множества переносимых параметров.

Методологическая схема исследования, отражающая основные составляющие диссертационной работы и их взаимосвязи, приведена на рис. 1.

Объекту исследований (блок 2), соответствует цель исследования (блок 1), состоящая в создании единого подхода к автоматизации анализа и синтеза проектных решений на базе имитационных моделей. Объект (блок 2), который анализируется на предмет (блок 3), определяет область исследований (блок 4) и совместно с применением теоретических основ исследования (блок 6) используется для постановки и решения задач исследования (блок 5) и выявления новизны решений (блок 7). Задачи исследования представляют собой систему мероприятий, начинающихся с анализа отечественной и зарубежной теории и практики, направленных на создание единого подхода к автоматизации анализа и синтеза проектных решений систем жизнеобеспечения зданий на базе имитационных моделей, включающих в себя разработку соответствующих рекомендаций и заканчивающихся экспериментальной практической проверкой полученных результатов. Ожидаемый практический результат (блок 8) исследований направлен на последующее применение на практики (блок 9).

Во второй главе разработана методика автоматизации проектирования систем жизнеобеспечения и эксплуатации зданий на базе имитационного моделирования, а также предложена частная логико-математическая имитационная модель систем жизнеобеспечения здания (на примерах отопления, пожаротушения и слаботочной кабельной сети (СКС)). Проанализированы проектные решения и составляющие элементы систем, рассмотрены устройства этих элементов.

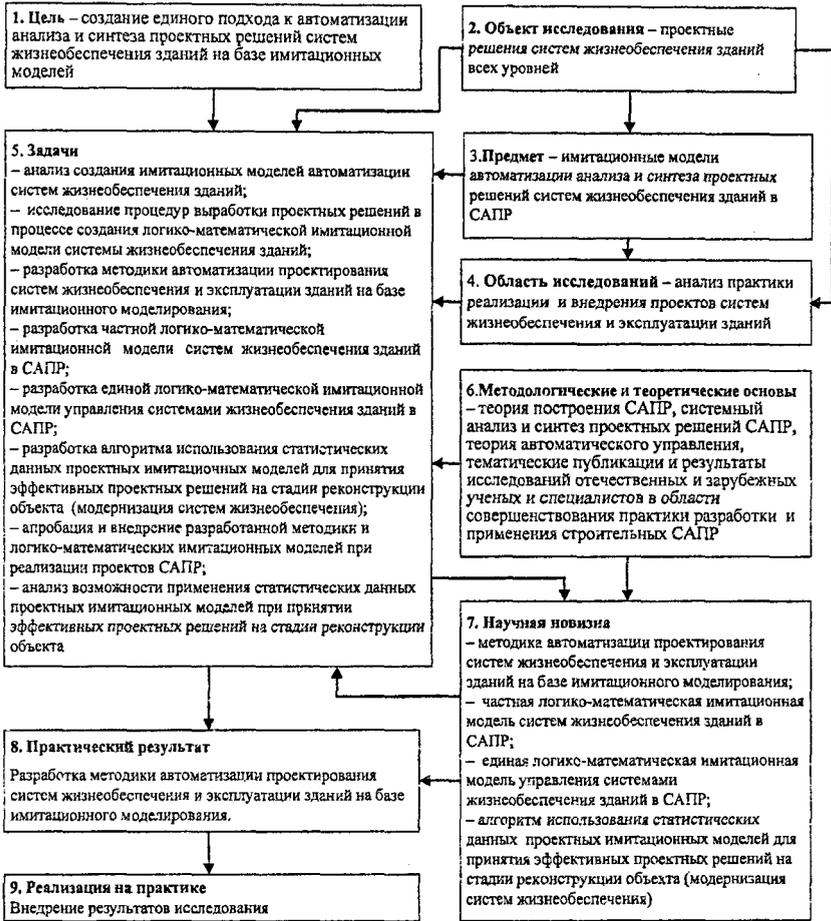


Рис. 1. Методологическая схема исследования

Существует два прогноза по созданной имитационной модели. Один из них – «гладкий прогноз», означающий, что после проведения экспериментов система не нуждается в модернизации и в изменении. Второй «экспертный прогноз» означает, что система нуждается в изменении и во внесении новых параметров в ее работу. В целом весь процесс создания логико-математической имитационной модели можно представить в виде схемы (рис. 2).

Создание методики автоматизации систем жизнеобеспечения и эксплуатации зданий на базе имитационного моделирования состоит из следующих этапов:

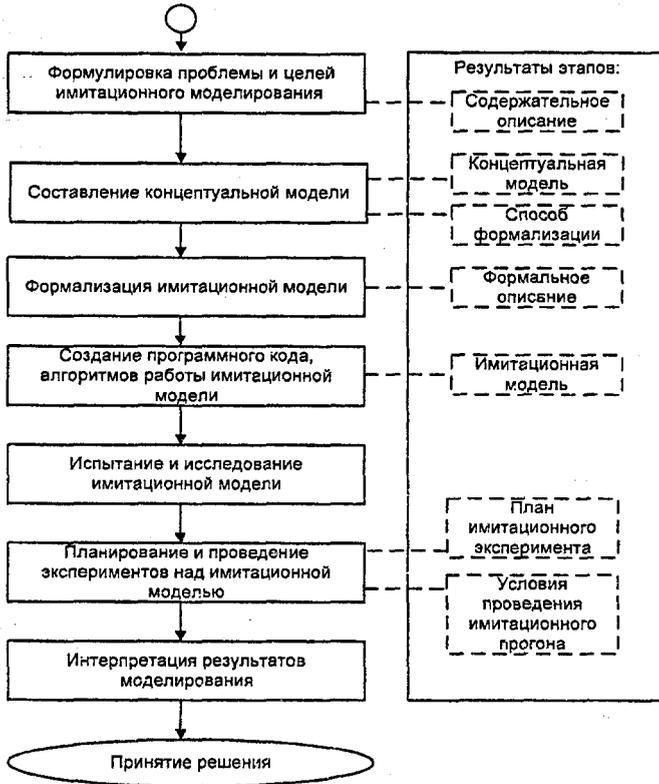


Рис. 2. Процесс создания логико-математической имитационной модели

- перенос необходимой структурированной информации из проекта САПР в программируемую логико-математическую имитационную модель;
- достижения достоверности модельных оценок и выводов на основе полученных статистических данных после проведения экспериментов над логико-математической имитационной моделью путем нахождения аналитических взаимосвязей между параметрами;
- использование оптимизированных данных для достижения отражения работоспособности логико-математической имитационной модели на основе данных из проекта САПР.

Для создания серии имитационных моделей были собраны исходные данные, подобраны параметры, которые необходимо вносить в программируемую имитационную среду для более точной передачи работы будущей САПР.

Причины создания имитационной модели могут быть различны – от меняющихся условий эксплуатации, до внедрения новых параметров,

характеристик или узлов системы. Из всего перечисленного, на основе проведенного анализа и синтеза проектных решений САПР по системам жизнеобеспечения зданий, была предложена схема этапов обоснования необходимости создания имитационной модели, которая может быть применена к любой системе жизнеобеспечения и эксплуатации здания. На рис. 3 представлена созданная блок-схема.

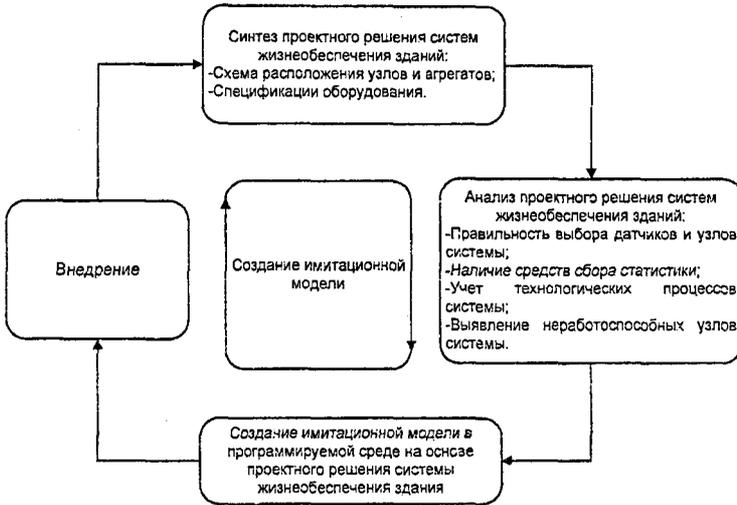


Рис. 3. Схема этапов обоснования необходимости создания имитационной модели

На основе собранных исходных данных и схемы обоснования создания модели, был смоделирован ряд систем жизнеобеспечения и эксплуатации зданий. Системы жизнеобеспечения и эксплуатации зданий были перенесены в программную имитационную среду со всеми параметрами работоспособности, с элементами систем и их характеристиками. На рис. 4 показана гистограмма, на которой собраны данные с имитационной модели системы отопления.

Для управления созданной моделью необходимо выстроить блок-схему управления этой моделью, в которой будут учтены все возможные варианты ее работы. Блок-схема создается на основе проведенного анализа и синтеза проектного решения САПР, в котором показаны все этапы и условия работы.

На рис. 5 показана созданная модель системы отопления здания. На рис. 6 показана блок-схема управления созданной моделью.

Стандартные возможности программного инструментария моделируемой имитационной среды оказались недостаточны для учета всех вариантов поведения системы отопления. Для решения проблемы в диссертации разработан собственный программный код на языке Java, расширяющий возможности системы и интегрированный в элемент программного инструментария моделируемой среды (рис. 7).

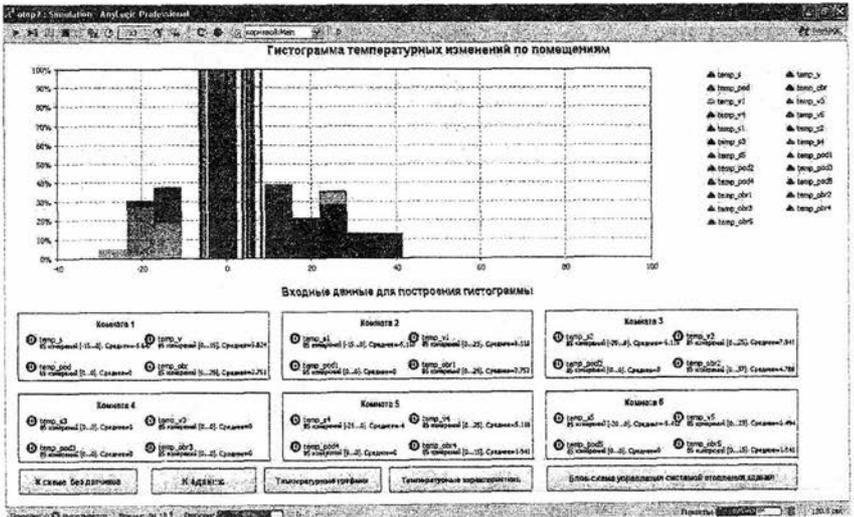


Рис. 4. Гистограмма данных имитационной модели системы отопления

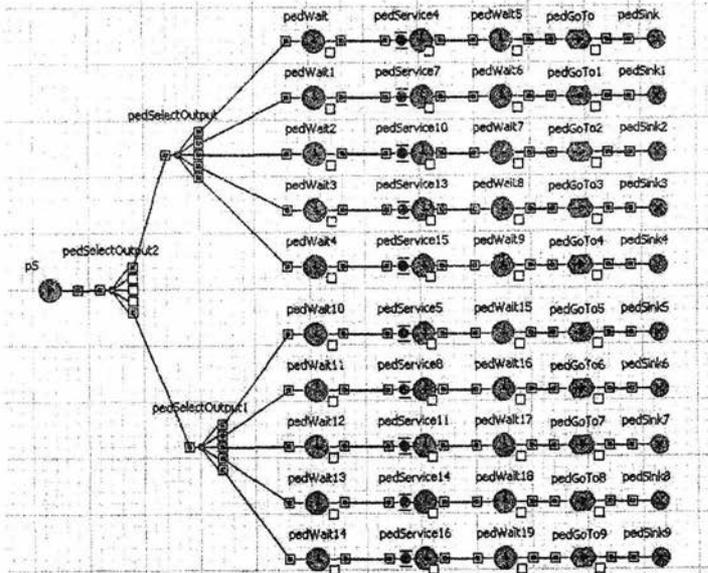


Рис. 5. Имитационная модель системы отопления



Рис. 6. Блок-схема управления моделью

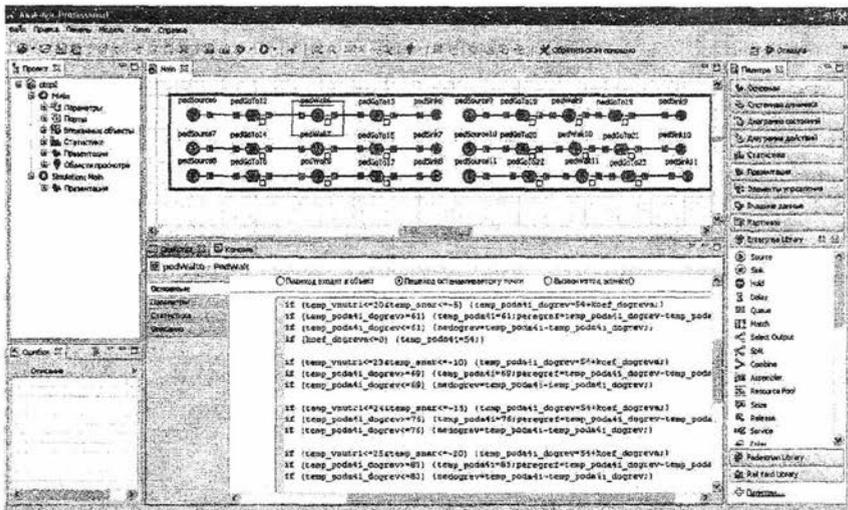


Рис. 7. Разработанный программный код на языке Java

Для получения статистических данных из логико-математической имитационной модели использовались входные данные из проектного решения системы отопления здания такие как:  $P_{дв}$  – входное давление теплоносителя в отопительную систему, Па;  $T_H$  – температура теплоносителя,  $C^0$ ;  $T_{вн}$  – температура датчика установленного внутри помещения,  $C^0$ ;  $T_{нв}$  – температура наружного воздуха,  $C^0$ ; PI – регулятор программно интегрированный; закрытая независимая схема индивидуального теплового пункта (ИТП, рис. 8).

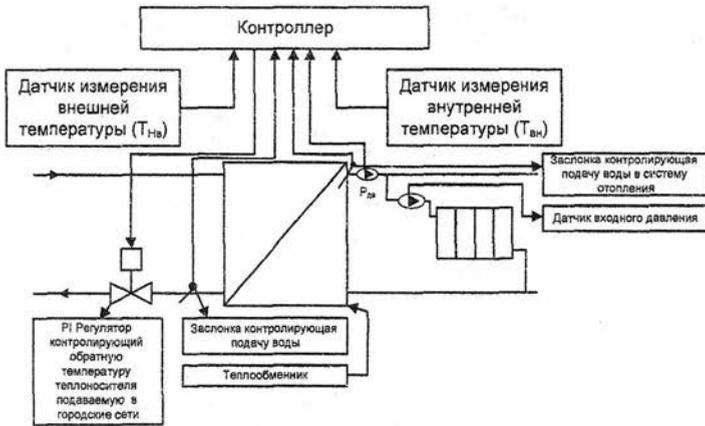


Рис. 8. Закрытая независимая схема ИТП

На основании проведенных экспериментов с имитационной моделью и установки в систему отопления дополнительного оборудования, а именно, индивидуального теплового пункта (ИТП), получены соотношения между подаваемыми температурными режимами тепловой энергии и коэффициентом увеличения тепловой энергии (1):

$$T_{нв} = T_{вн} \leftrightarrow T_{н} = T_{н} + t_{i+1} \quad (1)$$

где:  $T_{нв}$  – температура наружного воздуха,  $C^0$ ;  $T_{н}$  – температура теплоносителя,  $C^0$ ;  $T_{вн}$  – температура внутри помещения,  $C^0$ ;  $t$  – коэффициент увеличения подаваемой тепловой энергии,  $C^0$ . Далее представлены параметры, которые могут принимать определенный интервал значений:

$$0 < T_{нв} < -30 \quad 80 < T_{н} < 115 \quad (2)$$

$$15 < T_{вн} < 30 \quad 0 < t_i < 8 \quad (3)$$

На основе полученных соотношений подаваемых температурных режимов тепловой энергии построен результирующий график (рис. 9) температуры воды ( $T_{н}$ ), коэффициента увеличения подаваемой тепловой энергии ( $t$ ), температуры воды в обратном трубопроводе ( $T_{об}$ ).

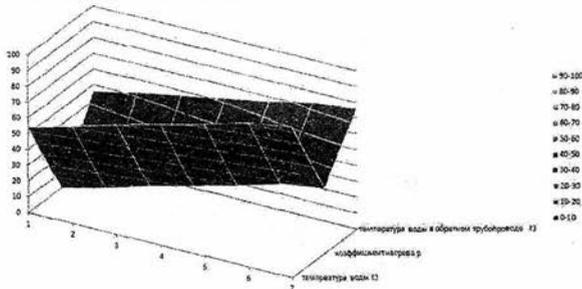


Рис. 9. Результирующий график

После проведения всех экспериментов над логико-математической имитационной моделью и получившихся статистических данных выведен коэффициент эффективности потребления тепловой энергии ( $Q_{эф}$ ) после анализа и синтеза проектного решения САПР для систем жизнеобеспечения зданий:

$$Q_{эф} = \{P_{дв}, T_{вн}, T_{н}, T_{нв}\} \quad (4)$$

где:  $P_{дв}$  – входное давление теплоносителя в отопительную систему, Па;  $T_{н}$  – температура теплоносителя,  $^{\circ}C$ ;  $T_{вн}$  – температура датчика установленного внутри помещения,  $^{\circ}C$ ;  $T_{нв}$  – температура наружного воздуха,  $^{\circ}C$ ;  $Q_{эф}$  – коэффициент эффективности потребления тепловой энергии, Гкал.

Для полноценной работы логико-математической имитационной модели слаботочной кабельной сети были созданы дополнительные переменные (рис. 10) с программным кодом на языке Java (рис. 11), которыми подбирались параметры обмена данными по сети такие как: величина передаваемых данных, задержка данных, время ожидания, время простоя, потери во время передачи данных.

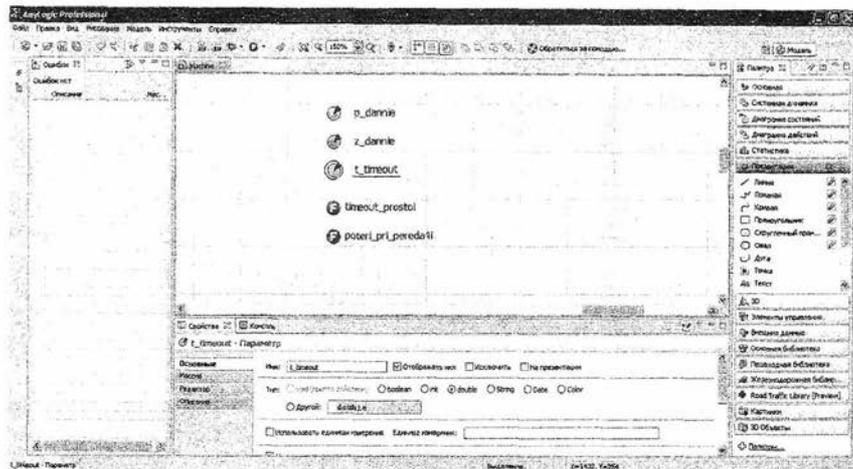


Рис. 10. Дополнительные переменные

В логико-математической имитационной модели пожаротушения просчитывалась реакция людей на сложившуюся экстренную ситуацию.

В данной модели оценивалось поведение и траектория движения по помещениям к эвакуационным выходам, гидрантам, огнетушителям.

На рис. 12 показана схема помещений и структура самой модели, на рис. 13 – план эвакуации и траектория движения людей (агентов).

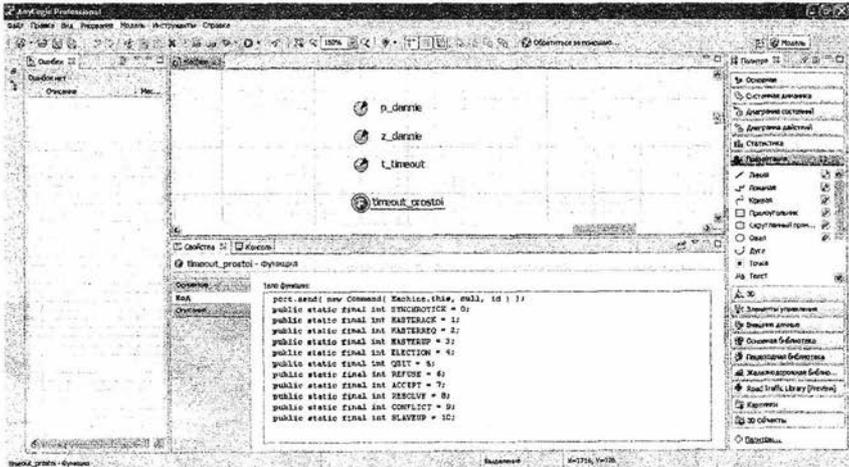


Рис. 11. Программный код для переменной timeout\_prostoi

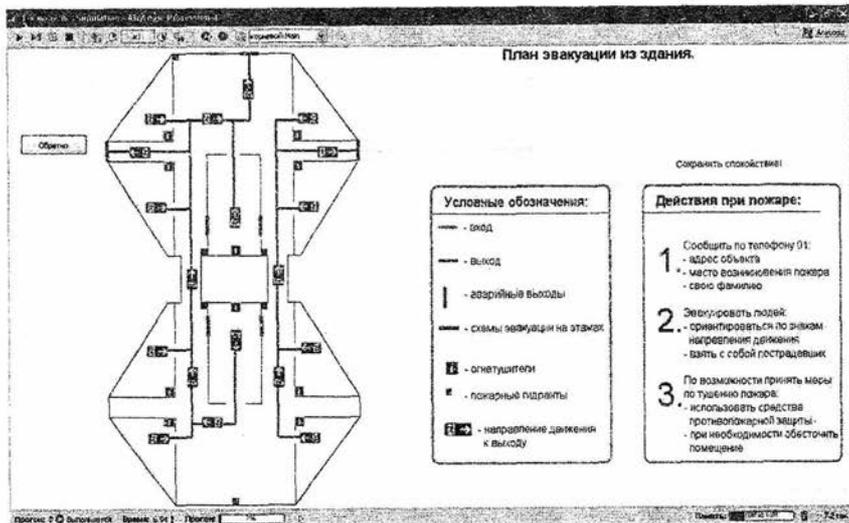


Рис. 12. Схема помещений и структура логико-математической имитационной модели

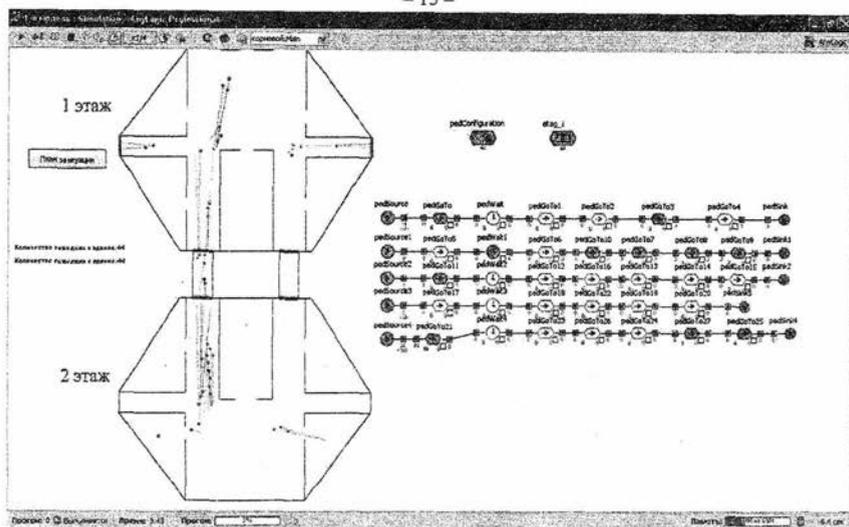


Рис. 13. План эвакуации и траектория движения людей (агентов)

В третьей главе рассматриваются логико-математические имитационные модели управления системами жизнеобеспечения зданий. Несмотря на то, что с использованием аппарата имитационного моделирования сегодня решается самый широкий спектр поставленных задач, учитывается множество параметров и событий, важным аспектом рассматриваемых процессов моделирования является возможность качественного расширения результатов проводимых исследования за счет применения систем поддержки принятия решений (СППР). Включение в решение практических задач подобных систем позволит охватывать гораздо больше факторов, которые необходимо учитывать во время реализации конкретных проектов не только на бумаге, но и во время создания имитационной модели.

При анализе и синтезе любого проекта САПР, ядро СППР состоит из имитации и эвристик, которые помогают решать и принимать проектные решения.

В общем виде СППР возможно представить несколькими параметрами:  $A$  – множество альтернатив проекта автоматизации и синтеза САПР;  $K = (K_1, K_2, K_3, \dots, K_m)$  – множество критериев по которым оценивается соответствие альтернативы поставленным целям; Мод:  $A \rightarrow K$  – модель, позволяющая для каждой альтернативы рассчитать вектор критериев;  $\Pi$  – решающее правило для выбора наиболее подходящей альтернативы в многокритериальной ситуации.

После анализа проекта САПР с применением методики автоматизации и выбора решения по СППР ( $V_p$  – выбор решения по проекту САПР) стало возможно составить схему принятия и выбора проектного решения (рис. 14), которая должна состоять из множества матриц предлагаемых решений

$X = \{ x_1, x_2, \dots, x_n \}$ ,  $Y = \{ y_1, y_2, \dots, y_m \}$ ,  $Z = \{ z_1, z_2, \dots, z_h \}$  параметра всего проекта  $P_c$  и общей матрицы  $B_{об} = \{ X, Y, Z \}$  приняты решения, которая включает в себя выбранные решения по матрицам  $X = \{ x_1, x_2, \dots, x_n \}$ ,  $Y = \{ y_1, y_2, \dots, y_m \}$ ,  $Z = \{ z_1, z_2, \dots, z_h \}$ :

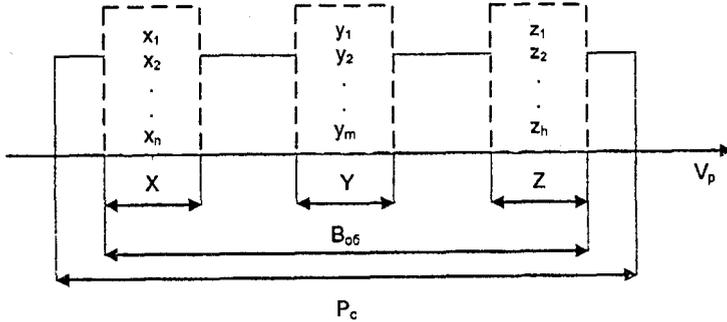


Рис. 14. Схема принятия и выбора решения

Матрицы  $X = \{ x_1, x_2, \dots, x_n \}$ ,  $Y = \{ y_1, y_2, \dots, y_m \}$ ,  $Z = \{ z_1, z_2, \dots, z_h \}$  по каждому принятому решению проекта САПР не должны совпадать и быть равными.

Выбор решения по проекту САПР с применением СППР и методики автоматизации проектных решений систем жизнеобеспечения зданий представляется в виде формулы:

$$B_{об} = \{ X \{ x_1, x_2, \dots, x_n \} + Y \{ y_1, y_2, \dots, y_m \} + Z \{ z_1, z_2, \dots, z_h \} \} \rightarrow$$

$$V_p = B_{об} \{ X, Y, Z \} \quad (5)$$

где:  $P_c$  – весь проект;  $B_{об}$  – матрица принимаемых решений после использования СППР. Общий вид задачи поиска решений или принятия проектного решения можно представить в виде формулы:

$$T = \{ S, S_0, S_k, F \} \quad (6)$$

где:  $S_0$  – начальное состояние;  $S_k$  – конечное состояние или состояния;  $S$  – множество промежуточных состояний;  $F = \{ F_{in} \}$  – множество операторов, которые переводят процесс поиска из одного состояния в другое.

Наиболее целостное и наглядное представление об алгоритме использования статистических данных при принятии проектных решений дает блок-схема, отражающая его основные стадии и порядок их следования (рис. 15).

СППР можно представить в виде системы четырех блоков, в которой каждый элемент иерархии будет использоваться и наращиваться в итоговой модели (рис. 16).

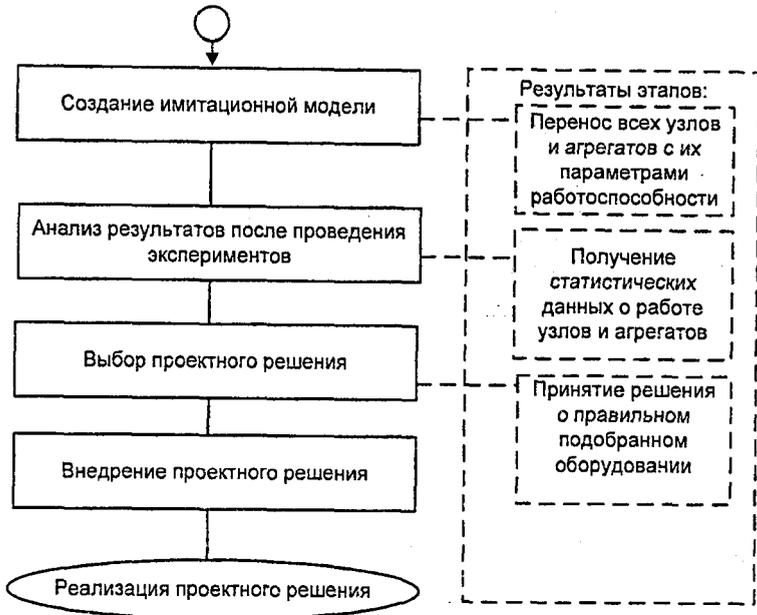


Рис. 15. Схема алгоритма использования статистических данных



Рис. 16. Схема СППР в виде четырех блоков

Из схемы видно, что каждый блок и элемент наращивается и изменяется во время создания имитационной модели и СППР. Предложенный вариант использования СППР достаточно гибкий инструмент, который может модернизироваться, изменяться и дополняться – все эти факторы помогают улучшать имитационную модель и получить более точные расчеты и данные после проведения экспериментов.

Поскольку системы жизнеобеспечения зданий постоянно усложняются, а их количество увеличивается – предлагается использовать разработанную единую логико-математическую имитационную модель управления системами жизнеобеспечения зданий, состоящую из взаимосвязанных блоков управления по каждой системе жизнеобеспечения здания (рис. 17).

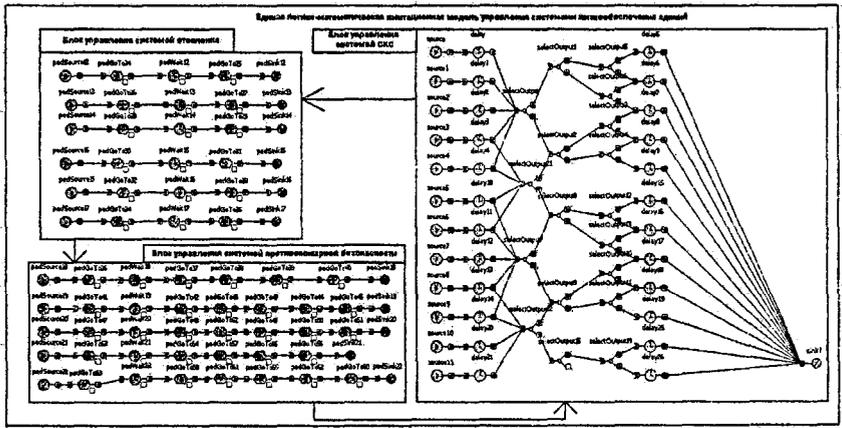


Рис. 17. Единая логико-математическая имитационная модель управления системами жизнеобеспечения зданий

В связи с этим помимо получения статистических данных после проведения экспериментов над логико-математической имитационной моделью необходим математический аппарат управления такими многоуровневыми комплексами, который бы учитывал максимально возможные логические взаимосвязи между параметрами.

Управлять таким комплексом логико-математических имитационных моделей предлагается с помощью математической модели (рис. 18).

Система управления – это система, целенаправленное поведение которой обеспечивается путем выработки соответствующих воздействий и оказания этих воздействий на элементы системы.

Управляемая имитационная модель – это подсистема системы управления, состоящая из объектов, на которые оказывается воздействие для обеспечения целенаправленного поведения системы управления.

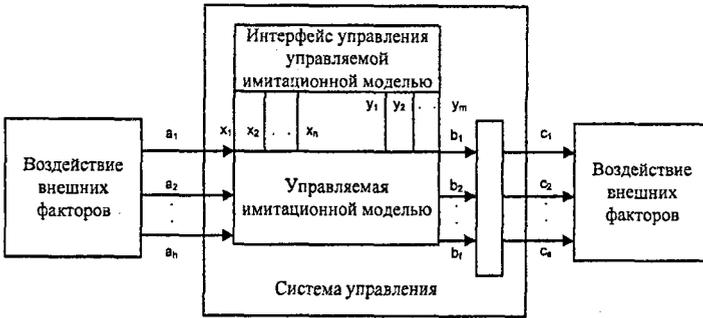


Рис. 18. Математическая модель управления

Интерфейс управления управляемой имитационной моделью – это подсистема системы управления, вырабатывающая и оказывающая воздействия на управляемую имитационную модель подсистемы для обеспечения целенаправленного поведения системы управления.

На схеме (см. рис. 18) приняты следующие обозначения:  $A_{\langle n \rangle}(t) = \langle a_1(t), a_2(t), \dots, a_n(t) \rangle$  – возмущающие переменные, характеризующие воздействия окружающей среды на систему управления в момент времени  $t$ ;  $X_{\langle n \rangle}(t) = \langle x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t) \rangle$  – переменные интерфейса управления, характеризующие целенаправленные воздействия интерфейсом управления имитационной моделью на управляемую имитационную модель в момент времени  $t$ ;  $B_{\langle n \rangle}(t) = \langle b_1(t), b_2(t), \dots, b_n(t) \rangle$  – переменные состояния, характеризующие состояние управляемой имитационной моделью в момент времени  $t$ ;  $C_{\langle s \rangle}(t) = \langle c_1(t), c_2(t), \dots, c_s(t) \rangle$  – выходные переменные, характеризующие выходную ситуацию или воздействие системы управления на внешние факторы в момент времени  $t$ ;  $Y_{\langle m \rangle}(t) = \langle y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t) \rangle$  – наблюдаемые переменные – это те переменные состояния и выходные переменные, которые наблюдаются интерфейсом управления имитационной моделью в момент времени  $t$ .

Выходные переменные в общем случае связаны с переменными состояния функциональной зависимостью:

$$C_s(t) = \psi_v(B_f(t)) \quad (7)$$

где  $\psi_v$  – вектор функции.

Используя введенные переменные, можно составить следующую математическую модель управления:

$$\left. \begin{aligned} B_f(t) &= \Phi_n(B_f(t_0), X_n(t), A_n(t), Y_m(t)t), & (1) \\ B_f(t) &\in D(t), & (2) \\ X_n(t) &\in E(t), & (3) \\ Y_m(t) &\in F(t), & (4) \\ t &\in [t_0, T] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где:  $V_f(t_0)$  – начальное состояние управляемой имитационной моделью;  $D(t)$  – область допустимых значений векторов переменных состояний управления имитационной моделью;  $E(t)$  – область допустимых значений векторов интерфейса управления имитационной моделью;  $F(t)$  – область допустимых значений векторов наблюдаемых переменных.

Выражения (8) описывают состояние системы в любой момент времени на интервале  $[t_0, T]$ , а совместно с выражением (7) – выходную ситуацию в том же интервале времени. Уравнение (1) в модели (8) представляет собой функциональную зависимость вектора состояний системы от начального состояния управления, возмущений, наблюдаемости системы, времени. Выражения (2)–(4) в этой модели являются математической формулировкой ограничений на состояния системы, управление и наблюдаемость переменных.

Внедрение единой логико-математической имитационной модели повышает эффективность управления, увеличивается отказоустойчивость, в процессе эксплуатации заблаговременно выявляются узлы и агрегаты которым необходимо техническое обслуживание или они подлежат замене.

В четвертой главе апробируются логико-математические имитационные модели систем жизнеобеспечения зданий и разработанные методики.

При создании новых проектов необходимо прогнозировать жизненный цикл объекта от его постройки до утилизации. Частично прогнозировать результаты и отслеживать работу системы еще на стадии разработки проекта позволяет информационная модель здания (англ. – *Building Information Model – BIM*), но сегодня принимать полноценные проектные решения, опираясь исключительно на BIM, не всегда эффективно. Поэтому для достижения наилучшего результата необходимо использовать совместно две технологии: информационной модели здания и имитационного моделирования (рис. 19).



Рис. 19. Взаимодействие информационной модели здания с имитационным моделированием

В диссертации предложен способ передачи полученных экспериментальных данных из логико-математической имитационной модели в разрабатываемый проект информационной модели здания для дальнейшего анализа проектируемых систем.

Передача информации организована в режиме реального времени путем загрузки / выгрузки данных без участия человека (рис. 20). При этом данные хранятся в базе данных на протяжении всего жизненного цикла здания.



Рис. 20. Передача и анализ данных

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

1. Проведенный анализ теории и практики отечественных и зарубежных исследователей в области эксплуатации систем жизнеобеспечения зданий выявил существенную необходимость в разработке методов и моделей анализа и синтеза проектов САПР и создания на их основе автоматизированных имитационных моделей, позволяющих комплексно оценивать проектные решения.

2. Предложенные имитационные модели систем жизнеобеспечения зданий позволяют учитывать специфические особенности проектов САПР, ранжировать и изменять модели по мере модернизации проектов, а также оценивать работоспособность каждого узла системы с заложенными в него характеристиками на этапе проектирования.

3. Предлагаемый подход к анализу и синтезу проектных решений САПР, совместно с имитационными моделями зданий, позволяет разработать единую автоматизированную систему управления системами жизнеобеспечения здания, ориентированную на многофакторную оценку проектных решений на этапе проектирования (по проф. А.А. Волкову).

4. Разработка имитационных моделей и проектов САПР совместно с СППР обеспечивает возможность эффективного многовариантного анализа и синтеза создания персонафицированных дискретных проектных решений систем жизнеобеспечения зданий. Предложенный подход позволяет более эффективно эксплуатировать и обслуживать системы жизнеобеспечения зданий.

5. Предложены и апробированы:

- методика автоматизации проектирования систем жизнеобеспечения и эксплуатации зданий на базе имитационного моделирования, которая описывает принципы переноса проектного решения САПР в программируемую имитационную среду;

- частная логико-математическая имитационная модель систем жизнеобеспечения зданий, позволяющая всесторонне анализировать проектное решение САПР и прогнозировать работу отдельных узлов системы;

- единая логико-математическая имитационная модель управления системами жизнеобеспечения здания; данная модель управляет комплексом систем жизнеобеспечения зданий и анализирует совместную работу всех узлов, агрегатов по данным проектного решения в САПР;

- алгоритм использования статистических данных проектных имитационных моделей для принятия эффективных проектных решений на стадии реконструкции объекта (модернизация систем жизнеобеспечения), предполагающий получение различных данных после проведения многократных экспериментов над моделью, позволяющий внесение конструктивных доработок и оценку работы системы после ее модернизации.

6. По результатам диссертации выявлены перспективные актуальные направления и задачи продолжения исследований:

- построение в программируемой имитационной среде моделей других систем жизнеобеспечения зданий, например, таких как *вентиляция и кондиционирование воздуха, освещение* и проч.;

- разработка детального алгоритма управления единой логико-математической имитационной моделью с возможностью многовариантного анализа и синтеза проекта САПР;

- оптимизация логико-математических имитационных моделей для более детального управления системами жизнеобеспечения зданий и принятия эффективных проектных решений на стадии реконструкции объекта.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах автора:

1. Каменский, Д.П. Постановки задач применения имитационного моделирования в САПР [Текст] // Сб. науч. тр. «Системный анализ, управление и обработка информации в строительстве». – Вып. №2. – М.: МГСУ, 2009. – 0,5 п.л. (в соавторстве, авторский вклад – 0,25 п.л.).
2. Каменский, Д.П. Актуальные задачи имитационных моделей при автоматизированном проектировании инженерных систем зданий [Текст] // Сб. науч. тр. «Системный анализ, управление и обработка информации в строительстве». – Вып. №1. – М.: МГСУ, 2010. – 0,5 п.л.
3. Каменский, Д.П. Моделирование систем жизнеобеспечения зданий в САПР [Текст] // Сб. науч. тр. «Системный анализ, управление и обработка информации в строительстве». – Вып. №2. – М.: МГСУ, 2010. – 0,5 п.л.
4. \* Каменский, Д.П. Имитационное моделирование и система поддержки принятия решений [Текст] // Вестник МГСУ. – 2011. – №6. – 0,5 п.л. (в соавторстве, авторский вклад – 0,25 п.л.).
5. \* Каменский, Д.П. Применение имитационного моделирования в системах жизнеобеспечения зданий [Текст] // Вестник МГСУ. – 2011. – №6. – 0,5 п.л. (в соавторстве, авторский вклад – 0,25 п.л.).

\* – работы, опубликованные в научных изданиях, входящих в действующий перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Лицензия ЛР №020675 от 09.12.1997 г.

ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет»

Подписано в печать: 14.11.2011.

Формат: 60×84 1/16

Печать: XEROX

Объем: 1,0 п.л.

Тираж: 100

Заказ №: б/н

НОЦ ИСИАС, 129337, г. Москва, Ярославское ш., 26, ФГБОУ ВПО «МГСУ»