

# Технологии комплексного моделирования при проектировании инженерных систем зданий

О.Ю. Марьясин,  
доц. каф. кибернетики, к.т.н., [maryasin2003@ystu.ru](mailto:maryasin2003@ystu.ru),  
А.А. Огарков,  
асп., [drivemox@mail.ru](mailto:drivemox@mail.ru),  
ЯГТУ, г. Ярославль

Рассматриваются решения по интеграции различных программных пакетов для проведения комплексных расчетов и моделирования инженерных систем зданий. Авторами были опробованы различные варианты организации интегрированного решения. Наиболее перспективными кандидатами на роль среды совместного моделирования, сейчас, по мнению авторов, являются системы на основе языка Modelica и пакет MATLAB, а наиболее функциональным и гибким является подход, использующий FMI-интерфейс, с моделями, полученными в системах Modelica, MATLAB или других, объединяемыми с помощью языка Python.

We consider solutions for the integration of various software packages for complex calculations and modeling of building engineering systems. The authors tested various variants for organizing an integrated solution. The most promising candidates for the role of a integrated modeling environment, according to the authors, are the systems based on the Modelica language and the MATLAB package, and the most functional and flexible is the approach using the FMI interface, with models obtained in the Modelica, MATLAB or other systems combined with using the Python language.

## Введение

В последнее время при проектировании зданий все шире используются концепция информационного моделирования зданий (BIM - Building Information Modeling). Использование информационных моделей в строительстве сейчас поддерживается на самом высоком уровне [1]. Проблемы сохранения окружающей среды и снижения коммунальных платежей требуют выполнения мер по энергосбережению и повышению энергетической эффективности при проектировании зданий. В то же время необходимо гарантировать комфортную и здоровую среду в помещениях. Все это создает благоприятные условия для более широкого использования моделирования энергопотребления зданий (BEM - Building Energy Modeling). Энергомоделирование в России пока является добровольным делом, если только не нужно сертифицировать здание на соответствие “зеленым” стандартам [2]. Однако, при проектировании систем отопления, вентиляции и кондиционирования (ОВК или HVAC, как их называют на западе) все равно, в том или ином виде, приходится выполнять расчеты, связанные с теплообменом, обеспечением качества воздуха в помещениях и энергосбережением. Сложность строительной инфраструктуры, связанная с множеством различных типов зданий, высокие требования к исполнению и эксплуатации инженерных сетей зданий приводят к тому, что при их проектировании необходимо обеспечить междисциплинарное взаимодействие различными системами здания для выполнения комплексных расчетов и моделирования. Это согласуется с предложенным в BIM принципом единой модели, являющимся одним из необходимых условий для выполнения всех стадий жизненного цикла здания [3].

Данные о конструкции и материалах здания из BIM, используются для проведения энергомоделирования в BEM, а построенные там модели используются при расчетах и моделировании HVAC систем. Данные о моделях и оборудовании используются при синтезе системы управления зданием, потом вместе с данными о системе управления при проектировании информационной сети здания и других систем. При этом, сейчас, большинство операций по передаче данных, как правило, осуществляются вручную, отсутствуют общепринятые форматы передачи данных между многими системами, практически отсутствуют интегрированные среды проектирования, охватывающие все системы здания, а существующие системы связаны жесткими рамками функциональных ограничений. Поэтому, можно утверждать, что в области проектирования инженерных систем зданий, вполне назрели и являются актуальными задачи создания удобных форматов и интерфейсов передачи данных между системами проектирования и разработка решений по интеграции различных программных пакетов для проведения комплексных расчетов и моделирования.

## 1. Инженерные системы зданий и пакеты для их расчета и моделирования

В настоящее время поддержанием в здании требуемых санитарно-гигиенических условий, обеспечением его безопасности и защищенности от нештатных ситуаций занимаются множество подсистем инженерного оборудования, каждая из которых характеризуется достаточно большим набором контролируемых технологических параметров и сигналов управления. Основными из них являются:

- HVAC система;
- система энергоснабжения, включая систему освещения;
- система безопасности (охранно-пожарной сигнализации, контроля доступа и видеонаблюдения);
- автоматизированная система управления здания (АСУЗ);
- информационная и телефонная сеть здания.

В совокупности, все они образуют то, что называется системой жизнеобеспечения здания. К вышеперечисленным подсистемам, сейчас все чаще добавляют системы мультимедиа, “Умный дом”, “Интернет вещей”, и перечень инженерных подсистем будет только расширяться. При проектировании таких разнородных систем, естественно, применяется и будет применяться различный теоретический и методологический аппарат, и реализующие его программные инструменты. Так, например, для расчетов и моделирования HVAC систем могут использоваться [4]:

1. специализированные пакеты для BEM, расчета и моделирования HVAC. Эти пакеты выполняют моделирование на основе системы дифференциальных и/или алгебраических уравнений, определяющих теплофизические характеристики зданий и HVAC систем, в том числе, с заданными стратегиями эксплуатации и управления. Здесь можно отметить системы Trane TRACE 700, EnergyPlus, ESP-r, IDA ICE, TRNSYS, HVACSIM+ и др.;
2. инструменты на базе общих пакетов для научных и инженерных расчетов, таких как MATLAB (библиотеки SIMBAD, HAMBASE, HAM-Tools и др.), пакетов, основанных на языке Modelica: Dymola, SimulationX, OpenModelica, JModelica и др. (библиотеки Buildings, BuildingSystems, BuildSysPro и др.);
3. специализированные пакеты для расчета HVAC систем, использующие инженерные методы, такие как Audytor OZC, Audytor C.O., Danfoss OZC, Danfoss C.O., MagiCAD Комфорт и Энергия, nanoCAD Отопление и др.

Системы из первой группы не ориентированы на применение оборудования какого-нибудь конкретного производителя и допускают определенную гибкость в организации расчетов и моделировании за счет ввода большого количества параметров и/или использования большой палитры объектов. Некоторые из них, такие как EnergyPlus, фактически представляют собой расчетный движок, для взаимодействия с которым используются дополнительные графические приложения DesignBuilder, Simergy, OpenStudio и др. Многие имеют возможность обмениваться данными с BIM системами и другими расчетными пакетами. Такие системы ориентированы на квалифицированных инженеров проектировщиков и научных работников.

Инструменты на базе общих пакетов для научных и инженерных расчетов являются наиболее универсальными и гибкими. Однако проведение расчетов и моделирования с их использованием требует от специалистов высокой квалификации. Связь таких пакетов с BIM системами, в настоящее время, только разрабатывается. Поэтому данные о конструкции здания, как правило, заносятся вручную, что значительно увеличивает трудоемкость расчетов. Поскольку такие инструменты широко распространены в академической среде, то и используют их научные работники или инженерные специалисты с академическим образованием.

Пакеты из третьей группы являются наименее гибкими и, как правило, не допускают больших отклонений от заданной расчетной схемы. Многие из таких пакетов имеют базы данных фирменного оборудования HVAC с преднастроенными параметрами. Последние версии таких пакетов имеют возможность получать данные от BIM систем. Такие пакеты достаточно легки в освоении и ориентированы на не очень сложные или типовые проекты и инженеров проектировщиков средней квалификации.

Моделирование HVAC систем, как правило, включает и моделирование систем управления инженерным оборудованием. Уровень моделирования систем управления в различных инструментах может отличаться. Системы управления могут быть представлены в виде моделей диспетчерского управления, определяющих профили отопительных и холодильных нагрузок, как например, в EnergyPlus или как модели локального управления, как в ESP-r и TRNSYS. Локальные контроллеры традиционно включают модели двух или трехпозиционных регуляторов, регуляторов с "мертвой зоной", различных типов ПИ- и ПИД-регуляторов. Более сложные и продвинутое модели контроллеров, такие как оптимальные, адаптивные, контроллеры на базе нечеткой логики, нейроконтроллеры и др., доступны только в инструментах на базе общих пакетов для научных и инженерных расчетов, таких как MATLAB, SCILAB, SimInTech, пакетах, основанных на языке Modelica (Dymola, OpenModelica, JModelica) или в инструментах, взаимодействующих с указанными пакетами (TRNSYS).

При описании функционирования систем энергоснабжения и безопасности может потребоваться аппарат дискретно-событийного, имитационного или даже агентного моделирования. Поэтому для расчетов и моделирования таких систем могут использоваться как общие пакеты для научных и инженерных расчетов, имеющие соответствующие возможности (Simulink/Stateflow в MATLAB, Modelica\_StateGraph2 в Modelica и др.), так и пакеты имитационного моделирования, такие как AnyLogic, GPSS World, Simio, PowerSim и др.

Для проектирования информационных систем традиционно используются системы с поддержкой языка UML или его расширения SysML. Моделирование информационных систем удобно разделить на моделирование компьютерных сетей и моделирование программного обеспечения. Для моделирования сетей, сетевого и компьютерного оборудования лучше использовать, не основанные на UML, специализированные пакеты, такие как Riverbed Modeler, OMNeT++, NS-3. Они уже включают примеры моделей различных сетевых протоколов и устройств. Для моделирования ПО, кроме UML-систем, могут использоваться упомянутые выше пакеты имитационного моделирования.

Из приведенного описания видно, какое разнообразие подходов и реализующих их инструментов может использоваться при расчетах и моделировании инженерных систем зданий. В этой связи, создание инструментов для комплексных расчетов и моделирования инженерных систем зданий представляется сложной и до конца трудно осуществимой задачей. Далее рассматриваются некоторые пути решения данной проблемы.

## 2. Интегрированные решения для комплексных расчетов и моделирования

Вначале сформулируем перечень основных требований, которым, на наш взгляд, должно отвечать интегрированное решение:

- охватывать проектирование всех основных подсистем инженерного оборудования здания;
- связь с BIM системами;
- связь с BEM системами или реализация функций BEM средствами решения;
- развитые математические возможности, векторно-матричные операции, решение систем дифференциальных уравнений;
- поддержка объектно-ориентированного и компонентного-ориентированного моделирования;
- возможность свободного программирования, создания новых объектов и компонентов;
- возможность дискретно-событийного и имитационного моделирования;
- графический интерфейс пользователя;
- наличие развитых средств визуализации, в том числе трехмерной;
- наличие функций оптимизации и связь с популярными решателями задач оптимизации, такими как CPLEX, GUROBI, IPOPT и др.;
- наличия функций анализа данных с использованием статистических и кибернетических методов.

Рассмотрим, какие из вышеперечисленных требований уже реализованы в существующих решениях. Сейчас предпринимаются попытки разработки единых форматов и интерфейсов передачи данных между различными сис-

темами. Так для связи с BIM системами разработаны форматы IFC (Industry Foundation Classes) [5] и gbXML (Green Building XML) [6]. Поддержка формата IFC уже стала практически стандартной функцией строительных САПР и BIM систем. IFC поддерживают такие популярные в России пакеты как AutoCAD, AutoCAD Architecture, ArchiCAD, Revit, MagiCAD, nanoCAD и многие др. Формат gbXML, по сравнению с форматом IFC, более удобен для обмена данными между строительными САПР и BIM системами с одной стороны и BEM системами, с другой, так как содержит только те данные, которые необходимы для BEM систем. Формат gbXML поддерживается меньшим числом строительных САПР и BIM систем, зато поддерживается большим числом BEM систем, среди которых Trace 700, DesignBuilder, HVAC Solution, Open Studio и др.

Форматы IFC и gbXML дают возможность организовать связку BIM+BEM, которая позволяет решить задачу моделирования микроклимата и энергопотребления здания, а также, частично или полностью решить задачу проектирования HVAC системы. Некоторые инженерные пакеты при этом идут еще дальше. Например, программный комплекс MagiCAD [7] дополнительно к BEM и HVAC позволяет проектировать системы энергоснабжения, а программный комплекс nanoCAD Инженерный BIM [8], хотя и не имеет таких развитых функций по энергомоделированию как MagiCAD, но позволяет дополнительно к HVAC системам проектировать системы энергоснабжения, системы безопасности и структурированные кабельные сети для АСУЗ и информационных систем. Можно сказать, что программный комплекс nanoCAD Инженерный BIM частично охватывает все упомянутые выше инженерные системы здания и удовлетворяет некоторым из перечисленных выше требований.

Слабым местом многих BEM систем и большинства инженерных пакетов является отсутствие возможности свободного программирования, возможности проведения дискретно-событийного и имитационного моделирования, оптимизации и продвинутого анализа данных. Это ограничивает возможности создания нетиповых или сложных проектов, где требуется расширенная математическая или алгоритмическая поддержка, функции оптимизации, прогнозирования и анализа. Поэтому назрела острая необходимость расширения связки BIM + BEM до BIM + BEM + Simulation Environment. Где в качестве среды Simulation Environment выступает один или несколько пакетов для расчетов и моделирования.

Одним из кандидатов на роль такой среды, по мнению авторов, мог бы стать пакет MATLAB. MATLAB имеет мощные математические и графические возможности, встроенный язык программирования. Библиотеки MATLAB включают функции оптимизации, статистические и кибернетические методы анализа. Среда Simulink обеспечивает компонентно-ориентированное, дискретно-событийное и имитационное моделирование. В области анализа и синтеза систем управления MATLAB вообще является общепризнанным мировым лидером. Кроме того, как уже было сказано ранее, MATLAB имеет широкое распространение в университетской и научной среде. Пакет MATLAB пока не имеет общеизвестных инструментов для непосредственного обмена данными с BIM системами, но может быть организована связь с отдельными BEM системами. Так, например, с помощью средства Building Controls Virtual Test Bed или библиотеки MLE+ можно организовать совместное моделирование MATLAB/Simulink с BEM системой EnergyPlus, и тем самым реализовать цепочку BIM + BEM + Simulation Environment. При этом решение на базе MATLAB удовлетворяет всем перечисленным ранее требованиям и может охватить практически все упомянутые выше инженерные системы здания. К примеру, в работе [9] рассматривается моделирование системы "Интеллектуальное здание" в пакете MATLAB/Simulink с использованием библиотеки Stateflow и Simscape. Недостатком такого решения является высокая стоимость коммерческих версий пакета MATLAB, недостаточная надежность существующих инструментов обмена данными с BEM системами и зависимость их от версий программных продуктов.

Значительную роль для обмена данными и выполнения совместных расчетов и моделирования могла бы сыграть организация единого общепринятого интерфейса между различными пакетами для расчетов и моделирования. Основным кандидатом на роль такого интерфейса сейчас претендует интерфейс FMI (Functional Mock-up Interface) [10]. FMI разрабатывался как независимый стандарт для обмена моделями и проведения совместного моделирования. Первая версия FMI появилась в 2010 г. В настоящее время интерфейс FMI поддерживается более 100 различными программными системами среди которых Adams, ANSYS, IBM Rational Rhapsody, MATLAB/Simulink (FMI Toolbox), NI LabVIEW, Dymola, SimulationX, MapleSim, OpenModelica, JModelica и многие др. Модели, разработанные в различных системах с помощью интерфейса FMI могут экспортироваться в FMU (Functional Mock-up Unit) модули, которые могут использоваться другими системами для обмена моделями или совместного моделирования.

Среди наиболее перспективных проектов по созданию интегрированных решений, использующих интерфейс FMI, следует особо отметить проект Annex 60 [11] и его наследника, проект BPSA Project 1 [12]. Целью данных проектов является создание свободно-доступных программных продуктов для проведения энергомоделирования и совместного моделирования различных систем на основе использования форматов IFC, CytyGML, интерфейса FMI и языка Modelica. В результате выполнения проекта Annex 60 была разработана одноименная библиотека для Modelica (сейчас она переросла в библиотеку IBPSA), которая стала ядром для ряда других Modelica библиотек, поддерживаемых разными сообществами разработчиков. Эти библиотеки позволяют производить энергомоделирование и моделирование оборудования HVAC систем совместно с системами управления. Для передачи данных от BIM систем к энергомоделям в Modelica в рамках проекта Annex 60 используется промежуточный формат SimModel, который позволяет трансформировать данные из формата IFC в данные доступные Modelica.

Другой ключевой идеей, предложенной в проекте Annex 60 является использование языка Python для расширения возможностей и автоматизации процесса моделирования. В рамках этой идеи процесс проектирования инженерных систем рассматривается как некий сложный бизнес-процесс, требующий автоматизации. В качестве основного средства автоматизации предлагается использовать язык Python и инструменты, разработанные для этого языка. Язык Python сегодня является одним из наиболее перспективных языков программирования в области работы со встраиваемыми устройствами, математических расчетов, машинного обучения, искусственного интеллекта и многих других. Для Python разработано большое количество библиотек. Так PyFMI дает возможность работать с FMU блоками, библиотеки SciPy, NumPy, Pandas, StatsModel организовать сложные математические вычисления с функциями оптимизации и анализа, matplotlib визуализировать результаты и т.д. Python имеет интерфейс с такими Modelica системами как Dymola (BuildingsPy), OpenModelica (OMPpython), а JModelica полностью построена на использовании FMU блоков совместно с Python.

Наработки проектов Annex 60 и BPSA Project 1 открывают перспективные пути реализации цепочки BIM + BEM + Simulation Environment. Но многие из них еще не реализованы полностью, не отработаны на практике и требуют усилий разработчиков для своего воплощения. Авторами были опробованы различные варианты организации интегри-

рованного решения с использованием систем Modelica, FMU блоков и языка Python. Такая работа усложняется тем, что версии программных пакетов, библиотек, спецификаций форматов и интерфейсов постоянно меняются, появляются новые инструменты и библиотеки. Учитывая сказанное, авторами рассматривалось два основных варианта реализации интегрированного решения.

Первый вариант предполагает построение комплексной модели внутри интегрированной графической среды системы Dymola или OpenModelica. При этом возможности модели могут расширяться за счет импорта FMU блоков, полученных в других пакетах моделирования. Схема информационного взаимодействия между отдельными компонентами интегрированного решения для данного варианта показана на рисунке. Например, модель информационной системы, разработанная в среде IBM Rational Rhapsody на языке SysML может быть экспортирована в FMU блок, а затем добавлена к Modelica модели. Альтернативным способом подключения информационных моделей на языке SysML к моделям в Modelica является использование инструмента ModelicaML среды OpenModelica. Так как среда OpenModelica является свободно-доступной, то в случае ее использования мы получаем полностью свободно-доступное интегрированное решение. Однако, следует учитывать, что, например, библиотеки созданные в рамках проекта Annex 60 ориентированы на коммерческую среду Dymola и не полностью поддерживаются в OpenModelica. Возможности такого варианта интегрированного решения практически совпадают с возможностями решения на базе MATLAB.

Второй вариант реализации не требует наличия интегрированной графической среды. Здесь модель полностью строится из FMU блоков, а структура модели и связи между блоками определяется программой на языке Python (как в пакете JModelica). Для просмотра и редактирования параметров FMU блоков и вывода результатов моделирования могут использоваться графические инструменты. Этот вариант также дает полностью свободно-доступное интегрированное решение, открывает перед проектировщиками очень широкие возможности, позволяет удовлетворить всем перечисленным ранее требованиям, и может охватить все упомянутые выше инженерные системы здания. Однако требует от проектировщиков совместной работы с разработчиками, имеющими хорошие знания языка Python.

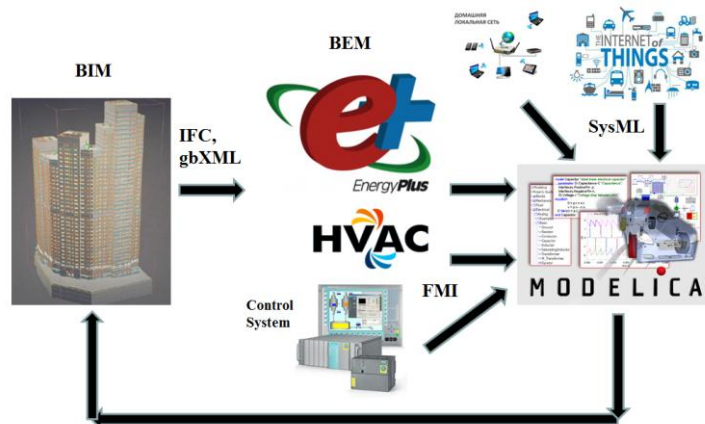


рис. Схема информационного взаимодействия между компонентами интегрированного решения

Таким образом, авторами проведен анализ существующих подходов, средств обеспечения интеграции и проведения совместного моделирования систем при проектировании инженерных систем зданий. Наиболее перспективными кандидатами на роль среды совместного моделирования, сейчас, по мнению авторов, являются системы на основе языка Modelica и пакет MATLAB. При этом наиболее функциональным и гибким является подход, использующий FMI-интерфейс, с моделями, полученными в системах Modelica, MATLAB или других, объединяемыми с помощью языка Python.

## Литература

1. Власти приказали ввести BIM за три года [Электронный ресурс]. URL: <https://ok-inform.ru/stroitelstvo/company/80065-vlasti-prikazali-vvesti-bim-za-tri-goda.html>.
2. Герасимов Н.А. Моделирование энергопотребления зданий - краеугольный камень зеленого проектирования для инженеров. Энергосбережение, № 4, 2014. – с. 28 – 33.
3. Талапов В. Жизненный цикл здания и его связь с внедрением технологии BIM [Электронный ресурс]. URL: <https://ardexpert.ru/article/8445>
4. Марьясин О.Ю., Колодкина А.С. Пакеты компьютерного моделирования HVAC систем и энергопотребления зданий. Математика и естественные науки. Теория и практика: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 11. - Ярославль: Издат. дом. ЯГТУ, 2016. – с. 306 – 315.
5. IFC - Industry Foundation Classes [Электронный ресурс]. URL: [http://www.ifcwiki.org/index.php?title=IFC\\_Wiki](http://www.ifcwiki.org/index.php?title=IFC_Wiki)
6. Green Building XML [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gbxml.org/index.html>
7. MagiCAD [Электронный ресурс]. URL: <https://www.magicad.com/ru>
8. NanoCAD [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nanocad.ru/>
9. Марьясин О.Ю., Колодкина А.С., Огарков А.А. Компьютерное моделирование "Интеллектуального здания". Моделирование и анализ информационных систем. Т. 23, № 4 (64), 2016. – с. 427 – 439.
10. Functional Mock-up Interface [Электронный ресурс]. URL: <http://fmi-standard.org/>
11. IEA EBC Annex 60 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.iea-annex60.org/index.html>
12. IBPSA Project 1 BIM/GIS and Modelica Framework for building and community energy system design and operation [Электронный ресурс]. URL: <https://ibpsa.github.io/project1/index.html>