

Р. Д. Еникеев, А. А. Черноусов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ ПАКЕТА ПРОГРАММ ДЛЯ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Приведены требования и описание архитектуры пакета прикладных программ для численного моделирования сложных технических объектов энергомашиностроения по многодисциплинарным моделям с поддержкой параметрического синтеза. Обсуждается состав, взаимосвязь между компонентами пакета и другие проектировочные решения. *Тепловые двигатели; системы управления; проектирование; пакеты прикладных программ; имитационное моделирование; параметрический синтез*

ВВЕДЕНИЕ

Современные энергетические установки (ЭУ) – сложные технические объекты (СТО), они характеризуются высокими значениями как удельных показателей, так и не менее важных экономических, экологических показателей, надежности, ресурса и др.

При высоких требованиях к показателям СТО удачные конструкции – результат компромиссных решений как по структуре, так и по значениям конструктивных параметров изделия, определяемых в ходе дорогостоящих, трудоемких, длительных и итерационных процессов проектирования и доводки, в ходе которых достигается структурная и параметрическая оптимизация СТО. Успех в создании конкурентоспособных изделий в относительно сжатые сроки определяется применением отработанных методологий проектирования, где существенную роль играют расчетные методики и средства численного моделирования работы СТО, в первую очередь – развитые специализированные пакеты прикладных программ (ППП) для инженерного анализа и другое информационное обеспечение.

Расчетное прогнозирование показателей СТО (решение прямой задачи) требует достаточно полного математического обеспечения в виде реализованных в ППП предметно-ориентированных моделей физико-химических процессов, а также моделей алгоритмов работы элементов систем автоматического управления (САУ). Последнее актуально, поскольку в немалой степени резервы конструкции раскрываются под управлением САУ, реализующей опти-

мальные алгоритмы управления, особенно в неустановившихся режимах.

Помимо *анализа* функционирования СТО, расчетные инструменты должны обеспечивать автоматизированное решение задач структурного и параметрического *синтеза* описаний изделий, оптимально соответствующих техническому заданию (ТЗ) на проектирование. В идеале, расчетной оптимизацией – решением обратной задачи в наиболее общей многопараметрической и многодисциплинарной постановке – должна достигаться цель проектирования.

Создание отвечающего таким требованиям ППП и сопутствующего информационного и методического обеспечения – масштабный проект, требующий тщательной проработки, начиная с проектирования архитектуры ППП с учетом предъявляемых требований.

Специализированные ППП класса систем имитационного моделирования (СИМ) для численного анализа и синтеза СТО могут разрабатываться силами отдельных научных коллективов (школ) и находить промышленное применение. При успешном развитии подобного ППП формируется *среда*, аккумулирующая результаты (в форме, готовой к повторному использованию) фундаментальных и прикладных НИР – опыт, знания, модели, методики и приемы выполнения расчетных и экспериментальных работ в определенной области техники.

На кафедре ДВС УГАТУ в 2009–2011 гг. выполнены НИР [5], в ходе которых создан ППП ALLBEA, на основе глубокой модернизации программного обеспечения, входившего в состав СИМ «Альбея». В статье рассмотрены задачи и требования к ППП, моделирующим процессы в СТО, и принятые с их учетом решения по общей архитектуре ППП ALLBEA и ряду аспектов его реализации.

Контактная информация: 8(347)273-05-53

Работа выполнена в рамках НИР по госконтракту № 02.740.11.0073 от 15 июня 2009 г.

ТРЕБОВАНИЯ К СОВРЕМЕННЫМ ПАКЕТАМ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ

Методологии проектирования ЭУ на базе тепловых двигателей с применением расчетного анализа и синтеза используются как инжиниринговыми фирмами, так и производителями. Пример – корпорация AVL List GmbH [6], которая предлагает собственный набор ППП для инженерного анализа различных аспектов работы ДВС, в том числе в составе ЭУ и транспортных средств (пакеты BOOST, HYDSYM, EXCITE, CRUISE и др.), и использует эти и другие программные средства в разработках ДВС и ЭУ, проводимых по собственной методологии. Сопоставимые по возможностям ППП, ориентированные на моделирование процессов в ЭУ на базе ДВС, разрабатываются также компаниями GammaTech [7] и Ricardo [8].

Современные программные средства – ППП, сочетающие развитое математическое обеспечение со средствами информационной поддержки проектирования, создавались десятилетиями и в тесной увязке с нуждами проектировщиков. В этих условиях – если речь идет о коллективах масштаба кафедр технических вузов или отделов НИИ – создание собственных ППП (конкурирующих с имеющимися на рынке) во всяком случае, не должно быть самоцелью. Такой ППП (а также сопутствующее методологическое и информационное обеспечение) видятся нам как закономерные результаты планомерных фундаментальных и прикладных НИР. Разработка ППП оправдана, если в нем реализуется среда для применения результатов выполненных НИР – в первую очередь апробированные модели и методики расчетно-экспериментальных работ в определенной области техники. Планомерная работа, нацеленная на развитие ППП, способствует росту кадрового потенциала.

Отказ же (в масштабах организаций) от такого развития и ориентация только на применение ППП от иностранных компаний чреваты снижением уровня отечественных разработок в области САПР и инженерного анализа, и как следствие – снижение кадрового потенциала. Проведение НИР по заказам тех же компаний также по существу способствует закреплению зависимости РФ от зарубежных поставщиков программного обеспечения и исследовательской аппаратуры.

Предпосылками успеха разработки собственного ППП в избранной технической области

являются, по нашему мнению: (а) специализация, (б) «задел» в форме реализованных и подкрепленных информационным обеспечением (как минимум – хорошо документированных) моделей и методик, (в) «школа» – коллектив специалистов, способный развивать этот задел, а также (г) потребность со стороны промышленности в проведении прикладных НИР в ходе проектировочных и доводочных работ.

Выбор при разработке ППП удачных проектировочных решений, языковых средств и инструментария, хорошая внутренняя документированность – наличие описаний деталей реализации, интерфейсов, собственно моделей, а также привлечение к работе (хотя бы одного) профессионального программиста, ответственного за архитектуру и интеграцию – минимально необходимые условия успешного ведения подобных проектов.

При таких условиях специальные ППП класса *систем имитационного моделирования* (СИМ) для численного анализа и синтеза СТО успешно разрабатываются силами отдельных научных коллективов и находят промышленное применение.

Примеры ППП в области объектов энергомашиностроения, разработанных в УГАТУ – СИМ DVIGwp [1, 2] (кафедра АД), а также СИМ «Альбея» [3] и СИМ Horsepower Lab [4] (кафедра ДВС).

ПРИМЕР ТИПИЧНОЙ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА

Решаемые с применением современных ППП задачи – не только расчетный *анализ* функционирования СТО, но и *синтез* (расчетный или расчетно-экспериментальный) описания изделия, которое оптимально соответствует выданному ТЗ. При многосторонности требований к изделиям требуется возможность расчета многих аспектов процессов – по моделям разнородных физических процессов, а также алгоритмов САУ – для синтеза оптимальных СТО и алгоритмов управления.

Поясним сказанное примером типичной задачи синтеза СТО в области энергомашиностроения. Пусть моделируемая система представлена совокупностью моделей

- энергетической установки (ЭУ);
- потребителя;
- САУ (при той или иной степени детализации в каждой из подсистем).

В конкретном случае потребителем механической энергии ЭУ может быть транспортное средство (ТС), описываемое моделью, учитывающей дорожные условия, а ЭУ может быть («классической» или гибридной) силовой установкой на базе ДВС. Постановка задачи параметрического синтеза потребует оптимизационного подбора конкретного массива параметров каждой из указанных «подсистем» СТО (для каждой заданной структуры модели) – как параметров алгоритмов и программ САУ, так и конструктивных параметров ЭУ как объекта управления. Разноплановые расчетные показатели СТО должны учитываться при вычислении *целевой функции* (ЦФ).

Основа моделирования процессов в СТО – расчет нестационарных процессов в подсистемах с адекватным разрешением по времени. Так, термогазодинамический аспект работы ДВС должен в ряде случаев моделироваться с шагом, много меньшим, чем период рабочего цикла. При этом в работе систем ДВС и ЭУ (от системы охлаждения до системы управления) могут быть важны процессы, характерные времена которых отличаются на порядки. Тогда приемлемая эффективность расчетов (но не в ущерб их достоверности) может достигаться, если расчетная программа позволяет привлекать для разных элементов и подсистем СТО как динамические модели элементов на основе систем ОДУ или уравнений в частных производных (УЧП), так и модели, адекватные в приближениях о несоизмеримости характерных времен – от моделей дискретных событий до моделей квазиравновесных процессов (состояний).

Задача совместного синтеза параметров ЭУ и САУ в составе ТС в типичном случае ставится для условий прохождения ездового цикла (ЕЦ). Тогда модель САУ должна включать *математическую модель водителя* – для имитации воздействия обученного оператора на органы управления ТС. Показателями для расчета ЦФ могут быть: расход топлива, эмиссия токсичных компонентов и шума в одном или нескольких «представительных» ЕЦ и т. д.

Нарушение ограничений или наступление нежелательных событий в рассчитываемом процессе (выход скорости ТС за пределы допуска в «карте» ЕЦ, перегрев или остановка двигателя, предельный разряд батареи – для гибридной силовой установки ТС и т. п.) могут отслеживаться и автоматически исключаться в процессе оптимизации.

Заметим, что алгоритм САУ может не предполагать измерений величин и/или воздействий на объект управления на малых (по сравнению, например, с длительностью цикла ДВС) временных масштабах. Тем самым может быть неоправданным применение, например, модели газообмена и рабочего процесса ДВС на основе систем ОДУ и УЧП. Намного практичнее окажется огрубленная «квазистатическая» модель ДВС, полученная из стендовых испытаний двигателя или его прототипа. В других случаях применимы как раз более детальные модели элементов СТО, здесь – модели газообмена и рабочего процесса, динамики и потерь на трение в ДВС и модели др. процессов, в основе которых – системы ОДУ и УЧП. Отсюда существенное требование к математическому обеспечению и архитектуре ППП – наличие моделей разного уровня детализации и «прозрачное» их применение в расчетной программе. В ней должен быть реализован корректный и эффективный алгоритм «сквозного» расчета динамики процессов в СТО по совокупности динамических, квазистатических и «событийных» моделей элементов.

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ППП

Сформулируем основные требования, которым, по нашему мнению, должен соответствовать современный ППП – инструмент решения прямых и обратных задач моделирования процессов в СТО в рамках методологий проектирования изделий энергомашиностроения.

1. Развитость математического обеспечения, понимаемая нами как укомплектованность ППП встроенными реализациями моделей базовых и типовых структурных элементов СТО – моделей (а) разных аспектов физических процессов и (б) разной степени детализации – моделей термогазодинамических процессов в проточной части тепловых двигателей и в их системах: моделей динамических, электрических и магнитных и др. процессов в элементах соответствующих систем, а также моделей блоков (элементарных алгоритмов) САУ.

2. Расширяемость математического обеспечения – не только возможность, но простота и удобство расширения (как разработчиками ППП, так и пользователями) набора физических аспектов и наборов моделей в выбранном аспекте; особенно важно представление возможностей пользователям:

- создавать (без программирования) «составные» модели элементов СТО на «элемент-

ной базе» встроенных моделей и манипулировать ими как полноценными моделями;

- подключать программно реализованные «пользовательские» модели – от вспомогательных (привлекаемых для «замыкания» встроенных моделей) до моделей элементов и целых библиотек таких моделей, оформленных по стандарту на интерфейс прикладного программирования ППП и применять эти пользовательские модели наряду со встроенными.

3. Поддержка решения обратных задач – применимость внешних (или встроенная поддержка) средств решения задач *структурной* и *параметрической* оптимизации (включая *параметрическую идентификацию* (ПИ) самих моделей, и возможность встраивания компонентов ППП в методологии «полунатурного моделирования»); в идеале – наличие простых в применении, мощных и универсальных встроенных средств автоматизированного *структурного* и *параметрического синтеза* оптимальных СТО.

Обратные задачи в проектировании СТО – многопараметрические (и, вообще говоря, «многодисциплинарные») задачи глобальной оптимизации. Как правило, многопараметрическая глобальная оптимизация СТО осуществима практически только по быстросчетным моделям. Такие модели выводятся из огрубляющих допущений о пространственных распределениях полей характеристик физических систем. Достоверность расчетов по таким моделям зачастую недостаточна для практических целей, даже при условии, что эмпирические характеристики элементов СТО получают по методикам, адекватным исходным гипотезам моделей. Необходима коррекция результатов, что рационально осуществлять путем ПИ модели по выборкам экспериментальных данных параметризацией замыкающих соотношений модели.

Заметим, что задача ПИ ставится и решается также как обратная (оптимизационная) с помощью средств для решения таких задач.

4. Эффективность в применении ППП для численного решения как прямых, так и обратных задач динамики процессов в СТО по моделям, «набранным» из разноаспектных и различных по степени детализации моделей элементов систем – комплексное свойство, достигаемое:

- применением эффективных (экономичных и высокого порядка) алгоритмов, дающих численное решение (вообще говоря, эволюционной) прямой задачи, быстро сходящееся

к точному решению при уменьшении параметра дискретизации – шага по времени Δt ;

- использованием также эффективных алгоритмов оптимизации, обеспечивающих быструю сходимость к решениям обратных задач;

- утилизацией («прозрачным» для пользователя способом) вычислительных мощностей многопроцессорных ЭВМ для вычислений в «распределенном» режиме, актуальных при проведении массовых расчетов (как правило, необходимых для решения оптимизационных задач);

- включением в ППП прочих средств, автоматизирующих все прочие аспекты «технологического процесса» моделирования.

Поддержка в ППП автоматизированного решения задач параметрического (и, желательно, также структурного) синтеза, а также эффективность решения прямой (и автоматизация решения обратной) задач по быстросчетным моделям важны, так как циклы идентификации и применения моделей СТО сокращаются настолько, что расчетно-экспериментальные работы возможны в режиме «полунатурного моделирования».

5. Универсальность и гибкость в применении, понимаемая нами как возможности:

- применять ППП в разных предметных областях;

- встраивать ППП в «пользовательские» методологии проектирования, вплоть до возможности работы ППП в тесном взаимодействии с CAE/CAD/CALS/PDM-системами способами, не обязательно предусмотренными разработчиками ППП.

6. Документированность, понимаемая как поддержка в актуальном состоянии (частично доступных пользователям в форме руководств, методических рекомендаций и др. учебных материалов) описаний:

- моделей и особенностей их реализации;
- приемов и примеров применения ППП;
- (в форме «внутренних» технических и функциональных спецификаций) архитектуры и компонентов ППП и методологии разработки.

7. Платформонезависимость («переносимость») – возможность построения ППП (без изменений исходных текстов) при идентичных функциональных возможностях для распространенных программно-аппаратных платформ, как минимум – для ПЭВМ под управлением 32-

и 64-разрядных версий операционных систем Windows и Linux.

Учет перечисленных требований на этапе проработки архитектуры ППП – при определении состава пакета, функционала и реализации его компонентов, способов их взаимодействия между собой и с внешними программными инструментами – необходимое условие того, что ППП и сопутствующее информационное обеспечение найдет промышленное применение.

ПРЕДЫСТОРИЯ РАЗРАБОТКИ

СИМ процессов в ДВС «Альбея», разработанная концептуально в начале 1990-х гг. на кафедре ДВС УГАТУ, нуждалась в коренной модернизации. СИМ «Альбея» в текущем состоянии полноценно поддерживает лишь термогазодинамический и динамический аспекты работы ЭУ, при весьма ограниченной поддержке расчета переходных процессов в ДВС. Она также плохо адаптируется к автоматизированному проведению массовых расчетов и решению обратных задач. Интегрированные с «Альбеей» математические модели для термодинамического аспекта ограничены специфичными лишь для предметной области ДВС элементами (модель ЦИЛИНДР процессов в рабочей камере ДВС и др.); в аспекте динамики реализованы также специфические модели кинематики и динамики ДВС, дополненные соответствующими моделями трения и изнашивания. Нарботки в области моделирования нестационарной и стационарной гидродинамики двухфазных сред (с несущей жидкой фазой) не интегрированы в СИМ «Альбея» [3] вплоть до сегодняшнего дня. Имеющиеся модели алгоритмов САУ были положены в основу самостоятельной СИМ «Альбея-УТС», никак не приспособленной к работе в едином комплексе с моделями физических процессов в ДВС и ЭУ.

В то же время на кафедре ДВС в 1-м десятилетии XXI века создавались прототипы ППП, призванного отвечать современным требованиям, отрабатывались отдельные критические компоненты ПО. Так, на опыте реализации СИМ Horsepower Lab [4] опробованы проекторочные решения, рационализированные модели «термогазодинамического» аспекта работы ДВС и методы их численной реализации, методы ПИ моделей и решения задач синтеза СТО.

Таким образом, при существенных наработках в области математического и методического обеспечения, имелись необходимость и возможность перепроектирования «с чистого лис-

та» ППП, начиная с его архитектуры – с учетом потребности в решении обсуждавшегося выше круга задач и перечисленных выше требований.

Разработка нового ППП ALLBEA выполнена в рамках госбюджетных НИР [5] в основном сотрудниками, аспирантами и студентами кафедры ДВС УГАТУ.

СОСТАВ И АРХИТЕКТУРА ALLBEA

ППП ALLBEA спроектирован с учетом перечисленных выше требований, с применением стандартного подхода, при котором основные программные компоненты ППП – расчетная программа (решатель, «солвер»), а также программа, предоставляющая графический интерфейс с пользователем (ГИП), реализуются как отдельные программы на основе единого предметно-независимого «ядра» ППП, инвариантного к предметной области. Прочие аспекты и «специфика» моделирования физических процессов в конкретных технических устройствах и поддержка разных постановок задач при этом выносятся в область прикладного математического обеспечения (МО), разделенную дополнительно по признаку физического аспекта, и далее – в область специализированных программ, поставляемые в составе ППП.

Данный подход позволяет естественно абстрагировать модули МО от особенностей реализации ППП в целом, а «ядро» – как от особенностей вычислений в модулях МО, так и от особенностей представления исходных данных и интерфейсов к ним. Это диктует необходимость в промежуточном «слое» «оберточных» модулей и стандартизации интерфейсов, предоставляемых модулями ПО некоторого уровня модулям «верхнего» уровня.

Последнее из списка требований к ППП – переносимость (т. е. идентичность функциональных возможностей, предоставляемых программами ППП на различных программно-аппаратных платформах). Переносимость ППП ALLBEA (всех программных модулей всех основных и вспомогательных компонентов) обеспечена *на уровне исходных текстов* – т. е. для компиляции и сборки объектного кода в исполняемые файлы для поддерживаемых платформ не нужно вносить изменения в исходный код модулей. С этой целью для разработки выбраны языки программирования (ЯП) C и C++ (с их стандартными библиотеками), а также переносимая библиотека классов C++ wxWidgets [9] (см. далее). ЯП C и C++ превосходно стандартизованы и реализованы в инструментах для раз-

работки под основные (поддерживаемые ППП) программные платформы – семейства операционных систем (ОС) Windows и Linux для современных ПЭВМ с 32- и 64-разрядной архитектурой. Возможность построения и работы компонентов ППП на поддерживаемых платформах периодически тестируется.

Состав пакета программ ППП ALLBEA, разработанного с применением описанного подхода к проектированию, схематически показан на рисунке. В состав ППП ALLBEA входит ядро, построенное как иерархия классов C++, помещенное во внутреннюю для проекта ППП библиотеку классов *albea-core*. На ней основаны оба главных компонента ППП – солвер *albea-solver* и программа *albea-ui*, предоставляющая ГИП. Солвер рассчитан на эффективное выполнение основной задачи – численного решения эволюционной задачи по встроенным и пользовательским моделям для заданного набора исходных данных, что не исключает его встраивания в произвольно организованный вычислительный процесс. Программа ГИП реализуется как редактор структуры и данных модели и «центр управления» решением прямых, а также (в перспективе) и обратных задач.

Указанные два программные компонента используют также библиотеку классов *albea-widgets* и программный код модулей данных и расчетных модулей, реализующих *модели* и *численные методы* прикладных библиотек.

Разработка последних ведется в рамках отдельных проектов; в настоящее время поддерживается следующий набор прикладных библиотек моделей разных физических аспектов:

- *mech* – «динамика и трибология» (элементарная динамика, кинематика и динамика ДВС, модели трения и изнашивания);
- *gasdyn* – «термогазодинамика» (нестационарные процессы газообмена и процессы в рабочих камерах ДВС);
- *hyddyn* – «гидродинамика» (нестационарные и стационарные течения двухфазных жидкостей по трубопроводам);
- *control* – «управление» (модели специфических элементов систем управления техническими системами) и алгоритмы;
- *nvh* – «акустика» (модели «акустических» процессов в технических системах: шума и вибраций).

В отдельную библиотеку (*model*) выделена совокупность простых математических моделей, используемых в основном для моделирования потоков данных в алгоритмах систем управления. Модули математического обеспечения реализуют модели трех стандартных для ППП разновидностей – модели *компонентов*, модели *коннекторов* (связей) и вспомогательные модели (*функциональные блоки*).

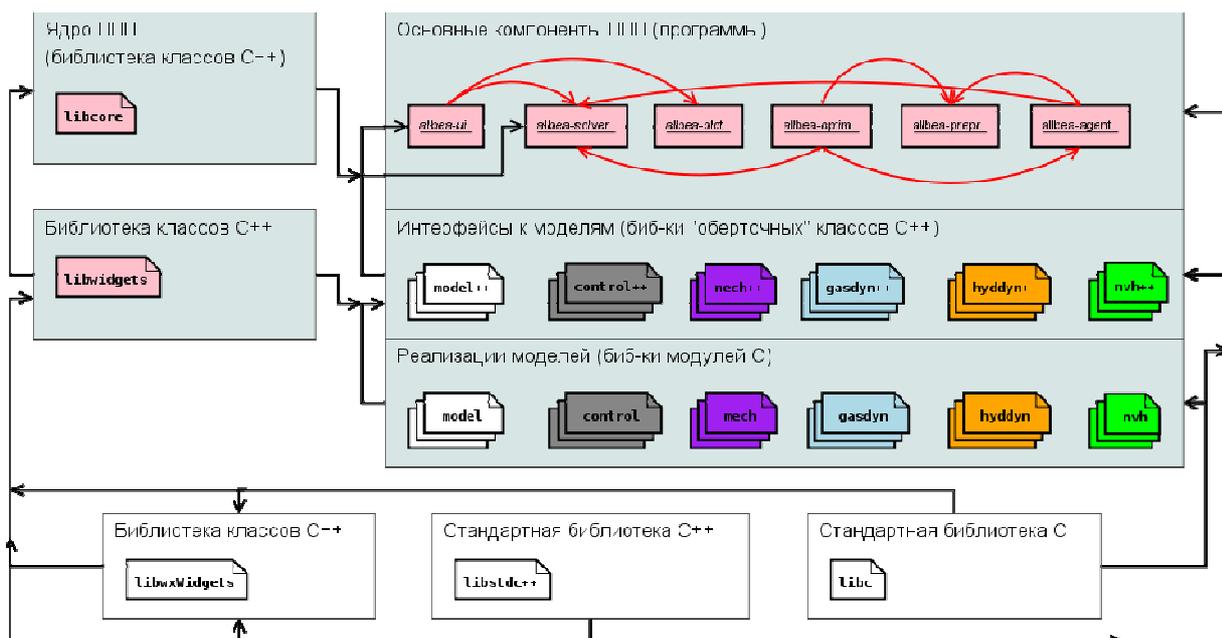


Рис. Основные компоненты ППП ALLBEA и их взаимосвязи

Для разработки модулей математического обеспечения ППП принят ЯП С, чем обеспечивается переносимость, простота и ясность в сочетании с высокой эффективностью исполняемого кода. Разработка ядра ППП и «интерфейсных» (между ядром и МО) модулей ведется на ЯП С++, обеспечивающем выразительность, переносимость, совместимость с ЯП С по базовым типам данных и поддержку парадигмы объектно-ориентированного программирования. «Высокоуровневые» средства (в частности, построение элементов ГИП) в ППП реализуются на основе переносимой (реализованной также на С++) библиотеки классов wxWidgets, исходный код которой открыт, а лицензия [9] позволяет применять ее в проектах с закрытым исходным кодом без отчислений.

В солвере решение эволюционных задач с начальными данными реализовано методом Эйлера второго порядка аппроксимации по времени. При его применении за один расчетный шаг происходит двукратное обращение к процедурам вычисления потоков сохраняющихся величин по моделям *коннекторов*, с последующим обновлением (предварительным или окончательным) этих и других зависимых переменных задачи в процедурах, реализующих модели *компонентов*.

Результирующий «сквозной» расчет по совокупности моделей элементов, образующих структурную схему («сборку») модели СТО обеспечивает:

- глобальную консервативность расчетного алгоритма – соблюдение разностных аналогов законов сохранения (в духе «методов конечных объемов»);
- квадратичную зависимость отклонений численных решений от точных решений эволюционных задач от шага Δt по времени.

Расчетные процедуры специального вида (модель события, квазистатическая модель, модель с участием «жестких» ОДУ) планируются к реализации в следующей версии солвера.

Прочие показанные на рисунке компоненты разработанного ППП нужны для специальных задач. Так, *albea-plot* служит для отображения численных решений, прочие же программы задействованы в решении обратных (оптимизационных) задач: программа *albea-optim* (в которой реализован универсальный генетический алгоритм) управляет процессом оптимизации, в том числе – в распределенном режиме вычислений, *albea-agent* – оболочка для запуска расчетных задач на многопроцессорных ЭВМ, а *albea-prepr*

применяется как фильтр («препроцессор») текстовых данных при параметризации расчетной задачи.

Моделирование с применением ППП ALLBEA строится на основе файла *проекта* (с описанием структуры и данных модели и настроек расчетного проекта ППП). Файл проекта ППП ALLBEA – форматированный в XML текстовый файл. Прочие файлы проекта размещаются в том же каталоге, что и главный файл. Это сделано для обратной совместимости – структура и данные моделей прежних версий ППП должны разумным образом импортироваться в программу ГИП ППП, редактироваться там до соответствия текущей версии и использоваться солвером для расчета.

В дистрибутив ППП ALLBEA могут входить программные инструменты, разрабатываемые в рамках самостоятельных программных проектов для применения как совместно с ППП, так и независимо от него; на рисунке они не показаны. Подключаемые к ППП инструменты служат для подготовки данных для расчетов, реализуя в основном методики обработки результатов натуральных или вычислительных экспериментов.

МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ

Помимо архитектуры и реализации базовых моделей всех заявленных аспектов, к настоящему времени отлажена *методология разработки* ППП, нацеленная на эффективную распределенную реализацию прикладных моделей, их тестирование и корректную интеграцию с ППП.

1. Прикладные модули ППП ALLBEA, их тесты и интерфейсы разрабатываются специалистами в соответствующих областях и, как правило, без доступа к исходному коду *ядра*, *программ пакета* и других *библиотек моделей*. Реализованная технология динамического подключения библиотек моделей обеспечивает полный цикл разработки прикладного ПО для ППП ALLBEA как специалистами, так и пользователями.

2. Разработка прикладных модулей на ЯП С, реализующих модели, а также «интерфейсных» классов С++ ведется параллельно с разработкой тестовых модулей и их документированием.

3. Исходный код программных модулей, тестовых модулей и документации хранится под управлением системы контроля версий исход-

ного кода в единой базе и может быть загружен и оттранслирован одной командой.

4. Интеграция прикладных модулей с ППП производится централизованно лицом, ответственным за интеграцию, а также разработку, построение и тестирование ППП ALLBEA в целом.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В период с 2009 г. по 2011 г. с применением описанных подходов пакет прикладных программ ALLBEA [5] в основном был реализован как в части архитектуры, так и в части базовых наборов прикладных моделей. Так, разработаны и описаны в документации:

- ядро ППП (реализованное в виде библиотеки классов C++);
- главные программные компоненты ППП, построенные на данном ядре – расчетная программа (солвер) и программа для редактирования исходных данных и управления расчетами;
- вспомогательные компоненты ППП – программы для параметризации данных, оптимизации, проведения распределенных вычислений и визуализации результатов;
- программные интерфейсы и др. аспекты оформления расчетных модулей;
- ряд моделей элементов СТО для всех показанных на рисунке аспектов, а также интерфейсов к их исходным данным – в виде библиотек модулей и классов (на C и C++).

Главные и вспомогательные программные компоненты ППП и его математическое обеспечение – модели элементов СТО базовых разновидностей прошли тестирование.

С применением компонентов ППП решались практические задачи параметрической идентификации моделей и синтеза оптимальных конструкций [5]. Однако прикладного и методологического багажа ППП недостаточно для успешного решения произвольных задач синтеза оптимальных СТО в области энергомашиностроения. Необходимо расширять номенклатуру моделей и накапливать опыт решения прямых и обратных задач по технологии расчетного синтеза, с упором на описание работы алгоритмов САУ по моделям, описывающим работу цифровых, и аналоговых устройств, включая датчики и исполнительные механизмы САУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ППП ALLBEA, разработанный на базе описанных архитектурных решений, в принципе позволяет решать широкий круг проектно-проводочных задач в области энергомашиностроения, включая синтез оптимальных конструктивных параметров изделий и параметров САУ и сопровождение расчетных работ в режиме «полунатурного» моделирования.

Принятая архитектура ППП обеспечивает «точки роста», необходимые для совершенствования в перечисленных ниже направлениях.

1. Расширение номенклатуры и доработка имеющихся моделей разных аспектов физических процессов: тепловые сети, электромагнетизм и др.

2. Поддержка эффективного «сквозного» счета по ОДУ и УЧП динамики элементов СТО с отличающимися на порядки характерными временами посредством:

- модели событий;
- квазистатических моделей;
- методов решения «жестких» ОДУ и т. п.

3. Поддержка операций с частью структурной схемы модели как единым целым – для создания и повторного применения в качестве моделей «составного» элемента СТО.

4. Разработка программного интерфейса, облегчающего параметризацию моделей элементов СТО.

5. Поддержка *структурного* синтеза в дополнение к синтезу *параметрическому*.

В 2012 г. планируется начать применение ППП ALLBEA в фундаментальных и прикладных НИР в качестве штатного инструмента расчетного анализа и синтеза СТО, а также внедрение ППП в учебный процесс кафедры ДВС. Дальнейшая работа по расширению математического обеспечения ППП и отладке его компонентов может диктоваться потребностями выполняемых расчетных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахмедзянов Д. А., Кривошеев И. А., Власова Е. С. Система термогазодинамического моделирования газотурбинных двигателей на переходных режимах работы DVIGwp: свид-во № 2004610868. М.: Роспатент, 2004.
2. Кривошеев И. А., Ахмедзянов Д. А., Кишалов А. Е. Имитационное моделирование работы авиационных ГТД с элементами систем управления // Вестник УГАТУ. 2008. Т. 11, № 2 (29). С. 3–11.

3. Система имитационного моделирования «Альбея» (ядро). Руководство пользователя. Руководство программиста: учеб. пособие / В. Г. Горбачев [и др.]; Уфимск. гос. авиац. техн. университет. Уфа: УГАТУ, 1995. 112 с.

4. **Черноусов А. А.** Программа для численного моделирования процессов в газоздушных трактах двигателей внутреннего сгорания Horsepower Lab 1D: свид-во № 2010613235. М.: Роспатент, 2010.

5. Методология моделирования процессов в раб. камере и системах ДВС, нацеленная на решение задач параметрического анализа и синтеза двигателей. Этап 6: Разработка документации пакета: Отчет о НИР (заключительный) / Р. Д. Еникеев [и др.]. Уфа: УГАТУ, 2011. 383 с.

6. Корпорация AVL List GmbH [Электронный ресурс] (<http://www.avl.com>).

7. Компания Gamma Technologies, Inc. [Электронный ресурс] (<http://www.gtisoft.com>).

8. Компания Ricardo [Электронный ресурс] (<http://www.ricardo.com>).

9. WxWidgets Library License. [Электронный ресурс] (<http://www.wxwidgets.org/about/licence3.txt>).

ОБ АВТОРАХ

Еникеев Рустэм Далилович, зав. каф. ДВС. Дипл. инженер-механик по ДВС (УАИ, 1981). Канд. техн. наук по тепл. двигателям (УАИ, 1987). Д-р техн. наук по тепл. двигателям (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. систем газообмена, перспект. раб. проц. ДВС.

Черноусов Андрей Александрович, доц. той же каф. Дипл. инженер-механик (УГАТУ, 1994). Канд. техн. наук по тепл. двигателям (УГАТУ, 1998). Иссл. в обл. числ. моделирования газообмена и систем имитационного моделирования ДВС.