

Усатый А.П.

## ПРОТОЧНАЯ ЧАСТЬ ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ КАК ОБЪЕКТ ИНТЕГРИРОВАННОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА САПР «ТУРБОАГРЕГАТ»

**Постановка и актуальность проблемы.** В современных условиях ни одно из предприятий, производящих сложное и уникальное оборудование, не может успешно конкурировать на рынке без активного использования систем автоматизированного проектирования (САПР) или, в крайнем случае, их отдельных, наиболее важных предметных компонент. Известно, что качество, эффективность, удобство использования являются основными предпосылками широкого внедрения в практику проектирования разрабатываемых САПР. Отмеченные выше свойства во многом зависят от возможностей тех инструментов, которые предоставляют САПР для создания и совершенствования информационных моделей объектов проектирования (ОП) в течение всего жизненного цикла изделия. Отмеченный факт требует особого внимания не только к разработке информационных моделей сложных технических объектов (СТО), к которым, безусловно, относится и проточная часть (ПЧ) мощных паровых турбин, но и средствам и методам формирования и совершенствования таких моделей.

Современные тенденции развития методологии создания информационных моделей СТО с длительным жизненным циклом базируются на необходимости описания всех стадий и состояний этого цикла.

Одно из общих и важных требований, предъявляемых к структуре информационных моделей, заключается в необходимости учитывать высокую вариантность проектных данных таких изделий («как задумано», «как спроектировано», «как изготовлено», «как существует при эксплуатации») [1].

Одна из возможных реализаций учета высокой вариантности данных предложена в САПР судов [2], где формирование информационной модели основано на построении обобщенных схем представления информации о судне, которые являются неотъемлемой составной частью систем сопровождения жизненного цикла объекта проектирования.

Достаточно серьезное внимание формированию информационной модели ОП уделено в работе [3], в которой она была реализована как инвариантная интегрированная структурно-функциональная параметрическая модель, охватывающая описание ОП на протяжении всего жизненного цикла, что позволило выполнять необходимые функции проектирования и контроля с использованием единых принципов описания объектов.

Рассмотрению принципов построения ЭИМК – электронной информационной модели корабля, отображающей его информационную структуру и использование этой структуры на различных этапах его жизненного цикла, посвящена работа [4].

Традиционно, особое внимание разработке САПР и, в частности, информационных моделей ОП уделяется в авиационной отрасли, например [5].

В большинстве современных работ по информационным моделям СТО сделан упор на объектно-ориентированную технологию формирования информации об ОП. Именно такой подход предоставляет пользователям новые возможности по накоплению и классификации информации об изделии, в том числе и о правилах, описывающих

элементы объекта, вспомогательной и справочной информации, а также различных мультидисциплинарных приложениях. Помимо этого, единый, динамически развивающийся цифровой шаблон ОП, собирающий в себе всеобъемлющую информацию об СТО, позволяет коренным образом изменить традиционные подходы, как проектированию, так и к вопросам изготовления и эксплуатации.

Все же следует отметить, что, не смотря на существование общих принципов построения информационных моделей СТО, в каждом конкретном случае такие модели должны учитывать не только существующий опыт проектирования конкретного производителя, но и наличие специфик, отражающих его технологический потенциал. Это, безусловно, накладывает свои особенности на структурно-топологическую организацию, методы и формы управления информационными моделями СТО.

Как видно, вопросам разработки информационных моделей СТО, к которым в полной мере относятся и осевые турбины, уделяется достаточно много внимания, особенно в области кораблестроения, авиастроения и общего машиностроения. Вместе с тем, решению научных проблем, связанных с созданием информационной модели ПЧ осевой турбины, как объекта САПР, посвящено еще явно не достаточно работ ученых и специалистов. В основном эта проблема нашла свое отражение в исследованиях, связанных с разработкой САПР «Турбоагрегат» [6, 7]. Хотя необходимость выполнения таких работ не вызывает сомнения, т.к. она обусловлена в первую очередь не только постоянным ростом конкуренции и все возрастающими требованиями сокращения сроков проектирования и изготовления, но и необходимостью сопровождения каждого экземпляра изготовленной турбины в течение всего жизненного цикла.

**Цель исследования.** К числу важнейших задач, требующих решения при создании интегрированной структурно-топологической информационной модели (ИСТИМ) ПЧ осевой турбины и использовании ее как единого шаблона при построении информационного пространства проекта, в первую очередь следует отнести:

1. Разработку формата метаданных, описывающих информационную модель ПЧ.
2. Разработку инвариантных средств создания и редактирования метаданных информационной модели ПЧ.
3. Создание информационной модели ПЧ в виде единого динамического структурно-топологического шаблона с конкретным набором метаданных.
4. Разработку средств формирования и управления информационным пространством проекта на базе метаданных единого динамического шаблона информационной модели ПЧ.
5. Разработку и реализацию метода, обеспечивающего работу алгоритмической части мультидисциплинарных моделей расчета ПЧ непосредственно с данными из проекта с иерархической формой их представления и визуализации.

При этом, разработанные соответствующие инвариантные методы и алгоритмы должны обеспечивать не только формирование информационных моделей, но и предоставлять возможность их совершенствования с учетом появления новых моделей расчета ПЧ, новых технологий САПР, изменения технологических возможностей производителя, новой информации об условиях эксплуатации и т.д.

**Основная часть.** Учитывая тот факт, что метаданные о структурно-топологических и разного рода функционально-параметрических связях информационной модели ПЧ хранятся в реляционной базе данных [6], а ее представление в редакторе ресурсов и проектах реализуется в виде иерархически организованных множеств

различного рода информации, потребовалась разработка специальных правил и формата хранения такой информации. Для алгоритмизации отмеченных правил была заимствована идея множественных термов [8]. Такой прием позволил представить информацию об ОП, в том числе и о его структурно-топологической иерархии в виде строк, содержащих линейные наборы необходимых констант, в том числе и уникальных индексов, соответствующих подчиненным записям реляционной базы данных, что существенным образом упростило хранение информации и ее обработку. В качестве примера, ниже приведена часть строки, содержащая некоторые сведения о записи «Турбина осевая», куда входят и индексы подчиненных ей, согласно рисунку 1, записей в БД:

$$\langle 1002; TurbineAxial\_n; 3; 25; 25+17; 87; 1111100000 + Турбина осевая; Турбина осьова; Turbine Axial; +1050; 1003; 2842; 2843; 2844; 2845; 2985+848; 849 \rangle, \quad (1)$$

где

- «1002» - индекс записи в БД, соответствующий информации о «Турбине осевой».
- «1050; 1003; 2842; 2843; 2844; 2845; 2985» – индексы записей в БД, соответственно для «Данные по осевой турбине»; «Ступень»; «Критерии качества»; «Функциональные ограничения»; «Оптимизируемые параметры»; «Режимные параметры»; «Тип конструкции».
- «848; 849» – индексы записей, соответствующие моделям расчета ПЧ – «1D Прямой расчет осевой турбины» и «2D Прямой расчет осевой турбины». В связи с тем, что записи с индексами «848; 849» относятся к структуре «Библиотеки моделей расчета», они не визуализируются в структуре «Объекты проектирования».

Аналогично, подчиненные узлы информации, с перечисленными выше индексами, имеют свою структурно-топологическую иерархию и свое содержание соответствующих им записей в БД. Как видно из строки (1) последовательность включения в список индексов подчиненных узлов не имеет значения, что упрощает обработку этой информации и расширяет возможности модификации и совершенствования разрабатываемой информационной модели ПЧ осевой турбины и других объектов САПР «Турбоагрегат».

Для решения 2-й задачи в САПР «Турбоагрегат» [6] был разработан специальный редактор ресурсов, фрагмент которого показан на рисунке 2. Данный редактор включает в себя:

- конструктор структурной топологии информационных моделей;
- конструктор средств интеграции с внешними источниками данных;
- конструктор внутренних функционально-параметрических связей с мультидисциплинарными солверами ПЧ и других объектов турбоагрегата;
- конструктор формирования справочных и атласных данных;
- конструктор управления полномочиями пользователей, и др.

Специально созданные методы и алгоритмы, использующиеся в редакторе ресурсов, позволяют формировать информационную модель ПЧ, осуществлять модификацию ее структурной топологии, выполнять различные настройки, устанавливать функционально-параметрические связи со справочниками и атласами и другие операции по совершенствованию информационной модели. Примечательно, что все отмеченные операции совершенно не требуют изменения кода той части ПО, которая ис-

пользует информационную модель ПЧ, как шаблон с метаданными при развертывании проекта в оперативной памяти компьютера.

Любое изменение информационной модели, выполненное через редактор ресурсов, автоматически включается, как в ранее созданные проекты ПЧ осевых турбин, так и во вновь создаваемые.

На рисунке 2 приведен фрагмент редактора ресурсов в режиме работы **конструктора внутренних функционально-параметрических связей** с мультидисциплинарными солверами объектов турбоагрегата.

Как видно из рисунка установление функционально-параметрических связей между параметрами информационной модели ПЧ и соответствующими параметрами из массивов данных моделей расчета является достаточно простой операцией – необходимо поставить отметку в окошке **CheckBox**, связанному с требуемым элементом массива и информация об отмеченной связи будет занесена в строку данных выбранного параметра. Данная информация будет использована при формировании информационного пространства проекта и настройки адресов параметров, расчетных моделей с параметрами информационной модели ОП в проекте. Строка из записи в БД ресурсов, содержащая информацию о связи, показанной на рисунке 2, приведена ниже.

$$\begin{aligned} &\langle 2501;it\_in;7;25;;1050+2;0;0000000000+полная\ эн\ таль\ пия\ на\ в\ хо\ де\ в \\ &цилин\ др;пов\ на\ эн\ таль\ пия\ на\ в\ хо\ ди\ до\ ци\ лін\ дру;total\ enthalpy\ at \\ &inlet;+532;12;7;1;1;566;1+ \\ &1050;2717;2841;2845;783;791;3320\sim 1902;2196+\sim 0/2486/848\sim 1/2559/2556+\rangle, \end{aligned} \quad (2)$$

где

- «2501» – индекс записи в БД, соответствующий информации о «*полной эн- тальпии на входе в цилиндр*».
- «0/2486/848» – фрагмент записи, показывающий, что в записи с индексом «848» модели «*1D Прямой расчет осевой турбины*» имеется подчиненная запись с индексом «2486» – «*Массив режимных параметров*», 0-й элемент которого соответствует параметру «*полная эн- тальпия на входе в цилиндр*» информационной модели ПЧ.

Иерархическая топология ИСТИМ ПЧ построена таким образом, что «вся» информация о ПЧ структурирована в соответствии используемыми классами элементов информационной модели. К числу основных классов относятся:

- Объект проектирования.
- Таблица.
- Вектор.
- Параметр.

Элементы класса «Объект проектирования» используются для формирования скелета структурной топологии ИСТИМ ПЧ. Одно из основных качеств элементов данного класса заключается в наличии у них свойства мультипликативности. Имеется в виду, что элементы этого класса в проекте могут размножаться вместе со всей подчиненной им информацией. В ИСТИМ ПЧ к числу таких элементов относятся «Турбина осевая», «Ступень» и «Сечение». Таким образом, подразумевается, что в проекте может быть несколько турбин, каждая из которых может состоять из нескольких ступеней, которые, в свою очередь, могут иметь по несколько сечений вдоль радиуса.

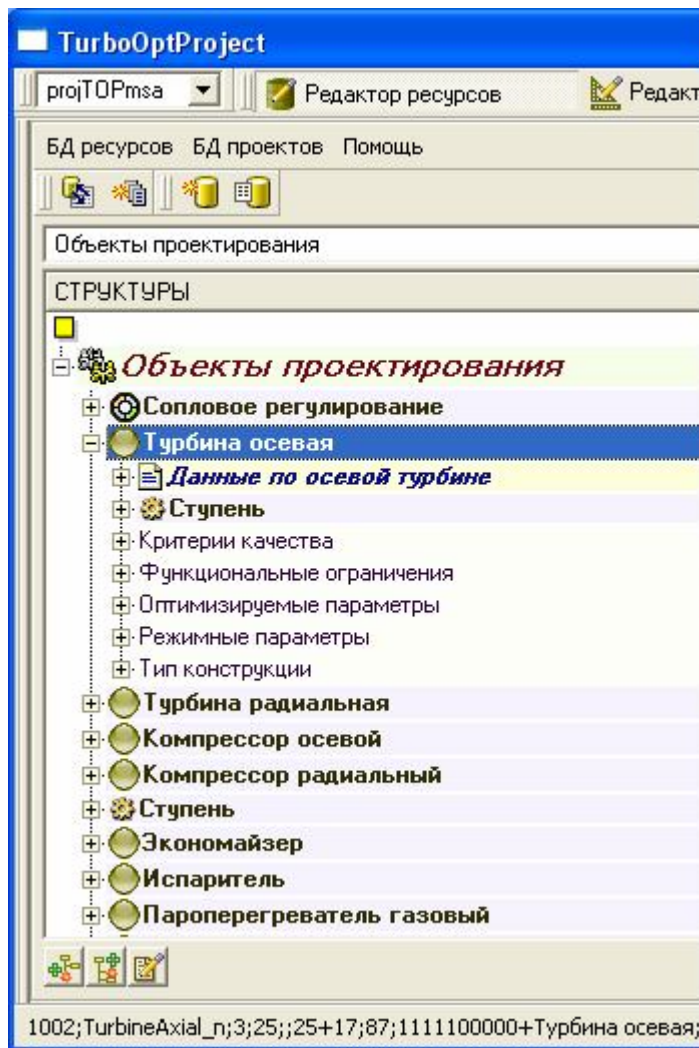


Рисунок 1 – Структурно-топологические информационные связи первого уровня иерархии для ОП «Турбина осевая»

то же свойство объекта. Например, параметр, соответствующий давлению рабочего тела на входе в цилиндр, имеет **параметр-клон** – давление рабочего тела перед первой ступенью цилиндра и т.п.

Кроме того, в описании элементов класса «Объект проектирования» предусмотрены множественные термы, хранящие информацию о связях с моделями расчета, с атласами конструкций и образцов этих ОП в схемах и т.д.

Таким образом, применение редактора ресурсов, с перечисленным набором конструкторов позволяет не только формировать ИСТИМ ПЧ, но и в случае необходимости ее редактировать и совершенствовать. Например, в структуру ИСТИМ ПЧ осевой турбины (рисунок 1) специально были введены информационные группы: «Критерии качества», «Функциональные ограничения», «Оптимизируемые параметры» и «Режимные параметры». Данные группы представляют собой динамические векторы ссылок на соответствующие параметры ПЧ и предназначены для представления необходимой информации в редакторе постановок задач оптимального проектирования ПЧ. Естествен-

Элементы класса «Таблица» предназначены для тематической группировки параметров, описывающих ПЧ осевой турбины. Класс «Вектор» предназначен для создания различного назначения динамических списков параметров. Класс «Параметр» используется непосредственно для описания свойств параметров, характеризующих ПЧ. Алгоритмы конструктора структурной топологии информационных моделей построены таким образом, что позволяют иерархически подчинять элементам класса «Объект проектирования» элементы классов «Объект проектирования», «Таблица» и «Вектор». Элементы классов «Таблица» и «Вектор» могут иметь у себя в подчинении только элементы класса «Параметр». Элементы класса «Параметр», также могут иметь у себя в подчинении элементы класса «Параметр». Такой прием используется для идентификации **параметр-клонов**, т.е. параметров, находящихся физически на разных уровнях иерархии шаблона ИСТИМ, но по своей предметной сути, отражающих одно и

но, с помощью редактора ресурсов (рисунок 2) набор компонент этих векторов можно легко изменить, что существенно образом расширяет возможности проектировщиков и классы решаемых оптимизационных задач.

Безусловно, к числу наиболее важных средств формирования и управления информационным пространством проекта ПЧ следует отнести механизмы навигации по информационному пространству проекта и выполнение различного рода групповых операций, как с объектами проекта, так и с параметрами их описывающими. Учитывая, что ИСТИМ ПЧ представляет собой иерархически организованные блоки информации, отмеченные выше две задачи, представляют в некотором смысле и самостоятельный интерес.

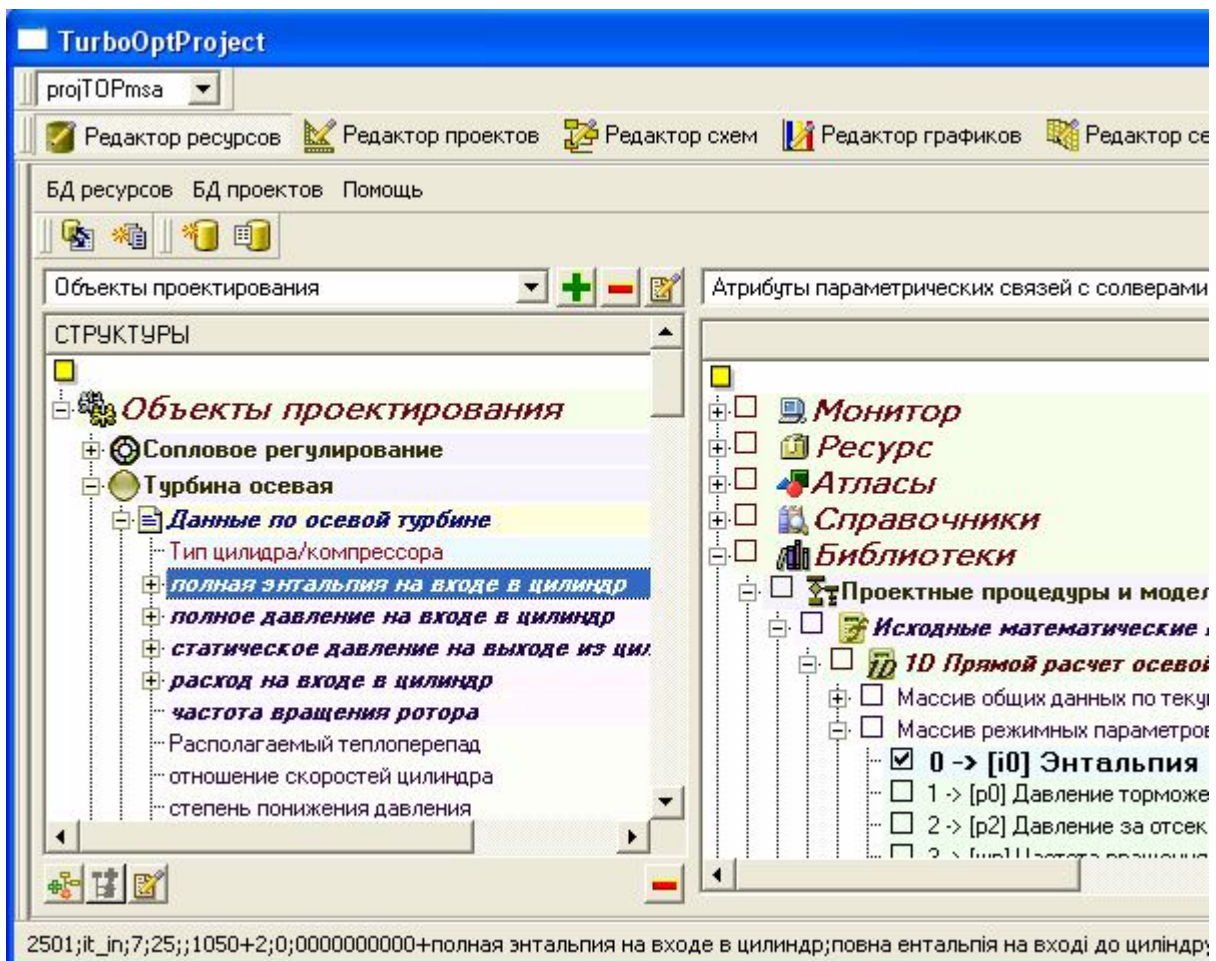


Рисунок 2 – Фрагмент редактора ресурсов в режиме работы конструктора внутренних функционально-параметрических связей

Созвучная проблема, заключающаяся в построении механизма однозначного связывания иерархического представления информации с ее реляционным представлением в СУБД, в настоящее время, помимо рекомендаций [9], имеет достаточно много решений, например [10, 11]. К сожалению, идеи, реализованные в отмеченных работах, не пригодны для прямого использования с целью организации эффективной навигации по проекту, а также выполнения необходимых групповых операций. В то же время использование возможностей реляционных СУБД для решения отмеченных выше задач представляется весьма перспективным. С точки зрения скорости выполнения различ-

ных операций навигации и выборки наиболее предпочтительным является использование сервера SQLite. Особенность этого сервера заключается в том, что он способен поддерживать операции создания SQL таблиц в оперативной памяти компьютера, а не только на жестком диске, как это предусмотрено в большинстве общеизвестных и доступных серверов. Работа с SQL таблицами, размещенными в оперативной памяти компьютера, требует существенно меньше временных ресурсов при выполнении различного рода операций.

При разработке механизма навигации по ИСТИМ ПЧ проекта был использован прием индексации его информационного пространства. Для этих целей все пространство было разделено на два множества в соответствии с классами элементов: «Объекты проектирования» и «Параметры». Для каждого множества в оперативной памяти компьютера созданы с помощью СУБД SQLite соответствующие индексные SQL таблицы. Структура этих таблиц сформирована таким образом, что позволяет с помощью простых и лаконичных SQL запросов перемещаться по информационному пространству проекта, а также осуществлять различные групповые выборки, как объектов проектирования, так и параметров. Основные поля этих таблиц предусмотрены для хранения следующей информации:

- текущего уникального индекса записи в таблице об элементе информационного пространства проекта;
- уникального индекса элемента в БД ресурсов;
- номера элемента в проекте (для объекта проектирования).

Кроме того, в таблицах предусмотрены поля под аналогичную информацию для элемента информационного пространства, расположенного на один иерархический уровень выше («отца») индексируемого текущего элемента.

Заполнение этих таблиц осуществляется параллельно с загрузкой проекта. **Наиболее важной особенностью индексирования** информационного пространства проекта посредством занесения информации об элементах этого пространства в отмеченные SQL таблицы является тот факт, что в качестве **текущего уникального индекса элемента** и его «отца» выступают **преобразованные к типу «unsigned» значения физических адресов соответствующих элементов в оперативной памяти компьютера**. Такой прием позволяет после выполнения необходимого SQL запроса, простым преобразованием значения уникального индекса элемента из типа «unsigned» в **формат физических адресов оперативной памяти** компьютера получить непосредственно прямой доступ к требуемому элементу информационного пространства проекта. Использование СУБД SQLite, а также описанного выше способа индексации в комплексе, представляют собой универсальный высокоэффективный механизм навигации по иерархически организованному информационному пространству проекта.

Для обеспечения работы алгоритмической части мультидисциплинарных моделей расчета ПЧ непосредственно с данными из информационного пространства проекта с иерархической формой их представления и визуализации был разработан специальный инвариантный метод. Данный метод основывается на замене в моделях расчета ПЧ массивов данных на соответствующие им массивы указателей (адресов). Такой подход позволяет вместо заполнения массивов конкретными величинами, присвоить элементам массивов значения адресов соответствующих параметров из иерархической структуры данных информационного пространства каждого конкретного проекта, связав, тем самым, алгоритмическую часть модели расчета с данными проекта. Указанная операция осуществляется один раз при инициализации модели. Для этой цели используется информация из соответствующего термина каждого конкретного параметра аналогично

(2). Таким образом, обработав информацию из термов, отвечающих за связи между данными проекта и моделью расчета, заполняются все массивы модели расчета адресами конкретных параметров из иерархической формы представления данных по ОП, предоставляя тем самым доступ алгоритмической части модели к необходимым для ее работы данным.

Следует отметить, что для хранения информации по каждому параметру ПЧ с учетом их высокой вариантности («как задумано», «как спроектировано», «как изготовлено», «как существует при эксплуатации» и т.п.), в объект класса, отвечающего за их визуализацию, была введена специальная строчная переменная. В указанной переменной может располагаться практически любое по размеру множество значений каждого параметра, тем самым, обеспечивая в полной мере возможность хранения информации о ПЧ осевой турбины на протяжении всего ее жизненного цикла. Устанавливая указатель на тот или иной элемент из множества значений для каждого из параметров ИСТИМ ПЧ, мы получаем интересующий нас вариант информации о ПЧ любого этапа жизненного цикла.

### **Выводы**

1. Разработан комплекс методов и алгоритмов, связанных с созданием и модификацией информационной модели проточной части осевой турбины.
2. Разработан формат метаданных, описывающих информационную модель проточной части.
3. Создана информационная модель ПЧ в виде единого динамического структурно-топологического шаблона.
4. Разработан эффективный механизм навигации по иерархически структурированному информационному пространству проекта.
5. Разработан и реализован метод, согласующий работу алгоритмической части мультидисциплинарных моделей расчета ПЧ непосредственно с данными из информационного пространства проекта.
6. Все разработанные методы и алгоритмы имплементированы в интегрированную САПР «Турбоагрегат».

### **Литература**

1. Краснухин А. Методологии проектирования сложных изделий // Открытые системы.– 2003. – № 6. – [http://citforum.univ.kiev.ua/consulting/articles/complex\\_projects/](http://citforum.univ.kiev.ua/consulting/articles/complex_projects/).
2. Кутейников М.А., Липис А.В., Машин А.В., Быков Г.В., Рьжов В.А., Петров А.В., Описание объекта в информационных системах, сопровождающих полный жизненный цикл судна // Информационно-аналитический журнал «Rational Enterprise Management». – 2006. – №1– С. 31–33.
3. Кизим А.В., Дворянкин А.М., Камаев В.А. Программно-информационный комплекс систем поддержки деятельности главного конструктора машиностроительного предприятия // Сетевой электронный научный журнал "Системотехника".– 2003. – №1. – <http://systech.miem.edu.ru/>.
4. Галкина О., Рындин А., Рябенский Л., Тучков А., Фертман И. Электронная информационная модель изделий судостроения на различных стадиях жизненного цикла // Электронный научный журнал CADmaster. – 2007. – №37.– С. 48–51. – <http://www.cadmaster.ru/>.



5. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Серия учебников "Газо-турбинные двигатели" для студентов специальности "Авиационные двигатели и энергетические установки". – <http://www.avid.ru/pr/uchebnik/>.

6. Бойко А.В., Говорущенко Ю.Н., Усатый А.П. Разработка информационной среды и средств динамического управления информационными моделями данных сложных технических объектов применительно к САПР «Турбоагрегат» // Тем. вип. «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування» .–2006.– №5.– С. 36–42.

7. Бойко А.В., Говорущенко Ю.Н., Усатый А.П. Программная реализация единого информационного пространства интегрированной системы автоматизированного проектирования «Турбоагрегат» // Электронное моделирование. – Киев: Институт проблем моделирования в энергетике НАН Украины, 2009. – №2, том 31 – С. 43–55.

8. Гаазе-Рапопорт М.Г., Поспелов Д.А., Аверкин А.Н. Толковый словарь по искусственному интеллекту, Компьютерная версия: Листопад И.Н., Прокудин А.Б., Щербаков Е.Н. – <http://www.raai.org/library/tolk/aivoc.html>.

9. Extensible Markup Language (XML) 1.0// W3C Recommendations. W3C, 2004.– <http://www.w3.org/TR/2004/REC-xml-200440204/>.

10. Shanmugasundaram J., Kiernan J., Fan C., Funderburg J. XPERANTO: Querying XML Views of relational data. // IBM Almaden Research Center. San Jose. – 2001.

11. Новак Л.Г., Кузнецов С.Д. Свойства данных XML // Труды ИСП РАН. 4. М: ИСП РАН. – 2003. – с. 187.

УДК 621.165

Усатий О.П.

### **ПРОТОЧНА ЧАСТИНА ОСЬОВОЇ ТУРБИНИ ЯК ОБ'ЄКТ ІНТЕГРОВАНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО ПРОСТОРУ САПР «ТУРБОАГРЕГАТ»**

В статті описано комплекс методів і алгоритмів, пов'язаних з розробкою й модифікацією інформаційної моделі проточної частини осьової турбіни. Запропоновано високоефективний механізм навігації по ієрархічному інформаційному простору проекту проточної частини. Розглянуто методи й алгоритми, що забезпечують роботу алгоритмічної частини мультидисциплінарних моделей розрахунку проточної частини осьової турбіни безпосередньо з даними із ієрархічно структурованого інформаційного простору проекту.

Usatyi A.P.

### **FLOW PATH OF THE AXIAL TURBINE AS OBJECT OF THE INTEGRATED INFORMATION SPACE CAD "TURBOAGGREGAT"**

In article the complex of methods and algorithms connected with development and improvement of information model of the axial turbine flow path is described. The high-performance mechanism of navigation on a hierarchical information space of the flow path project is proposed. Methods and algorithms ensuring operation of an algorithmic part of multidisciplinary calculation models of axial turbine flow path directly with data from the project hierarchically structured information space are considered.