

РАЗРАБОТКА НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА КАК ИНСТРУМЕНТА ПОДГОТОВКИ ИНЖИНИРИНГОВЫХ КОМАНД ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

Т.Б. Чистякова, И.В. Новожилова, Д.Н. Фураев (СПбГТИ (ТУ))

Представлена архитектура научно-образовательного комплекса для командного практико-ориентированного обучения специалистов в области решения задач промышленного инжиниринга, включающего вопросы проектирования, ресурсосберегающего управления, экологического менеджмента, маркетинга, а также оценки экономической эффективности производства при реализации жизненного цикла высокотехнологичной продукции различного назначения. Апробация научно-образовательного комплекса проведена на примере обучения целевых групп персонала российских предприятий Северо-Западного региона (ООО «Завод по переработке пластмасс им. «Комсомольской правды», ООО «Вириал», АО «ПМП», ПАО «Северсталь», ПАО «НЛМК») при поддержке Фонда инфраструктурных и образовательных программ РОСНАНО. Повышение профессионального уровня кадрового обеспечения промышленных предприятий позволяет повысить эффективность производств, улучшить качество и экологические характеристики высокотехнологичной продукции, а также усовершенствовать системы управления производством.

Ключевые слова: промышленный инжиниринг, научно-образовательный комплекс, компьютерная система обучения, инжиниринговая команда, проектирование, управление, жизненный цикл продукции.

Введение

Промышленный инжиниринг современных высокотехнологичных предприятий с целью их модернизации, повышения качества продукции и внедрения новых систем управления производством приводит к необходимости формирования высококвалифицированного кадрового обеспечения в области проектирования, обработки информации и управления сложными производственными объектами [1]. Основным направлением повышения экономической эффективности производств в химической и смежных отраслях промышленности является внедрение ресурсо- и энергосберегающих технологий за счет экономии сырья и материалов, переработки отходов производства, интенсификации рециклинга, использовании вторичных энергоресурсов и др. По данным компаний Marsh & McLennan, Inc. и Gulf Publishing Holdings, LLC (Hydrocarbon Processing) (<http://www.hydrocarbonprocessing.com>), промышленные предприятия теряют до 20 млрд. долл. США или 5% годового производства из-за незапланированного простоя технологического оборудования и низкого качества продукции. По результатам исследований компании ARC Advisory Group, 40% потерь в мировой промышленности составляет человеческий фактор (<https://www.arcweb.com>). Потери из-за ошибок управленческого производственного персонала приводят к снижению качества продукции, незапланированным простоям оборудования, экологическому ущербу и другим потерям, которые сравнимы по масштабу с потерями от аварий [2]. Таким образом, современным направлением развития автоматизированных обучающих систем для управленческого производственного персонала высокотехнологичных предприятий является разработка образовательных комплексов, охватывающих все стадии жизненного цикла промышленной продукции и представляющих собой программный инструмент для создания комплексной виртуальной (цифровой) модели производ-

ства. Системы данного класса позволяют проводить проектные и инженерные расчеты до/в стадии проектирования промышленного изделия (продукции), осуществлять выполнение операций на виртуальной модели, проводить визуализацию и моделирование технологических процессов с учетом условий конкретного производства [3, 4]. Важнейшими этапами разработки и применения данного подхода являются:

- 1) формирование целевых показателей конкурентоспособной продукции и ресурсных ограничений (временных, финансовых, технологических, производственных, экологических);

- 2) декомпозиция жизненного цикла продукции на ключевые стадии производства;

- 3) выделение специалистов, задействованных на каждой стадии жизненного цикла продукции и формирующих инжиниринговую команду для комплексного решения задачи промышленного инжиниринга высокотехнологичного предприятия.

Определение целевых показателей и ресурсных ограничений высокотехнологичной продукции позволяет не только отслеживать их взаимное влияние на различных этапах жизненного цикла, но и оперативно вносить необходимые изменения и уточнения при решении задач цифрового проектирования, моделирования и управления. Таким образом, реализуется комплексный подход в планировании и управлении жизненным циклом высокотехнологичной продукции с использованием междисциплинарных технологий и знаний из различных профессиональных областей, таких как маркетинг, экономика, экология, проектирование, автоматизированное управление и синтез материалов.

Целью работы является разработка гибкого настраиваемого научно-образовательного комплекса как инструмента подготовки инжиниринговых команд для решения задач цифрового проектирования и ресурсосберегающего управления жизненным циклом высокотехнологичной продукции полимерной,

керамической, металлургической и нефтехимической промышленности. Основу комплекса составляет модуль формирования индивидуальных траекторий обучения специалистов с учетом профессиональных стандартов или требований рабочих мест, что позволяет реализовать компетентностный подход практико-ориентированного обучения отдельных целевых групп персонала. Включение в состав научно-образовательного комплекса компьютерных систем для практико-ориентированного обучения специалистов с использованием виртуальной и дополненной реальности позволяет решать задачу перенастройки производства на новый вид продукции, имитировать сложные физико-химические процессы получения промышленных изделий на базе математических моделей, проводить их комплексное исследование, а также решать задачу обучения методам безаварийного ведения технологических процессов.

Результатом обучения специалистов инженеринговой команды является формирование технологического регламента производства высокотехнологичной продукции, включающего описание процесса подготовки сырья, данные оборудования, диапазоны технологических режимов ключевых стадий производства для получения продукции с заданными требованиями по качеству. Технологический регламент, визуализированный в виде подробной технологической карты производства, учитывает требования рынка сбыта продукции, требования экологической безопасности, а также экономической эффективности каждой стадии жизненного цикла и производства в целом [5, 6].

Постановка комплексной задачи управления жизненным циклом промышленной продукции

Производства полимерной, керамической, металлургической и нефтехимической продукции являются крупнотоннажными, многоассортиментными, характеризуются огромными массивами информации, поступающими с производственных линий, отлича-

ются многофакторными взаимодействиями и связями, возникающими по ходу процессов, а также наличием изменяющегося состава сырья — композиционных смесей. Сложность управления процессами производства данного класса обусловлена разнородностью физико-химических процессов переработки сырья и материалов, многообразием оборудования, большим числом контролируемых переменных, наличием рециклинга, чувствительностью к возникновению брака при выборе управляющих воздействий, строгими требованиями к экологическим показателям производства [3, 7, 8].

Как объекты изучения и управления данные производства, как правило, характеризуются: выпуском продукции различного вида $TP = \{TP_1, \dots, TP_{ip}\}$ обширной номенклатуры $MP = \{MP_1, \dots, MP_{mp}\}$; многообразием технологических стадий $TS = \{TS_1, \dots, TS_{is}\}$, оборудования $EQ = \{EQ_1, \dots, EQ_{eq}\}$; возможностью получения одного и того же продукта из сырья разных видов $FS = \{FS_1, \dots, FS_{fs}\}$ по различным рецептурам $RP = \{RP_1, \dots, RP_{rp}\}$; строгими требованиями к качеству полупродуктов $IP = \{IP_1, \dots, IP_{ip}\}$ и готовой продукции $QP = \{QP_1, \dots, QP_{qp}\}$; возникновением на стадиях производства нештатных ситуаций $ST = \{ST_1, \dots, ST_{st}\}$, связанных с нарушением показателей качества продукции $RS = \{RS_1, \dots, RS_{rs}\}$.

Для выпуска определенного вида продукции TP с заданными требованиями по качеству и экологическим характеристикам QP специалистам инженеринговой команды необходимо:

- 1) выполнить маркетинговое исследование потребности рынка в продукции (изделии) и сделать вывод о целесообразности производства;
- 2) сформировать целевые показатели конкурентоспособной продукции QP и определить ресурсные ограничения (временные, финансовые, технологические, производственные, экологические);
- 3) провести декомпозицию жизненного цикла продукции на ключевые стадии производства. Опре-

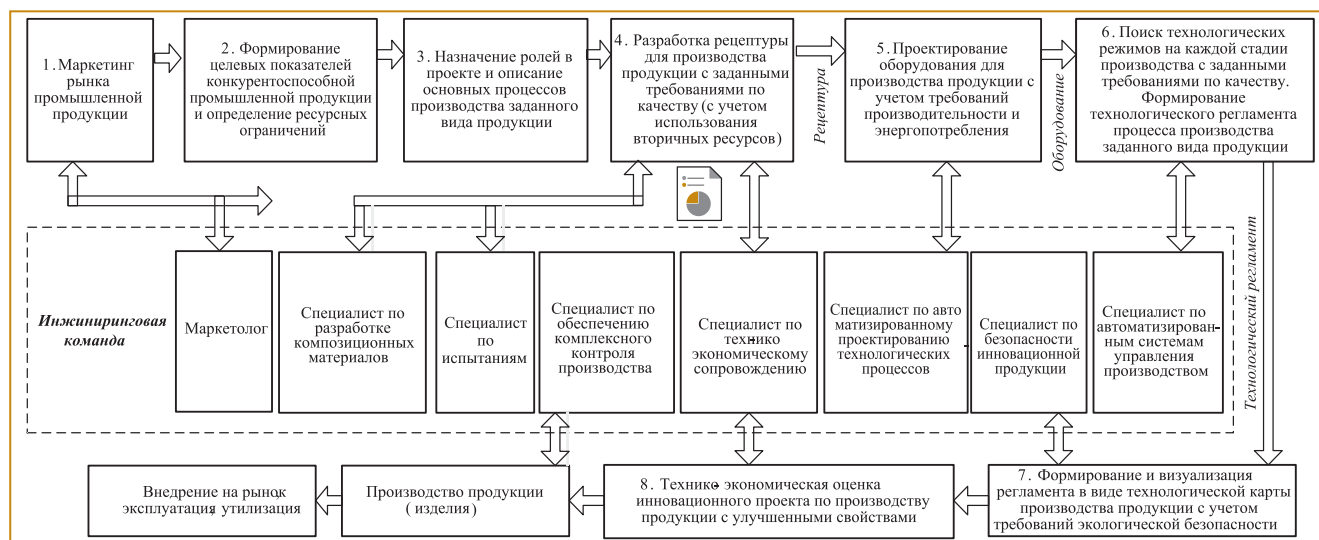


Рис. 1. Укрупненная схема управления жизненным циклом высокотехнологичной продукции

делить специалистов инжиниринговой команды, задействованных на каждой стадии жизненного цикла высокотехнологичной продукции. Сформулировать профессиональные компетенции для каждой группы специалистов с учетом требований профессиональных стандартов или требований рабочих мест.

4) разработать рецептуру RP , определить состав сырья FS для изготовления продукции с заданными требованиями по качеству QP с учетом использования вторичных материалов. В случае использования вторичных материалов, целесообразно рассчитать экономическую эффективность полученной композиционной смеси для ее возможной реализации;

5) с учетом требований к экологическим показателям производства, производительности и энергопотреблению необходимо сформировать последовательность технологических стадий TS и оборудования EQ для выпуска продукции заданного качества QP ;

б) для выпуска определенного вида TP продукции, заданной составом сырья FS , рецептурой RP определить диапазоны технологических режимов $[U_{jmin}; U_{jmax}]$ каждого из элементов технологической схемы EQ при соблюдении ограничений по качеству материалов $QP_{jmin} \leq Y_j \leq QP_{jmax}$;

7) сформировать технологический регламент TM процесса производства продукции с учетом требований экологической безопасности;

8) провести общую технико-экономическую оценку $EI = \{EI_1, \dots, EI_{el}\}$ жизненного цикла продукции с учетом анализа планово-экономической и маркетинговой деятельности производства, расчета проектной себестоимости и технико-экономических показателей продукции.

На рис. 1 приведена схема управления жизненным циклом высокотехнологичной продукции.

Таким образом, для решения задачи проектирования и ресурсосберегающего управления жизненным циклом высокотехнологичной продукции с учетом требований профессиональных стандартов в состав инжиниринговой команды включены следующие группы специалистов: специалисты для обеспечения производственного цикла, маркетинговой и технико-экономической оценки жизненного цикла, контроля и обеспечения безопасности производственной среды, автоматизированного проектирования технологических процессов, а также автоматизированного

управления производством с использованием цифровых технологий.

Формирование траектории обучения инжиниринговой команды

Методология формирования траектории обучения инжиниринговой команды для решения задач проектирования и ресурсосберегающего управления жизненным циклом высокотехнологичной продукции основана на фреймовом описании и включает этапы (рис. 2):

1) определение целевых групп персонала (ЦГП) каждой стадии жизненного цикла продукции $Fr^{(1)} ::= \langle \text{ЦГП}, Q^{(1)}, A^{(1)} \rangle$, где $Fr^{(1)}$ — фрейм-прототип «ЦГП», компонентами которого являются атрибуты $Q^{(1)}$ и их характеристики $A^{(1)}$;

2) формирование набора профессиональных компетенций (ПрК) для обучения ЦГП $Fr^{(2)} ::= \langle \text{ПК}, Q^{(2)}, A^{(2)} \rangle$ на основании анализа обобщенных трудовых функций соответствующих профессиональных стандартов для каждой ЦГП;

3) для освоения сформулированных результатов обучения (ПрК) формирование практико-ориентированных учебных модулей (УМ) $Fr^{(3)} ::= \langle \text{УМ}, Q^{(3)}, A^{(3)} \rangle$;

4) разработка электронного учебного курса (ЭУК) $Fr^{(4)} ::= \langle \text{ЭУК}, Q^{(4)}, A^{(4)} \rangle$. Для освоения компетентностных результатов обучения используются компьютерные обучающие системы, позволяющие учитывать характеристики объекта изучения, аккумулировать экспертные знания в области проектирования и управления технологическими процессами, а также формировать практико-ориентированные результаты обучения;

5) разработка контрольно-измерительных материалов (КИМ) $Fr^{(5)} ::= \langle \text{КИМ}, Q^{(5)}, A^{(5)} \rangle$. Для количественной оценки результатов освоения ПК используются КИМ в виде тестовых заданий ($q_1^{(5)}$). Для качественной оценки образовательных результатов (ОР) инструктору предоставляется возможность задания дополнительных ситуаций на объекте изучения; проводить контроль над действиями обучаемого ($q_2^{(5)}$) и режимами функционирования объекта изучения ($q_3^{(5)}$); осуществлять анализ и оценку действий обучаемого по результатам протоколов обучения ($q_4^{(5)}$);

б) итоговая оценка ОР освоения ПК $Fr^{(6)} ::= \langle \text{ОР}, Q^{(6)}, A^{(6)} \rangle$. Для оценки итоговых ОР используется сетка

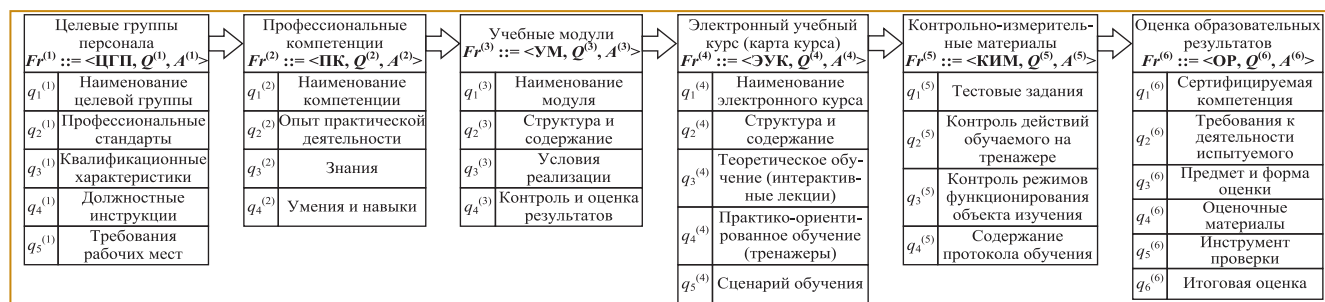


Рис. 2. Процесс формирования траектории обучения специалистов инжиниринговой команды

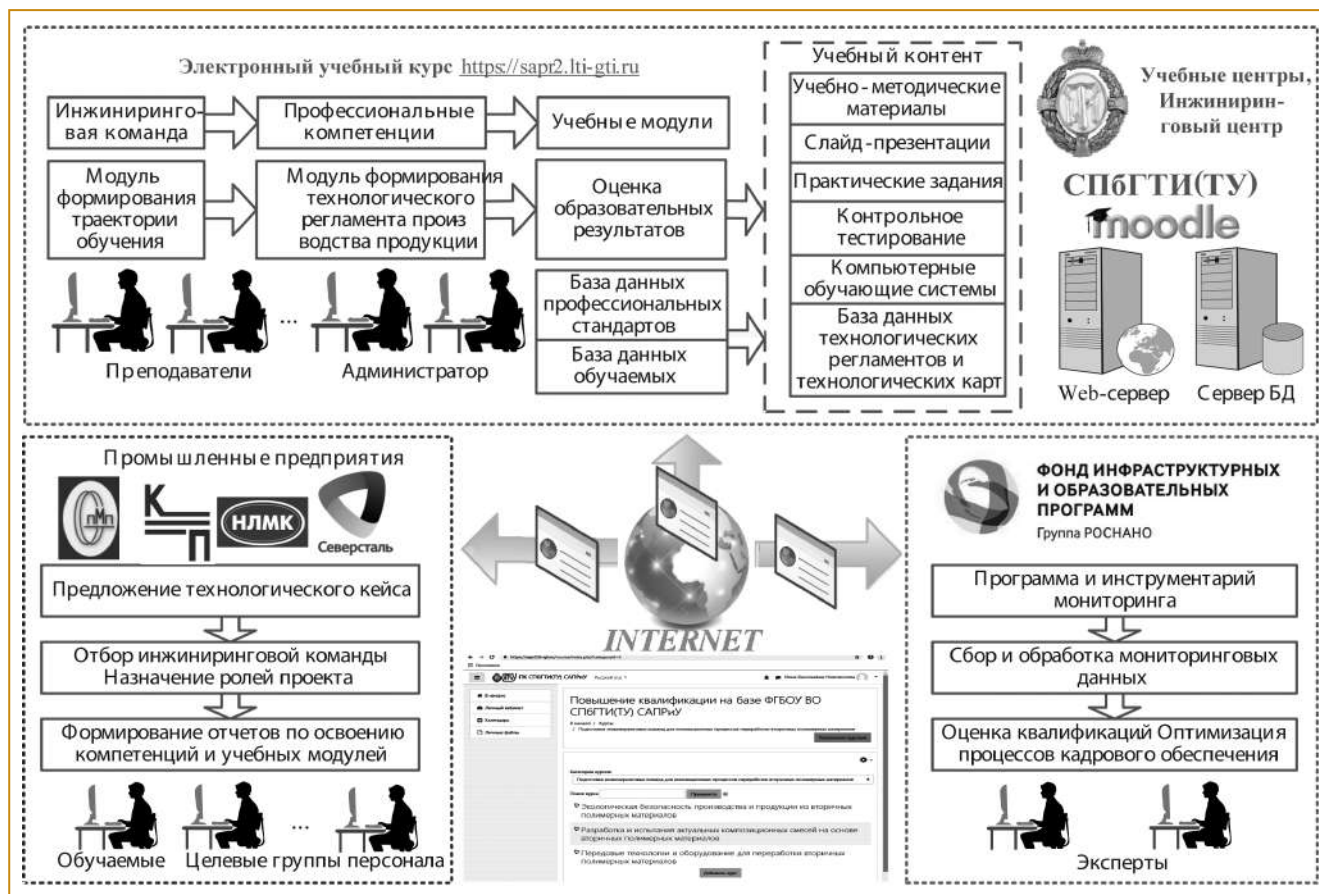


Рис. 3. Архитектура научно-образовательного комплекса

критериев, сопоставляющая критерии обучения и достигнутые результаты, а также позволяющая инструктору формализовать процесс выставления оценки по результатам выполнения практического задания.

Результатом обучения специалистов инжиниринговой команды является формирование технологического регламента производства продукции, который формируется по результатам объединения отчетов по каждой стадии жизненного цикла, при этом результаты работы каждого этапа передаются на последующий, и данные отчета предыдущего этапа являются входными данными для изучения и выполнения последующих практических заданий. Таким образом, осуществляется комплексное обучение инжиниринговой команды в области решения задач проектирования и ресурсосберегающего управления жизненным циклом высокотехнологичной продукции.

Архитектура научно-образовательного комплекса

Для реализации предложенной траектории обучения инжиниринговой команды разработан научно-образовательный комплекс, включающий образовательные ресурсы в области производства полимерной, керамической, металлургической, нефтехимической продукции российских производителей, совокупность информационных и телекоммуникационных технологий, соответствующих технологических средств и обеспечивающий освоение практико-ори-

ентированных образовательных результатов в полном объеме.

Укрупненная архитектура научно-образовательного комплекса (рис. 3), включает базу данных технологических регламентов, профессиональных стандартов, учебно-методических материалов, модуль формирования индивидуальных траекторий обучения специалистов, модуль формирования технологического регламента производства, интерфейс пользователя (обучаемых), интерфейс инструктора (преподавателя), интерфейс администратора, интерфейс эксперта.

Ядром научно-образовательного комплекса являются компьютерные обучающие системы, позволяющие решать сложную задачу проектирования производства, на основе математических моделей ключевых процессов проводить исследование причинно-следственных связей объекта изучения, определять технологические режимы оборудования для получения продукции с заданными требованиями по качеству, а также имитировать возникновение нестандартных ситуаций с целью обучения специалистов навыкам безаварийного ведения технологических процессов. При формировании функциональной структуры системы обучения создаются модули, выполняющие функции обучения и тренажа: интерфейс инструктора (преподавателя); интерфейс обучаемого; модуль выполнения вычислительных экспериментов; модуль формирования результатов имитационного

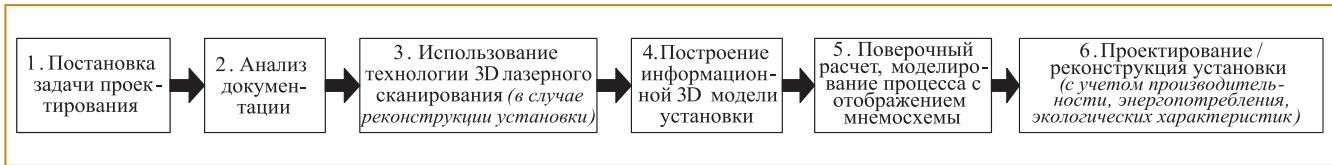


Рис. 4. Ключевые этапы решения задачи проектирования на примере объектов нефтехимической промышленности

моделирования; информационное и математическое обеспечение.

Научно-образовательный комплекс имеет гибкую модульную структуру и настраивается на различные характеристики и режимы функционирования объекта изучения, что позволяет использовать его для обучения проектированию и ресурсосберегающему управлению различными технологическими процессами и производствами, в том числе с рециклингом.

Решение задачи проектирования и ресурсосберегающего управления жизненным циклом высокотехнологичной продукции на примере нефтехимического производства

Наиболее сложной задачей при реализации жизненного цикла высокотехнологичной нефтехимической продукции является цифровое проектирование систем управления технологическими процессами и выбора оборудования с учетом требований производительности, энергопотребления и экологической безопасности. Этапы решения задачи проектирования на примере объектов нефтехимической промышленности приведены на рис. 4. Современные методы

проектирования основываются на создании и использовании информационной 3D модели, включающей полный массив данных по объекту на стадиях проектирования с обеспечением возможности передачи накопленной информации на последующие стадии жизненного цикла [9, 10].

На рис. 5 приведен пример функциональной структуры компьютерной обучающей системы, входящей в состав научно-образовательного комплекса, в области проектирования объектов нефтехимической промышленности. Система позволяет осуществлять поддержку принятия проектных решений по компоновке оборудования и трассировке трубопроводов, визуализировать элементы и их атрибуты информационной 3D-модели, проводить имитационное моделирование технологических процессов с целью поиска допустимых режимов функционирования оборудования при соблюдении требований по производительности, энергопотреблению и качеству получаемой нефтехимической продукции [10].

Задача проектирования заключается в определении геометрических параметров новой установки и опре-

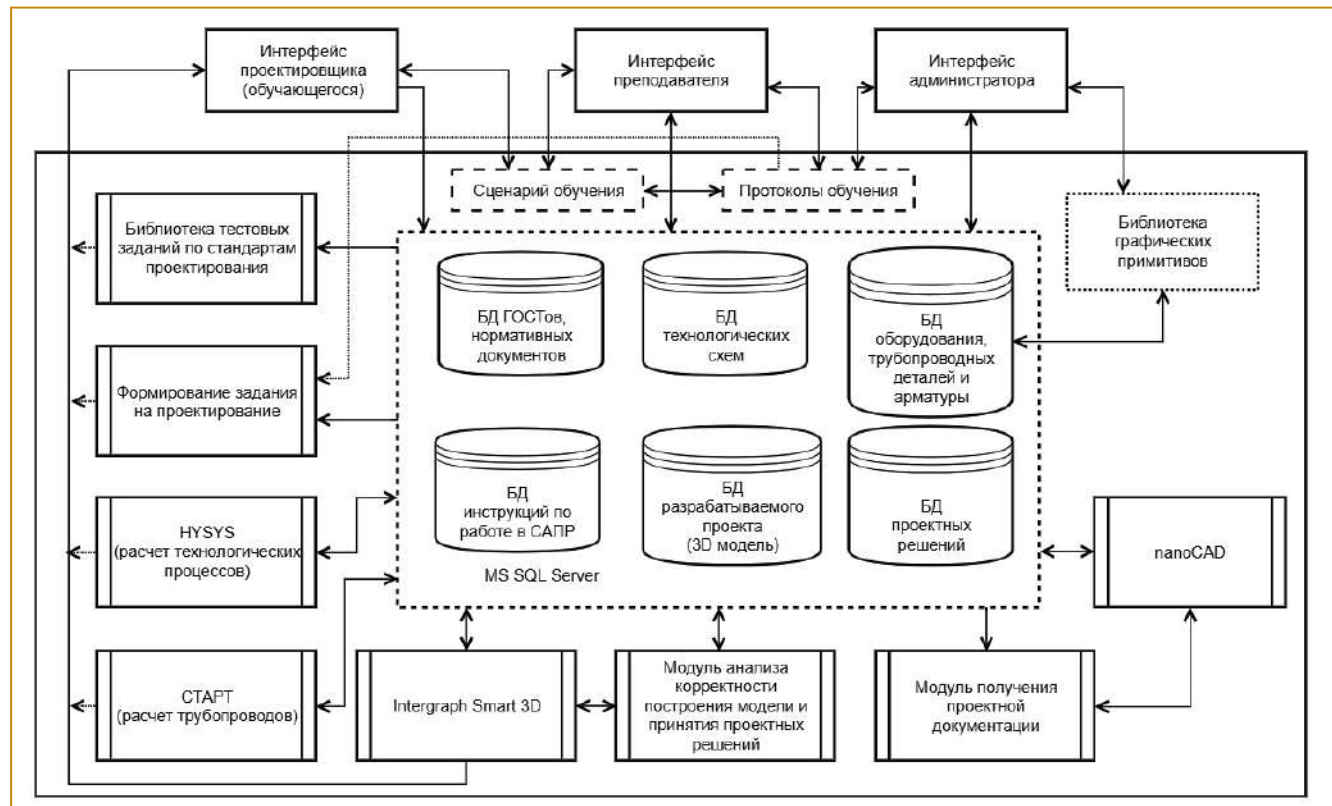


Рис. 5. Функциональная структура компьютерной системы для обучения проектированию объектов нефтехимической промышленности

Таблица. Перечень реализованных практико-ориентированных образовательных программ

Наименование образовательной программы	Заказчик	Промышленное предприятие
Программа повышения квалификации в формате e-learning для предприятий наноиндустрии «Автоматизированная обработка информации и управление производством наноструктурированных керамических материалов и покрытий»	ФИОП РОСНАНО» и ООО «Вириал» в рамках проекта Национального Фонда подготовки кадров при участии Blackboard	ООО «Вириал»
Программа повышения квалификации в области применения наноструктурированных огнеупорных материалов для металлургических процессов	ФИОП «РОСНАНО» в рамках проекта МИСиС для ПАО «Северсталь»	ЧерМК
Программа повышения квалификации «Технологии производства и эксплуатации инновационных огнеупорных материалов и изделий для металлургических процессов»	ПАО «НЛМК»	ПАО «НЛМК»
Учебный модуль «Подготовка инжиниринговых команд для инновационных процессов переработки вторичных полимерных материалов»	ФИОП РОСНАНО, АНО «НАРК», ООО «Завод по переработке пластмасс им. «Комсомольской правды»	ООО «Завод по переработке пластмасс им. «Комсомольской правды»

делении режимов ее функционирования при выполнении конструкционных ограничений (по предельно допустимым размерам помещения, зонам обслуживания и ремонта, массе и габаритам оборудования) и технологических ограничений (по скорости потока в трубопроводе, времени транспортировки, уклону трубопровода). По результатам принятия проектных решений система формирует проектную документацию. Для оценки полученных знаний специалистов, в системе используется библиотека тестовых заданий, включающая вопросы по классификации процессов нефтехимической промышленности, нормам проектирования, классификации трубопроводов, способам их прокладки и проектирования, типам соединений, крепежным изделиям, правилам их подбора, способам управления, промышленной безопасности и др.

Компьютерная система для обучения специалистов проектированию и ресурсосберегающему управлению жизненным циклом нефтехимической продукции разработана при поддержке Германской службы академических обменов и апробирована на примере обучения специалистов инжиниринговой компании АО «ПМП».

Заключение

Предложенная архитектура научно-образовательного комплекса позволяет осуществлять практико-ориентированное обучение специалистов промышленных предприятий с учетом требований профессиональных стандартов, условий совместного выполнения технологических проектов специалистами инжиниринговой команды в области решения задачи проектирования и ресурсосберегающего управления жизненным циклом высокотехнологичной продукции с учетом требований маркетинговой стратегии, экологической безопасности и экономической эффективности. Реализованные образовательные программы на базе научно-образовательного комплекса приведены в таблице.

Апробация научно-образовательного комплекса, проведенная на примере обучения целевых групп персонала российских предприятий Северо-Западного региона полимерной (ООО «Завод по переработке пластмасс имени «Комсомольской правды»), кера-

мической (ООО «Вириал»), нефтехимической (АО «ПМП»), металлургической (ПАО «Северсталь»), ПАО «НЛМК») отраслей промышленности, подтвердила его работоспособность и возможность использования для подготовки специалистов в области проектирования и ресурсосберегающего управления жизненным циклом высокотехнологичной продукции различного назначения. Отдельные модули научно-образовательного комплекса выполнялись проектными командами студентов и аспирантов при проведении прикладных научно-исследовательских работ с поддержкой ФИОП РОСНАНО и Германской службы академических обменов под руководством преподавателей кафедры САПРИУ СПбГТИ (ТУ).

Использование современных технологий практико-ориентированного обучения и подготовки инжиниринговых команд позволяет повысить эффективность высокотехнологичных производств за счет внедрения систем проектирования и ресурсосберегающего управления, повысить качество выпускаемой продукции, улучшить экологические характеристики, а, главное, повысить профессиональный уровень кадрового обеспечения промышленных предприятий в условиях цифровизации экономики и модернизации системы профессиональных стандартов и квалификаций.

Список литературы

1. *Chistyakova T., Novozhilova I.* Intelligence computer simulators for elearning of specialists of innovative industrial enterprises. 2016 XIX IEEE International Conference on SCM. St. Petersburg. 2016, pp. 329-332. doi: 10.1109/SCM.2016.7519772.
2. *Дозорцев В.М.* Цифровые двойники в промышленности: генезис, состав, терминология, технологии, платформы, перспективы. Часть 1. Возникновение и становление цифровых двойников. Как существующие определения отражают содержание и функции цифровых двойников? // Автоматизация в промышленности. — 2020. № 9. С. 3-11.
3. *Reinig G.* Skript Prozessführung – Advanced Process Control. Ruhr-Universität Bochum, 2005.
4. *Meshalkin V., Khodchenko S.* The nature and types of engineering of energy- and resource-efficient chemical process systems. Polym. Sci. Ser. D (2017) 10: 347. doi: 10.1134/S1995421217040128.

5. *Chistyakova T.B. (2019). A Synthesis of Training Systems to Promote the Development of Engineering Competences. In E. Smirnova, & R. Clark (Eds.), Handbook of Research on Engineering Education in a Global Context (pp. 430-442). Hershey, PA: IGI Global. doi: 10.4018/978-1-5225-3395-5.ch036.*
6. *Chistyakova T.B., Kozlova S.P., Shlyago Yu.I., Novozhilova I.V. Scientific and educational complex for resource-saving management of life cycle of processes and processing of secondary polymeric materials//XXI Mendeliev Congress on General and Applied Chemistry. Book 3. Abstracts. — Saint Petersburg, 2019. p. 197.*
7. *Dvoretckii D., Dvoretckii S., Ostrovskii G. Integrated design of power- and resource-saving chemical processes and process control systems: Strategy, methods, and application. Theor Found Chem Eng 42, 26–36 (2008). doi: 10.1134/S0040579508010041.*
8. *Мокрозуб В.Г., Малыгин Е.Н., Карпушкин С.В. Постановка задачи разработки математического и информационного обеспечения процесса проектирования многоассортиментных химических производств // Вестник ТГТУ. — 2017. — Том 23. № 2. — С. 252 - 264.*
9. *Чистякова Т.Б., Защиринский С.В., Фураев Д.Н. Системы автоматизированного проектирования 3d моделей промышленных установок // Автоматизация в промышленности. — 2018. — № 11. — С. 9 - 12.*
10. *Chistyakova T., Novozhilova I., Kozlov V. (2019). Computer System of Industrial Data Mining for Resource-Saving Control of Steel-Smelting Converter Production. 523-526. 10.1109/SUMMA48161.2019.8947550.*

Чистякова Тамара Балабековна — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой систем автоматизированного проектирования и управления (САПРиУ) Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета) (СПбГТИ(ТУ)),

Новожилова Инна Васильевна — канд. техн. наук, доц. кафедры САПРиУ СПбГТИ(ТУ),

Фураев Дмитрий Николаевич — аспирант кафедры САПРиУ СПбГТИ(ТУ), начальник отдела комплексной поддержки информационных систем, АО «ПМП».

Контактный телефон +7(812) 494-93-54.

E-mail: nov@technolog.edu.ru

Intel представляет второе поколение квантового криогенного контроллера Horse Ridge

В рамках on-line конференции Intel Labs Day компания Intel представила Horse Ridge II — криогенный контроллер второго поколения, который позволяет точнее управлять квантовой системой. Среди новых функций: управление состоянием кубита и его считывание, а также управление электрическим потенциалом нескольких квантовых вентилях (квантовых логических элементов) — это необходимо для запутывания кубитов. Анонс Horse Ridge II — важный шаг для преодоления одного из самых больших препятствий в области квантовых вычислений — ограничения масштабируемости.

Новые функции. Horse Ridge II, как и контроллер первого поколения, использует технологию привода кубитов (cubit drive) — генерации радиочастотных импульсов — для манипулирования состоянием кубита. Вместе с тем появились две новые функции, которые обеспечивают интеграцию внешних электронных блоков управления в систему на кристалле (SoC), работающую внутри криогенного рефрижератора.

Новые функции обеспечивают:

- **считывание состояний кубитов.** Эта функция позволяет считывать текущее состояние кубита прямо в чипе с минимальными задержками и без необходимости хранить большие объемы данных, экономя память и электроэнергию;

- **мультивентильное импульсное модулирование.** Функция позволяет одновременно управлять большим числом однокубитных квантовых вентилях (логических элементов). Она является ключевой для эффективного считывания их состояний, а также запутывания и взаимодействия множества кубитов. В результате возможно создавать более масштабируемые системы.

В чип Horse Ridge II также интегрирован *программируемый микроконтроллер*. Его наличие позволяет достичь не только большей гибкости всей системы, но и реализовать сложные схемы работы функций управления. Микроконтроллер использует методы цифровой обработки сигнала для дополнительной фильтрации импульсов, что помогает уменьшить интерференции (нежелательные взаимодействия) между кубитами.

Horse Ridge II произведен с использованием энергоэффективной 22-нм технологии Intel® FinFET (22FFL). Рабо-

тоспособность контроллера подтверждена при температуре 4 К (-269,15 °С). Существующие квантовые компьютеры могут работать только при более низких температурах — в диапазоне милликельвинов, что всего на долю градуса выше абсолютного нуля (-273,15 °С). Однако кремниевые спиновые кубиты — основа квантовых достижений Intel — могут работать при температуре ≥ 1 К. Эта особенность делает проблему охлаждения квантовой системы не такой значительной.

Intel занимается исследованиями в области криогенного управления, чтобы обеспечить работу элементов управления и кремниевых спиновых кубитов при одинаковой температуре. Текущие достижения в этой области демонстрируют значительный прогресс и являются важнейшим звеном в долгосрочной стратегии Intel.

Почему это важно. Сегодняшние квантовые системы управляются электроникой, работающей при комнатной температуре. При этом кубитный чип размещен внутри рефрижератора растворения, и для связи с ним используется большое число коаксиальных кабелей. Такой подход не позволяет масштабировать систему до большого числа кубитов из-за ее размеров, стоимости, значительного энергопотребления и высокой тепловой нагрузки на рефрижератор.

Контроллер Horse Ridge первого поколения позволил Intel решить эту проблему, радикально снизив потребность в числе шкафов с оборудованием и кабелей для соединения с рефрижератором. Intel заменила их высокоинтегрированной системой-на-кристалле (SoC), которая значительно упрощает проектирование системы, сокращает время запуска и повышает производительность кубитов, используя сложные методы обработки сигналов. Также это позволяет команде разработчиков эффективно масштабировать квантовую систему до большего числа кубитов.

Ожидается, что корпорация Intel представит дополнительные технические подробности этой разработки в ходе Международной конференции по твердотельным схемам (ISSCC) в феврале 2021 г.

[Http://intel.com](http://intel.com)