

Инжиниринг цифрового тренажера для обучения операторов формования листового стекла

В.П. Мешалкин^{1,2}, Т.Б. Чистякова², Д.Ю. Петров^{3,4}✉

¹ Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва, 125047, Россия

² Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), г. Санкт-Петербург, 190013, Россия

³ Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов, 410028, Россия

⁴ Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, 410012, Россия

Ссылка для цитирования

Мешалкин В.П., Чистякова Т.Б., Петров Д.Ю. Инжиниринг цифрового тренажера для обучения операторов формования листового стекла // Программные продукты и системы. 2024. Т. 37. № 2. С. 213–220. doi: 10.15827/0236-235X.142.213-220

Информация о статье

Группа специальностей ВАК: 2.3.3

Поступила в редакцию: 31.03.2023

После доработки: 27.01.2024

Принята к публикации: 26.02.2024

Аннотация. В статье проведен анализ формования листового стекла флоат-методом, определены виды нештатных ситуаций технологического процесса. Выполнен кластерный анализ множества нештатных ситуаций, каждая из которых описана как теоретико-множественная модель. Для упрощения интерфейса цифрового тренажера разработаны модели бизнес-процессов для обучения и аттестации операторов. На основе анализа существующих бизнес-процессов предприятия в нотации BPMN 2.0 разработаны логико-информационные модели перспективных бизнес-процессов Разработка тестов и Аттестация сотрудников. При разработке архитектуры, режимов функционирования и программно-информационного обеспечения цифрового тренажера использована методика model-based system engineering, реализованная в среде визуального моделирования IBM Rhapsody на основе нотаций UML и SysML. Разработаны диаграммы вариантов использования и диаграммы классов цифрового тренажера с использованием языка UML, а также структура БД системы обучения, включающая критерии группировки ситуаций, характеристики ситуаций, функции пользователей системы, и структура ПО. Реализованы основные функции – обучение и тестирование операторов, ведение БД персонала цифрового тренажера, составление отчетов по результатам тестирования, редактирование БД по аварийным ситуациям на основе предварительного анализа опыта технологов и операторов. Цифровой тренажер разработан на языке PascalABC, для записи результатов использована текстовая БД. Разработан пользовательский интерфейс цифрового тренажера.

Ключевые слова: цифровой тренажер, обучение, бизнес-процесс, формование листового стекла, оператор, диаграмма вариантов использования, диаграмма классов, нештатная ситуация

Благодарности. Работа проведена в ИПТМУ РАН при выполнении госзадания Минобрнауки РФ, тема № FFNM-2022-0010 (разработка диаграмм, структуры и ПО цифрового тренажера), и при поддержке гранта РНФ, проект № 21-79-30029 (описание бизнес-процессов)

Введение. Для снижения риска ошибочных действий персонала при авариях и нештатных ситуациях на производстве необходимы специальные цифровые тренажеры, позволяющие операторам после обучения на них своевременно выбирать и выполнять регламентированные действия по переводу *технологического процесса* (ТП) из аварийного в штатный режим [1]. Цифровизированное управление рисками и безопасностью при проектировании энерго- и ресурсоэффективных химических производств обеспечивается за счет использования методов оптимизации показателей надежности [2]. На основе системного анализа опыта действий операторов в нештатных ситуациях (ухудшение качества, аварийные ситуации) разрабатываются математические модели

для их обнаружения на ранних стадиях [3, 4]. Математическое моделирование ТП производства листового стекла осуществляют специализированные программные комплексы GFM (Glass Furnace Model), NOGRID CFD и другие, а также универсальные программные комплексы Логос, ANSYS, COMSOL Multiphysics и т.п. Для повышения квалификации операторов необходимо использовать специальные цифровые тренажеры, интегрированные с информационными системами предприятия [5–7].

Высокоэффективное функционирование предприятий стекольной промышленности обеспечивается сокращением отходов формируемого стекла и затрат на производство при повышении качества выпускаемой продукции [8]. Увеличение количества отходов стекла во многом

связано с возникновением нештатных ситуаций, заканчивающихся аварийным обрывом ленты стекла [9], в результате производство несет убытки. Внедрение новых технологий и техники выполняют при капитальном ремонте производства листового стекла. Это обеспечивает переход производства на новый уровень производительности и обуславливает необходимость систематически повышать квалификацию технологов и операторов.

Перспективным направлением в области обучения и контроля знаний технологического персонала химических предприятий является использование цифровых тренажеров и инструментов Индустрии 4.0 [10, 11].

Для обучения операторов разработан цифровой тренажер. Определены параметры штатных режимов и основные нештатные ситуации, возникающие при формовании ленты стекла флоат-методом в ванне с расплавом олова.

Каждая нештатная ситуация описана как теоретико-множественная модель $E = \langle N, C, I, J, R, S \rangle$, где N – название аварийной ситуации; C – множество признаков аварийной ситуации; I – множество изображений пульта оператора, отображающих развитие аварийной ситуации с течением времени; J – ванна расплава общего вида; R – множество причин возникновения аварийной ситуации; S – последовательность действий оператора по ликвидации данной аварийной ситуации.

Для облегчения процессов обучения и аттестации операторов формования ленты стекла и упрощения интерфейса цифрового тренажера множество аварийных ситуаций разделено на подмножества (группы). Такое разделение проведено на основе кластерного анализа с использованием пакета прикладных программ NCSS. Получены пять кластеров (групп) нештатных ситуаций (см. таблицу).

Разработаны логико-информационные модели бизнес-процессов в текущем состоянии в нотации Business Process Model and Notation (BPMN) 2.0. На рисунке 1 в нотации BPMN 2.0 показаны логико-информационные модели бизнес-процессов Разработка тестов и Аттестация сотрудников. Представлены исполнители единиц деятельности в этих процессах – Главный технолог, Эксперт-технолог, Администратор комплекса для аттестации, Кадровик, Оператор формования листового стекла. Бизнес-процессы взаимодействуют с БД: 1С.Кадры, АСУТП, База тестов, Результаты обучения. Стартовыми событиями являются Утверждение нового технического регламента, Заверше-

ние разработки новых тестов, Прием оператора формования листового стекла на работу, Наступление срока переаттестации сотрудников.

Анализ логико-информационной модели бизнес-процессов показал, что тренажер должен функционировать в трех режимах: Оператор, Администратор, Эксперт. Выбор режима осуществляется на основе меню прав выбранного имени пользователя и пароля.

В режиме Оператор предусмотрены обучение операторов и их аттестация. Аттестация проводится двумя способами: по изображению ситуации и ее описанию оператор должен определить название ситуации, причины возникновения (для нештатных) и последовательность действий по переводу процесса в штатный режим или для заданной ситуации определяется последовательность действий конкретного специалиста с учетом синхронизации по времени его действий с действиями других специалистов в данном ТП.

В режиме Администратор осуществляются ведение БД пользователей (обучаемого персонала) и формирование отчетов по аттестации.

В режиме Эксперт заполняется и редактируется БД аварийных ситуаций, возникающих при формовании листового стекла методом флоат-процесса, с учетом изменения регламентов ТП и анализа практического опыта действий по устранению нештатных ситуаций и дефектов.

При разработке ПО цифрового тренажера использована методика MBSE (model-based system engineering), позволяющая выполнять управление требованиями, проектирование, анализ, верификацию и валидацию на протяжении всего жизненного цикла. Методика MBSE реализована в среде визуального моделирования IBM Rhapsody на основе нотаций UML и SysML.

На основе анализа требований определены варианты использования цифрового тренажера для разработки тестов и базы тестов, редактирования тестов, подготовки обучения и тестирования, анализа обучения и тестирования, отчета об обучении и тестировании, разработки базы обучения персонала, обучения оператора, тестирования оператора. С цифровым тренажером взаимодействуют акторы: оператор, эксперт, администратор, ПО 1С.Кадры и АСУТП.

На рисунке 2 показана диаграмма вариантов использования цифрового тренажера для обучения операторов формования листового стекла.

На основе анализа диаграммы вариантов использования разработана структура классов

Кластеры нештатных ситуаций

Clusters of emergency situations

Номер кластера	Основная причина неисправности	Нештатная ситуация
1	Прекращение подачи средств обеспечения формования листового стекла (электроэнергия, природный газ, вода, защитная атмосфера ванны с расплавом олова)	Кратковременное отключение электроэнергии
		Длительное отключение электроэнергии
		Полное прекращение подачи электроэнергии
		Отключение газа
		Прекращение подачи защитной атмосферы ванны с расплавом олова
2	Отказы устройств формования стекла	Отскок одного последнего бортоформирующего ролика
		Отскок одного непоследнего бортоформирующего ролика
		Поломка дозирующего шибера
		Поломка отсекающего шибера
		Отключение нагревателя
		Течь холодильника
		Остановка лера печи отжига
3	Прилипание стекла к ванне с расплавом олова	Налипание ленты стекла на бортоформирующий ролик
		Залипание ленты под бортоформирующий ролик
		Залипание стекломассы ко дну
		Залипание ленты стекла к окружке ванны
4	Инородные включения в разливе стекла	Крупное включение по краю ленты
		Крупное включение по центру ленты
		Камень в выработочном канале
5	Нестабильное состояние разлива стекла	Нестабильное состояние лужи

цифрового тренажера: Users – обеспечивает хранение информации о пользователях; Tests – содержит информацию о тестах; Test – подкласс для одного теста; Group – позволяет управлять пользователями; Attestation – обеспечивает процессы обучения и тестирования; Create_test – обеспечивает создание новых тестов. Диаграмма классов показана на рисунке 3. Для каждого пользователя определяются атрибуты: группа, имя, пароль, производство, ТП и режим ТП.

Для группировки ситуаций определены параметры: производство, ТП, режим ТП, группа ситуаций. Каждая нештатная ситуация в кластере описывается следующими характеристиками: название ситуации, множество признаков ситуации, графическое изображение на пульте оператора и общий вид ТП, отображаю-

щие развитие этой ситуации во времени, множество причин возникновения этой ситуации, последовательность действий персонала по обработке ситуации с учетом должностных обязанностей.

Структура функциональных подсистем цифрового тренажера представлена на рисунке 4.

Оператор обучается на основе последовательного изучения всех нештатных ситуаций, для каждой из которых демонстрируются пульт оператора и общий вид ТП с развитием ситуации во времени, список причин, признаков ситуации, действий по ее устранению, последовательность действий всех специалистов, участвующих в заданной ситуации, с учетом синхронизации по времени и длительности выполнения каждого действия (<https://swsys.ru/uploaded/image/2024-2/Meshalkin.html>).

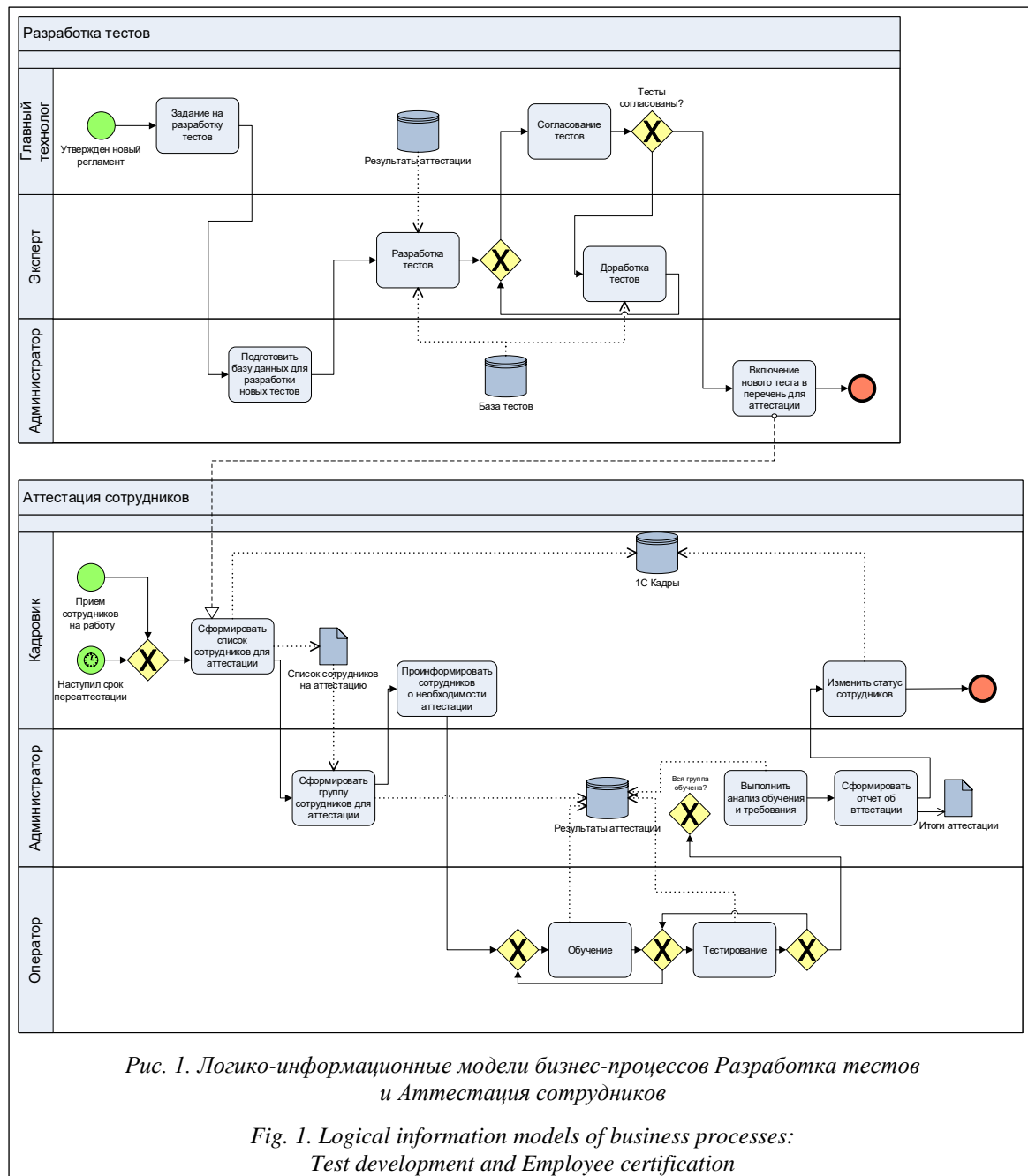


Рис. 1. Логико-информационные модели бизнес-процессов Разработка тестов и Аттестация сотрудников

Fig. 1. Logical information models of business processes: Test development and Employee certification

Тренажер осуществляет аттестацию операторов двумя способами: по изображению ситуации и ее описанию определяются название ситуации, причины возникновения (для нештатных) и последовательность действий по изменению ситуации; для заданной ситуации определяется последовательность действий конкретного специалиста с учетом синхронизации по времени его действий с действиями других специалистов в данном ТП (<http://www.swsys.ru/uploaded/image/2024-2/4.jpg>).

При предотвращении аварийной ситуации или ликвидации ее последствий важное значе-

ние имеет своевременное воздействие на ТП каждого из должностных лиц. Оператор обязан знать последовательность и длительность собственных действий и синхронизировать их с другими специалистами, работающими с данной нештатной ситуацией. Проконтролировать уровень знаний специалиста можно с использованием формы Синхронизация действий. Из списка действий необходимо своевременно выбрать истинные действия в правильной последовательности и в соответствии с должностью.

Цифровой тренажер реализован на языке PascalABC, а для хранения результатов исполь-

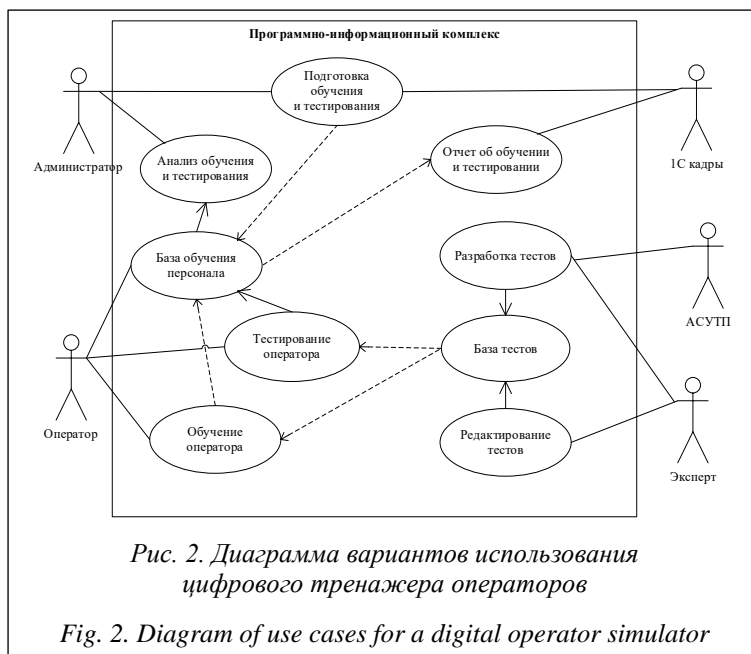


Рис. 2. Диаграмма вариантов использования цифрового тренажера операторов

Fig. 2. Diagram of use cases for a digital operator simulator

зована текстовая БД. В системе реализовано дерево развития ситуаций, обеспечивающее дополнительный режим обучения, в котором могут быть объединены несколько последовательных аварийных ситуаций.

Заключение

При производстве листового стекла предъявляются жесткие требования к качеству полу-

ченной продукции, при этом оно характеризуется большим количеством нештатных ситуаций. Для управления таким сложным ТП необходимы квалифицированные операторы, которые по характерным признакам могут идентифицировать нештатные ситуации на ранних этапах возникновения, понимать вызывающие их причины, выполнять регламентированные действия по их устранению.

Обучение и аттестацию операторов стекольного производства обеспечивает предложенный цифровой тренажер. Комплексное применение подходов к созданию тренажера на основе проектирования бизнес-процессов и разработки структуры обеспечения

с использованием универсального языка моделирования SysML позволило разработать цифровой тренажер для обучения операторов формирования листового стекла действиям в нештатных ситуациях.

Логико-информационные модели бизнес-процессов в программном комплексе Business Studio дают возможность описать взаимодействие участников процесса повышения квали-

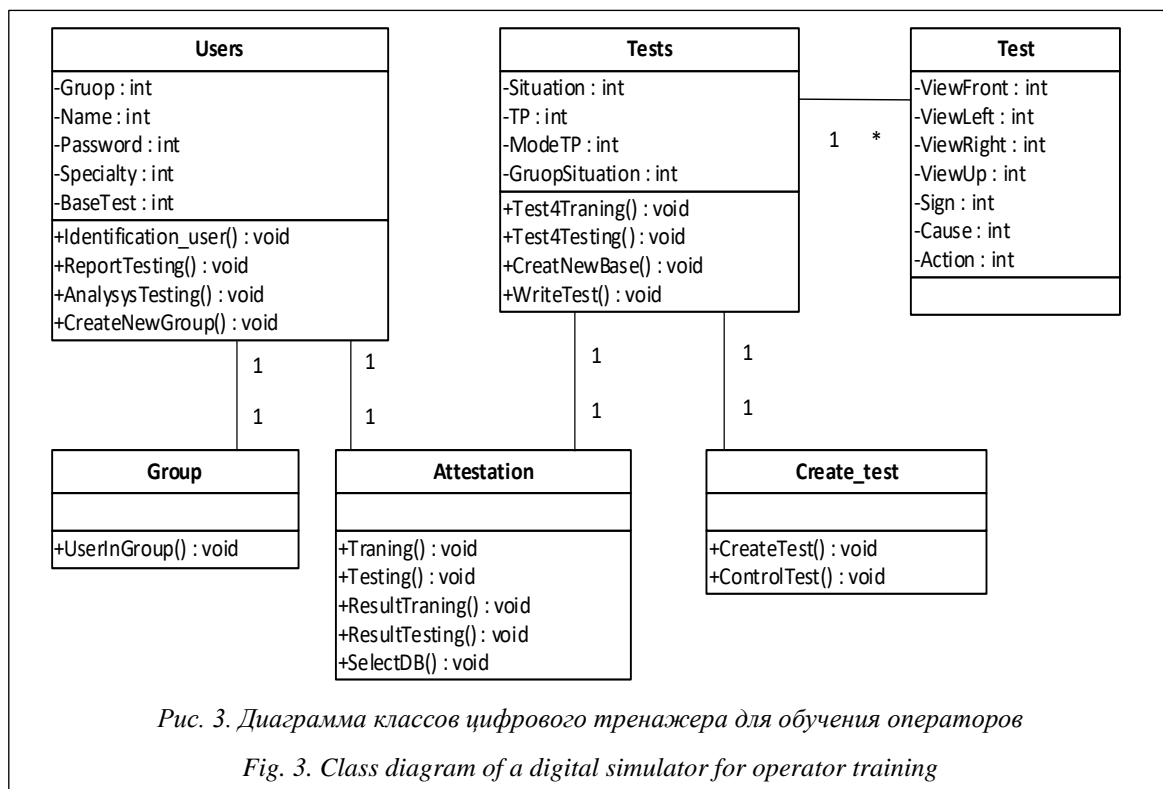


Рис. 3. Диаграмма классов цифрового тренажера для обучения операторов

Fig. 3. Class diagram of a digital simulator for operator training

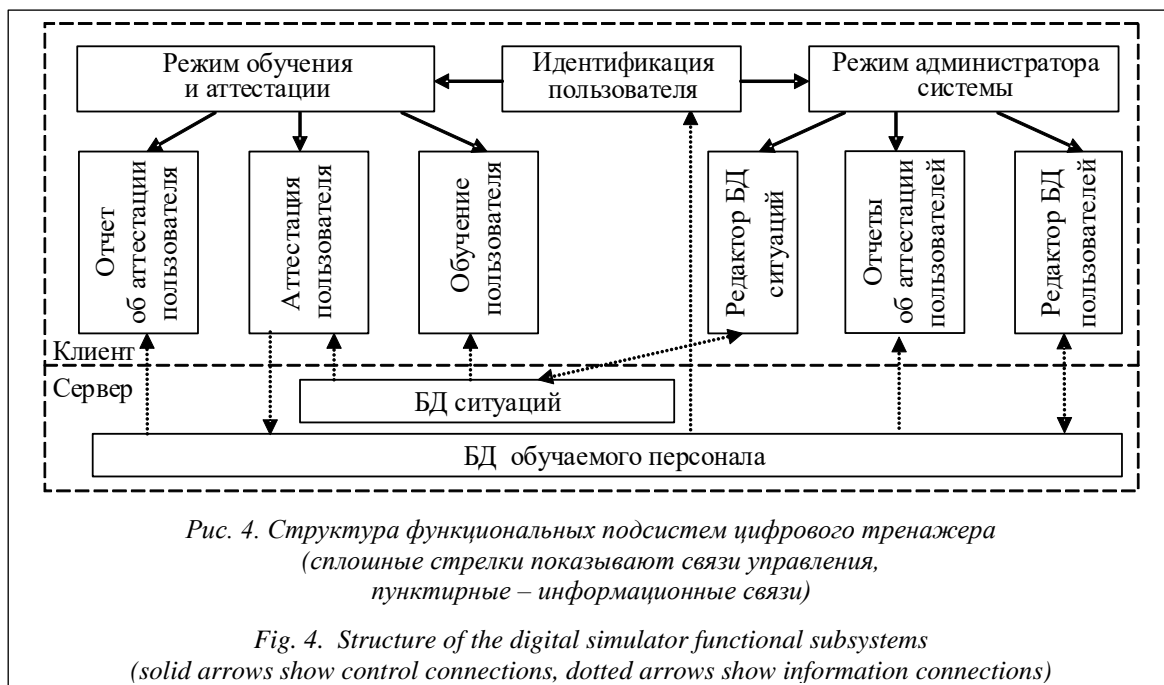


Рис. 4. Структура функциональных подсистем цифрового тренажера (сплошные стрелки показывают связи управления, пунктирные – информационные связи)

Fig. 4. Structure of the digital simulator functional subsystems (solid arrows show control connections, dotted arrows show information connections)

фикации. Эти модели в нотации BPMN 2.0 стали основой для разработки диаграммы вариантов использования в среде визуального моделирования IBM Rhapsody на языке SysML. Структура описания ситуаций ТП формования листового стекла обеспечивает разработку описания ТП варки стекла, его отжига и других процессов, необходимых для обучения персонала. Цифровой тренажер позволяет использовать в качестве обучающего материала анимацию и видеоролики. Это повышает наглядность процесса обучения и улучшает понимание ситуаций, возникающих в различных ТП. Разработанный цифровой тренажер является компонентом внедряемой в настоящее время на предприятии единой информационной системы предприятия. Тренажер обеспечивает возмож-

ность его использования для повышения квалификации производственного персонала промышленных объектов аналогичного класса (производство полимерной пленки, линолеума, бумаги и др.).

В процессе подготовки информации об аварийных ситуациях ТП для наполнения БД цифрового тренажера специалисты предприятия решают главную задачу – более полное понимание истинных причин возникновения нештатных ситуаций, а значит, и разработку новых, менее затратных способов их устранения. Перспективными направлениями развития цифрового тренажера являются разработка функций экспертной системы реального времени и обеспечение поддержки принятия решений производственным персоналом.

Список литературы

1. Marcano L., Haugen F.A., Sannerud R., Komulainen T. Review of simulator training practices for industrial operators: How can individual simulator training be enabled? *Safety Sci.*, 2019, vol. 115, pp. 414–424. doi: 10.1016/j.ssci.2019.02.019.
2. Meshalkin V.P., Dovi V.G., Bobkov V.I., Belyakov A.V., Butusov O.B. et al. State of the art and research development prospects of energy and resource-efficient environmentally safe chemical process systems engineering. *Mendelev Communications*, 2021, vol. 31, no. 5, pp. 593–604. doi: 10.1016/j.mencom.2021.09.003.
3. Фураев Д.Н., Чистякова Т.Б. Компьютерная система для обучения ресурсосберегающему проектированию процессов вторичной переработки нефти // *Изв. СПбГТИ(ТУ)*. 2021. № 59. С. 101–106. doi: 10.36807/1998-9849-2021-59-85-101-106.
4. Koteleva N., Kuznetsov V., Vasileva N. A simulator for educating the digital technologies skills in industry. Part one. Dynamic simulation of technological processes. *Appl. Sci.*, 2021, vol. 11, no. 22, art. 10885. doi: 10.3390/app112210885.
5. Moreland J., Toth K., Fang Y., Block M. et al. Interactive simulators for steel industry safety training. *Steel Research Int.*, 2019, vol. 90, no. 4, art. 1800513. doi: 10.1002/srin.201800513.
6. Жуков И.В., Хабаров М.Д., Харазов В.Г. Компьютерные тренажеры для тестирования и разработки систем усовершенствованного управления технологическим процессом // *Изв. СПбГТИ(ТУ)*. 2017. № 40. С. 111–114.
7. Богомолов Б.Б., Быков Е.Д., Меньшиков В.В., Зубарев А.М. Организационно-технологическое моделирование химико-технологических систем // *Теоретические основы химической технологии*. 2017. Т. 51. № 2. С. 221–229. doi: 10.1134/S0040579517010043.

8. Han J., Li L., Wang J., Chen Sh., Liu Ch., Li C. Simulation and evaluation of float glass furnace with different electrode positions. *J. of the American Ceramic Society*, 2022, vol. 105, no. 2, pp. 7097–7110. doi: 10.1111/jace.18700.
9. Петров Д.Ю. Архитектура информационной системы управления жизненным циклом цифрового двойника для непрерывного производства // Изв. СПбГИ(ТУ). 2021. № 57. С. 98–104.
10. Жуков И.В., Харазов В.Г. Результаты поэтапной модернизации и эксплуатации усовершенствованной системы управления (APC-системы) // Изв. СПбГИ(ТУ). 2017. № 41. С. 105–112.
11. Hashim A.H.H., Hussein B.N. Role of operator training simulator (OTS) in capability building towards the fourth Industrial Revolution (IR 4.0). *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 778, art. 012044. doi: 10.1088/1757-899X/778/1/012044.

Software & Systems

doi: 10.15827/0236-235X.142.213-220

2024, 37(2), pp. 213–220

Digital simulator for training sheet glass forming operators

Valery P. Meshalkin ^{1,2}, Tamara B. Chistyakova ², Dmitry Yu. Petrov ^{3,4}✉

¹ Mendeleev University of Chemical Technology of Russian Federation,
Moscow, 125047, Russian Federation

² St. Petersburg State Technological Institute (Technical University),
St. Petersburg, 190013, Moscow, 125047, Russian Federation

³ Institute for Precision Mechanics and Control Problems of the Russian Academy of Sciences,
Saratov, 410028, Russian Federation

⁴ Saratov State University, Saratov, 410012, Russian Federation

For citation

Meshalkin, V.P., Chistyakova, T.B., Petrov, D.Yu. (2024) 'Digital simulator for training sheet glass forming operators', *Software & Systems*, 37(2), pp. 213–220 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.142.213-220

Article info

Received: 31.03.2023

After revision: 27.01.2024

Accepted: 26.02.2024

Abstract. The paper analyzes flat glass forming by a float method and determines the types of abnormal technological process situations. It shows a cluster analysis of many emergency situations; each situation is described as a set-theoretic model. To simplify a digital simulator interface, there are developed business process models for operator training and certification. The paper shows logical and information models of promising business processes Test development and Employee certification developed in BPMN 2.0 notation based on the analysis of existing business processes of an enterprise. When developing the architecture and modes of operation and software and information support of the digital simulator, the authors used a model-based system engineering methodology implemented in the IBM Rhapsody visual modeling environment based on UML and SysML notations. The authors developed use case diagrams and class diagrams of the digital simulator using the UML language, a software structure, as well as a training system database structure that includes criteria for grouping situations, situation characteristics, functions of system users. The main implemented functions are the following: training and testing of operators; maintaining a database of digital simulator personnel; compiling reports on test results; editing an emergency database based on a preliminary analysis of technologists' and operators' experience. The digital simulator is designed in the PascalABC language, the results are recorded in a text database. The user interface of the digital simulator has been also developed.

Keywords: digital simulator, training, business process of forming flat glass, operator, use case diagram, class diagram, emergency situation

Acknowledgements. The work was performed at the IPTMU RAS when fulfilling the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic no. FFM-2022-0010); the work was supported by a grant from the Russian Science Foundation according to the project no. 21-79-30029

References

1. Marcano, L., Haugen, F.A., Sannerud, R., Komulainen, T. (2019). 'Review of simulator training practices for industrial operators: How can individual simulator training be enabled?', *Safety Sci.*, 115, pp. 414–424. doi: 10.1016/j.ssci.2019.02.019.
2. Meshalkin, V.P., Dovì, V.G., Bobkov, V.I., Belyakov, A.V., Butusov, O.B. et al. (2021) 'State of the art and research development prospects of energy and resource-efficient environmentally safe chemical process systems engineering', *Mendeleev Communications*, 31(5), pp. 593–604. doi: 10.1016/j.mencom.2021.09.003.

3. Furaev, D.N., Chistyakova, T.B. (2021) 'Computer system for teaching resource-saving design of oil recycling processes', *Bull. of SPSIT(TU)*, (59), pp. 101–106 (in Russ.). doi: 10.36807/1998-9849-2021-59-85-101-106.
4. Koteleva, N., Kuznetsov, V., Vasileva, N. (2021) 'A simulator for educating the digital technologies skills in industry. Part one. Dynamic simulation of technological processes', *Appl. Sci.*, 11(22), art. 10885. doi: 10.3390/app112210885.
5. Moreland, J., Toth, K., Fang, Y., Block, M. et al. (2019) 'Interactive simulators for steel industry safety training', *Steel Research Int.*, 90(4), art. 1800513. doi: 10.1002/srin.201800513.
6. Zhukov, I.V., Habarov, M.D., Kharazov, V.G. (2017) 'Computer simulators for testing and optimization of technological solutions in refining', *Bull. of SPSIT(TU)*, (40), pp. 111–114 (in Russ.).
7. Bogomolov, B.B., Bykov, E.D., Men'shikov, V.V., Zubarev, A.M. (2017) 'Organizational and technological modeling of chemical process systems', *Theoretical Foundations of Chemical Eng.*, 51(2), pp. 238–246 (in Russ.). doi: 10.1134/S0040579517010043.
8. Han, J., Li, L., Wang, J., Chen, Sh., Liu, Ch., Li, C. (2022) 'Simulation and evaluation of float glass furnace with different electrode positions', *J. of the American Ceramic Society*, 105(2), pp. 7097–7110. doi: 10.1111/jace.18700.
9. Petrov, D.Yu. (2021) 'Architecture of the information system for life cycle management of digital twin for continuous processes', *Bull. of SPSIT(TU)*, (57), pp. 98–104 (in Russ.).
10. Zhukov, I.V., Kharazov, V.G. (2017) 'The results of the gradual upgrading and operation of the advanced control system (APC system)', *Bull. of SPSIT(TU)*, (41), pp. 105–112 (in Russ.).
11. Hashim, A.H.H., Hussein, B.N. (2020) 'Role of operator training simulator (OTS) in capability building towards the fourth Industrial Revolution (IR 4.0)', *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 778, art. 012044. doi: 10.1088/1757-899X/778/1/012044.

Авторы

Мешалкин Валерий Павлович^{1, 2},
академик РАН, д.т.н., профессор, директор,
vpmeshalkin@gmail.com
Чистякова Тамара Балабековна²,
д.т.н., профессор, зав. кафедрой, chistb@mail.ru
Петров Дмитрий Юрьевич^{3, 4},
к.т.н., доцент, старший научный сотрудник,
зав. кафедрой, iac_sstu@mail.ru

Authors

Valery P. Meshalkin^{1, 2}, Academician of RAS,
Dr.Sc. (Engineering), Professor, Director,
vpmeshalkin@gmail.com
Tamara B. Chistyakova², Dr.Sc. (Engineering),
Professor, Head of Chair, chistb@mail.ru
Dmitry Yu. Petrov^{3, 4}, Cand. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, Senior Researcher,
Head of Chair, iac_sstu@mail.ru

¹ Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева,

г. Москва, 125047, Россия

² Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), г. Санкт-Петербург, 190013, Россия

³ Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов, 410028, Россия

⁴ Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, 410012, Россия

¹ Mendeleev University of Chemical Technology of Russian Federation, Moscow, 125047, Russian Federation

² St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), St. Petersburg, 190013, Russian Federation

³ Institute for Precision Mechanics and Control Problems of the Russian Academy of Sciences, Saratov, 410028, Russian Federation

⁴ Chernyshevsky National Research State University of Saratov, Saratov, 410012, Russian Federation