DOI: 10.17122/ntj-oil-2020-1-38-55

УДК 622.24

И.Д. Мухаметгалиев, З.В. Агзамов (Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация)

РАЗРАБОТКА ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОГО ИНТЕРФЕЙСА ТРЕНАЖЕРА НАКЛОННО-НАПРАВЛЕННОГО БУРЕНИЯ

Ilmir D. Mukhametgaliev, Zufar V. Agzamov (Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation)

DEVELOPMENT OF THE HUMAN-MACHINE INTERFACE OF THE DIRECTIONAL DRILLING SIMULATOR

Введение

Человеко-машинный интерфейс (ЧМИ) с процессом управления работой технологического оборудования для наклонно-направленного бурения (ННБ) охватывает инженерные решения, обеспечивающие взаимодействие людей-операторов различных должностей (бурильщика, инженера ННБ, бурового супервайзера) с управляемым ими буровым оборудованием. Тем не менее, данный ЧМИ должен разрабатываться также с учетом возможности решать более сложные задачи многоуровневого управления траекторией ННБ [1], в том числе, с использованием методов искусственного интеллекта [2-4].

В общем случае, разрабатываемый ЧМИ тренажера, конечно же, имеет различия для названных операторов, принимающих активное участие в управлении технологическим процессом ННБ при их совместном обучении: интерфейс для инженера по наклонно-направленному бурению и супервайзеру осуществляется, в основном, посредством диалоговых окон на дисплее компьютера, а для бурильщика - интерфейс с буровым

Background

The human-machine interface (HMI) with the control of technological equipment operation for directional drilling covers engineering solutions that ensure the interaction of human operators of various professions (driller, directional drilling engineer, drilling supervisor) with the drilling equipment they manage. Nevertheless, this HMI should also be developed taking into account the possibility of solving more complex problems of multi-level control of the directional drilling trajectory, including using artificial intelligence methods.

The directional drilling simulator HMI has differences for these operators, who are actively involved in the technological process of directional drilling control during their joint training: the HMI for the directional drilling engineer and the supervisor is carried out mainly through dialog windows on the computer display, and the HMI with the drilling equipment for the driller is provided by handles, buttons, switches, etc., as

оборудованием обеспечиваются рукоятками, кнопками, переключателями и пр., а также различными табло, в том числе, цифровыми, для отображения технологической информации.

Как будет показано далее, ЧМИ для тренажера управления наклонно-направленным бурением для операторов, включая бурильщика, может быть построен исключительно посредством диалоговых окон (программный тренажер) без существенного снижения качества обучения.

Качество разрабатываемого ЧМИ оценивается в ходе проведения тренингов с данным тренажером при совместном обучении основных операторов, участвующих в управлении ННБ, для чего рассчитываются соответствующие критерии эффективности.

Тренажеры для работников нефтегазовой отрасли имеют различные назначения: тренажеры могут разрабатываться с целью обучения специалистов, демонстрации технологического процесса, а также имитационного моделирования. Однако каким бы ни был тренажер, в большинстве случаев от него требуется как можно лучше имитировать производственный процесс и реалистичнее моделировать рабочую среду. В связи с большим количеством производителей скважинных телеметрических систем, их различной модификации, конечно же, разрабатываемый ЧМИ тренажера ННБ не может точно соответствовать всем элементам ЧМИ ПО телеметрических систем. Тем не менее, авторы поставили перед собой цель разработать как можно более универсальный ЧМИ тренажера ННБ, который был бы близок к ЧМИ большинству программных продуктов для телеметрических систем.

Цели и задачи

Целью исследований явилась разработка ЧМИ для программного тренажера по наклонно-направленному бурению нефтяных и газовых скважин. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- провести обзор и анализ функционирования ЧМИ аналогичных программных тренажеров и промышленного программного обеспечения для ННБ;
- сформировать требования к ЧМИ разрабатываемого тренажера;
- сформировать и оптимизировать функциональные области диалоговых окон тренажера ННБ;
- провести оценку эффективности разработанного ЧМИ тренажера ННБ.

Результаты

Разработан ЧМИ тренажера ННБ, который способен реалистично имитировать

well as various displays, including digital ones, for displaying technological information.

The HMI for a directional drilling control simulator for operators, including a driller, can be built exclusively through dialog windows (software simulator) without significantly reducing the quality of training.

The quality of directional drilling simulator HMI is estimated during the training with this simulator for the joint training of the main operators involved in the directional drilling control, so the relevant performance criteria are calculated.

Simulators for oil and gas industry specialists have various purposes: simulators can be developed with the aim of training specialists, demonstrating the technological process, as well as simulation. However, whatever the simulator is, it is required to simulate the production process as best as possible and more realistic to simulate the working environment. Due to the large number of downhole telemetry systems manufacturers, their various modifications, the directional drilling simulator HMI cannot exactly match all the HMI elements of the telemetry systems software. Nevertheless, the authors set themselves the goal of developing the most versatile directional drilling simulator HMI, which would be close to the of most telemetry systems software HMI.

Aims and Objectives

The aim of the research is the HMI development for the software simulator for oil&gas well directional drilling. To achieve this target it is necessary to solve the following objectives:

- to review and analyze the HMI operation of similar software simulators and field software for directional drilling;
- to develop requirements for the simulator HMI;
- to develop and optimize the functional parts of the dialog windows of the directional drilling simulator;
- to evaluate the effectiveness of the directional drilling simulator HMI

Results

The HMI of the directional drilling simulator was developed, which is capable of realistically simulating the most complete list of the main technological processes when drilling directional and horizontal wells. The HMI dialog

наиболее полный перечень основных технологических процессов при бурении наклонно-направленных и горизонтальных скважин. Диалоговые окна данного ЧМИ в значительной степени отражают функционирование ЧМИ промыслового программного обеспечения поддержки бурения нефтяных и газовых скважин. Разработанный ЧМИ показал свою эффективность в ходе проведения тренингов с данным тренажером при совместном обучении бурильщика, инженера по ННБ и бурового супервайзера.

windows reflect the operation of the HMI field software for supporting oil and gas drilling. The simulator HMI has shown its effectiveness during the trainings with this simulator for the joint training of a driller, an directional drilling engineer and a drilling supervisor.

Ключевые слова: человеко-машинный интерфейс; тренажер наклонно-направленного бурения; диалоговое окно тренажера; имитация процесса бурения скважин; обучение; наклонно-направленное бурение

Key words: human-machine interface; directional drilling simulator; simulator dialog window; well drilling simulation; training; directional drilling

Обзор интерфейсов тренажеров наклонно-направленного бурения

Для разработки человеко-машинный интерфейс (ЧМИ) тренажера наклонно-направленного бурения (ННБ) и выбора облика диалоговых окон необходимо, прежде всего, провести обзор и проанализировать ЧМИ аналогичных по своему функциональному назначению тренажеров, существующих на рынке для обучения ННБ.

Тренажер компании «Learn to drill» предназначен для обучения основам ликвидации газонефтеводопроявления (ГНВП). ЧМИ тренажёра разработан таким образом, что оператор видит статус выполнения операций, параметры которых он может регулировать. Процесс управления технологическими процессами сопровождается анимацией, элементы управления аналогичны контроллерам, применяемым на производстве (рисунок 1) [5]. ЧМИ для мобильного приложения «Wellcontrol», работающего в среде операционной системы IOS, содержит мнемосхему гидравлической линии буровой установки. Анимационное сопровождение, создающее эффект присутствия, визуализирует изменение технологического процесса в зависимо-

сти от выбранных команд оператора (рисунок 2). Тренажер «Drillsim 5000» содержит ЧМИ, который отображает множество модулей, имитируемых рабочие места специалистов в бурении. Тренажер устроен таким образом, чтобы оператор мог тренироваться на базе виртуальной версии либо физической приборной панели, благодаря возможности подключения множества контроллеров по имитации осевой нагрузки на долото, регулирования параметров промывки и т.д. Функциональная возможность по обмену данными в реальном времени через интерфейсы позволяет подключить несколько физических приборных панелей управления бурением к единому интерфейсу (монитору) (рисунок 3).

В ЧМИ тренажера бурения АМТ-231 используется мнемосхема технологического процесса бурения скважин. ЧМИ данного тренажера поддерживает режим «Автоматический», при котором оператор может управлять объектом с помощью элементов управления - физической клавиатуры или рукоятками, подобными производственным (рисунок 4).

Управление тренажером осуществляется одним оператором, поэтому составные части ЧМИ консолидированы в одном окне.

Рисунок 1. Диалоговое окно тренажера компании «Learn to drill»

Рисунок 2. Диалоговое окно тренажера «Wellcontrol»

Рисунок 3. Диалоговое окно тренажера по ликвидации ГНВП (слева), реальный вид пульта бурильщика по управлению противовыбросовым оборудованием (справа)

Рисунок 4. Внешний вид тренажера «AMT-231»

Несмотря на то, что система управления тренажера оснащена множеством кнопок и рукояток для управления процессом бурения, очевидно, что реальное рабочее место бурильщика будет намного отличаться от тренажера: механические свойства данных ручек и кнопок, их расположение, будет совершенно другим - и поэтому на рабочем месте бурильщику все равно придется переучиваться, получая навыки работы с реальным оборудованием. В этом смысле обучение управлению процессом бурения на тренажере с помощью клавиатуры и мышки ничем не хуже, тем более что это не вводит тренируемого в заблуждения, что он уже полностью готов к управлению на рабочем месте [6].

Обзор и функциональные области интерфейса промыслового программного обеспечения для направленного бурения

При разработке ЧМИ специализированного тренажера ННБ нельзя ограничиваться рассмотрением только существующих на рынке аналогичных тренажеров, поскольку промысловое программное обеспечение (ПО) для ННБ постоянно совершенствуется. По этой причине необходимо также проанализировать ЧМИ современного промыслового ПО ННБ.

В производственном секторе бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин применяется множество различных специализированных программных продуктов, позволяющих автоматически решать сложные технологические задачи ННБ. При разработке тренажера было решено в максимальной степени адаптировать интерфейс виртуального тренажера к внешнему виду промышленного ПО (рисунок 5).

Отметим общие информационно-функциональные характеристики программ, которые применяются при строительстве наклонно-направленных скважин:

- табло, указывающее направление отклоняющей забойной двигателя;
- значение зенитного угла и азимута в режиме реального времени;
- параметры бурения: осевая нагрузка на долото, давление в манифольде;

- момент и частота вращения бурильной колонны, механическая скорость бурения, производительность насосов и т.д.;
- состояние скважины: глубина скважины, параметры кривизны и т.д.

Анализ состава интерфейсных окон программного обеспечения для поддержки бурения скважин позволяет выделить типовые функциональные области, предназначенные для решения задач управления, информирования, выполнения расчетов и т.д.

Работу с типовыми функциональными областями (зонами) можно рассмотреть на примере интерфейса программно-телеметрического комплекса «Слим Пулс» компании «Шлюмбергер», приведенного на рисунке 6.

В его составе можно выделить 4 функциональные зоны:

Зона 1 - информационная область, которая с помощью световой сигнализации способна оперативно оповещать о возникающих в процессе бурения осложнениях или статусе текущего процесса, отображая следующую информацию: уровень качества сигнала забойной телеметрической системы, положение КНБК относительно забоя, прихватоопасность, наименование текущего скважинного процесса. Следует отметить, что все показатели вычисляются и интерпретируются с использованием математических моделей и алгоритмов идентификации;

Зона 2 - область отображения информации о текущем значении положения отклонителя КНБК, а также нескольких его предыдущих значений, представленных в виде жирных точек, сдвигающихся к центру круга при каждом новом приходе значения измерения, образуя, таким образом, предысторию изменения значения положения отклонителя, что важно в процессе ориентирования КНБК.

На рисунке 6 можно увидеть, что отклонитель ориентирован в направлении 26° относительно гравитационной составляющей, и это значение не менялось при предыдущих 10 измерениях. В этой области также отображается дополнительная информация о наличии и расположении телесистемы и наддолотного модуля, значениях коррекции измерений и пр.

Рисунок 5. Диалоговые окна рабочего ПО, отображающие состояние процесса бурения с телесистемами: «Navigator» (а), «Toolteck» (б), «Vertex» (в), «BTC-172» (г)

Рисунок 6. Диалоговое окно программно-телеметрического комплекса «Слим Пулс»

Зона 3 - область отображения информации о нескольких последних инклинометрических измерениях, необходимых для расчета пространственного положения траектории скважины: глубина замера, зенитный угол, азимут, глубина по вертикали, рассчитанная интенсивность искривления.

Зона 4 - информационные поля с текущими числовыми значениями основных параметров: текущей и вертикальной глубине скважины, давлении в манифольде, положении талевого блока, времени бурения и циркуляции, параметрах кривизны скважины и др.

Как можно видеть, в целом данное окно служит исключительно для отображения информации, но никак не для ввода каких-либо управляющих воздействий, поскольку управление осуществляется не с экрана компьютера, а с помощью ручек, переключателей и кнопок с пульта буровика.

Аналитико-экспериментальная оптимизация облика диалоговых окон ЧМИ

Для анализа качества и эффективности ЧМИ тренажера в процессе его разработки оценивались ключевые показатели времени принятия решений для оптимизации размеров управляющих графических объектов диалоговых окон, состава и расположения блоков ЧМИ для информирования и управления имитируемым процессом.

Адекватность работы ЧМИ оценивалась по двум ключевым показателям: времени принятия пользователем одного единственного решения путем ввода команды (наращивание, расхаживание, запуск насосов и т.д.) и времени принятия решения из нескольких альтернативных решений (грузить, частота вращения, ЧДХ насосов, корректор отклонителя) [7]. Расчет по методике Фиттса позволил определить время, которое было затрачено оператором, во-первых, на оценку различных ситуаций, возникающих в тренажере, выбрать единственно верное решение (например запуск насосов после наращивания буровой колонны) и, во-вторых, на время, необходимое для воздействия на элемент виртуального управления в интерфейсе (на-

пример, время нажатия на соответствующую кнопку):

$$T = \alpha + b \log_2 \left(\frac{D}{S} + 1 \right), \quad (1)$$

где T (мс) - среднее время, затраченное на окончание движения;

a (мс) - среднее время начала/завершения движения курсора;

b - величина, находящаяся в прямой зависимости от среднестатистической скорости нажатия на соответствующую кнопку;

D (мм) - расстояние от точки начала движения курсора до центра графического объекта;

S (мм) - ширина объекта, проходящая вдоль траектории движения курсора;

a и b являются константами, которые возможно получить экспериментально.

Для расчета времени выбора одного решения из множества предложенных (грузить, расхаживать, частота вращения) был применен закон Хика:

$$T = \alpha + b \log_2 (n + 1), \quad (2)$$

где T (мс) - среднее время, затраченное на выбор одной из альтернатив;

n - количество альтернатив, из которых производится выбор;

a и b - коэффициенты пропорциональности, определяемые эмпирически.

Расчеты времени, затраченного на принятие единственного правильного решения, позволили скорректировать размеры графических объектов и сгруппировать в отдельные зоны элементы управления имитируемым процессом бурения направленной скважины, а также элементы информирования пользователя о текущих параметрах и режимах бурения и кривизне скважины [6].

Требования к разработке ЧМИ тренажера ННБ

Анализ ЧМИ аналогичных по своему функциональному назначению программных тренажеров, существующих на рынке для обучения ННБ, а также современного промышленного ПО ННБ, позволил сформировать

требования к ЧМИ разрабатываемого тренажера. При этом ключевыми требованиями к разработке тренажера авторы считают следующие:

1) элементы интерфейса виртуального тренажера должны быть максимально приближены к экранным формам реальных программ, применяемых в ходе проектирования и бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин;

2) возможность проведения совместного обучения бурильщика, инженера ННБ и супервайзера в едином информационном поле, при этом оперирование динамическими процессами строительства скважин в тренажере должно осуществляться путем нажатия рационально расположенных кнопок, одноименных к производственному ПО;

3) необходимость группировки кнопок диалогового окна в различные блоки: управления параметрами и режимами имитации бурения, кнопки для получения информации о состоянии процесса искривления скважины, ввод параметров искривления скважины для построения ее траектории;

4) необходимость воссоздать анимации управления положениями отклонителей забойной телеметрической системы, процесса ликвидации аварии связанной с потерей подвижности бурильной колонны, изменение положения указательной стрелки датчиков контроля параметров бурения и уровня бурильной колонны положения аналогично тем, которые содержатся в программных продуктах производственного назначения;

5) необходимость применения алгоритмов для упрощения работы в тренажере (дружелюбный интерфейс): технология «горячие клавиши» (упрощение ввода команд изменения производительности насосов, осевой нагрузки на долото, частоты вращения бурильной колонны, корректировки положения отклонителей), управление курсором с помощью навигационных клавиш (быстрый ввод параметров глубины бурения, зенитного угла и азимута скважины), масштабирование в зависимости характеристик монитора компьютера без потери задуманного образа экранной формы;

6) необходимость автоматизации второстепенных процессов наращивания после завершения имитации бурения новой свечи, запуска и остановки насосов, расхаживания бурильной колонны, которые имеют вспомогательную цель;

7) необходимость парольного доступа к личному кабинету оператора, где содержится база данных по текущему состоянию его успеваемости, спроектированная инклинометрия и настройка параметров тренировки;

8) дизайн и цветовая гамма интерфейса должны соответствовать принятым стандартам по разработке прикладных программных продуктов, применяемых в области бурения наклонных скважин [8-13].

Результаты разработки ЧМИ тренажера ННБ

В тренажер были интегрированы модели по оперативному информированию, зона обновления инклинометрических замеров, блок управления, модуль обработки данных статического замера и мгновенных измерений динамических параметров кривизны, круговое табло по ориентированию КНБК, информационные таблички (рисунок 7).

В данном диалоговом окне собраны все основные средства, необходимые для управления процессом наклонно-направленного бурения [14]. Основные необходимые для тренинга функциональные области, соответствующие рабочему программному обеспечению, дополняются в составе диалогового окна тренажера специфическим информационным полем прохождения тренинга 6. Вместо разработки нескольких различных диалоговых окон тренажера, специализированных для бурильщика, инженера по наклонно-направленному бурению, супервайзера и др., авторы тренажера приняли решение о формировании единого универсального интерфейсного окна при прохождении тренинга различными специалистами.

Данное решение обусловлено тем, что весь объем информации универсального окна нужен каждому из рассматриваемых специалистов, хотя выполняемые ими функции немного различаются.

Рисунок 7. Диалоговое окно тренажера с разделением на функциональные области

Так, например, при прохождении тренинга бурильщиком действия кнопок области 2 управления подразумевают непосредственное управление технологическим оборудованием. В случае прохождения тренинга инженером по наклонно-направленному бурению действия кнопок данной области лишь формируют задания бурильщику для соответствующего выполнения управления.

Для супервайзера данные кнопки не активируются, и поля в данной области лишь отражают действия по управлению инженером по наклонно-направленному бурению и бурильщика.

Наиболее актуальными для тренинга инженера по наклонно-направленному бурению являются области 1, 3 и 5; для бурильщика - 2 и 4; для супервайзера на буровой - 1, 3-5.

Область 1 предназначена для отображения последних данных статического замера зенитного и азимутального углов и соответствующей им глубины (11).

Область 2 предназначена для управления технологическим оборудованием: имеет кнопки выполнения запуска/останова насосов (16), операций наращивания (23) и расхаживания (20), а также кнопки для изменения значений нагрузки на инструменте (1), частоты вращения ротора (17), частоты двойных ходов насоса (10) и положения отклонителя (5). Как было сказано ранее, действия кнопок различаются при прохождении тренинга бурильщиком, инженером по наклонно-направленному бурению и супервайзером: соответственно - непосредственное управление технологическим оборудованием, формирование задания бурильщику для соответствующего выполнения управления, отображение действий по управлению.

Область 3 предназначена для управления пространственным положением траектории скважины путем подбора необходимых интенсивностей искривления по заданным интервалам глубин на основе расчета и прогнозирования положения траектории скважи-

ны в пространстве, в том числе - расчета положения забоя скважины относительно круга допуска. Данная область представлена в табличном виде, в строки таблицы вводятся значения зенитного и азимутального углов (действительных или подбираемых) по глубинам скважины (12), и автоматически рассчитываются декартовы координаты (13, 14), а также другие параметры, включая положение забоя скважины относительно целевого круга допуска и интенсивности искривления на данном участке траектории (15).

Области 4 и 6 предназначены для отображения идентификационной информации об обучающемся (Ф.И.О., организация и др.), а также для отображения информации о текущем состоянии и результативности прохождения тренинга.

Область 5 предназначена для отображения наиболее важных технологических параметров для управления бурением: имеет круглое поле плана (проекция в перпендикулярной плоскости) скважины (3) со шкалой (4), отражающее текущее значение положения отклоняющей КНБК (2) и несколько его предыдущих значений, наименование текущего гравитационного (GTF) или магнитного (MTF) метода пространственного ориентирования (19), имеет информационное табло, отражающее текущие значения давления в манифольде (9), осевой нагрузки на долото (7), мгновенной механической скорости

бурения (8) и момента вращения бурильной колонны (18), а также еще одно информационное табло, отражающее текущие значения глубины скважины (6), положения талевого блока (21) и глубины долота (22).

Кроме вышеозначенных ключевых требований к разрабатываемому тренажеру, авторами сформулированы задачи (функции отображения), которые должно выполнять программное обеспечение визуализации:

- отображение технологической информации в удобной для человека графической форме (как правило, в виде интерактивных мнемосхем);
- отображение аварийных сигнализаций технологического процесса;
- архивирование технологических данных (сбор истории процесса);
- предоставление оператору возможности манипулировать (управлять) объектами управления;
- контроль доступа и протоколирование действий оператора; автоматизированное составление отчетов за произвольный интервал времени (посменные отчеты, еженедельные, ежемесячные и т.д.).

Данные задачи были реализованы при помощи нескольких вспомогательных диалоговых окон, с которыми взаимодействует основное окно тренажера. Разработанные диалоговые окна также соответствуют производственному ПО и приведены на рисунках 8-11.

Рисунок 8. Диалоговые окна для проектирования траектории скважины: тренажер ННБ (слева), производственное ПО (справа)

Рисунок 9. Диалоговые окна для подбора типа и параметров забойного бурового оборудования: тренажер ННБ (слева), производственное ПО (справа)

Рисунок 10. Диалоговые окна для решения технологических задач при ликвидации аварий, связанных с потерей подвижности буровой колонны: тренажер ННБ (слева), производственное ПО (справа)

Рисунок 11. Диалоговые окна для регистрации и интерпретирования параметров бурения, фиксирования критических значений: тренажер ННБ (слева), производственное ПО (справа)

Влияние качества ЧМИ на эффективность совместного обучения на тренажере

ЧМИ является важнейшей составляющей тренажера, поскольку именно ЧМИ отвечает за реалистичность представления текущей технологической ситуации, поэтому качество ЧМИ существенно влияет на эффективность обучения на тренажере, тем более для сложного формата совместного обучения бурильщика, инженера ННБ и супервайзера. Поэтому оценку качества ЧМИ целесообразно проводить в рамках анализа совместного обучения, для которого необходимо сформировать критерий эффективности.

Одной из известных методик оценки эффективности применения тренажерных систем при совместном обучении является использование геометрического индекса оценки качества [15].

Согласно данной методике критерий эффективности совместных тренировок на основе тренажера принимается равным площади основания пирамиды, представленной на рисунке 12.

При этом стороны основания пирамиды a_i соответствуют надежности выполнения тренировок членами «команды» в составе бурильщика, инженера по ННБ и бурового супервайзера.

В качестве параметра, описывающего усложнение оперативной обстановки, примем индекс оценки качества выполнения тренинга, который зависит от интенсивности ошибок персонала и времени выполнения тренинга.

Геометрический индекс оценки качества выполнения тренинга соответствует площади основания (горизонтальных сечений) пирамиды:

$$K_H^j = S = \frac{1}{4R^j} \prod_i e^{-\lambda_i \cdot t_i^j},$$

где $i = 1, 2, 3$ - участники тренинга (стороны основания);

$j = 1, 2, 3, \dots, n$ - виды подготовки (горизонтальные сечения пирамиды);

R^j - коэффициент изменения оперативной обстановки;

λ_i - интенсивность ошибок за единицу

времени, 1/с;

t_i - время выполнения задания

$$t_{i_{\min}} \leq t_i \leq t_{i_{\max}};$$

$$\frac{K_H^j}{K_H^{j+1}} = k,$$

где k - коэффициент подобия, показывающий эффективность того или иного метода подготовки персонала.

При $k > 1$ выполняется достаточное условие эффективности методики подготовки.

Типовая картина изменения индекса качества совместной подготовки при повторных тренингах на базе тренажера представлена на рисунке 13, где приведен график изменения данного индекса (линия, построенная по экспериментальным точкам), а также его полиномиальная аппроксимация (плавная линия).

Из данного графика (рисунок 13) можно увидеть, что качество подготовки растет с увеличением количества тренингов, причем наиболее быстрый рост наблюдается в начале графика.

Тем не менее, данный график не достигает единичного уровня и устанавливается примерно на уровне немного меньшем единицы.

Характерно, что в процессе установления этого уровня (4-8 тренингов по оси абсцисс) видны отклонения от установившегося значения, обусловленные случайной составляющей в развитии ситуаций тренинга.

Исходя из поведения графиков интуитивно понятно, что оптимальное количество тренингов составляет 3-6 повторений, что согласуется с результатами проведенных тренингов с данным тренажером: практика проведения совместных тренингов бурильщика, инженера ННБ и супервайзера показала, что для достижения достаточного уровня качества тренажерной подготовки необходимо не менее 3-4 тренингов, что достигается за счет эффективной работы всех составляющих тренажера (например, математические модели, способ имитации технологических процессов и т.д.), и, в первую очередь, ЧМИ.

Рисунок 12. Пирамида совместного обучения

Рисунок 13. Графики «Индекса оценки качества» при совместной тренажерной подготовке K_{H}^j

Выводы

1. Для разработки ЧМИ любого обучающего программного тренажера необходим детальный обзор и анализ интерфейса как производственного ПО, так и виртуальных тренажеров. Результаты данного сравнительного анализа показали, что при разработке ЧМИ программного тренажера по ННБ обязательными являются как информационные области для отображения текущего состояния прохождения тренинга, так и технологические области, включающие табло с направлением отклонителя КНБК, отображение параметров кривизны скважины, параметров бурения и текущего статуса производственного процесса и т.д.

2. В рамках аналитико-экспериментальной оптимизации облика диалоговых окон ЧМИ тренажера ННБ проанализированы качество и эффективность данного ЧМИ по двум ключевым показателям: времени принятия одного единственного или нескольких правильных решений. С этой целью выполнены необходимые расчеты согласно законов Фиттса и Хика, в результате которых стала очевидна необходимость коррекции размеров графических объектов и группирования блоков управления имитируемым технологическим процессом, а также

блоков информирования.

3. Сформулированы специальные требования к разработке ЧМИ обучающего программного тренажера и возлагаемые на него задачи. В результате проведенных работ было разработано диалоговое окно тренажера, которое является единым и универсальным для операторов, участвующих в управлении технологическим процессом ННБ: бурильщика, инженера ННБ, бурового супервайзера, и обеспечивающее необходимый уровень качества совместного обучения. Данное диалоговое окно включает 6 областей, отражающих текущее состояние прохождения тренинга, данные текущего статического замера, данные инклинометрии, оперативную информацию о состоянии технологических операций, данные измерения положения отклонителя и управления процессами ННБ.

4. С использованием геометрического индекса эффективности тренингов сформированы требования к минимально необходимому количеству совместных тренингов на базе тренажера. Результаты исследования показали, что для достижения достаточного уровня качества совместной тренажерной подготовки бурильщика, инженера ННБ и супервайзера необходимо не менее 3-4 совместных тренингов.

Список литературы

1. Алимбеков Р.И. Задачи многоуровневого управления траекторией бурения наклонно-направленных нефтяных скважин // Проблемы нефтегазового комплекса России: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. Уфа: УГНТУ, 1998. С. 195-199.
2. Агзамов З.В. Управление с прогнозирующими моделями траекторией нефтяных и газовых скважин // Датчики и системы. 2017. № 12. С. 55-59.
3. Агзамов З.В., Мухаметгалиев И.Д. Экспертная система формирования компоновки низа бурильной колонны для управления направленным бурением скважин // Проблемы автоматизации технологических процессов добычи, транспорта и переработки нефти и газа: сб. тр. V Всеросс. заоч. науч.-практ. конф. Уфа: УГНТУ, 2017. С. 134-140.
4. Васильев В.И., Нураев И.Ф., Агзамов З.В. Управление направленным движением бурового

References

1. Alimbekov R.I. Zadachi mnogourovneвого upravleniya traektoriei bureniya naklonno-napravlennykh neftyanykh skvazhin [Tasks of Multi-Level Control of the Direction of Drilling of Directional Oil Wells]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Problemy neftegazovogo kompleksa Rossii»* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference «Problems of the Oil and Gas Complex of Russia»]. Ufa, USPTU Publ., 1998, pp. 195-199. [in Russian].
2. Agzamov Z.V. Upravlenie s prognoziruyushchimi modelyami traektoriei neftyanykh i gazovykh skvazhin [Management with Predictive Models of the Trajectory of Oil and Gas Wells]. *Datchiki i sistemy - Sensors and Systems*, 2017, No. 12, pp. 55-59. [in Russian].
3. Agzamov Z.V., Mukhametgaliev I.D. Ekspertnaya sistema formirovaniya komponovki niza buril'noi kolonny dlya upravleniya napravlenym bureniem skvazhin [Expert System for the Formation

инструмента на основе нечеткой логики // Вопросы управления и проектирования в информационных и кибернетических системах: межвуз. науч. сб. ст. Уфа: УГАТУ, 1996. С. 94-98.

5. Исмаков Р.А., Рахматуллин Д.В., Мухаметгалиев И.Д. Применение виртуального программы тренажера для ЭВМ «Слайд Мастер 1.18» для обучения практическим навыкам бурения нефтяных и газовых скважин с использованием забойных телеметрических систем // Сб. матер. Всеросс. науч.-практ. конф., посвященной 85-летию доктора технических наук, профессора, академика РАЕН В.И. Кудинова. Ижевск: Удмуртский государственный университет, 2016. С. 93-102.

6. Исмаков Р.А., Рахматуллин Д.В., Мухаметгалиев И.Д. Квалификационный отбор инженерно-технического персонала в сфере наклонно-направленного бурения с применением инженерного тренажера «Слайд Мастер 1.18» // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли: матер. междунар. науч.-практ. конф. Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2016. С. 262-267.

7. Хрусталева В.И. Проектирование человеко-машинных интерфейсов с учетом эргономических аспектов разработки программного обеспечения // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 11. С. 109-112.

8. ГОСТ 21829-76. Система «человек - машина». Кодирование зрительной информации. Общие эргономические требования. М.: Госстандарт, 1976. 9 с.

9. ГОСТ 23000-78. Система «человек - машина». Пульты управления. Общие эргономические требования. М.: Госстандарт, 1987. 12 с.

10. ГОСТ 26387-84. Система «человек - машина». Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2006. 7 с.

11. ГОСТ 21480-76. Система «человек - машина». Мнемосхемы. Общие эргономические требования. М.: Госстандарт, 1986. 6 с.

12. ГОСТ 22902-78. Система «Человек - машина». Отсчетные устройства индикаторов визуальных. Общие эргономические требования. М.: Госстандарт, 1979. 7 с.

13. ГОСТ 20.39.108-85. Комплексная система общих технических требований. Требования по эргономике, обитаемости и технической эстетике. Номенклатура и порядок выбора. М.: Госстандарт, 1985. 19 с.

14. Мухаметгалиев И.Д., Исмаков Р.А., Чиглинцев С.С. Аккредитация кадров и рационализация набора полевого персонала объектов бурения // Сервисные услуги в добыче нефти: матер. II науч.-техн. конф. Уфа: УГНТУ, 2015. С. 148-154.

15. Шарафутдинов А.А. Совершенствование оценки эффективности совместной тренажерной подготовки персонала объектов ТЭК и личного состава пожарной охраны: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: УГНТУ, 2016. 149 с.

of the Bottom of the Drill String to Control Directional Drilling]. *Sbornik trudov V Vserossiiskoi zaochnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov dobychi, transporta i pererabotki nefti i gaza»* [Proceedings of the V All-Russian Extramural Scientific and Practical Conference «Problems of Automation of Technological Processes of Oil, Gas and Oil Production, Transport and Processing»]. Ufa, UGNTU Publ., 2017, pp. 134-140. [in Russian].

4. Vasilev V.I., Nugaev I.F., Agzamov Z.V. Upravlenie napravlenym dvizheniem burovogo instrumenta na osnove nechetkoi logiki [Control of Directional Movement of a Drilling Tool Based on Fuzzy Logic]. *Mezhvuzovskii nauchnyi sbornik statei «Voprosy upravleniya i proektirovaniya v informatsionnykh i kiberneticheskikh sistemakh»* [Interuniversity Scientific Collection of Articles «Management and Design Issues in Information and Cybernetic Systems»]. Ufa, USATU Publ., 1996, pp. 94-98. [in Russian].

5. Ismakov R.A., Rakhmatullin D.V., Mukhametgaliev I.D. Primenenie virtual'nogo programmy trenazhera dlya EVM «Slaid Master 1.18» dlya obucheniya prakticheskim navykam bureniya neftyanykh i gazovykh skvazhin s ispol'zovaniem zaboinykh teletmetricheskikh sistem [The Use of the Virtual Simulator Program for the Computer «Slide Master 1.18» for Training in Practical Skills in Drilling Oil and Gas Wells Using Downhole Telemetry Systems]. *Sbornik materialov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 85-letiyu doktora tekhnicheskikh nauk, professora, akademika RAEN V.I. Kudinova* [The Collection of Materials of the All-Russian Scientific-Practical Conference Dedicated to the 85th Anniversary of Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences V.I. Kudinova]. Izhevsk, Udmurtskii gosudarstvennyi universitet Publ., 2016, pp. 93-102. [in Russian].

6. Ismakov R.A., Rakhmatullin D.V., Mukhametgaliev I.D. Kvalifikatsionnyi otbor izhenerno-tekhnicheskogo personala v sfere naklonno-napravlennoogo bureniya s primeneniem inzhenerenogo trenazhera «Slaid Master 1.18» [Qualification Selection of Engineering Personnel in the Field of Directional Drilling Using the Engineering Simulator «Slide Master 1.18»]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Dostizheniya, problemy i perspektivy razvitiya neftegazovoi otrasli»* [Materials of the International Scientific-Practical Conference «Achievements, Problems and Prospects for the Development of the Oil and Gas Industry»]. Al'met'evsk, Al'met'evskii gosudarstvennyi neftyanoi institut Publ., 2016, pp. 262-267. [in Russian].

7. Khrustalev V.I. Proektirovanie cheloveko-mashinnykh interfeisov s uchetom ergonomicheskikh aspektov razrabotki programmnogo obespecheniya

[Design of Human-Machine Interfaces Taking into Account Ergonomic Aspects of Software Development]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii - Modern High Technologies*, 2019, No. 11, pp. 109-112. [in Russian].

8. *GOST 21829-76. Sistema «chelovek - mashina». Kodirovanie zritel'noi informatsii. Obshchie ergonomicheskie trebovaniya* [State Standard 21829-76. Man-Machine System. Coding of Visual Information. General Ergonomic Requirements]. Moscow, Gosstandart Publ., 1976. 9 p. [in Russian].

9. *GOST 23000-78. Sistema «chelovek - mashina». Pul'ty upravleniya. Obshchie ergonomicheskie trebovaniya* [State Standard 23000-78. Man-Machine System. Control Consoles. General Ergonomic Requirements]. Moscow, Gosstandart Publ., 1987. 12 p. [in Russian].

10. *GOST 26387-84. Sistema «chelovek - mashina». Terminy i opredeleniya* [State Standard 26387-84. Man-Machine System. Terms and Definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 7 p. [in Russian].

11. *GOST 21480-76. Sistema «chelovek - mashina». Mnemoskhemy. Obshchie ergonomicheskie trebovaniya* [State Standard 21480-76. Man-Machine System Mnemo-Schemes. General Ergonomic Requirements]. Moscow, Gosstandart Publ., 1986. 6 p. [in Russian].

12. *GOST 22902-78. Sistema «Chelovek - mashina». Otschetnye ustroystva indikatorov vizual'nykh. Obshchie ergonomicheskie trebovaniya* [State Standard 22902-78. Man-Machine System. Reading Device of Visual Display. General Ergonomic Requirements]. Moscow, Gosstandart Publ., 1979. 7 p. [in Russian].

13. *GOST 20.39.108-85. Kompleksnaya sistema obshchikh tekhnicheskikh trebovaniy. Trebovaniya po ergonomike, obitaemosti i tekhnicheskoi estetike. Nomenklatura i poryadok vybora* [State Standard 20.39.108-85. General Requirements Complex System. Human Factors, Inhabitation and Technical Esthetics Requirements. Nomenclature and Order of Choice]. Moscow, Gosstandart Publ., 1986. 19 p. [in Russian].

14. Mukhametgaliev I.D., Ismakov R.A., Chiglintsev S.S. Akkreditatsiya kadrov i ratsionalizatsiya nabora polevogo personala ob'ektov bureniya [Accreditation of Personnel and Rationalization of Recruitment of Field Personnel for Drilling Facilities]. *Materialy II nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Servisnye uslugi v dobyche nefi»* [Materials of the II Scientific and Technical Conference «Services in Oil Production»]. Ufa, UGNTU Publ., 2015, pp. 148-154. [in Russian].

15. Sharafutdinov A.A. *Sovershenstvovanie otsenki effektivnosti sovmestnoi trenazhernoi podgotovki personala ob'ektov TEK i lichnogo sostava pozharnoi okhrany: dis. kand. tekhn. nauk* [Improving the Assessment of the Effectiveness of Joint Training of Personnel of Fuel and Energy Facilities and Fire Brigade Personnel: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, UGNTU Publ., 2016. 149 p. [in Russian].

Авторы

• Мухаметгалиев Ильмир Дамирович
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Ассистент «Бурение нефтяных и газовых
скважин»
Российская Федерация, 450064, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
e-mail: ilmir8787@mail.ru

• Агзамов Зуфар Варисович, канд. техн. наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Доцент кафедры «Автоматизация
технологических процессов и производств»
Российская Федерация, 450064, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
тел. (347)-242-07-32
e-mail: zufar_agzamov@mail.ru

The Authors

• Mukhametgaliev Ilmir D.
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant of Oil and Gas Well Drilling Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064,
Russian Federation
e-mail: ilmir8787@mail.ru

• Agzamov Zufar V., Candidate
of Engineering Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Automation of Technological
Processes and Industrial Facilities Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064,
Russian Federation
tel: (347)-242-07-32
e-mail: zufar_agzamov@mail.ru