

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РЕАЛИЗАЦИИ СОВРЕМЕННЫХ ТРЕНАЖЕРНЫХ ИМИТАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ

А.С. Лосенков, Т.С. Ющенко,

С.А. Стрельникова, А.А. Казаков (ООО «Энергоавтоматика»)

В связи с использованием современных систем автоматики при управлении и обслуживании магистральных нефтепроводов требования к диспетчерскому персоналу, а также к надежности самих систем автоматики и автоматизации на сегодняшний день являются очень высокими. Одним из самых эффективных способов подготовки кадров для управления магистральными трубопроводами является использование в обучающем процессе тренажерных комплексов. Кроме того, испытания и настройку ПО систем автоматики также удобно и безопасно проводить на тренажерных имитационных комплексах. Третьей важной задачей является поддержка технолога при составлении карты технологических режимов и переходов на нефтепроводе. Все эти задачи обуславливают высокие требования, предъявляемые к современным тренажерным комплексам магистральных нефтепроводов. В связи с этим тренажеры в своем составе должны иметь качественные гидродинамические модели нестационарных процессов, модули полной имитации систем линейной и стационарной автоматики, вспомогательных систем, а также модули создания сценариев обучения и контроля за их выполнением обучаемым.

Ключевые слова: тренажерный имитационный комплекс, гидродинамическая модель, линейная и стационарная автоматика.

Введение

Работа магистральных нефтепроводов (МН) характеризуется сложными ТП, аварии в ходе которых приводят к значительным экономическим и экологическим потерям. В настоящее время управление большинством МН происходит в автоматизированном режиме. На технологических объектах установлено современное оборудование, работающее с использованием микропроцессорных систем автоматики, вследствие чего требования к качеству обслуживания и диспетчерского управления являются очень высокими.

Одним из самых эффективных методов подготовки кадров для управления МН является введение в обучающий процесс интегрированных систем на базе тренажерных комплексов. Согласно [1], индивидуальные и совместные занятия на тренажерах оставляют в памяти 75...90% информации, в то время как лекции — только 10...15%. Особенно эффективными являются занятия в условиях решения сложных задач в режиме реального времени на тренажерных комплексах существующих объектов.

С учетом современных требований добывающих и транспортных компаний нефтегазовой отрасли, помимо основных обучающих функций, тренажеры должны выступать в качестве полноценных имитационных программно-вычислительных комплексов, способных моделировать стационарные и переходные гидродинамические процессы в трубопроводе, имитировать действия линейной и стационарной автоматики, состояния и характеристики технологических объектов нефтепровода, учитывать свойства нефтепродукта, то есть выступать полной заменой реального трубопровода для ПО верхнего уровня. Поэтому современные тренажерные имитационные комплексы служат не только для обучения диспетчерского персонала, но также существенно помогают технологам при разработке карты режимов и составлении плановых переходов, а также отделам АСУТП

при проведении испытаний систем верхнего и среднего уровня, установленных в диспетчерских пунктах.

Созданием тренажерных систем диспетчерского управления с середины XX века занимаются как российские, так и зарубежные специалисты. В частности, свои научные работы посвятили данной теме Григорьев Л. И. [2] и Митичкин С. К. [3]. В работе [4] авторы приводят историю становления тренажерных систем для нефтяной отрасли.

С начала 1990-х годов компания ООО «Энергоавтоматика» занимается созданием и практическим внедрением тренажерных имитационных комплексов собственной разработки как для отдельных технологических объектов нефтепроводов, так и для МН в целом, в том числе для МН «Восточная Сибирь — Тихий Океан» (ВСТО). Последний был запущен в 2009 г. и до сих пор ведется его плановое расширение до максимальной пропускной способности в 80 млн. т в год. В связи с этим на нефтепроводе устанавливается самая современная система автоматики и предъявляются высокие требования к ПО в диспетчерских пунктах и, следовательно, к тренажерному имитационному комплексу.

Практический опыт, приобретенный при разработке и внедрении тренажерных имитационных комплексов МН «ВСТО» и МН «Куюмба — Тайшет», позволил сформировать основные положения, без которых невозможно существование современных тренажеров МН.

Рассмотрим подробно структуру и возможности современных тренажерных имитационных комплексов, устанавливаемых на МН.

Структура тренажерного имитационного комплекса

Так как основная задача тренажерного имитационного комплекса — это обучение диспетчеров в условиях, предельно близких к реальным, то в состав комплекса должны входить все основные АРМы, уста-

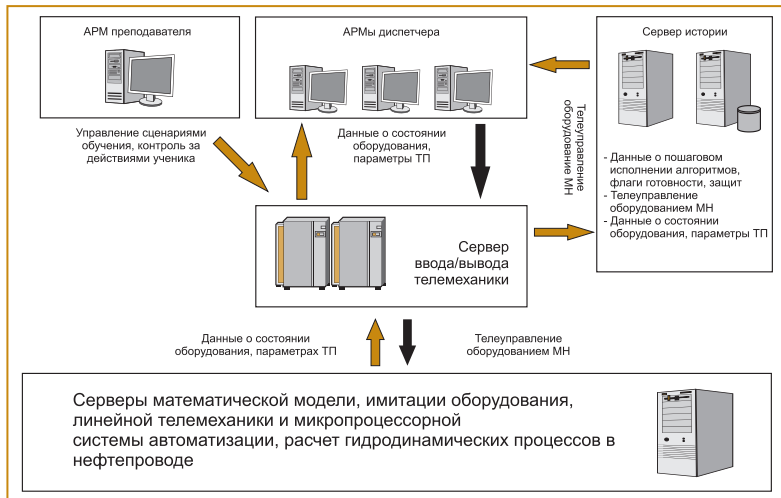


Рис. 1. Общая схема тренажерного имитационного комплекса

новленные в диспетчерском пункте (или максимально приближенные аналоги), с помощью которых ведется контроль и управление технологическими участками МН и насосно-перекачивающими станциями (НПС). Кроме того, необходим отдельный АРМ для преподавателя, с которого он может выбирать сценарии обучения и вести контроль выполнения заданий, а также управлять технологическим оборудованием и процессами в нефтепроводе. В результате в состав тренажерного имитационного комплекса входят:

- АРМ преподавателя, на который устанавливается специализированное ПО, позволяющее управлять работой нефтепровода, создавать сценарии обучения, изменять характеристики технологического оборудования, задавать аварийные ситуации на НПС и линейных контрольных пунктах (КП) и т. д.;

- сервер математической модели и имитации станционной и линейной автоматики, на который устанавливается математическая модель гидродинамических процессов в трубопроводе (например, ПО Cassandra производства ООО «Энергоавтоматика»), модули имитации линейной и станционной автоматики. Для передачи данных между АРМами и серверами внутри программного комплекса используется ОПС-сервер (или другое ПО передачи данных, используемое в диспетчерском пункте);

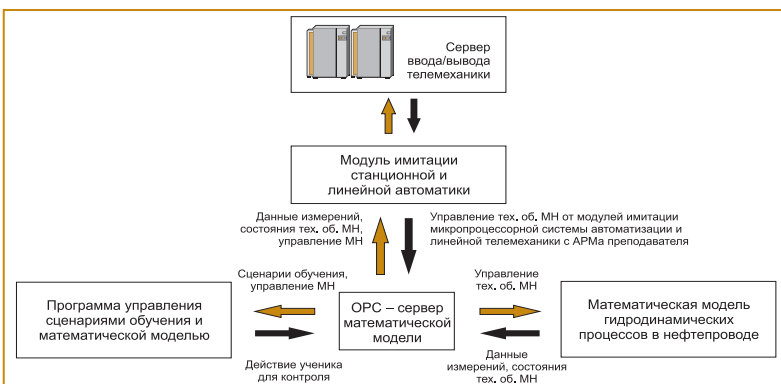


Рис. 2. Схема модулей специализированного ПО тренажерного имитационного комплекса

- АРМ диспетчера № 1 (АРМ системы диспетчерского контроля и управления);
- АРМ диспетчера № 2 (АРМ системы управления);
- АРМ диспетчера № 3 (АРМ системы обнаружения утечек);
- АРМ диспетчера № 4 (АРМ системы поддержки диспетчера);
- (Число АРМов диспетчера определяется конкретным нефтепроводом).

ПО АРМов диспетчера является идентичным ПО, установленному в диспетчерском пункте, или максимально приближенным аналогом.

Общая схема тренажерного имитационного программно-технического комплекса показана на рис. 1.

Сервер ввода/вывода телемеханики, сервер истории и АРМы диспетчера идентичны (или максимально приближены к) серверам и АРМам, установленным в диспетчерском пункте, в то время как на АРМ преподавателя и серверах математической модели, имитации оборудования микропроцессорной системы автоматизации и линейной телемеханики установлено специализированное ПО.

Структурная схема специализированного ПО для имитации гидродинамических процессов в трубопроводе, модулей линейной и станционной автоматики и для создания и управления сценариями обучения приведено на рис. 2.

Тренажерный имитационный комплекс имеет модульную структуру, и его состав может варьироваться в зависимости от предъявляемых требований и поставленных перед системой задач.

Основные задачи тренажерного имитационного комплекса

На сегодняшний день в связи с бурным развитием и внедрением специализированного ПО для АСУТП на МН требования к тренажерным имитационным комплексам значительно выросли. Кроме основной задачи по обучению персонала появился ряд дополнительных не менее важных задач.

Современные тренажеры должны представлять собой имитационные программно-технические комплексы, способные заменять для ПО диспетчерского пункта остальную часть реального трубопровода, в том числе имитировать всю автоматику нижнего и среднего уровня, моделировать сложные гидродинамические процессы в нефтепроводе и выдавать все измеряемые значения (расхода, давления, температуры, потребляемой мощности и т. д.).

Основные задачи программного комплекса можно разбить на три части:

1) обучение диспетчерского персонала трубопровода в предельно приближенных

к реальным условиям. Можно выделить две основные подзадачи при обучении:

- обучение диспетчеров с целью формирования знаний и навыков управления МН в штатных/нештатных ситуациях;
- периодическое обучение диспетчеров с целью поддержания у них знаний и навыков управления МН в штатных/нештатных ситуациях;

2) информационная поддержка технолога. Расчет произвольных стационарных и нестационарных технологических режимов трубопровода с различными характеристиками технологического оборудования и релогическими свойствами нефти. Расчет параметров трубопровода во время переходных режимов, а также пуска и останова технологического участка МН. Расчет изменения параметров МН при запуске и проходе средств очистки и диагностики (СОД), пуске противотурбулентных присадок (ПТП) в МН, изменении свойств нефти, замене рабочих колес насосов, регуляторов и другого технологического оборудования МН;

3) тестирование и проверка ПО, установленного или планируемого к использованию на АРМах и серверах в диспетчерском пункте. Серверы математической модели и имитации линейной и станционной автоматики полностью имитируют гидродинамические процессы в трубопроводе, автоматику нижнего и среднего уровня и позволяют тестировать ПО диспетчерского пункта в максимально приближенных к реальным условиям, без риска возможных аварий на реальном нефтепроводе и какого-либо влияния на его работу.

Функциональность отдельных модулей программного комплекса

Тренажерный имитационный программно-технический комплекс является модульным и имеет блочную структуру. В соответствии с требованиями, предъявляемыми на каждом объекте, собирается необходимая структура комплекса. Рассмотрим основные базовые модули комплекса.

Математическая модель нестационарных гидродинамических процессов в разветвленных нефтепроводах.

Наиболее наукоемким и сложным модулем в тренажерном имитационном комплексе является гидродинамическая модель нестационарных процессов. Создание такой математической модели основывается на комплексном использовании фундаментальных положений гидродинамики вязкой сжимаемой жидкости, современных методов решения систем нелинейных дифференциальных уравнений и анализе информации о характеристиках технологического оборудования, используемых на МН. С теоретическими положениями, лежащими в основе создания таких моделей, можно познакомиться в [5]. Отдельные особенности математического моделирования в МН описаны в [6, 7].

Отметим важные функции, которые должны присутствовать в гидродинамической модели тренажерного имитационного комплекса:

1) учет технологического оборудования МН и его характеристик:

- участок трубопровода (эффективный диаметр, толщина стенки, шероховатость, длина участка);
 - задвижка (значение пропускной способности в зависимости от процента открытия задвижки, скорость открытия/закрытия);
 - насосный агрегат (напорная характеристика, мощностная характеристика, номинальные обороты, скорость изменения оборотов);
 - предохранительный клапан (давление открытия);
 - система сглаживания волн давления;
 - регулятор давления (характеристики заслонок, уставки на входе/выходе, коэффициенты чувствительности, параметры регулятора в зависимости от выбранного типа);
 - резервуар (высота, диаметр резервуара, уровень разлива, свойства нефти в резервуаре);
 - средства очистки и диагностики (тип СОД);
- 2) учет распределения свойств нефти (плотность, вязкость, температура) вдоль нефтепровода;
- 3) учет высотного профиля нефтепровода;
- 4) учет влияния ПТП на свойства нефти;
- 5) моделирование ПИД — регуляторов и частотно регулируемых приводов;
- 6) возможность расчета стационарных и переходных процессов в нефтепроводе как в режиме реального времени, так и с ускорением;
- 7) учет самотечных участков;
- 8) расчет движения СОД по нефтепроводу.

Кроме того, важной характеристикой математической модели является возможность изменения основных характеристик технологического оборудования, таких как напорные и мощностные характеристики насосов, пропускные способности и время закрытия задвижек, эффективные диаметры участков труб, уставки и пропускные способности регуляторов и предохранительных клапанов и т. д.

Здесь перечислены только основные характеристики технологического оборудования, чем больше характеристик оборудования возможно учесть при математическом моделировании, тем более вариативна будет модель и тем больше возможностей будет у пользователей при имитации реального трубопровода. Одной из программ, удовлетворяющей всем описанным выше требованиям, является ПО Cassandra разработки ООО «Энергоавтоматика».

Согласно требованиям, предъявляемым к современным тренажерным комплексам, при использовании идентифицированных значений (по фактическим данным с нефтепровода) основных характеристик технологических объектов, отклонения давлений на стационарных и переходных режимах математической модели тренажерных имитационных комплексов и фактических данных не должны превышать $0,3...0,5$ кгс/м², а расходов — $50...150$ м³/ч.

Учет противотурбулентных присадок.

В настоящее время на многих нефтепроводах вводят ПТП для уменьшения затрат на транспортировку. В связи с этим появилась необходимость в матема-

тическом моделировании гидродинамических процессов, происходящих в трубопроводе при добавлении в нефть ПТП. Для пользователей тренажерного имитационного комплекса учет ПТП в нефтепроводе может быть реализован путем задания объемного расхода ПТП в желаемой точке ввода.

Исходя из заданного расхода ПТП и текущего расхода перекачки, в модели вычисляется стартовая концентрация ПТП. По мере продвижения присадки по трубопроводу стартовая концентрация изменяется в соответствии с заданной зависимостью концентрации от времени. Несмотря на то, что деградация ПТП задается в зависимости от времени, в тренажерном имитационном комплексе предусмотрено отсутствие деградации при отсутствии течения, то есть в остановленном трубопроводе концентрация ПТП не изменяется. Далее, по заданной зависимости определяется эффективность ПТП в соответствии с текущей концентрацией ПТП в расчетной области трубопровода; в свою очередь, полученная эффективность ПТП участвует в расчете коэффициента гидравлического сопротивления.

Пользователь может задавать такие характеристики ПТП, как:

- зависимость эффективности ПТП от концентрации;
- изменение концентрации ПТП в зависимости от времени нахождения ПТП в трубопроводе (деградация ПТП).

Данные характеристики предоставляются производителем ПТП; зависимость концентрации ПТП от времени также может быть уточнена с помощью системы поддержки диспетчера (СПД) в случае, если СПД установлена на функционирующем трубопроводе, где проводится перекачка с ПТП.

Используя измерения давлений, расходов и реологических свойств нефти, СПД рассчитывает фактическое распределение коэффициента гидравлического сопротивления по длине трубопровода.

Далее рассчитывается эффективность ПТП по формуле:

$$\varphi = (\lambda_0 - \lambda_{\text{ПТП}}) / \lambda_{\text{ПТП}} \times 100\%,$$

где φ — эффективность ПТП, λ_0 — коэффициент гидравлического сопротивления при перекачке без ПТП, $\lambda_{\text{ПТП}}$ — коэффициент гидравлического сопротивления при перекачке с ПТП. Используя фактический расход (ПТП распространяется по нефтепроводу со скоростью потока), распределение эффективности по длине преобразуется в зависимость эффективности от времени нахождения присадки в трубопроводе.

Модули имитации стационарной и линейной автоматики

Модули имитации стационарной и линейной автоматики моделируют микропроцессорную систему автоматизации, системы линейной телемеханики

и вспомогательные системы, а также телемеханику всех технологических объектов МН.

Так как стационарная и линейная автоматика различных НПС и КП даже на одном нефтепроводе может существенно различаться, не говоря уже о разных нефтепроводах различных компаний, то модуль имитации удобно представлять в виде набора настраиваемых алгоритмов. Для каждого из автоматизированных технологических объектов, будь то насос, задвижка или другой объект, существует набор готовых алгоритмов, а также ПО для их создания и редактирования. Алгоритмы управления КП и НПС, защит микропроцессорной системы автоматизации и т.д. также возможно создавать и редактировать с помощью указанного ПО. Таким образом возможно имитировать работу любых систем автоматики, установленных на МН, и обеспечить корректное моделирование штатных, предаварийных и аварийных ситуаций во время обучения диспетчерского персонала, работы технолога с режимами или при тестировании других программ, установленных в диспетчерском пункте.

Перечислим типы основных алгоритмов, которые моделируются модулем имитации стационарной и линейной автоматики МН.

1. Алгоритмы имитации телемеханики технологических объектов МН:

- стационарных задвижек;
- задвижек линейной части и КППСОД (камера пуска и приема средств очистки и диагностики);
- подпорных насосных агрегатов;
- магистральных насосных агрегатов;
- резервуаров с плавающей крышей и резервуаров аварийного сброса;
- регуляторов;
- предохранительных клапанов и системы сглаживания волн давления.

2. Алгоритмы имитации телемеханики линейных КП при наличии задвижек/без задвижек.

3. Алгоритмы имитации стационарной автоматики:

- телемеханики при аварийной остановке НПС;
- защиты НПС по анализу параметров;
- управления НПС при задании команд с системы управления;
- работы дополнительных систем (электроснабжение, вентиляция, маслосистема, пожаротушение и др.).

Модули имитации стационарной и линейной автоматики отвечают за передачу данных между всеми подсистемами тренажерного имитационного комплекса, передают команды из системы диспетчерского контроля и управления в математическую модель, передают данные измерений из математической модели в систему диспетчерского контроля и управления, систему управления и остальные подсистемы, установленные на АРМах диспетчера (рис. 2).

Частота передачи данных может варьироваться от 0,1 с до 1...10 с и более в зависимости от характеристик автоматики нижнего уровня каждого конкретно магистрального нефтепровода.

Модуль управления математической моделью и сценариями обучения

Модуль управления математической моделью и сценариями обучения — это основная программа, в которой работает инструктор/технолог/сотрудник АСУТП при использовании тренажерного имитационного комплекса. Этот модуль установлен на АРМ преподавателя и с его помощью пользователь может:

- набирать новые и редактировать существующие конфигурации МН, добавлять технологические объекты, алгоритмы имитации линейной и станционной автоматики;
- создавать новые и редактировать существующие сценарии обучения, контролировать выполнение сценариев обучаемым;
- управлять технологическим оборудованием МН;
- создавать, управлять и контролировать выполнение сценариев обучения;
- производить расчет стационарных и переходных режимов МН (как вручную, так и в автоматическом режиме при известной карте технологических режимов МН), сохранять и загружать в дальнейшем созданные режимы;
- задавать распределение свойств нефти (температура, вязкость, плотность) по длине трубопровода;
- задавать уставки предельных/аварийных давлений на линейной части и НПС;
- создавать утечки;
- моделировать аварии на технологических объектах МН и на НПС.
- изменять характеристики технологических объектов МН в режиме реального времени.

Таким образом, пользователь АРМа преподавателя может создавать произвольные сценарии обучения, выбирать время изменения состояния оборудования, определять в какой момент времени произойдет авария или утечка нефти, при выполнении сценария следить за его выполнением, после завершения сценария анализировать действия обучаемого по сформированному с помощью специального ПО отчету.

Все перечисленные функции доступны через интерфейс модуля управления математической моделью и сценариями обучения. Они позволяют максимально использовать тренажерный имитационный комплекс для решения задач обучения диспетчерского персонала, дают возможность технологам выполнять расчет стационарных режимов и переходных процессов, а также работникам отделов АСУТП испытывать ПО, установленное на АРМах диспетчера.

Заключение

Согласно современным требованиям, предъявляемым к тренажерным имитационным комплексам МН,

в их функции должно входить не только обучение диспетчерского персонала в условиях, максимально приближенных к реальным, но и ряд дополнительных функций для автоматизации работы технолога, а также проверки ПО, установленного в диспетчерском пункте.

Для выполнения указанных дополнительных функций в тренажерном комплексе должна использоваться качественная гидродинамическая модель, позволяющая вести расчет как стационарных, так и нестационарных режимов, учитывать самотечные участки, высотный профиль МН, характеристики технологического оборудования и производить расчет как в режиме реального времени, так и с ускорением. Для проверки ПО диспетчерского пункта в тренажерном имитационном комплексе должны присутствовать модули, которые полностью воспроизводят действия станционной и линейной автоматики и предоставляют все замерные данные с датчиков МН.

Практический опыт, полученный ООО «Энергоавтоматика» при разработке и внедрении тренажерных имитационных комплексов на МН России и стран СНГ, показывает, что требования, предъявляемые к моделированию гидродинамических процессов в нефтепроводе и систем автоматики НПС и КП, постоянно возрастают. Также особое внимание уделяется развитию интерфейсной части ПО, а также алгоритмам оценки действий ученика в различных ситуациях. В связи с этим для корректного функционирования ПО и удовлетворения требований пользователя необходимо осуществлять техническую поддержку тренажерного имитационного комплекса во время расширения и модернизации нефтепровода.

Список литературы

1. Базарова Г.Т. Особенности обучения взрослых // Менеджер по персоналу. 2007. №2. С.42-48.
2. Григорьев Л.И., Сарданашвили С.А., Дятлов В.А. Компьютеризованная система подготовки диспетчерского персонала в транспорте газа. М.: Нефть и Газ. 1996. 198 с.
3. Григорьев Л.И., Кузнецова Л.В., Митичкин С.К., Молотков Г.П., Юдовский О.В. Имитационное моделирование газотранспортных систем в задачах диспетчерского управления. М: МИНГ им. И.М. Губкина, 1989.
4. Дозорцев В.М., Шестаков Н.В. Компьютерные тренажеры для нефтехимии и нефтепереработки: опыт внедрения на российском рынке // Приборы и системы управления. 1998. №1. С.27-32.
5. Гликман Б.Ф. Математические модели пневмогидравлических систем. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 368 с.
6. Золотов И.О., Лосенков А.С., Стрельникова С.А. Особенности построения гидравлических моделей трубопровода с переменной толщиной стенки // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. №5. С. 54-65.
7. Золотов И.О., Лосенков А.С., Стрельникова С.А. Об одной особенности стартовых режимов работы нефтепровода // Нефтяное хозяйство. 2012. № 3. С. 102-105.

Лосенков Александр Станиславович — д-р техн. наук, заместитель генерального директора,
Ющенко Тарас Сергеевич и **Стрельникова Светлана Алексеевна** — инженеры 1-ой категории,
Казakov Анатолий Алексеевич — ведущий специалист ООО «Энергоавтоматика».

Контактный телефон (495) 737-04-89.

E-mail: losenkov@energoavtomatika.com yushchenko@energoavtomatika.com