УДК 004.94

М.И. Кочергин, Д.С. Торгаева, М.П. Сухоруков, В.М. Дмитриев, Ю.А. Шурыгин

Многоуровневое моделирование физико-технических задач на примере глубинного насоса

Рассматриваются особенности моделирования физико-технических задач, формулируются критерии для их эффективного моделирования в инструментальных средах. Проводится краткий анализ программных средств для моделирования задач исследования сложных динамических объектов (как надкласса физико-технических задач). Описываются положения разработанного подхода для многоуровневого компьютерного моделирования физико-технических задач в рамках формализма метода многоуровневых компонентных цепей. Демонстрируются особенности и возможности данного подхода на примере задачи моделирования усилий на полированном штоке штангового глубинного насоса для добычи нефти.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, метод компонентных цепей, многоуровневое моделирование, среда моделирования, штанговый глубинный насос.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-79-86

Физико-технические задачи (ФТЗ) представляют собой постановки некоторых проблем из области техники о сложном динамическом объекте, решаемые с применением знаний из специализированных разделов физики. Под сложностью динамического объекта [1] следует понимать: 1) сложность поведения, подразумевающую наличие дискретно-непрерывного (гибридного) [2, 3] поведения - сочетания дискретного поведения с непрерывным (физическим), которое может быть вызвано рядом причин [4]; 2) сложность структуры, подразумевающую наличие составных компонентов (тел), связанных как жёсткой, так и упругой связью; 3) переменный, зависящий от времени и режимов состав моделируемых объектов; 4) взаимодействие объектов различной природы (например, техническое устройство с дискретным поведением и физический объект с непрерывным поведением).

Такие особенности ФТЗ предъявляют ряд требований для инструментальных сред моделирования: 1) наличие инструментов для моделирования как непрерывного, так и дискретно-непрерывного поведения объектов; 2) наличие инструментов для отображения геометрических свойств объектов; 3) возможность постепенной детализации модели; 4) наличие готовых блоков (элементов), содержащих модели из предметной области (позволяющих отображать «физические» свойства объектов); 5) возможность разделения моделей объектов и их систем управления.

Применяемые инструменты для моделирования сложных динамических систем в целом и ФТЗ в частности можно разделить на следующие категории [5]: 1) «универсальные» среды моделирования (Lab-View, Simulink, VisSim, Rand Model Designer [6], ИСМА [7], SimInTech [8]); 2) системы компьютерной математики (Mathcad, Mathematica (Wolfram), Махіта); 3) программы, реализующие численные методы (Excel, языки программирования); 4) узкоспециализированные пакеты, в том числе САПР (например, SolidWorks для решения задач гидравлики). В работах [9, 10] отмечаются следующие недостатки существующих систем моделирования: 1) отсутствие средств эффективного моделирования событийно управляемых систем; 2) отсутствие удобного языка планирования и проведения вычислительного эксперимента; 3) отсутствие интерфейсов между различными средами моделирования (отсутствие возможности обмена моделями между пакетами); 4) отсутствие стандартизированных компонентов в разных пакетах.

Анализ существующих сред моделирования в соответствии с выделенными особенностями ФТЗ показывает следующее. Инструменты для моделирования дискретно-непрерывного поведения имеются в таких средах, как Simulink, SimInTech, Rand Model Designer, ИСМА, однако имеют ряд недостатков, основной из которых - возможность задания непрерывного поведения модели, дополняющего дискретное, исключительно в символьной форме, что ограничивает исследователя, особенно при структурном моделировании. В библиотеке компонентов LabView имеются компоненты для отображения геометрических свойств объектов, однако они не позволяют охватить весь спектр решаемых задач блоки предназначены для выполнения геометрических преобразований (вращение координат, перевод в СИ и пр.) и решения базовых геометрических операций (например, расчёт центра тяжести фигуры). Готовые блоки для отображения физических свойств объектов имеются только в Simulink.

Наиболее подходящим средством для моделирования ФТЗ представляется среда моделирования МАРС [11], предусматривающая возможность разделения моделей объектов и их систем управления и содержащая специальные компоненты для моделирования физических, геометрических свойств объектов и их дискретно-непрерывного поведения в ФТЗ. Отделение непрерывной модели объекта от алгоритма его системы управления (сценария вычислительного эксперимента) является наиболее предпочтительным не только с целью обеспечения наглядности представления схемы модели, но и повышения эффективности её работы.

Многоуровневый подход к представлению компьютерных моделей

СММ МАРС базируется на методе многоуровневых компонентных цепей (ММКЦ) [12] и обладает открытой для изменений библиотекой компонентов. Модели в среде моделирования МАРС строятся на визуальном (графическом) языке.

ММКЦ предполагает декомпозицию компьютерной модели на 3 уровня:

1. Объектный слой (С-слой) [13], на котором описывается непрерывное поведение объекта средствами аналитического моделирования в виде алгебродифференциальных уравнений или в структурнокомпонентной форме.

2. Логический (алгоритмический) слой (L-слой) [14], на котором описывается дискретное поведение объекта средствами имитационного моделирования, осуществляется параметризация модели (из баз данных [15], геоинформационных систем [16]), обработка результатов моделирования, автоматизированное документирование результатов моделирования [17] и пр.

3. Визуальный слой (V-слой) [18] – графический интерфейс модели.

Моделирование усилий на штоке

штангового глубинного насоса

Одним из примеров физико-технических задач (как задач о техническом – искусственном – объекте, решаемых с помощью знаний из специализированных разделов физики) является задача моделирования усилия на полированном штоке штангового глубинного насоса (ШГН), структурная схема которого представлена на рис. 1 [20].



Рис. 1. Структурная схема штангового глубинного насоса. *1* – эксплуатационная колонна; 2 – приемный клапан; *3* – цилиндр насоса; *4* – плунжер; *5* – нагнетательный клапан; *6* – насосно-компрессорные трубы; *7* – насосные штанги; *8* – крестовина; *9* – устьевой патрубок; *10* – обратный клапан для перепуска газа; *11* – тройник; *12* – устьевой сальник; *13* – устьевой шток; *14* – канатная подвеска

Нефтедобывающие установки, оснащённые ШГН, являются наиболее распространённым видом добывающего оборудования. Несмотря на низкую (в сравнении с электроцентробежными насосами) производительность, данные установки нашли широкое применение при добыче из низкодебитных скважин и скважин с различными осложнениями в добыче, такими как высокая обводненность, пескопроявления, высокая вязкость или температура скважинной жидкости, наличие ароматических углеводородов, соле- и парафинообразование, т.е. в тех случаях, когда применение центробежных насосов становится неэффективным [21]. Для определения оптимальной скорости откачивания скважинной жидкости, оптимального закона движения полированного штока, выявления различных неисправностей ШГН и пр. наиболее простым подходом является создание и исследование его математической модели.

Обычно при моделировании ШГН представляется в виде системы последовательно соединённых элементов: плунжерной пары, колонны штанг, штока. Возвратно-поступательное перемещение колонны штанг описывается дифференциальным уравнением продольных колебаний однородного стержня. При этом заданными граничными условиями являются значения перемещений полированного штока и плунжера, а также усилий, приложенных в этих точках [22].

Охарактеризуем формальный портрет [23] рассматриваемой задачи. Основным моделируемым процессом является возвратно-поступательное движение колонны штанг, поэтому в качестве основных взаимодействующих объектов выделим полированный шток (источник движения), плунжер (движущееся тело), насосные штанги (растяжимое тело). Будем считать полированный шток источником скорости в моделируемой системе, рассчитывая его перемещение S(t) по некоторому гармоническому закону. Поставим данному объекту в соответствие компонент «Источник скорости» (рис. 2), математическая модель которого имеет вид

$$B_1 \cdot V_p = S(t) , \qquad (1),$$

где B_1 — некоторый коэффициент (константа или функциональный параметр), V_p — потенциальная переменная (в нашем случае — скорость), S(t) — некоторая функциональная зависимость.



Рис. 2. Компонент «Источник скорости»

Для моделирования движения тел в ММКЦ используются так называемые модели твёрдых тел (характеризующихся постоянной формой, размерами, массой, моментами инерции), содержащие в себе законы кинематики и динамики движения. Однако в рассматриваемом случае (движение по одной координате) участие тел в модели сводится к инерционному звену – точке, обладающей массой. Будем рассматривать насосные штанги и плунжер в качестве таких объектов, учитывая такие их параметры, как площадь сечения и плотность материала. Математическая модель инерционного звена (рис. 3) имеет вид

$$A_1 \cdot \frac{dV_p}{dt} + B_2 \cdot V_f = 0, \qquad (2),$$

где V_f – потоковая переменная (сумма сил F, воздействующих на тело); V_p – потенциальная переменная (скорость тела V); A_1 – параметр модели (масса тела m); B_2 – параметр модели (здесь равен 1); t – время.



Рис. 3. Компонент «Инерционное звено»

Деформация (растяжение и сжатие) штанг во время их движения может быть смоделирована посредством компонентов типа «Пружина» (рис. 4), имеющими (как и остальные рассматриваемые компоненты) 2 элементарные связи с потенциальными переменными v_1 , v_2 (скорости) и потоковой переменной F (сила). Типовая математическая модель компонента имеет вид:

$$\frac{dF}{dt} = k \cdot (v_1 - v_2), \qquad (3),$$

в которой коэффициент k может быть как постоянным, так и функциональным параметром. Величину растяжения штанг в таком случае можно рассчитать, исходя из разницы значений скоростей v_1 и v_2 на узлах компонента.

$$v_1, F$$

Рис. 4. Компонент «Пружина»

Силы трения, воздействующие при совершении движения на шток, штанги и плунжер, могут быть смоделированы с помощью компонента «Демпфер» (рис. 5). Математическая модель этого компонента имеет вид:

$$F = R \cdot (v_1 - v_2), \tag{4}$$

где коэффициент *R* аналогичным образом может представлять собой константу или функциональный параметр.

$$v_1, F$$
 v_2, F

Рис. 5. Компонент «Демпфер»

Давление газожидкостной смеси на плунжер может быть смоделировано с помощью компонента «Источник потоковой переменной», аналогичного «Источник скорости» и имеющего математическую модель:

$$B_2 \cdot V_f = C(t), \qquad (5),$$

где B_2 — некоторый коэффициент (константа или функциональный параметр); V_f — потоковая переменная (в нашем случае — сила); C(t) — некоторая функциональная зависимость. Построим компьютерную модель рассматриваемой задачи из вышеописанных компонентов, указывая на точки приложения сил (объекты их воздействия) путём формирования топологических связей компонентов, опираясь на ранее упомянутые топологические законы.

Многоуровневое моделирование усилий на штоке штангового глубинного насоса в рамках формализма многоуровневого метода компонентных цепей

На V-слое модели (рис. 6) располагается интерфейс для взаимодействия с компьютерной моделью. В качестве варьируемых параметров выступают: 1) длина хода штока, 2) частота откачивания, 3) динамический уровень жидкости. Остальные параметры модели считаются неизменными, так как зависят от конфигурации оборудования и задаются непосредственно в свойствах соответствующих компонентов модели. В качестве измеряемых переменных выступают: 1) нагрузка на плунжер, 2) нагрузка на шток, 3) величина потери хода плунжера при сжатии и растяжении штанг, 4) скорость хода плунжера. Все компоненты этого слоя имеют одноимённые отображения на L-слое, что позволяет реализовать механизм обмена данными между слоями по замкнутой итерационной схеме V-L-C-L-V.



Рис. 6. Вид модели на V-слое

На L-слое модели (рис. 7) располагаются:

1. Диаграмма состояний (КЦ «начало» - «вниз (шток)» – «вверх (шток)»), характеризующая направление движения плунжера (вниз или вверх), что необходимо для расчёта величины деформации штанг и силы трения по отличающимся выражениям при движении вниз и вверх, а также для реализации эффекта «запаздывания» плунжера при движении «за» штангами. Диаграммы состояний представляют собой концептуальную модель объекта в виде конечного автомата, характеризующую поведение объекта в форме последовательности его состояний, сменяющих друг друга при выполнении определённых условий [24]. В данной задаче диаграммы состояний дополняют непрерывное поведение системы, описываемое на С-слое, дискретным поведением, тем самым формируя гибридное поведение [25].

Схема работы диаграмм состояний в СММ МАРС следующая: при получении значения true на вход Start компонент начинает передавать значения, подаваемые на вход in через выход out, и продолжает до тех пор, пока не станет истинным вложенное в него условие (математическое выражение), после чего прекращает свою работу, передав значение true на выход End.

2. КЦ, осуществляющая параметрирование основных компонентов модели - «Плунжер», «Штанги», «Трение», «Деформация», «Давление смеси», которые имеют одноимённые отображения на С-слое. Значения переменных на этом слое передаются последовательно от компонента к компоненту (пройдя при необходимости заложенные в компоненты преобразования). После того как завершается инициализация всех переменных (передача значений на С-слой), начинается вычислительный эксперимент на С-слое (решение систем алгебродифференциальных уравнений вычислительным ядром), результаты которого на каждой итерации работы модели возвращаются обратно на L-слой и при необходимости отображаются пользователю на V-слое через компоненты-приёмники (графики и компоненты вида «Цифровое табло»).

Значения параметров модели, принятых за константу (например, площадь сечения штанг, плотность материала штанг и пр.), задаются на данном слое через свойства соответствующих компонентов.

На *С*-слое (рис. 8) располагается модель непрерывного поведения моделируемой системы (визуально соответствующая виду моделируемого объекта «шток – штанги – плунжер») в виде КЦ, состоящей из следующих компонентов: 1) «плунжер», «штанги» – компоненты, представляющие собой модели инерционных звеньев (тел), осуществляющие возвратно-поступательное движение; 2) «источник» – компонент, представляющий собой модель штока (источника скорости); 3) «трение» – компонент, содержащий систему уравнений для расчёта величины силы трения плунжера при движении вниз и вверх; 4) «деформация» (упругость) – компонент для расчёта деформации штанг при ходе вниз и вверх; 5) «нагрузка» – компонент для расчёта нагрузки газожидкостной смеси на плунжер; 6) измерители потенциальных переменных V_n , передающие значения на одноимённые отображения на *L*-слое; 7) интеграторы IN, используемые для расчёта положения штока и плунжера.

Каждый компонент (за исключением измерителей и интеграторов) содержит в себе систему алгебро-дифференциальных уравнений, которая решается на каждой итерации. Рассчитанные скорости плунжера и штока передаются на *L*-слой через компоненты-измерители, значения других переменных передаются на выводы соответствующих компонентов по ходу решения. Топологические связи компонентов определяют порядок их опроса и, как следствие, порядок решения системы уравнений (которая решается по завершении опроса).

Использование компонентов-интеграторов на этом C-слое позволяет перейти от базисных переменных – силы F и скорости v – к работе силы и перемещению. Аналогичным образом могут использоваться компоненты-дифференциаторы. Для измерения значений потоковых переменных используются соответствующие измерители V_b . На этом слое также возможно моделирование движения многофазных потоков (например, нефть/газ) через компоненты типа «насос», «труба» и пр. за счёт использования неоднородных векторных связей, содержащих несколько пар дуальных переменных (потенциальную и потоковую).



Рис. 7. Вид модели на *L*-слое

Доклады ТУСУР, 2019, том 22, № 3



Результатом работы построенной модели является динамограмма P(u) – зависимость усилия, приложенного к штоку, от его перемещения (рис. 9), отражающая состояние погружного оборудования и используемая для его диагностики [26]. Левый нижний угол динамограммы P(u) соответствует крайнему нижнему положению полированного штока, когда плунжер останавливается и закрывается нагнетательный клапан, нагрузка на полированный шток равна весу штанг в жидкости. В следующий момент полированный шток начинает движение вверх, однако плунжер остается неподвижным до тех пор, пока штанги не получат полного растяжения от веса столба жидкости над плунжером и сил трения.



Рис. 9. График зависимости нагрузки в точке подвеса *P*, *H* штанг от перемещения этой точки *u*, м

Величина растяжения штанг прямо пропорциональна воспринятой нагрузке, поэтому усилия на штоке нарастают постепенно, положение штока, соответствующее полному растяжению штанг и открытию приемного клапана, соответствует левому верхнему углу Р(и). При дальнейшем движении полированного штока вверх нагнетательный клапан закрыт, приемный клапан открыт, жидкость из скважины заполняет пространство под плунжером, нагрузка на полированный шток равна нагрузке от веса столба жидкости, веса штанг в жидкости и сил трения. Правый верхний угол динамограммы соответствует крайнему верхнему положению полированного штока. Далее начинается его движение вниз, приемный клапан закрывается, однако плунжер не может опуститься, поскольку под ним находится практически несжимаемая жидкость, нагнетательный клапан остается закрытым до тех пор, пока нагрузка со штанг не передастся насосно-компрессорным трубам, при этом длина штанг сократится.

Правый нижний угол динамограммы соответствует положению полированного штока, при котором штанги получили максимальное сокращение, и открылся нагнетательный клапан. При движении плунжера вниз приемный клапан закрыт, нагнетательный клапан открыт, нагрузка на полированный шток соответствует нагрузке от веса штанг в жидкости и сил трения. Шток опускается до своего крайнего нижнего положения, нагнетательный клапан закрывается, и цикл повторяется вновь [27, 28].

Заключение

ФТЗ, имеющие широкое распространение в сфере исследовательской, функционально-проектной и образовательной деятельности, обладают рядом особенностей (вызванных в первую очередь сложностью моделируемых в них объектов), что снижает их эффективность моделирования классическими средствами. Описанный в данной работе подход позволяет создавать модель из готовых параметрируемых блоков, отделяя при этом модель непрерывного поведения объекта (представляемую как в блочно-символьном виде, так и в компонентном) от модели (алгоритма) его управления (реализуемого различными средствами, в том числе с помощью диаграмм состояний). Использование готовых блоков при этом не снижает универсальность среды за счёт возможности их гибкой настройки, а также открытости самой библиотеки компонентов. Разделение переменных на дуальную пару (потенциальная и потоковая) и возможность организации между компонентами неоднородных векторных связей позволяет моделировать многофазные энергетические и информационные потоки.

Одним из примеров ФТЗ является рассмотренная в данной работе задача моделирования усилия на полированном штоке ШГН. Она характеризуется как структурной, так и поведенческой сложностью, которые нашли отражение в её многоуровневой компьютерной модели. Проведённая формализация задачи позволила декомпозировать её на 3 уровня: 1) непрерывная модель движения тел при воздействии сил трения и растяжения, учитывающая структурную сложность; 2) дискретная модель движения, разделённая на такты, учитывающая поведенческую сложность; 3) визуальное представление работы модели. Такое разделение позволит быстро проводить дальнейшее развитие и уточнение этой модели: например, учёт внештатных режимов работы или неисправностей оборудования – в таком случае КЦ L-слоя (в виде диаграммы состояний) будет управлять переключениями режимов работы оборудования, модели которых представляются в виде подцепей на C-слое и «активируются» и параметрируются управляющими сигналами с L-слоя. Реализация данной задачи была произведена с применением стандартных компонентов одномерной механики («источник скорости», «пружина», «демпфер») с их корректировкой и параметрированием, что подтверждает тезис об универсальности разрабатываемого подхода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проекта ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», Соглашение № 14.574.21.0157 (уникальный идентификатор RFMEFI57417X0157).

Литература

1. Колесов Ю.Б. Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. – 239 с.

2. Бессонов А.В. Компьютерное моделирование пространственно-временных гибридных систем // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – № 3-1(61). – С. 123–129.

3. Hybrid systems. Preliminary comparative analysis of Modelica and Model Vision Language / Yu.B. Kolesov, Yu.B. Senichenkov, A. Urquia, C. Martin-Villalba // Университетский научный журнал. – 2014. – № 8. – С. 102–111.

4. Шорников Ю. В. Спецификация и инструментальный анализ гибридных систем / Ю.В. Шорников, А.В. Бессонов, Д.Н. Достовалов // Научный вестник Новосиб. гос. техн. ун-та. – 2015. – № 4 (61). – С. 101–117.

5. Кочергин М.И. Обзор инструментов для компьютерного моделирования физических процессов // Научная сессия ТУСУР–2017: матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, посвящённой 55-летию ТУСУРа, Томск, 10–12 мая 2017 г.: в 8 ч. – Томск: В-Спектр, 2017. – Ч. 4. – С. 96–99.

6. Senichenkov Yu.B. Rand Model Designer in manufacturing applications / Yu.B. Senichenkov, Yu.B. Kolesov // Университетский научный журнал. – 2014. – № 8. – С. 112–123.

7. Shornikov Yu.V. Modeling and simulation of transients in EPS using ISMA / Yu.V. Shornikov, E.A. Ророv // Университетский научный журнал. – 2017. – № 30. – С. 30–38.

8. Хабаров С.П. Использование SimInTech для анализа систем автоматического управления // Информационные системы и технологии: теория и практика. – СПб.: СПбГЛТУ, 2019. – С. 106–116.

9. Инихов Д.Б. Пакеты моделирования в образовании: современная ситуация и нерешенные проблемы / Д.Б. Инихов, Ю.Б. Колесов, Ю.Б. Сениченков // Компьютерные инструменты в образовании. – 2012. – № 6. – С. 44–55.

10. Колесов Ю.Б. Объектно-ориентированное моделирование в среде Rand Model Designer / Ю.Б. Колесов, Ю.Б. Сениченков // Неделя науки СПбПУ: матер. научного форума с междунар. участием. Междисциплинарные секции и пленарные заседания институтов. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2015. – С. 18–25.

11. Дмитриев В.М. Среда многоуровневого компьютерного моделирования химико-технологических систем / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа. – Томск: Изд-во НИ ТГУ, 2017. – 332 с.

12. Ганджа Т.В. Развитие метода компонентных цепей для реализации комплекса программ моделирования химико-технологических систем: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.18. – Томск, 2017. – 457 с. 13. Зайченко Т.Н. Информационное моделирование цифровых устройств в системе МАРС // Вестник Томского гос. пед. ун-та. – 2005. – № 7 (52). – С. 84–90.

14. Synthesis of an automatic control method for major oil pipelines based on inverse dynamics problem concept / A.E. Karelin, A.V. Maystrenko, A.A. Svetlakov, V.M. Dmitriev, T.V. Gandzha, N.V. Aksenova // Petroleum and Coal. - 2018. - T. 60, \mathbb{N} 1. - C. 152–156.

15. Дмитриев В.М. Алгоритм и система поддержки автоматизированного эксперимента в рамках среды многоуровневого компьютерного моделирования / В.М. Дмитриев, С.А. Панов, С.С. Алексеенко // Электронные средства и системы управления. – 2016. – № 1-2. – С. 117–120.

16. Панов С.А. Интеграция среды МАРС с геоинформационной системой с целью автоматизированной параметризации компьютерных моделей / С.А. Панов, Т.Е. Григорьева, А.С. Болденков // Электронные средства и системы управления. – 2018. – № 1–2. – С. 5–8.

17. Панов С.А. Автоматизированное формирование паспортов проектов по разработке новых месторождений нефти и газа / С.А. Панов, Т.Е. Григорьева // Электронные средства и системы управления. – 2017. – № 1-2. – С. 119–122.

18. Компьютерное моделирование визуальных интерфейсов виртуальных инструментов и приборов / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа, В.В. Ганджа, С.А. Панов // Научная визуализация. – 2016. – Т. 8, № 3. – С. 111–131.

19. Кочергин М.И. Применение интерактивных математических панелей для моделирования физических задач в рамках среды многоуровневого моделирования // Моделирование. Фундаментальные исследования, теория, методы и средства: матер. 17-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 26–27 сент. 2017 г. / Южно-Российский гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М.И. Платова. – Новочеркасск: Лик, 2017. – С. 54–59.

20. Вакула Я.В. Нефтегазовые технологии. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2006. – 168 с.

21. Ковшов В.Д. Моделирование динамограммы станка-качалки. Нормальная работа насоса / В.Д. Ковшов, М.Е. Сидоров, С.В. Светлакова // Нефтегазовое дело. – 2004. – Т. 2. – С. 75–81.

22. Ивановский В. Н. Повышение интереса к штанговым насосным установкам – в чем причина? // Территория Нефтегаз. – 2013. – № 8. – С. 48–49.

23. Кочергин М.И. Формализация текстовых условий задач по физике / М.И. Кочергин, К.С. Кочергина // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, №1. – С. 65–68.

24. Kochergin M.I. Interpretation of the statechart diagram into a multilevel simulation language // Доклады ТУ-СУР. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 122–125. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-122-125

25. Сениченков Ю.Б. Численное моделирование гибридных систем. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2004. – 206 с.

26. Analysis of methods for measuring the liquid level in the annular space of an oil well / J. Shinyakov, M. Sukhorukov, D. Torgaeva, A. Soldatov, N. Shalyapina, D. Li // MATEC Web of Conferences. -2018. - Vol. 158.

27. Садов В.Б. Моделирование динамограмм с различными дефектами оборудования нефтяной скважины // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2013. – Т. 13, № 1. – С. 16–25.

28. Белов И.Г. Исследование работы глубинных насосов динамографами. – М.: Гостоптехиздат, 1960. – 128 с.

Кочергин Максим Игоревич

Ст. преп. каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050 Тел.: +7 (382-2) 41-39-15 Эл. почта: max24kochergin@gmail.com

Торгаева Дарья Сергеевна

Мл. науч. сотр. лаб. цифровых систем управления научно-исследовательского института космических технологий (НИИ КТ) ТУСУРа Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050 Тел.: +7-923-425-70-35 Эл. почта: belial1349@mail.ru

Сухоруков Максим Петрович

Зав. лаб. НИИ КТ ТУСУРа Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050 Тел.: +7-952-88-22-698 Эл. почта: Max_sukhorukov@mail.ru

Дмитриев Вячеслав Михайлович

Д-р техн. наук, профессор каф. КСУП ТУСУРа Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050 Тел.: +7 (382-2) 41-39-15 Эл. почта: dmitriewvm@gmail.com

Шурыгин Юрий Алексеевич

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. КСУП ТУСУРа Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050 Тел.: + 7(382-2) 51-05-30 Эл. почта: office@tusur.ru

Kochergin M.I., Torgaeva D.S., Sukhorukov M.P.,

Dmitriev V.M., Shurygin Yu.A.

Multilevel modeling of physical and technical problems (on the example of the task of modeling forces on the rod of a sucker rod pump)

The article discusses the features of modeling physical and technical problems, formulates criteria for their effective modeling in instrumental environments. A brief analysis of software tools for modeling research problems of complex dynamic objects (as a superclass of physical and technical problems) is carried out. The provisions of the developed approach for multilevel computer modeling of physical and technical problems within the framework of the formalism of the multilevel component circuit method are described. The features and capabilities of this approach are demonstrated by the example of the task of modeling forces on a polished rod of a sucker rod pump for oil production.

Keywords: computer simulation, component circuit method, multi-level modeling, modeling environment, sucker rod pump.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-79-86

References

1. Kolesov Yu.B. *Obektno-orientirovannoe modelirovanie slozhnyh dinamicheskih sistem* [Object-oriented modeling of complex dynamic systems]. St. Petersburg, Publishing house of SPbSPU, 2004, 239 p.

2. Bessonov A.V. Komp'juternoe modelirovanie prostranstvenno-vremennyh gibridnyh system [Computer modeling of spatio-temporal hybrid systems. Control systems and information technology]. Control systems and information technology, 2015, no. 3-1(61), pp. 123–129 (in Russ.).

3. Kolesov Yu.B., Senichenkov Yu.B., Urquia A., Martin-Villalba C. Hybrid systems. Preliminary comparative analysis of Modelica and Model Vision Language *University Scientific Journal*, 2014, no. 8, pp. 102–111.

4. Shornikov Yu.V., Bessonov A.V., Dostovalov D.N. [Specification and instrumental analysis of hybrid systems]. *Scientific Bulletin of the Novosibirsk State University*, 2015, no. 4 (61), pp. 101–117 (in Russ.).

5. Kochergin M.I. Obzor instrumentov dlja komp'juternogo modelirovanija fizicheskih processov [A review of tools for computer modeling of physical processes] Nauchnaja sessija TUSUR–2017: materialy Mezhdunarodnoj nauchnotehnicheskoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchjonyh, posvjashhjonnoj 55-letiju TUSURa [Scientific session TUSUR-2017. Materials of the International scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists dedicated to the 55th anniversary of TUSUR], Tomsk: B-Spectr, 2017, Part. 4. pp. 96–99 (in Russ.).

6. Senichenkov Yu.B., Kolesov Yu.B. Rand Model Designer in manufacturing applications. *University Scientific Journal*, 2014, no. 8, pp. 112–123.

7. Shornikov Yu.V., Popov E.A. Modeling and simulation of transients in EPS using ISMA. *University Scientific Journal*, 2017, no. 30, pp. 30–38.

8. Habarov S.P. Ispol'zovanie SimInTech dlya analiza sistem avtomaticheskogo upravleniya [Using SimInTech to analyze automatic control systems] // Informacionnye sistemy i tekhnologii: teoriya i praktika [Information Systems and Technologies: Theory and Practice]. St. Petersburg, Publishing house of LTA, 2019, pp. 106–116 (in Russ.).

9. Inikhov D.B. Kolesov Yu.B., Senichenkov Yu.B. *Pakety modelirovanija v obrazovanii: sovremennaja situacija i nereshennye problemy* [Packages of modeling in education: the current situation and unsolved problems]. *Computer tools in education*, 2012, no. 6, pp. 44–55 (in Russ.).

10. Kolesov Yu.B., Senichenkov Yu.B. *Obektnoorientirovannoe modelirovanie v srede Rand Model Designer* [Object-Oriented Modeling with Rand Model Designer]. Nedelja nauki SPbPU: materialy nauchnogo foruma s mezhdunarodnym uchastiem. Mezhdisciplinarnye sekcii i plenarnye zasedanija institutov [*SPbPU Science Week*: Materials of a scientific forum with international participation. Interdisciplinary sections and plenary sessions of institutes]. St. Petersburg, Polytechnic University Publishing House, 2015, pp. 18–25 (in Russ.).

11. Dmitriev V.M., Gandzha T.V. Sreda mnogourovnevogo komp'juternogo modelirovanija himiko-tehnologicheskih sistem [The environment of multilevel computer modeling of chemical-technological systems], Tomsk, Publishing house of NI TSU, 2017, 332 p.

12. Gandzha T.V. *Razvitie metoda komponentnyh cepej dlja realizacii kompleksa programm modelirovanija himikotehnologicheskih sistem* [Development of the method of component chains for the implementation of a set of programs for modeling chemical-technological systems. Dr. Diss.], Tomsk, 2017, 457 p.

13. Zaichenko T.N. Informacionnoe modelirovanie cifrovyh ustrojstv v sisteme MARS [Information modeling of digital devices in the MARS system]. Bulletin of Tomsk State Pedagogical University, 2005, no. 7 (52), pp. 84–90 (in Russ.).

14. Karelin A.E., Maystrenko A.V., Svetlakov A.A., Dmitriev V.M., Gandzha T.V., Aksenova N.V. Synthesis of an automatic control method for major oil pipelines based on inverse dynamics problem concept / *Petroleum and Coal*, 2018, vol. 60, no. 1, pp. 152–156 (in Russ.).

15. Dmitriev V.M., Panov S.A., Alekseenko S.S. Algoritm i sistema podderzhki avtomatizirovannogo eksperimenta v ramkah sredy mnogourovnevogo komp'yuternogo modelirovaniya [Algorithm and system for supporting an automated experiment within the framework of a multilevel computer simulation]. Electronic tools and control systems, 2018, no. 1-2, pp. 5–8 (in Russ.).

16. Panov S.A., Grigoryeva T.E., Boldenkov A.S. Integracija sredy MARS s geoinformacionnoj sistemoj s cel'ju avtomatizirovannoj parametrizacii komp'juternyh modelej [Integration of the MARS environment with a geographic information system for the purpose of automated parameterization of computer models]. Electronic tools and control systems, 2018, no. 1–2, pp. 5–8 (in Russ.).

17. Panov S.A., Grigoryeva T.E. Avtomatizirovannoe formirovanie pasportov proektov po razrabotke novyh mestorozhdenij nefti i gaza Jelektronnye sredstva i sistemy upravlenija [Automated formation of project passports for the development of new oil and gas fields]. Electronic tools and control systems, 2017, no. 1-2, pp 119–122 (in Russ.).

18. Dmitriev V.M., Gandzha T.V., Gandzha V.V., Panov S.A. *Komp'juternoe modelirovanie vizual'nyh interfejsov virtual'nyh instrumentov i priborov* [Computer simulation of visual interfaces of virtual instruments and devices]. *Scientific visualization*, 2016, vol. 8, no. 3, pp. 111–131 (in Russ.).

19. Kochergin M.I. Primenenie interaktivnyh matematicheskih panelej dlja modelirovanija fizicheskih zadach v ramkah sredy mnogourovnevogo modelirovanija [The use of interactive mathematical panels for modeling physical problems within the framework of a multi-level modeling environment]. Modelirovanie. Fundamental'nye issledovanija, teorija, metody i sredstva: materialy 17-oj Mezhdunar. nauch.prakt. konf. [Modeling. Basic research, theory, methods and means. Materials of the 17th Intern. scientific-practical conf., Novocherkassk]. Novocherkassk: Lik, 2017, pp. 54–59 (in Russ.).

20. Vakula Y.V. *Neftegazovye tehnologii* [Oil and gas technology]. Almetyevsk, Almetyevsk State Oil Institute, 2006, 168 p.

21. Kovshov V.D., Sidorov M.E., Svetlakova S.V. [Simulation of the dynamogram of the sucker rod pump. Normal pump operation]. *Petroleum Engineering*, 2004, vol. 2, pp. 75–81 (in Russ.).

22. Ivanovsky V.N. *Povyshenie interesa k shtangovym nasosnym ustanovkam-v chem prichina?* [Increased interest in sucker rod pump installations – what is the reason?]. *Oil and Gas Territory*, 2013, no. 8, pp. 48–49 (in Russ.).

23. Kochergin M. I., Kochergina K. S. Formalization of text descriptions for physics tasks. *Proceedings of TUSUR University*, 2016, vol. 19, no.1. pp. 65–68 (in Russ.).

24. Kochergin M.I. Interpretation of the statechart diagram into a multilevel simulation language. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, Vol. 20, no. 4, pp. 122–125. doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-122-125

25. Senichenkov Yu.B. *Chislennoe modelirovanie gibridnyh sistem* [Numerical simulation of hybrid systems]. St. Petersburg, Polytechnic University Publishing House, 2004, 206 p.

26. Shinyakov J., Sukhorukov M., Torgaeva D., Soldatov A., Shalyapina N., Li D. Analysis of methods for measuring the liquid level in the annular space of an oil well. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 158, doi: 10.1051/matecconf/201815801029.

27. Sadov V.B. [Simulation of dynamometer cards with various defects of oil well equipment]. *Bulletin of the South Ural State University: series «Computer technologies, auto-matic control & radioelectronics»*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 16–25 (in Russ.).

28. Belov I. G. *Issledovanie raboty glubinnyh nasosov dinamografami* [Research of the work of deep pumps by dynamographs]. M., Gostoptekhizdat, 1960, p. 128.

Maksim I. Kochergin

Senior lecturer, Department of Computer Control and Design Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 74, Vershinin str., Tomsk, Russia, 634045 Phone: + 7 (382-2) 51-05-30 Email: maksim.i.kochergin@tusur.ru

Daria S. Torgaeva

Junior Researcher, Laboratory of Digital Control Systems, Space Technology Research Institute, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050 Phone: + 7-923-425-70-35 Email: belial1349@mail.ru

Maxim P. Sukhorukov

Head, Laboratory of Digital Control Systems, Space Technology Research Institute, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050 Phone: +7 (382-2) 90-01-06 Email: max_sukhorukov@mail.ru

Vyacheslav M. Dmitriev

Doctor of Engineering Science, Professor, Department of Computer Control and Design Systems, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050 Phone: + 7(382-2) 51-05-30 Email: office@tusur.ru

Yury A. Shurygin

Doctor of Engineering Science, Professor, Head of the Department of Computer Control and Design Systems, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050 Phone: + 7 (382-2) 51-05-30 Email: office@tusur.ru