

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Программная инженерия

Том 14. № 12. 2023



Рисунки к статье Е. В. Орловой
 «МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ RL ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ
 ТРАЕКТОРИЙ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ»



Рис. 2. Концептуальная схема формирования ДРРЧК

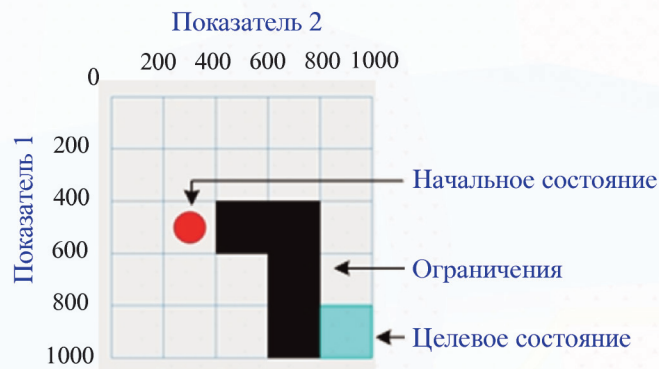


Рис. 5. Представление задачи в виде сетки 5×5

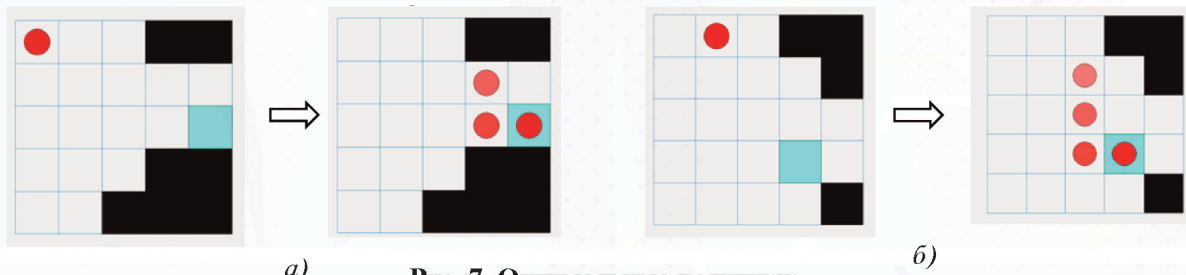


Рис. 7. Оптимальные политики:

a – эксперимент 1, начальное состояние (1, 1), целевое состояние (3, 5), возможен переход (прыжок) из состояния (4, 3) в состояние (3, 4); *б* – эксперимент 2, начальное состояние (2, 1), целевое состояние (4, 4), возможен переход (прыжок) из (1, 3) в (2, 4)

Программная инженерия

Прин
Том 14
№ 12
2023
ИН

Учредитель: Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

Издается с сентября 2010 г.

DOI 10.17587/issn.2220-3397

ISSN 2220-3397

Редакционный совет

Садовничий В.А., акад. РАН
(председатель)
Бетелин В.Б., акад. РАН
Васильев В.Н., чл.-корр. РАН
Макаров В.Л., акад. РАН
Панченко В.Я., акад. РАН
Стемпковский А.Л., акад. РАН
Ухлинов Л.М., д.т.н.
Федоров И.Б., акад. РАН
Четверушкин Б.Н., акад. РАН

Главный редактор

Васенин В.А., д.ф.-м.н., проф.

Редколлегия

Антонов Б.И.
Афонин С.А., к.ф.-м.н.
Бурдонов И.Б., д.ф.-м.н., проф.
Борзовс Ю., проф. (Латвия)
Гаврилов А.В., к.т.н.
Галатенко А.В., к.ф.-м.н.
Корнеев В.В., д.т.н., проф.
Костюхин К.А., к.ф.-м.н.
Махортов С.Д., д.ф.-м.н., доц.
Манцивода А.В., д.ф.-м.н., доц.
Назирова Р.Р., д.т.н., проф.
Нечаев В.В., д.т.н., проф.
Новиков Б.А., д.ф.-м.н., проф.
Павлов В.Л. (США)
Пальчунов Д.Е., д.ф.-м.н., доц.
Петренко А.К., к.т.н., проф.
Позднеев Б.М., д.т.н., проф.
Позин Б.А., д.т.н., проф.
Серебряков В.А., д.ф.-м.н., проф.
Сорокин А.В., к.т.н., доц.
Терехов А.Н., д.ф.-м.н., проф.
Филимонов Н.Б., д.т.н., проф.
Шапченко К.А., к.ф.-м.н.
Шундеев А.С., к.ф.-м.н.
Щур Л.Н., д.ф.-м.н., проф.
Язов Ю.К., д.т.н., проф.
Якобсон И., проф. (Швейцария)

Редакция

Чугунова А.В.

Журнал издается при поддержке Отделения математических наук РАН, Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН, МГУ имени М.В. Ломоносова, МГТУ имени Н.Э. Баумана

СОДЕРЖАНИЕ

- Зотов Я. А.** Принципы построения стенда полунатурного моделирования для отладки АСУ ТП на основе ПЛК «Багет» 575
- Смирнов Р. С.** Риски использования ОС Linux с включенным механизмом обновления встроенного программного обеспечения (сервис Linux Vendor Firmware Service) на предприятиях критической инфраструктуры ТЭК 583
- Стенников В. А., Барахтенко Е. А., Соколов Д. В., Майоров Г. С.** Построение цифровых двойников для проектирования интегрированных энергетических систем 592
- Орлова Е. В.** Методы и алгоритмы RL для моделирования индивидуальных траекторий профессионального развития 603
- Резина Н. М., Шакиров Р. Н.** Разработка адаптивного сайта с применением системы управления контентом NetCat 6 616

Журнал зарегистрирован
в Федеральной службе
по надзору в сфере связи,
информационных технологий
и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации

ПИ № ФС77-38590 от 24 декабря 2009 г.

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в подписных агентствах (индекс по Объединенному каталогу "Пресса России" — 22765) или непосредственно в редакции (для юридических лиц).

Тел.: (499) 270-16-52.

Http://novtex.ru/prin/rus E-mail: prin@novtex.ru

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) и Russian Science Citation Index (RSCI).

Журнал входит в Перечень научных журналов, в которых по рекомендации ВАК РФ должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

© Издательство "Новые технологии", "Программная инженерия", 2023

SOFTWARE ENGINEERING

PROGRAMMNAYA INGENERIA

Vol. 14

N 12

2023

Published since September 2010

DOI 10.17587/issn.2220-3397

ISSN 2220-3397

Editorial Council:

SADOVNICHY V. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.),
Acad. RAS (*Head*)
BETELIN V. B., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Acad. RAS
VASIL'EV V. N., Dr. Sci. (Tech.), Cor.-Mem. RAS
MAKAROV V. L., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Acad.
RAS
PANCHENKO V. YA., Dr. Sci. (Phys.-Math.),
Acad. RAS
STEMPKOVSKY A. L., Dr. Sci. (Tech.), Acad. RAS
UKHLINOV L. M., Dr. Sci. (Tech.)
FEDOROV I. B., Dr. Sci. (Tech.), Acad. RAS
CHETVERTUSHKIN B. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.),
Acad. RAS

Editor-in-Chief:

VASENIN V. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.)

Editorial Board:

ANTONOV B.I.
AFONIN S.A., Cand. Sci. (Phys.-Math)
BURDONOV I.B., Dr. Sci. (Phys.-Math)
BORZOV JURIS, Dr. Sci. (Comp. Sci), Latvia
GALATENKO A.V., Cand. Sci. (Phys.-Math)
GAVRILOV A.V., Cand. Sci. (Tech)
JACOBSON IVAR, Dr. Sci. (Philos., Comp. Sci.),
Switzerland
KORNEEV V.V., Dr. Sci. (Tech)
KOSTYUKHIN K.A., Cand. Sci. (Phys.-Math)
MAKHORTOV S.D., Dr. Sci. (Phys.-Math)
MANCIVODA A.V., Dr. Sci. (Phys.-Math)
NAZIROV R.R., Dr. Sci. (Tech)
NECHAEV V.V., Cand. Sci. (Tech)
NOVIKOV B.A., Dr. Sci. (Phys.-Math)
PAVLOV V.L., USA
PAL'CHUNOV D.E., Dr. Sci. (Phys.-Math)
PETRENKO A.K., Dr. Sci. (Phys.-Math)
POZDNEEV B.M., Dr. Sci. (Tech)
POZIN B.A., Dr. Sci. (Tech)
SEREBR'YAKOV V.A., Dr. Sci. (Phys.-Math)
SOROKIN A.V., Cand. Sci. (Tech)
TEREKHOV A.N., Dr. Sci. (Phys.-Math)
FILIMONOV N.B., Dr. Sci. (Tech)
SHAPCHENKO K.A., Cand. Sci. (Phys.-Math)
SHUNDEEV A.S., Cand. Sci. (Phys.-Math)
SHCHUR L.N., Dr. Sci. (Phys.-Math)
YAZOV Yu. K., Dr. Sci. (Tech)

Editors:

CHUGUNOVA A.V.

CONTENTS

- Zotov Ya. A.** Principles of Constructing a HIL Simulation Stand for Debugging Automated Process Control Systems based on the Baget PLC. 575
- Smirnov R. S.** Risks of Using Linux OS with Enabled Firmware Update Mechanism (Linux Vendor Firmware Service) 583
- Stennikov V. A., Barakhtenko E. A., Sokolov D. V., Mayorov G. S.** Development of Digital Twins for the Design of Integrated Energy Systems 592
- Orlova E. V.** Reinforcement Learning Methods and Algorithms for Modeling Individual Trajectories of Professional Development 603
- Rezina N. M., Shakirov R. N.** Development of Adaptive Site based on NetCat Content Management System 616

Я. А. Зотов, инж., zotov@niisi.ras.ru,
Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований
Российской академии наук, Москва

Принципы построения стенда полунатурного моделирования для отладки АСУ ТП на основе ПЛК «Багет»*

Поступила в редакцию 07.09.2023

Принята к публикации 02.10.2023

Сформулированы принципы построения стенда полунатурного моделирования для отладки и исследования автоматизированных систем управления технологическими процессами на основе программируемых логических контроллеров «Багет», и рассмотрен вариант реализации программного обеспечения для такого стенда. Автор предлагает использовать интерпретатор языка высокого уровня для разработки модели исследуемого процесса, а также подключить библиотеки типовых алгоритмов и стандартных функций. Для внесения возмущений в работу моделей и имитации отказов оборудования предусмотрены средства управления работой стенда.

Ключевые слова: автоматизированные системы управления, моделирование, полунатурный стенд

Для цитирования:

Зотов Я. А. Принципы построения стенда полунатурного моделирования для отладки АСУ ТП на основе ПЛК «Багет» // Программная инженерия. 2023. Том 14, № 12. С. 575—582. DOI: 10.17587/prin.14.575-582.

Введение

Неотъемлемым компонентом современных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) являются компьютеры и иные электронные компоненты (датчики, устройства передачи информации и пр.). Число ЭВМ, входящих в состав АСУ ТП, зависит от масштаба технологического процесса и может исчисляться десятками и сотнями. На каждой ЭВМ выполняется некоторый алгоритм управления техническими средствами, и этот алгоритм необходимо разработать и отладить.

В целях сокращения издержек, связанных с использованием реального объекта и штатной аппаратуры технологического процесса на ранних этапах проектирования и разработки, традиционно применяются разнообразные методы моделирования [1—3].

* Работа выполнена в рамках государственного задания по проведению фундаментальных исследований по теме «Исследование и реализация программной платформы для перспективных многоядерных процессоров» (FNEF-2022-002).

Вопросы моделирования технологических процессов в настоящее время чрезвычайно актуальны, поскольку согласно ГОСТ моделирование является обязательным этапом разработки автоматизированных систем управления технологическими процессами [4—6]. Адекватная модель технологического процесса позволяет осуществить отладку и верификацию алгоритмов АСУ ТП без использования реального оборудования, сокращая таким образом финансовые затраты и вероятность нештатных ситуаций вследствие ошибок, допущенных при разработке АСУ ТП.

Основными методами моделирования являются:

- физическое моделирование;
- математическое моделирование;
- имитационное моделирование;
- полунатурное моделирование.

При физическом моделировании для каждого объекта-оригинала создается уникальная модель, например, модель самолета для исследования характеристик в аэродинамической трубе или полноразмерная модель кузова автомобиля из пластилина для визуальной оценки дизайна.

Изготовление сложных физических моделей требует значительных затрат (а в большинстве случаев создание такой модели невозможно), поэтому, несмотря на определенные преимущества, данный метод имеет очень ограниченную область применения.

Метод математического моделирования имеет большую историю [1] и подразумевает, прежде всего, использование специализированных программ для моделирования ТП конкретных отраслей производства (например, GIBBS [7] для моделирования в нефтегазовой отрасли) или более универсальных GE Predix [8], Eclipse Ditto [9], MATLAB [10], Mathcad [11] и даже Excel [12].

Метод математического моделирования требует формально строгого описания (формализации) поведения объекта-оригинала, например, представления в виде системы уравнений. Тогда, указав начальные условия, можно выполнить расчет и узнать, каким будет состояние объекта-оригинала в заданный момент времени. Формализация поведения сложного технологического процесса сама по себе является нетривиальной задачей, возможно даже задачей, не имеющей решения. Вместе с тем и для условно «простых» технологических процессов математическая модель с высокой степенью детализации способна потребовать большого объема вычислений. При этом особенно важно, что такая модель обычно функционирует в масштабированном модельном времени, отличающемся от реального. Поэтому в случае работы с объектами, имеющими жесткие ограничения по времени (например, как элементы системы управления критической инфраструктуры), необходимо учитывать отличие результатов, полученных при вычислениях в модельном времени, от реального функционирования объекта-оригинала.

Сложности с формализацией поведения объекта-оригинала привели к развитию отдельной ветви математического моделирования — методу имитационного моделирования [3].

В случае имитационного моделирования структура модели соответствует структуре компонентов (подсистем) объекта-оригинала. Способы формализации компонентов могут учитывать их особенности и быть различными для разных компонентов, например, вместо системы уравнений задействуют наборы данных, полученных экспериментальным путем в ходе других исследований или полученных для аналогичного объекта. Время по-прежнему может быть масштабированным.

Метод имитационного моделирования предполагает проведение множества экспериментов, в результате которых формируется статистическая

оценка параметров моделируемого объекта. Функциональные связи внутри имитационной модели реализуют с помощью передачи данных между моделями подсистем. Более детальное отражение характеристик и свойств объекта-оригинала, достигаемое методом имитационного моделирования по сравнению с «чисто математическим» методом, повышает адекватность модели оригиналу.

Полунатурное моделирование — это следующий шаг по совершенствованию модели в плане соответствия объекту-оригиналу. Метод полунатурного моделирования предполагает частичное использование реальной аппаратуры в составе модели (моделирующего комплекса), что является основным преимуществом данного метода по сравнению с математическим моделированием [13]. Включение штатных компонентов объекта-оригинала в состав модели частично освобождает от необходимости детализации математической модели и одновременно обеспечивает более полное соответствие оригиналу, ведь согласно словам, которые приписывают Норберту Винеру, наиболее совершенной моделью кота является такой же кот, а лучше — он сам.

В случае полунатурного моделирования технического комплекса под реальной аппаратурой, прежде всего, подразумевают штатные ЭВМ, входящие в состав технического комплекса и оснащенные штатным программным обеспечением, а также (при технической возможности) прочие электронные/электрические компоненты объекта-оригинала: интерфейсные устройства, периферийные электронные устройства, пульта, индикаторы и т. п.

Данный метод широко применяется, например, при создании тренажеров для обучения операторов: ученик использует штатный пульт управления, а моделирующий алгоритм в реальном масштабе времени обеспечивает функционирование пульта с учетом действий оператора.

Метод полунатурного моделирования с использованием штатной вычислительной аппаратуры позволяет добиться функционирования алгоритмов системы управления объекта-оригинала в реальном масштабе времени, т. е. в штатном режиме, что повышает качество результатов моделирования.

Имея в своем распоряжении полунатурный стенд, на этапе проектирования и разработки АСУ ТП будет несложно и необременительно с точки зрения издержек изменять конфигурацию электронной аппаратуры, состав и содержание управляющих алгоритмов, что позволит добиться более эффективного функционирования системы управления.

Таким образом, следует признать, что метод полунатурного моделирования обладает явными

преимуществами по сравнению с методом математического моделирования на этапах проектирования, разработки, сопровождения и исследования современных АСУ ТП.

Проблемы конструирования стендов полунатурного моделирования для АСУ ТП

Стенды полунатурного моделирования интенсивно используют для исследований в сфере науки и производства с середины прошлого века. Однако в отсутствие высокопроизводительных ЭВМ, типовых решений для коммуникаций и передачи данных, а также стандартизации в области разработки программного обеспечения, каждый из этих стендов был, по сути, уникальным объектом, не допускающим повторного использования для решения задач, связанных с другим технологическим процессом.

Современные АСУ ТП конструируются на основе стандартизованных элементов и, прежде всего, программируемых логических контроллеров (ПЛК). В составе АСУ ТП эти устройства осуществляют прием информации от датчиков, контролирующих состояние объекта управления, и передают сигналы на управляющие механизмы, которые меняют состояние объекта управления. Некоторая совокупность ПЛК может быть подключена к высокопроизводительной ЭВМ, на которой выполняются алгоритмы, управляющие функционированием технологического процесса или его части. Помимо передачи данных ПЛК может выполнять первичную обработку информации и реагировать на сбои и отказы.

Таким образом, ПЛК в совокупности с интерфейсами подключенных датчиков и/или исполнительных механизмов представляет собой типовую структурную единицу АСУ ТП. Отладив алгоритмы управления на уровне таких структурных единиц, можно переходить на отладку алгоритмов работы более высоких уровней АСУ ТП.

Поскольку связь ПЛК с реальной аппаратурой реализована на базе стандартизованных интерфейсов, а передача данных выполняется по стандартизованным протоколам, конкретная область применения ПЛК фактически не играет роли в отличие от ситуации в более ранних периодах, когда конструкция АСУ и полунатурного стенда вынужденно несла на себе специфические ограничения предметной области.

Доступность высокопроизводительных ЭВМ с типовым набором аппаратных интерфейсов и программных средств для использования в составе АСУ ТП и стендов также способствует освобождению от специфических зависимостей, а также обеспечивает мобильность и возможность повторного использования разработок.

В статье рассматривается задача построения такого стенда полунатурного моделирования на основе ПЛК, который потенциально мог бы быть использован для исследования технологического процесса без привязки к конкретной задаче в области науки или производства.

В качестве базового устройства предлагается использовать ПЛК «Багет» [14].

АСУ ТП на основе ПЛК «Багет»

В качестве исходных будем рассматривать такие АСУ ТП, которые имеют структуру, аналогичную показанной на рис. 1.

Данная АСУ ТП включает в себя управляющую ЭВМ, которая исполняет возложенные на нее функции управления технологическим процессом, и ПЛК «Багет» в количестве, необходимом для реализации функций передачи данных и управления технологическим процессом на объект управления (ОУ). Функционирование системы контролирует оператор с помощью графического интерфейса, аналогичного интерфейсам систем типа SCADA. В качестве управляющей ЭВМ возможно использовать персональный компьютер под управлением операционной системы семейства Linux.

Программируемый логический контроллер «Багет» был разработан в Научно-исследовательском институте системных исследований Российской академии наук (НИИСИ РАН) [14]. Он предназначен для применения в производственной среде, реализует функции контроля и управления в составе АСУ ТП и обладает развитыми

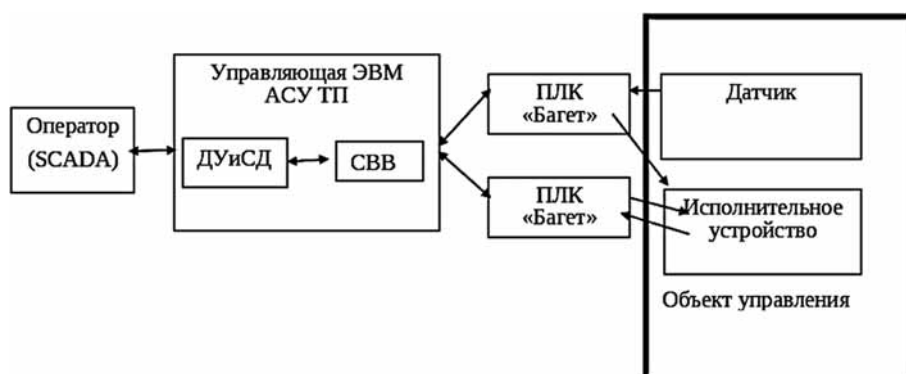


Рис. 1. Структура АСУ ТП на основе ПЛК «Багет»

средствами ввода сигналов от датчиков и вывода сигналов на исполнительные механизмы.

Датчики служат источником информации о состоянии объекта управления, а с помощью исполнительных механизмов АСУ ТП воздействует на ОУ. Датчики и исполнительные устройства подсоединяются к ПЛК в количестве, определяемом конструкцией ПЛК и потребностями технологического процесса.

На управляющей ЭВМ выполняются программы ДУиСД (диспетчерское управление и сбор данных [15]) и СВВ (сервер ввода-вывода [16]).

Программа ДУиСД используется как SCADA-система для управления функционированием объекта-оригинала, отображения оперативной информации и отслеживания аварийных ситуаций. Сервер ввода-вывода обеспечивает передачу данных между ДУиСД и программами, исполняемыми на ПЛК. В качестве канала связи между ними задействована локальная сеть Ethernet. Данные передаются согласно протоколу MLCP (проприетарный протокол, разработанный в НИИСИ РАН [17]).

Программируемый логический контроллер «Багет» имеет канал связи с управляющей ЭВМ АСУ ТП на основе локальной сети Ethernet. Передача данных между ПЛК и управляющей ЭВМ выполняется по протоколу MLCP.

Для обмена информацией между ПЛК и периферией (датчиками и исполнительными механизмами) в современных АСУ ТП используется целый ряд каналов передачи данных и промышленных протоколов связи, в том числе Modbus, OPC UA, МЭК 60870-5-101, МЭК 60870-5-104 — все они доступны для ПЛК «Багет».

Автоматизированная система управления технологическими процессами масштабного технологического процесса может иметь гораздо более сложную структуру, чем показана на рис. 1, и включать большое число разнообразных компонентов. Однако в ее основе всегда можно выделить звено «управляющая ЭВМ — ПЛК — датчики/исполнительные устройства». Очевидно, имеет смысл начать прототипирование и отладку «большой» АСУ ТП с таких базовых звеньев, поэтому в данной работе рассматривается полунатурный стенд именно для такого звена.

Состав аппаратуры и программного обеспечения стенда полунатурного моделирования

В основу разработки стенда полунатурного моделирования заложены следующие принципы:

- простота реализации и использования стенда при наличии необходимых функциональных возможностей;

- возможность использования полунатурного стенда для моделирования работы АСУ ТП в различных областях применения;

- мобильность создаваемого программного обеспечения.

В состав стенда полунатурного моделирования включены следующие компоненты (рис. 2): штатная управляющая ЭВМ АСУ ТП, ПЛК «Багет», моделирующая ЭВМ.

Управляющая ЭВМ АСУ ТП и ПЛК, включая исполняемые программы, интерфейсы и протоколы передачи данных, являются элементами базового звена реальной АСУ ТП. Моделирующая ЭВМ не является штатным элементом АСУ ТП и используется, чтобы имитировать недостающие данные и каналы передачи этих данных.

На управляющей ЭВМ выполняются программы ДУиСД и СВВ.

В качестве канала связи между ними задействована локальная сеть Ethernet. Данные передаются согласно протоколу MLCP.

Программируемый логический контроллер «Багет», входящий в состав полунатурного стенда (см. рис. 2), имеет каналы связи с управляющей ЭВМ АСУ ТП и моделирующей ЭВМ на основе локальной сети Ethernet. В роли моделирующей ЭВМ может выступать компьютер с микропроцессорной архитектурой семейства Intel под управлением операционной системы семейства Linux. Передача данных между ПЛК и управляющей ЭВМ выполняется по протоколу MLCP в штатном режиме. Для обмена информацией между ПЛК и моделирующей ЭВМ может быть использован канал на основе локальной сети Ethernet или иной, возможно, штатный канал АСУ ТП при наличии технической возможности на моделирующей ЭВМ.

Безусловно, использование реально работающего протокола передачи данных между ПЛК и моделирующей ЭВМ (на рис. 2 он помечен как «Промышленный протокол») особенно в сочетании со штатным каналом связи повысит достоверность результатов моделирования.

На моделирующей ЭВМ выполняется программа (на рис. 2 обозначена как «Модель»), имитирующая функционирование технологического процесса на объекте-оригинале.

Управление ходом моделирования выполняет оператор стенда с помощью команд, вводимых на консоли.

Передача данных между моделью ТП и штатными программами, исполняемыми на ПЛК, выполняется по каналу на основе локальной сети Ethernet с использованием протокола Modbus TCP. Данный вариант коммуникации был вы-

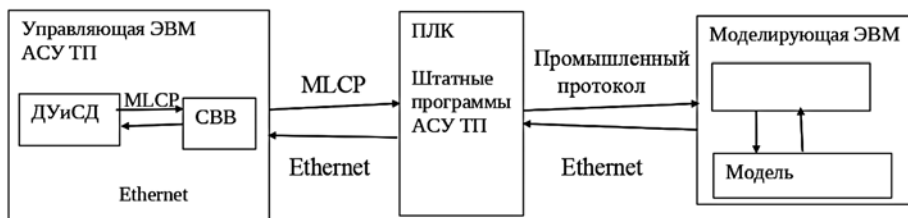


Рис. 2. Состав и структура стенда полунатурного моделирования

бран как наиболее простой в реализации. В случае необходимости могут быть использованы иные протоколы.

Более подробно структура и функционирование модели технологического процесса рассматриваются в следующих разделах.

Структура и функциональные возможности модели технологического процесса

Модель ТП реализована с использованием языков программирования Си и JavaScript. Выбор данных языков обусловлен тем, что для модели ТП ожидаемо будет задействован компьютер с микропроцессорной архитектурой семейства Intel: разработка и функционирование как упрощенной, так и полноценной детальной модели требуют достаточно производительной ЭВМ с современной инструментальной средой.

Языки Си и JavaScript широко используются в разработках, что облегчит портирование и повторное использование компонентов программного обеспечения стенда на ЭВМ с различной архитектурой. Язык программирования JavaScript является одним из самых популярных языков программирования [18].

Синтаксис языка JavaScript является Си-подобным, знакомым очень большому числу разработчиков, что облегчает работу с ним. Для JavaScript существует множество библиотек и фреймворков, которые упрощают разработку и позволяют создавать более мощные и гибкие приложения. Также язык обладает поддержкой обратной совместимости: старые исходные тексты будут по-прежнему работать в новых стандартах языка и новых версиях интерпретатора.

Ядром модели ТП является встроенный интерпретатор MuJS языка JavaScript. Данный интерпретатор реализует спецификацию ECMA-262 языка ECMAScript и использует сценарии, представленные в виде текстовых файлов [19].

Интерпретатор MuJS — это программный продукт с открытым исходным кодом, свободно распространяемый по лицензии ISC [20]. Его достоинством является простота использования.

Интерпретатор MuJS написан на языке Си, обладает несложным интерфейсом для связывания с исполняемым кодом и не требует сложных систем сборки.

Данный продукт содержит стандартную библиотеку языка JavaScript, включающую математические, логические и строковые функции, а также работу со сложными типами, такими как массивы и объекты. При создании простых моделей это позволяет обойтись без использования дополнительных библиотек, встраиваемых модулей и внешних программ, что облегчает процесс разработки модели и повышает его эффективность.

Помимо библиотеки интерпретатора, в составе программного обеспечения моделирующей ЭВМ имеется библиотека дополнительных часто используемых при моделировании типовых функций (преобразование из инженерных единиц измерения в значения, используемые модулями ввода-вывода, и обратно, пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор [21] и некоторые другие функции).

Как было указано выше, рассматриваемый полунатурный стенд предназначен в первую очередь для работы с базовым звеном АСУ ТП вне зависимости от задачи, решаемой с помощью данной автоматизированной системы управления. Но в тех случаях, когда требуется разработка развернутой детализированной модели в конкретной предметной области, программист может расширить функциональные возможности модели, используя дополнительные модули, функции и типы данных на языке JavaScript и/или подключая сторонние программы.

Таким образом, за счет использования дополнительного программного обеспечения на основе базовой конфигурации можно построить полунатурные стенды различного уровня для широкого круга технологических процессов в разнообразных областях производства.

Алгоритм функционирования модели ТП в составе полунатурного стенда

Модель ТП в составе полунатурного стенда работает следующим образом.

После запуска программы с помощью команды, введенной с консоли, создаются два POSIX-потока (рис. 3) [22].

В одном потоке циклически выполняется алгоритм, моделирующий технологический процесс.

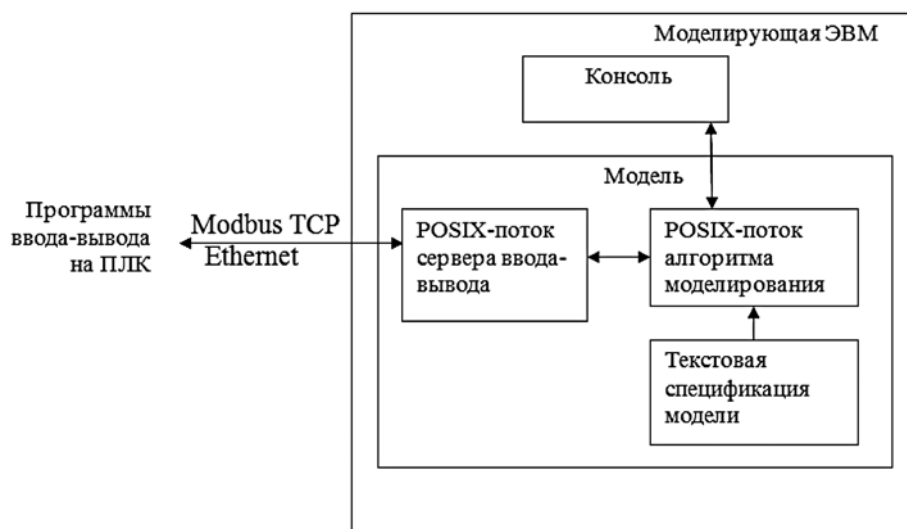


Рис. 3. Схема функционирования модели ТП в составе полунатурного стенда

Во втором потоке запускается СВВ, имитирующий обмен данными между программами ПЛК и датчиками/исполнительными устройствами объекта управления.

Данный сервер моделирует поведение периферийных устройств ПЛК и является программной реализацией протокола Modbus TCP для передачи данных между ПЛК и моделью.

Передача данных между POSIX-потоками на моделирующей ЭВМ выполняется через буферы. Атомарность операций доступа к буферам гарантируется за счет применения мьютексов.

Алгоритм моделирования и параметры передачи данных специфицируются с помощью текстовых файлов, которые поступают на вход интерпретатору MuJS.

Для установки сквозного соответствия между технологическими параметрами, которые контролирует система ДУиСД, и параметрами модели ТП используются регистры Modbus: соответствующие друг другу параметры двух компонентов стенда должны быть связаны с одним и тем же регистром.

С помощью команд, вводимых с консоли, можно изменять значения, соответствующие технологическим параметрам модели. Данная функциональная возможность позволяет вмешиваться в работу модели ТП, имитируя отказы или погрешности в работе оборудования ОУ.

Заключение

Предложен способ построения стенда полунатурного моделирования для базового звена АСУ ТП, которое присутствует в составе любой автоматизированной системы управления на основе ПЛК «Багет».

Наличие стенда для базового звена позволяет ускорить процесс прототипирования и отладки даже в случае объемной разработки, поскольку из правильно работающих элементов будет проще построить систему целиком.

Также преимуществом изложенного подхода является отсутствие привязки стенда к определенному типу технологического процесса или к узкой области производства: стенд допускает использование готовых моделей, разработку новых моделей, включение различных библиотек функций.

Простота конструкции стенда при данном подходе сочетается с полноценным набором функциональных возможностей. Как сказано выше, за счет подключения дополнительного программного обеспечения можно усложнить и детализировать модель. Данный стенд способен служить и для отладки алгоритмов ПЛК, и в качестве тренажера для обслуживающего персонала реального ОУ, поскольку оператор стенда может имитировать сбои и погрешности штатной аппаратуры, аварийные ситуации на ОУ.

Использование для разработки языков программирования Си и JavaScript обеспечивает мобильность и простоту расширения возможностей предлагаемого программного обеспечения.

Разработка сложных систем на основе полунатурного моделирования позволяет экономить ресурсы и эффективно решать поставленные задачи, поэтому предлагаемый подход к построению стендов, несомненно, будет востребован в процессе разработки АСУ ТП на основе ПЛК «Багет».

Список литературы

1. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем — искусство и наука. М.: Мир, 1978. 418 с.
2. Балашов В. В., Бахмуrow А. Г., Волканов Д. Ю. и др. Стенд полунатурного моделирования для разработки встроенных вычислительных систем реального времени // Сб. докладов Четвертой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2009). СПб., 2009. С. 215—219.
3. Девятков В. В. Методология и технология имитационных исследований сложных систем: современное состояние и перспективы развития: монография. М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2013. 448 с.
4. ГОСТ Р 57700.22—2020. Компьютерные модели и моделирование. Классификация.
5. ГОСТ Р 57700.37—2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения.

6. **ГОСТ 16504—81.** Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.

7. **Что** такое GIBBS. Моделирование в нефтегазовой отрасли. URL: <http://www.gibbsim.ru/node/10> (дата обращения 28.08.2023).

8. **GE Predix.** TAdviser. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:GE_Predix (дата обращения: 28.08.2023).

9. **Eclipse** Ditto documentation overview. Eclipse Foundation. URL: <https://www.eclipse.org/ditto/intro-overview.html> (дата обращения 28.08.2023).

10. **MATLAB.** MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (дата обращения: 28.08.2023).

11. **Mathcad:** Math Software for Engineering Calculations. URL: <https://www.mathcad.com/en> (дата обращения: 28.08.2023).

12. **Optimization** with Excel Solver. Simply Easy Learning at your fingertips. URL: https://www.tutorialspoint.com/excel_data_analysis/advanced_data_analysis_optimization_with_excel_solver.htm (дата обращения: 29.08.2023).

13. **Базаева С. Е., Зотов Я. А.** Инструментальные средства разработки моделей технических комплексов // Труды научно-исследовательского института системных исследований Российской академии наук. 2022. Том 12, № 4. С. 5—14.

14. **Промышленные** контроллеры для «Росатома» построит создатель самобытных российских процессоров. Не «Эльбрус», не «Байкал» // Интернет-издание о высоких тех-

нологиях — Сnews. URL: https://www.cnews.ru/news/top/2023-02-28_promyshlennye_kontrollery (дата обращения 04.09.2023).

15. **Функциональное** описание программы ДУиСД. ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН: Разработка ПО. URL: <https://www.niisi.ru/ДУиСД.pdf> (дата обращения 23.06.2023).

16. **Онин А. Н.** Программа Сервер ввода-вывода // Труды научно-исследовательского института системных исследований Российской академии наук. 2023. № 3. С. 5—12.

17. **Функциональное** описание программы БПП MLCP ДУиСД. ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН: Разработка ПО. URL: <https://www.niisi.ru/soft3.pdf> (дата обращения 04.09.2023).

18. **Most** popular programming languages in 2023. Stack Overflow Annual Developer Survey. URL: <https://survey.stackoverflow.co/2023/#most-popular-technologies-language-prof> (дата обращения 25.09.2023).

19. **MuJS.** URL: <https://mujs.com/> (дата обращения 04.09.2023).

20. **ISC** Open Source Software Licenses. ISC. Open Source For an Open Internet. URL: <https://www.isc.org/licenses/> (дата обращения 04.09.2023).

21. **Денисенко В.** ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. 2006. № 4. С. 66—74.

22. **ISO/IEC/IEEE 9945:2009** — Информационные технологии. Переносимый интерфейс операционной системы (POSIX). Базовые технические требования. Выпуск 7. URL: <https://www.iso.org/standard/50516.html> (дата обращения: 04.09.2023).

Principles of Constructing a HIL Simulation Stand for Debugging Automated Process Control Systems based on the Baget PLC

Ya. A. Zotov, Engineer, zotov@niisi.ras.ru

Federal State Institution “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Moscow, 117218, Russian Federation

Corresponding author:

Yaroslav A. Zotov, Engineer,

Federal State Institution “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Moscow, 117218, Russian Federation

E-mail: zotov@niisi.ras.ru

Received on September 09, 2023

Accepted on October 02, 2023

The problem of constructing a HIL simulation stand for researching a technological process using programmable logic controller (PLC) “Baget” is described in this article.

Issues of modeling technological processes are currently extremely relevant, since modeling is a mandatory stage in the automated process control systems development. An adequate model of the technological process allows debugging and verification of automated process control system algorithms without using real equipment, reducing financial costs and the probability of emergency situations.

The HIL modeling method involves partial use of real equipment as part of the model. The inclusion of standard components of the original object in the model does not require detailed mathematical model and at the same time provides a more complete correspondence to the original. Due to using a computer from the original object, the stand software operates under conditions close to the real technological process, which improves the quality of the simulation results.

The HIL modeling stand includes the following components:

- 1) control computer of automated process control system;*
- 2) programmable logic controller PLC “Baget”;*
- 3) simulation computer.*

The stand for the basic element of an automated process control system allows to speed up the process of prototyping and debugging even in the case of complex systems, because it will be easier to build the entire system from correctly functioning elements.

Another advantage of this approach is that the stand is not tied to a specific type of technological process or to a narrow area of production — the stand allows the use of ready-made models, the development of new models, and the inclusion of various function libraries.

The simplicity of the stand design with this approach is combined with a full range of functionality. By connecting additional software, you can create more complicated and detailed model. This stand is also capable of serving both for debugging PLC algorithms and as a simulator for maintenance personnel of a real control object, because the stand operator can simulate failures and errors of standard equipment, emergency situations at the control object.

Using C and JavaScript programming languages for development ensures portability and ease of expanding the capabilities of the modeling software.

The development of complex systems based on HIL modeling allows saving resources and effectively solving assigned problems, therefore the proposed approach to building stands will be in demand in the process of developing an automated process control system based on the PLC “Baget”.

Keywords: automated control systems, modeling, hardware-in-the-loop (HIL) simulation

For citation:

Zotov Ya. A. Principles of Constructing a HIL Simulation Stand for Debugging Automated Process Control Systems based on the Baget PLC, *Programmnaya Ingeneria*, 2023, vol. 14, no. 12, pp. 575—582. DOI: 10.17587/prin.14.575-582.

References

1. **Shannon R. E.** *Systems Simulation: The Art and Science*, University of Alabama in Huntsville. Huntsville, Alabama. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1975, 387 p.
2. **Balashov V. V., Bakhmurov A. G., Volkanov D. Yu.** et al. HIL simulation stand for the development of embedded real-time computing systems, *Sbornik докладov Chetvertoy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika”*, Saint Petersburg, 2009, pp. 215—219 (in Russian).
3. **Devyatkov V. V.** *Methodology and technology of simulation studies of complex systems: current state and development prospects*: monography, Moscow, Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2013, 448 p. (in Russian).
4. **GOST R 57700.22—2020.** Computer models and simulation. Classification» (in Russian).
5. **GOST R 57700.37—2021.** Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions (in Russian).
6. **GOST 16504—81.** The state system of testing products. Product test and quality inspection. General terms and definitions (in Russian).
7. **What** is GIBBS, available at: <http://www.gibbsim.ru/node/10> (date of access 28.08.2023).
8. **GE** Predix, available at: https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82:GE_Predix (date of access 28.08.2023).
9. **Eclipse** Ditto documentation overview, available at: <https://www.eclipse.org/ditto/intro-overview.html> (date of access 28.08.2023).
10. **MATLAB**, available at: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (date of access 28.08.2023).
11. **Mathcad**: Math Software for Engineering Calculations, available at: <https://www.mathcad.com/en> (date of access 28.08.2023).
12. **Optimization** with Excel Solver, available at: https://www.tutorialspoint.com/excel_data_analysis/advanced_data_analysis_optimization_with_excel_solver.htm (date of access 29.08.2023).
13. **Bazaeva S. E., Zotov Ya. A.** Tools for developing models of technical complexes, *Trudy nauchno-issledovatel'skogo instituta sistemnykh issledovaniy Rossiyskoy akademii nauk*, 2022, no. 4, pp. 5—14 (in Russian).
14. **Industrial** controllers for Rosatom will be built by the creator of original Russian processors. Not “Elbrus”, not “Baikal”, *Cnews*, available at: https://www.cnews.ru/news/top/2023-02-28_promyshlennyye_kontrollery (date of access 04.09.2023).
15. **Functional** description of the DUSD program, available at: <https://www.niisi.ru/%D0%94%D0%A3%D0%B8%D0%A1%D0%94.pdf> (date of access 23.06.2023).
16. **Onin A. N.** I/O server program, *Trudy nauchno-issledovatel'skogo instituta sistemnykh issledovaniy Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, no. 3, pp. 5—12 (in Russian).
17. **Functional** description of the BPP MLCP DUSD program, available at: <https://www.niisi.ru/soft3.pdf> (date of access 04.09.2023).
18. **Most** popular programming languages in 2023, available at: <https://survey.stackoverflow.co/2023/#most-popular-technologies-language-prof> (date of access 25.09.2023).
19. **MuJS**, available at: <https://mujs.com/> (date of access 04.09.2023).
20. **ISC** Open Source Software Licenses, available at: <https://www.isc.org/licenses/> (date of access 04.09.2023).
21. **Denisenko V.** PID controllers: principles of construction and modification, *STA*, 2006, no. 4, pp. 66—74 (in Russian).
22. **ISO/IEC/IEEE 9945:2009.** Information technology — Portable Operating System Interface (POSIX®) Base Specifications, Issue 7, available at: <https://www.iso.org/standard/50516.html> (date of access 04.09.2023).

Риски использования ОС Linux с включенным механизмом обновления встроенного программного обеспечения (сервис Linux Vendor Firmware Service) на предприятиях критической инфраструктуры ТЭК

Поступила в редакцию 02.09.2023
Принята к публикации 02.10.2023

Рассмотрен механизм обновления встроенного программного обеспечения (firmware) в дистрибутивах операционной системы Linux. С учетом стратегии импортозамещения и активного перехода на эту операционную систему, в том числе в решениях, связанных с цифровизацией энергетики, рассмотрена задача дополнительного контроля процесса обновления, включая используемые на предприятиях критической инфраструктуры отечественные дистрибутивы (AstraLinux, AltLinux). Сделан вывод о наличии потенциальных уязвимостей в этом механизме и предложено решение в виде организации собственного сервиса дополнительной верификации «прошивок».

Ключевые слова: встроенное программное обеспечение (ПО), AltLinux, AstraLinux, цифровизация электроэнергетики, ОС Linux, Linux vendor firmware service, fwupd, LVFS

Для цитирования:

Смирнов Р. С. Риски использования ОС Linux с включенным механизмом обновления встроенного программного обеспечения (сервис Linux Vendor Firmware Service) на предприятиях критической инфраструктуры ТЭК // Программная инженерия. 2023. Том 14, № 12. С. 583—591. DOI: 10.17587/prin.14.583-591.

Введение

В 2015 г. Richard Hughes, один из разработчиков Gnome, а также по совместительству сотрудник Dell, разработал сервис обновления так называемого встроенного программного обеспечения («прошивок») устройств для операционной системы (ОС) Linux, который изначально предназначался для использования компанией Dell [1].

Со временем сервис Linux Vendor Firmware Service (LVFS) набрал популярность и на данный момент включен в большинство самых распространенных дистрибутивов ОС Linux — Ubuntu, Debian, RedHat и других построенных на их базе.

Отечественные дистрибутивы Linux, такие как AstraLinux (пункт 80 — БЮЛЛЕТЕНЬ № 2023-0426SE17 (оперативное обновление 1.7.4) [2]) и AltLinux [3] используют этот же механизм.

Публичная статистика у проекта отсутствует, на 1 декабря 2021 г. владельцами сервиса задекла-

рировано 40 млн скачиваний «прошивок» (за год до этого было 25 млн) [4], на 31 мая 2022 г. — около 52 млн скачиваний [5], т. е. он активно используется по всему миру.

Принцип работы сервиса схематично изображен на рис. 1.

Служба «прошивки» LVFS предоставляет ресурсы и поддержку, позволяющие производителям оборудования оперативно проводить обновления «прошивок» у конечных пользователей.

Работающий на компьютере-клиенте сервис fwupd периодически скачивает с сервера LVFS индекс метаданных с информацией о драйверах, далее сверяет по прописанным в метаданных условиям совпадение с атрибутами подключенных к компьютеру устройств и при необходимости проводит обновление (чаще всего через интерфейс UEFI).

С учетом того, что в процессе обновления передается уникальная для конфигурации клиента

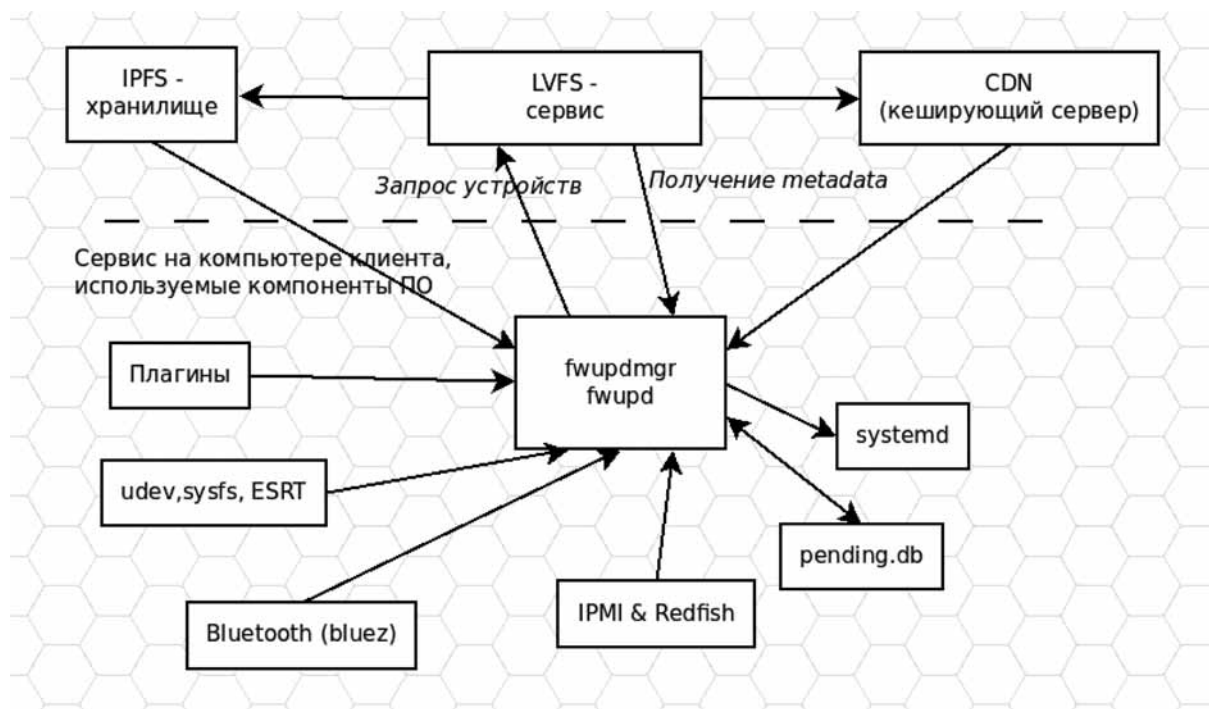


Рис. 1. Схема работы fwupd и LVFS

метаинформация, включающая в себя IP-адрес клиента, информацию о системе и пр., то может быть организована целенаправленная загрузка модифицированных образов «прошивок» (в том числе вместе с данными в индексе) на основе информации, передаваемой при соединении.

Возможна также модификация «прошивки» непосредственно при загрузке вендорами файлов в сервис. Владельцами LVFS декларируется, что все загружаемые производителями файлы проверяются антивирусом ClamAV и загружаются в сервис VirusTotal для дальнейшего анализа [6].

Существует коммерческий сервис Binarly FwHunt, который декларирует, что регулярно проверяет LVFS на предмет появления уязвимых к атаке «прошивок» устройств (может использоваться в том числе для оперативной разработки самих атак).

Сложность обнаружения проблемных «прошивок» состоит в том, что для этого необходимо понимание специфики работы оборудования, которым зачастую обладает только его производитель, а также того факта, что нередко сами «прошивки» защищены дополнительным уровнем шифрования по не раскрываемым производителями ключам и по сути представляют собой «черные ящики».

При этом регулярно возникают проблемные ситуации по цепочке «централизованного обновления», примеры которых приведены далее.

1. В 2017 г. компания CCleaner сообщила, что хакеры-злоумышленники смогли получить доступ

к серверам, используемым для распространения и обновления программы. Хакеры внедрили вредоносный код в обновление, которое было загружено на более чем 2,3 млн компьютеров.

2. В 2019 г. стало известно о том, что были скомпрометированы серверы компании ASUS, их использовали для распространения вредоносного ПО через легитимное ПО Live Update Utility на миллионы компьютеров.

3. Инцидент SolarWinds, произошедший в 2020 г., стал одной из самых громких атак на цепочку поставок в истории. Хакеры взломали системы SolarWinds и добавили вредоносный код в обновления продукта Orion, который использовали десятки тысяч компаний и организаций по всему миру.

4. Проблема безопасности CVE-2023-1707 с обновлением «прошивки» затрагивает около 50 моделей принтеров HP Enterprise LaserJet и HP LaserJet Managed. По стандарту CVSS v3.1 серьезность проблемы получила 9,1 из 10 баллов.

Использование ОС Linux в российской энергетике

В связи с происходящим процессом цифровизации энергетики, а также реализации программы импортозамещения, нередко сводящейся к переходу в части ПО на использование open source ПО, все чаще на третьем уровне абстракции (рис. 2) в качестве ОС используются различные дистрибутивы ОС Linux.

Интеллектуальное электронное устройство (ИЭУ)

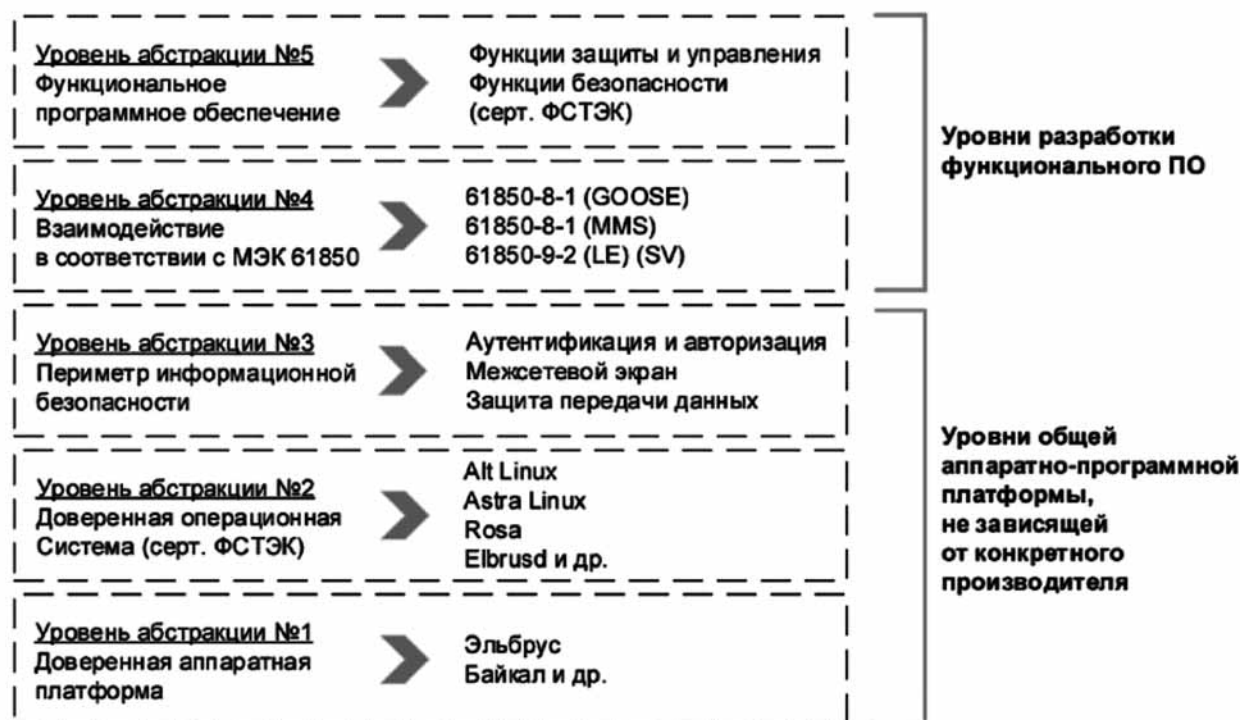


Рис. 2. Пять уровней абстракции при создании кроссплатформенного «Интеллектуального электронного устройства», используемого при построении SmartGrid (так называемых умных электросетей) [7]

Также ввиду отсутствия лицензионных отчислений за использование ОС некоторые решения для рабочих станций или серверного ПО на предприятиях в сфере энергетики уже сейчас строятся на базе Linux. К 2025 г. согласно Указа Президента РФ от 30 марта 2022 г. № 166 «О мерах по обеспечению технологической независимости и безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» должен быть осуществлен полный переход с иностранного ПО.

Есть и проекты, изначально декларирующие использование свободно распространяемого ПО на энергетической инфраструктуре, например, Linux Foundation Energy (при поддержке Google, Microsoft, General Electrics, Hitachi, Tennet и др.) [8], Open Smart Grid и др.

На предприятиях топливно-энергетического комплекса (ТЭК) уже активно идет переход на ОС Linux, в том числе на рабочих станциях. Это показывает мониторинг системы госзакупок¹ по ключевому слову Linux и дополнительному фильтру списка предприятий из реестра системообразующих организаций российской экономики в части ТЭК — присутствуют массовые закупки поддержки систем с этой ОС крупными организациями

¹ <https://zakupki.gov.ru>

ТЭК, таким как, например, Росатом (закупка № 32211991322), Русгидро (закупка № 32211086790: 3567 лицензий на использование ОС AstraLinux), СО-ЕЭС (закупка № 3221195060), АО СИБЭК (закупка № 32211871727) и др.

Полностью отказаться от механизма обновления «прошивок», встроенного в распространяемые дистрибутивы, затруднительно, так как при этом может быть существенно ухудшена производительность или функциональные возможности используемого оборудования и ПО.

В стандартах, касающихся непосредственно SmartGrid и элементов новой цифровой энергетики, процесс обновления «прошивок» указан в случае наличия, как часть специализированных разделов, например, для электромобилей и электрозаправок — раздел IEC 63110-1:2022, для освещения — раздел IEC 62386-105:2020, отдельный стандарт с общими подходами по безопасности, без детализации — раздел ISO/IEC 27019:2017. Для ПО системного уровня онтология процесса обновления «прошивок» (причем включающая критически важный элемент верификации производителей оборудования и/или ПО к нему) не представлена, как и стандарты на ее базе. По цифровой подстанции реализация зависит непосредственно от производителей, например, ручная установка «про-

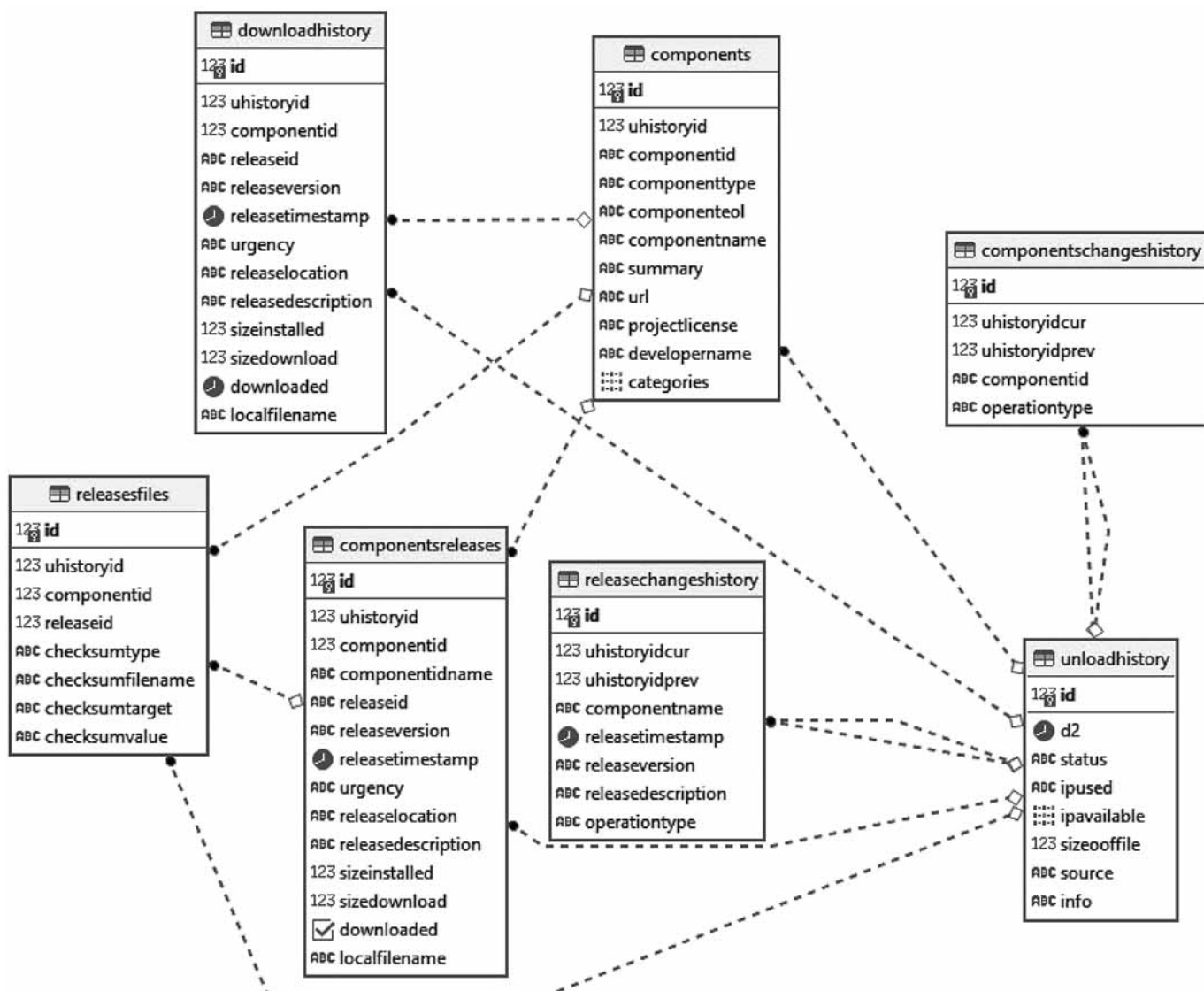


Рис. 3. Схема базы данных, используемая для мониторинга репозитория LVFS

шивок» у ABB¹; Siemens предоставляет отдельное решение в рамках проприетарного ПО² и пр., т. е. процесс у различных вендоров не унифицирован. Есть отдельные общие стандарты (например, часть стандарта DLMS) на обновления неметрологической части ПО приборов учета электроэнергии, но они также зависимы от конкретных реализаций в национальных системах или условий эксплуатации оборудования конкретных производителей.

В смежной сфере Интернета вещей разрабатывается стандарт RFC9019, но он также не полно описывает процесс практической реализации системы распространения обновлений, каковым является уже апробированный на практике подход, используемый в LVFS.

¹ <https://new.abb.com/medium-voltage/digital-substations/protection-relay-services/firmware-update-release>

² <https://www.siemens.com/uk/en/products/energy/energy-automation-and-smart-grid/digital-substation/substation-device-management.html>

Эксперимент

Для анализа механизма обновления «прошивок» было разработано ПО для мониторинга (размещен в открытом доступе по лицензии GPLv3 [9]) — сервис, который ежедневно скачивал индекс и вычислял разницу с предыдущими полученными данными, результаты обработки сохранялись в базе данных, схема которой представлена на рис. 3.

Перечислим основные сущности, представленные на рис. 3, с примерами данных.

- Components — драйверы-устройства (рис. 4).
- ComponentsReleases — релизы драйверов, пример данных (рис. 5).
- Прочие таблицы: ReleasesFiles — хеши файлов релиза, UnloadHistory — история загрузок данных, ComponentsChangeHistory и ReleaseChangeHistory — содержат результаты сравнения индексов по компонентам и по релизам. Подробную информацию

123 uhistoryid	ABC componentid	ABC componentna	ABC summary	ABC url
55	1	com.eposaudio.USBEDCC01.fir	USB ED CC 01	Adapter with call control, USB to ED
56	1	com.fingerprints.lenfy.firmwar	FPC Disum	Firmware for FPC Disum Fingerprint Reader device
57	1	com.formelife.studio.firmware	Studio Sys UPD	Firmware for the Studio device
58	1	com.fujitsu.D3543-A1.Firmwar	D3543-A1	UEFI Firmware for D3543-A1 System Board
59	1	com.fujitsu.D3543-A1.uefi.firm	D3543-A1	UEFI Firmware for D3543-A1 System Board
60	1	com.fujitsu.D3543-A2.uefi.firm	D3543-A2	UEFI Firmware for D3543-A2 System Board
61	1	com.fujitsu.D3544-A1.Firmwar	D3544-A1	UEFI Firmware for D3544-A1 System Board
62	1	com.fuiitsu.D3544-A1.uefi.firm	D3544-A1	UEFI Firmware for D3544-A1 Svsstem Board

Рис. 4. Пример данных — Components

123 id	123	123	ABC n	ABC	releasetimestamp	ABC	ABC releaselocation	ABC releasedescription
79	1	57	8765	108041	2021-06-30 00:00:00.000	mediur	https://fwupd.org/downloads/b7eb1c37489777694	This update fixes a compatibility issue which was ob
80	1	58	22352	619125	2023-03-03 00:00:00.000	high	https://fwupd.org/downloads/4d52fb2fedb014963	Dell PC SN810 NVMe SSD Firmware Update which inc
81	1	58	12480	615200	2022-03-21 10:29:26.000	high	https://fwupd.org/downloads/3377039b21e8c8cfa	Dell PC SN810 NVMe SSD Firmware Update which inc
82	1	59	16873	340000	2022-11-18 00:00:00.000	high	https://fwupd.org/downloads/9d59a15b1d863020	This stable release fixes the following:FW releaseFW f
83	1	59	11963	340000	2022-02-15 00:00:00.000	high	https://fwupd.org/downloads/dbf3a0600e2983727	This stable release fixes the following:This FW release
84	1	60	18087	346000	2023-01-15 00:00:00.000	critical	https://fwupd.org/downloads/01752390ca47ff351	This stable release fixes the following:FW releaseGC c
85	1	61	16057	245000	2022-10-12 00:00:00.000	high	https://fwupd.org/downloads/f0b5e58dceafab155	This stable release fixes the following:FW releaseRem
86	1	62	19319	112001	2023-03-01 00:00:00.000	mediur	https://fwupd.org/downloads/9e3adb9b7a34ecd6	Fix LPM handling issue, LUT overwritten issue and au
87	1	62	14816	112001	2022-08-05 00:00:00.000	low	https://fwupd.org/downloads/8bed0ad541c3a6d0	FW modification for removing redundant code of the
88	1	62	12233	112001	2022-02-18 00:00:00.000	low	https://fwupd.org/downloads/e922aac31d935e32e	This FW update includes Chromebook and Ubuntu P
89	1	63	19261	922123	2023-02-10 00:00:00.000	mediur	https://fwupd.org/downloads/1672410cd5ba80c0	This stable release fixes the following:FW releaseFixe
90	1	63	16671	922100	2022-11-09 00:00:00.000	mediur	https://fwupd.org/downloads/4c2aa6c6ce36a44cb	This stable release fixes the following:FW releaseFixe
91	1	64	33505	510051	2021-03-18 00:00:00.000	high	https://fwupd.org/downloads/d3db99ae153e9cf9f	This is the firware to update for BC901 for new versio
92	1	65	17431	739141	2022-12-21 00:00:00.000	high	https://fwupd.org/downloads/02bba560c24bdbf4	Dell PC SN740 NVMe SSD Firmware for dellSupports:
93	1	65	11317	731030	2021-12-22 12:06:51.000	high	https://fwupd.org/downloads/35d850d8c67efdacc	WD PC SN740 NVMe SSD FW update for Dell (731030
94	1	66	27470	413000	2023-03-06 00:00:00.000	high	https://fwupd.org/downloads/77ab61f4af6b60128	This firmware provides the following:Fixed compatib
95	1	67	17290	240000	2022-12-15 00:00:00.000	high	https://fwupd.org/downloads/83e97e64e3e5a2cc3	This stable release fixes the following:FW releaseDLL

Рис. 5. Пример данных — ComponentsReleases

об атрибутивном составе таблиц можно найти в описании ПО [9].

Результаты мониторинга индекса LVFS с 13.08.2023 по 22.08.2023

В период с 13.08.2023 по 22.08.2023 ежедневно с помощью разработанного ПО проводилась загрузка индекса LVFS и его импорт в описанную выше базу данных с расчетом разницы между версиями индекса. Результаты (топ 15) вендоров по числу имеющихся в репозитории драйверов приведены на рис. 6.

В списке на рис. 6 представлены поставщики оборудования, разместившие драйверы в LVFS, список отсортирован по числу уникальных id оборудования в убывающем порядке.

По аналогии с мониторингом закупок на предмет приобретения поддержки ОС Linux или программных решений, работающих в этой среде, по технической документации, размещаемой в системе госзакупок, можно увидеть, что оборудование указанных производителей по-прежнему активно закупается предприятиями ТЭК, в частности, ноутбуки Lenovo, Dell, HP.

Перечислим особенности, замеченные за период мониторинга.

1. Безвозвратное удаление компонентов (рис. 7).

	ABC developername	123 c
1	Lenovo	650
2	Dell	437
3	HP	39
4	Star Labs	20
5	EPOS	20
6	Fujitsu	16
7	Synaptics	12
8	Nordic	11
9	Wacom	8
10	8BitDo	8
11	Adlink	6
12	Logitech	5
13	System76	4
14	NovaCustom	3
15	Corsair	3

Рис. 6. Вендоры

Например, 15 августа 2023 г. была загружена «прошивка» для вычислительного модуля AdLinkTech COM-НРС, которая на следующий день была безвозвратно удалена.

2. Удаление файлов релизов.

Удаление файлов релизов идет на регулярной основе, причем ссылки на старые файлы в индексе не сохраняются. Пример приведен на рис. 8.

id	123	123	ABC componentid	ABC operationtype	ABC info
1	2	1	com.dell.uefi6e7d6855.firmware	new	20230813
2	2	1	com.lenovo.ThinkPadN1VRG.corporate.firmware	new	20230813
3	2	1	com.lenovo.ThinkPadN25RG.Consumer.firmware	new	20230813
4	2	1	com.lenovo.ThinkPadN25RG.firmware	new	20230813
5	2	1	com.lenovo.ThinkPadN38HT.firmware	new	20230813
6	4	3	com.adlinktech.COM-HPC.firmware	new	20230815
7	5	4	com.adlinktech.COM-HPC-ALT-BIOS.firmware	new	20230816
8	5	4	com.adlinktech.COM-HPC.firmware	removed	20230816
9	6	5	com.adlinktech.COM-HPC-ALT-CC.firmware	new	20230817
10	6	5	com.dell.uefi4d7bdc4_Precision5530.firmware	new	20230817
11	6	5	com.adlinktech.COM-HPC-ALT-BIOS.firmware	removed	20230817

Рис. 7. Удаленные компоненты

123	123 uhis	ABC componentname	releasetimestamp	ABC rel	ABC releasedescription	ABC operation
8	7	Inspiron 15 3520, Inspiron 15 3520, Vostr	2023-06-28 00:00:00.000	69632	Fixes and Enhancements=====	new
8	7	Inspiron 15 3520, Vostro 3520, Vostro 34:	2023-06-28 00:00:00.000	69632	Fixes and Enhancements=====	new
8	7	Inspiron 15 3520, Inspiron 15 3520, Vostr	2023-06-28 00:00:00.000	69632	Fixes and Enhancements=====	new
8	7	ThinkPad L14 L15 Gen3 AMD	2023-04-21 00:00:00.000	0.1.18	Lenovo ThinkPad L14 L15 Gen3 AMD Embedded con	removed
8	7	Inspiron 3530, Vostro 3530, Vostro 3430	2023-01-19 00:00:00.000	65792	Fixes and Enhancements:Supports 13th Generation I	removed
8	7	Inspiron 15 3511, Vostro 15 3510	2022-12-20 00:00:00.000	70656	Fixes and Enhancements:=====	removed
8	7	Inspiron 15 3511, Vostro 15 3510	2022-12-20 00:00:00.000	70656	Fixes and Enhancements:=====	removed
8	7	Inspiron 15 3511, Vostro 15 3510	2022-12-19 00:00:00.000	70656	Fixes and Enhancements:=====	removed
8	7	Inspiron/Vostro 3X8X	2022-12-19 00:00:00.000	71169	Fixes and Enhancements:-----Firmware	removed
8	7	Inspiron 15 3511, Vostro 15 3510	2022-12-19 00:00:00.000	70656	Fixes and Enhancements:=====	removed
8	7	Inspiron 15 3520, Inspiron 15 3520, Vostr	2022-12-15 00:00:00.000	68096	Fixes and Enhancements:-----Firmware	removed
8	7	Inspiron 15 3520, Inspiron 15 3520, Vostr	2022-12-15 00:00:00.000	68096	Fixes and Enhancements:-----Firmware	removed
8	7	Inspiron 15 3520, Vostro 3520, Vostro 34:	2022-12-14 00:00:00.000	68096	Fixes and Enhancements:-----Firmware	removed
8	7	Inspiron/Vostro 3X8X	2022-11-14 00:00:00.000	70656	Fixes and Enhancements:-----Firmware	removed
8	7	Inspiron 5493,Inspiron 5593,Inspiron 349	2022-09-12 00:00:00.000	71680	Fixes and Enhancements:Firmware updates to adre	removed
11	10	Precision 7670, Precision 7770	2023-07-26 00:00:00.000	69121	This stable release fixes the following issues:Fixed the	new
11	10	ThinkPad X1 Nano Gen 2	2023-07-26 00:00:00.000	0.1.21	BIOS and ECFW firmware Update For Reference code	new
11	10	Precision 7680, Precision 7780	2023-07-10 00:00:00.000	66817	This stable release fixes the following issues:This rele	new
11	10	ThinkPad X1 Nano Gen 2	2023-07-08 00:00:00.000	0.1.18	BIOS and ECFW regular update for reference code.	new
11	10	Latitude 3410, Latitude 3510	2023-07-06 00:00:00.000	71936	This stable release fixes the following issues:This rele	new
11	10	WD22 USB4	2023-05-04 14:18:35.000	38.00	-Same as previous release, there is no change for this	new
11	10	WD19 Thunderbolt	2023-05-04 14:18:35.000	60.00	-Same as previous release, there is no change for this	new
11	10	WD22 USB4	2022-06-08 02:48:05.000	38.00	-Same as previous release, there is no change for this	new
11	10	WD19 Thunderbolt	2022-06-08 02:48:05.000	60.00	-Same as previous release, there is no change for this	new
11	10	Thunderbolt	2023-05-04 14:18:35.000	60.00	-Same as previous release, there is no change for this	removed
11	10	USB4	2023-05-04 14:18:35.000	38.00	-Same as previous release, there is no change for this	removed
11	10	Precision 7680, Precision 7780	2023-04-13 00:00:00.000	66050	This stable release fixes the following issues:This rele	removed
11	10	Precision 7670, Precision 7770	2023-03-14 00:00:00.000	68352	This stable release fixes the following issues:This rele	removed
11	10	ThinkPad X1 Nano Gen 2	2022-12-13 00:00:00.000	0.1.18	New functions or enhancementsUpdated the Diagno	removed
11	10	ThinkPad X1 Nano Gen 2	2022-12-08 00:00:00.000	0.1.15	Lenovo ThinkPad X1 Nano Gen 2 Embedded controll	removed
11	10	Latitude 3410, Latitude 3510	2022-08-15 00:00:00.000	70144	This stable release fixes the following issues:Fixed the	removed
11	10	USB4	2022-06-08 02:48:05.000	38.00	-Same as previous release, there is no change for this	removed
11	10	Thunderbolt	2022-06-08 02:48:05.000	60.00	-Same as previous release, there is no change for this	removed

Рис. 8. Изменения в файлах релизов

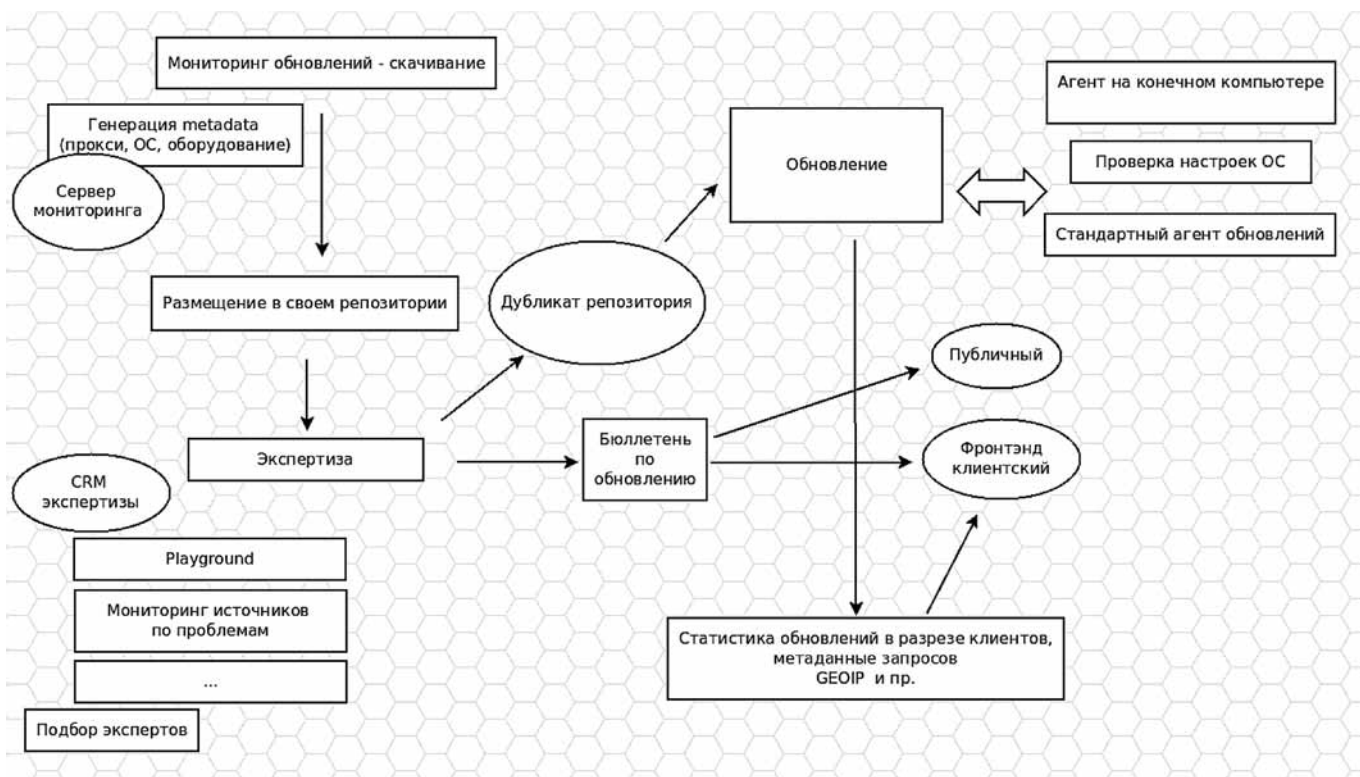


Рис. 9. Схема дублирования репозитория LVFS

Таким образом, даже за короткий период мониторинга уже обнаружены случаи, которые помимо непосредственно уязвимой схемы говорят о невозможности восстановления истории изменений в случае наличия каких-либо трудностей с определенным обновлением.

Для самостоятельного проведения эксперимента необходимо скачать представленное ПО [9], выполнить инструкции по установке (стандартная сборка, настройка базы данных Postgres, далее создание таблиц командой *fwmonitor setup*) и затем ежедневно вручную или с помощью вызова по расписанию с помощью системной утилиты *crontab* скачивать индекс из сервиса LVFS (командой *fwmonitor download*). Расчет разницы проводится автоматически при загрузке или импорте (команда *fwmonitor import [имяxml файла индекса]*). В настройках ПО предусмотрена опция скачивания не только индекса, но и непосредственно измененных в хранилище LVFS файлов, при этом необходимо учитывать, что суточный срез может составлять несколько Гбайт данных.

Для использования в рабочей среде рекомендуется осуществлять проверку несколько раз в сутки и с нескольких сетевых адресов, относящихся к различным географическим зонам, чтобы исключить локализацию отдачи со стороны LVFS-сервера по метаданным клиента.

Решение задачи

Для защиты от потенциальной подмены «прошивок» возможна реализация схемы с дублированием репозитория LVFS с дополнительным уровнем верификации новых «прошивок» перед их распространением, как автоматически (сканирование с использованием доступных инструментов), так и с привлечением независимых экспертов (по принципу CRM).

Подобная схема (рис. 9) также как минимум позволит устранить потенциальную возможность таргетирования атак на конечных пользователей по их метаданным за счет их сокрытия за прокси сервером(ами). Программное обеспечение мониторинга должно быть дополнено углубленной функцией анализа сав-файлов и UEFI-капсул, как наиболее вероятного места размещения проблемного исполняемого кода.

Технические требования к развертыванию собственного репозитория драйверов с зеркалированием хранилища LVFS относительно невелики: полная копия репозитория на 01.09.2023 имеет объем около 150 Гбайт с обновлением примерно 10...15 Гбайт еженедельно, что вместе с сохранением истории изменений за три года составит несколько Тбайт. Это позволит организовывать подобные центры на корпоративном уровне при

наличии соответствующей системы, реализующей предложенную схему. Централизованная база данных и клиент могут быть расширены функционалом распределенного реестра (см. пример предложения An Over-the-Blockchain Firmware Update Framework for IoT Devices [10]) с сохранением ключей непосредственно загрузивших ПО компаний и их сотрудников, что также повысит уровень доверия к процессу обновления и качество процедуры разбора инцидентов в случае их возникновения.

Заключение

Сервис fwupd успешно выполняет функции по обновлению ПО и драйверов, по своей архитектуре может быть использован (и уже активно используется), как в корпоративной среде, так и при эксплуатации на компонентах критической инфраструктуры, при условии наличия уровня дополнительной верификации и ведения истории обновлений, предварительного тестирования загружаемых «прошивок» в искусственных средах, так называемых песочницах. Для верификации необходима разработка автоматизированных или полуавтоматизированных сервисов предварительной проверки «прошивок» перед их использованием в рабочей среде, в том числе на критической инфраструктуре, а в случае стандартизации подхода в целом — возможно масштабирование и на обновление специализированного ПО через единый репозиторий, независимый от дистрибутивов. Следует также отметить, что анализ опыта эксплуатации сервиса LVFS (конфигурация оборудования, серверного ПО и пр.) при необходимости

позволит создать аналог, в перспективе с улучшением и стандартизацией процесса обновления встроенного ПО с учетом российской специфики, в том числе и для критически важных процессов, связанных с эксплуатацией оборудования от различных производителей на предприятиях ТЭК.

Список литературы

1. **Официальный** сайт LVFS. URL: <https://fwupd.org/> (дата обращения 22.08.2023).
2. **БЮЛЛЕТЕНЬ** № 2023-0426SE17 (оперативное обновление 1.7.4). URL: <https://wiki.astralinux.ru/pages/viewpage.action?pageId=263044494> (дата обращения 22.08.2023).
3. **Официальный** репозиторий ALT Linux, версия c10f1. URL: http://ftp.altlinux.org/pub/distributions/ALTLinux/c10f1/branch/files/x86_64/RPMS/fwupd-1.8.10-alt1.x86_64.rpm (дата обращения 22.08.2023).
4. **Larabel M.** Linux Vendor Firmware Service Serves Up 40 Millionth Download // Phoronix Media. 01.12.2021. URL: <https://www.phoronix.com/news/LVFS-40-Million-Downloads> (дата обращения 22.08.2023).
5. **Larabel M.** LVFS Has Served More Than 52 Million Firmware Files To Linux Users // Phoronix Media. 31.05.2022. URL: <https://www.phoronix.com/news/LVFS-Fwupd-52-Million> (дата обращения 22.08.2023).
6. **Условия** использования LVFS. URL: <https://lvfs.readthedocs.io/en/latest/claims.html> (дата обращения 22.08.2023).
7. **Лоскутов А. Б., Куликов А. Л., Илюшин П. В.** От плана ГОЭЛРО к цифровизации электроэнергетического комплекса страны // Электричество. 2020. № 12. С. 14–30. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-12-14-30.
8. **Digital** substation initiative launched to modernise power grid infrastructure // Transformers. 26.06.2020. URL: <https://transformers-magazine.com/tm-news/digital-substation-initiative-launched-to-modernise-power-grid-infrastructure/> (дата обращения 22.08.2023).
9. **Репозиторий** ПО FWMonitor. URL: <http://github.com/SmirnovRoman/FWMonitor> (дата обращения 22.08.2023).
10. **Yohan A., Lo N.-W.** An Over-the-Blockchain Firmware Update Framework for IoT Devices // 2018 IEEE Conference on Dependable and Secure Computing (DSC). Kaohsiung, Taiwan, 2018. P. 1–8. DOI: 10.1109/DESEC.2018.8625164.

Risks of Using Linux OS with Enabled Firmware Update Mechanism (Linux Vendor Firmware Service)

R. S. Smirnov, Developer, mail@romansmirnov.org,
Rosseti-Tsifra JSC, Moscow, 107023, Russian Federation

Corresponding author:

Roman S. Smirnov, Developer,
Rosseti-Tsifra JSC, Moscow, 107023, Russian Federation
E-mail: mail@romansmirnov.org

Received on September 02, 2023

Accepted on October 02, 2023

The article discusses the mechanism for updating the built-in software (firmware) in distributions of the Linux operating system (OS). Considering the import “substitution strategy” in Russia proposed in technology sector and the active transition to this OS, including in solutions related to the digitalization of the energy sector, the problem of

additional control over the firmware update process, incl. in used domestic distributions (AstraLinux, AltLinux). At the moment most popular mechanism of automatic firmware update is Linux Vendor Firmware Service (LVFS), article includes brief description of its update process. Using software developed for complete monitoring LVFS metadata were found multiply inconsistencies of current scheme of firmware update — deleting of files from index, replacement of already uploaded images with same id. Also basing on client agent metadata it is possible to organize targeted substitution of binary images transferred by service directly to hardware bypassing built-in monitoring tools. Finally it is concluded that there are potential vulnerabilities in this mechanism and a solution is proposed in the form of organizing own service with additional layer for verification of “firmware” during process of its distribution. If scheme with additional security layer over base of popular and well proved by practice LVFS will be successful it can be used in industrial applications with including in future in appropriate standards as reference model.

Keywords: embedded software, altlinux, astralinux, power industry digitalization, Linux OS, Linux vendor firmware service, fwupd, LVFS

For citation:

Smirnov R. S. Risks of Using Linux OS with Enabled Firmware Update Mechanism (Linux Vendor Firmware Service), *Programmnaya Ingeneria*, 2023, vol. 14, no. 12, pp. 583—591. DOI: 10.17587/prin.14.583-591.

References

1. **Official** website of LVFS, available at: <https://fwupd.org/> (accessed 08/22/2023).
2. **Astra Linux BULLETIN** No. 2023-0426SE17 (operational update 1.7.4), available at: <https://wiki.astralinux.ru/pages/viewpage.action?pageId=263044494> (date of access 22.08.2023).
3. **Official ALT Linux repository**, version c10f1, available at: http://ftp.altlinux.org/pub/distributions/ALTLinux/c10f1/branch/files/x86_64/RPMS/fwupd-1.8.10-alt1.x86_64.rpm (date of access 22.08.2023).
4. **Larabel M.** Linux Vendor Firmware Service Serves Up 40 Millionth Download, *Phoronix Media*, 01.12.2021, available at: <https://www.phoronix.com/news/LVFS-40-Million-Downloads> (date of access 22.08.2023).
5. **Larabel M.** LVFS Has Served More Than 52 Million Firmware Files To Linux Users, *Phoronix Media*, 31.05.2022, available at: <https://www.phoronix.com/news/LVFS-Fwupd-52-Million> (date of access 22.08.2023).
6. **LVFS Terms of Use**, available at: <https://lvfs.readthedocs.io/en/latest/claims.html> (date of access 22.08.2023).
7. **Loskutov A. B., Kulikov A. L., Ilyushin P. V.** From the GOELRO plan to the digitalization of the country's electric power complex, *Electricity*, 2020, no. 12, pp. 14—30. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-12-14-30 (in Russian).
8. **Digital Substation Initiative** launched to modernize power grid infrastructure, *Transformers magazine*, 26.06.2020, available at: <https://transformers-magazine.com/tm-news/digital-substation-initiative-launched-to-modernise-power-grid-infrastructure/> (date of access 22.08.2023) (in Russian).
9. **FWMonitor** software repository, available at: <http://github.com/SmirnovRoman/FWMonitor> (date of access 22.08.2023).
10. **Yohan A., Lo N.-W.** An Over-the-Blockchain Firmware Update Framework for IoT Devices, *2018 IEEE Conference on Dependable and Secure Computing (DSC)*, Kaohsiung, Taiwan, 2018, pp. 1—8. DOI: 10.1109/DESEC.2018.8625164.

ИНФОРМАЦИЯ

Продолжается подписка на журнал «Программная инженерия» на первое полугодие 2024 г.

Оформить подписку можно через подписные агентства
или непосредственно в редакции журнала (для юридических лиц).

Подписной индекс по Объединенному каталогу

«Пресса России» — 22765

Сообщаем, что с 2020 г. возможна подписка
на электронную версию нашего журнала:

ООО «ИВИС»: тел. (495) 777-65-57, 777-65-58; e-mail: sales@ivis.ru;
ООО «УП Урал-Пресс Округ». Для оформления подписки (индекс 013312)
следует обратиться в филиал по месту жительства — <http://ural-press.ru>

Адрес редакции: 107076, Москва, Матросская Тишина, д. 23, с. 2, оф. 45,

Издательство «Новые технологии»,
редакция журнала «Программная инженерия»

Тел.: (499) 270-16-52. E-mail: prin@novtex.ru

В. А. Стенников, академик РАН, директор, sva@isem.irk.ru,
Е. А. Барахтенко, канд. техн. наук, доц., ст. науч. сотр., barakhtenko@isem.irk.ru,
Д. В. Соколов, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., sokolov_dv@isem.irk.ru,
Г. С. Майоров, мл. науч. сотр., mayorovgs@isem.irk.ru,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем
энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук
(ИСЭМ СО РАН), Иркутск

Построение цифровых двойников для проектирования интегрированных энергетических систем

Поступила в редакцию 11.07.2023

Принята к публикации 19.09.2023

Статья посвящена построению цифровых двойников для решения задач проектирования интегрированных энергетических систем (ИЭС). Представлен разработанный авторами новый методический подход к проектированию ИЭС на базе ее цифрового двойника, который включает в себя следующие составляющие: архитектуру программной платформы для создания цифровых двойников; набор технологий и инструментальных средств ее реализации; методы автоматизированного построения вычислительной подсистемы цифрового двойника ИЭС; методику решения задачи проектирования ИЭС на базе ее цифрового двойника. Представлены результаты вычислительного эксперимента, полученные с использованием выполненной программной реализации элементов цифрового двойника ИЭС.

Ключевые слова: цифровой двойник, интегрированная энергетическая система, онтология, методический подход, модельно-управляемая разработка, программная платформа, программная архитектура, вычислительная подсистема, автоматизация программирования, проектирование

Для цитирования:

Стенников В. А., Барахтенко Е. А., Соколов Д. В., Майоров Г. С. Построение цифровых двойников для проектирования интегрированных энергетических систем // Программная инженерия. 2023. Том 14, № 12. С. 592—602. DOI: 10.17587/prin.14.592-602.

Введение

Создание на базе нескольких отдельно функционирующих систем энергоснабжения (электро-, тепло/холодо-, газоснабжения и др.) новой энерготехнологической конструкции в виде интегрированной энергетической системы (ИЭС) значительно расширяет их функциональные возможности, обеспечивает взаимозаменяемость энергоносителей и реализует синергетический эффект по обеспечению надежного, безопасного, экономичного и экологичного энергоснабжения [1–3]. Реализация эффективных ИЭС невозможна без активного привлечения современных передовых информационно-коммуникационных технологий и интеллекту-

альных средств на цифровой основе. Такой подход обеспечивает возможность гибкого управления их развитием и функционированием, координацию подсистем и выполнение общесистемных целевых установок. Перечисленные выше соображения свидетельствуют о необходимости применения цифровых двойников (ЦД), которые функционируют в виртуальном пространстве и имеют двунаправленные связи с физическим пространством для отражения решений из одного пространства в другое.

Впервые идея ЦД была предложена Дэвидом Гелернтером [4], а концепция ЦД впервые сформулирована Майклом Гривзом [5]. В настоящее время эта концепция вызывает все больший интерес со стороны специалистов, занимающихся

проектированием и развитием систем различной сложности и разного назначения [6, 7]. Цифровой двойник рассматривается в качестве одного из перспективных подходов для реализации интеллектуального производства и Индустрии 4.0 [7–11]. В рамках Индустрии 4.0 предполагается создание киберфизических систем и используются концепция ЦД, технологии Интернета вещей. Такой подход обеспечивает повышение эффективности процессов обслуживания и эксплуатации инженерных систем, к которым относятся и энергетические системы. В настоящее время появились работы, посвященные исследованиям особенностей применения технологии ЦД для ИЭС. В работе [12] предложен метод планирования на сутки вперед на основе ЦД с учетом координации между различными преобразователями энергии в ИЭС, что повышает энергоэффективность, экономит затраты и сокращает выбросы углерода. Авторами статьи [13] обсуждена техническая основа технологии ЦД ИЭС и дан анализ ее применения. В статье [14] исследован подход к использованию технологий ЦД в ИЭС и предложена инфраструктура решений ЦД на основе аппаратного обеспечения. В работе [15] для решения задач управления ИЭС предложена структура ЦД, представлен процесс автоматизации генерации модели, гарантирующий, что цифровая модель в виртуальном пространстве отображает физическую систему.

Анализ исследований, выполняемых в области использования концепции ЦД, подтверждает актуальность построения ЦД для решения задач проектирования ИЭС.

1. Постановка задачи исследования

Интегрированная энергетическая система является сложным для проектирования инженерным объектом, что обусловлено высокой сложностью конфигурации этих систем, широким набором применяемого при их построении оборудования, необходимостью обеспечения различных режимов функционирования и согласования работы отдельных подсистем единой ИЭС, наличием ряда элементов и подсистем, обладающих активным поведением. Вместе с тем ИЭС являются системами с высокой стоимостью проектирования, построения, развития, управления и обслуживания при функционировании. Такие системы обладают огромной значимостью для экономики и социальной жизни общества. Изменения в ИЭС и управляющие воздействия на них должны быть обоснованы и не приводить к негативным последствиям. Перечисленные особенности ИЭС приводят к необходимости решения задач их проектирования

и развития научно и теоретически обоснованными средствами. Исследования ИЭС на компьютерных моделях позволяют рассматривать различные варианты их построения до создания или изменения конфигурации реальной системы, а также изменения режимов ее функционирования. Такой подход позволяет избежать рисков, связанных с экономическими потерями и введением системы в режимы функционирования, не удовлетворяющие техническим требованиям.

Авторами ведется работа в направлении построения ЦД для решения задач проектирования ИЭС. Применение ЦД позволяет проводить моделирование в виртуальном пространстве с рассмотрением различных конфигураций построения ИЭС. Преимущество ЦД состоит в том, что свойства реальной системы можно перенести на объект, существующий в виртуальном пространстве, и выполнить исследование объекта на компьютерных и математических моделях. В результате решения задачи обеспечивается получение оптимального научно и экономически обоснованного варианта ИЭС, который реализуется при построении или развитии реальной ИЭС.

В рамках настоящей статьи рассмотрены принципы построения ЦД, дано описание разработанного методического подхода к проектированию ИЭС на основе ее ЦД, приведены результаты апробации элементов ЦД на схеме энергоснабжения при решении задачи ее развития.

2. Принципы построения цифровых двойников для решения задач проектирования интегрированных энергетических систем

Решение задачи проектирования ИЭС связано с определением ее структуры и параметров с минимальными капитальными и эксплуатационными затратами для обеспечения текущих и будущих потребностей потребителей в различных видах энергии. При этом определяются состав и последовательность реализации проектных решений для возможных состояний ИЭС в будущем в различные временные периоды в целях достижения заданных показателей. Полученные проектные решения основаны на расчетах по поиску рациональной структуры и параметров ИЭС с учетом заданных условий, ограничений, а также рассматриваемых при их проектировании возможных сценариев. В этом случае ЦД ИЭС должны обеспечить возможность формирования проектных решений для разных временных периодов с рассмотрением различных сценариев, а также отслеживание динамики процессов построения и развития ИЭС во времени.

Интегрированные энергетические системы представляют собой сложные технические объекты, состоящие из различного типа систем энергоснабжения, которые являются подсистемами в составе таких систем. При этом существуют характерные особенности моделирования при совместном рассмотрении систем различного типа в рамках ИЭС. Эти особенности связаны с техническими и технологическими решениями по интеграции, которые необходимо учитывать для обеспечения координации подсистем и выполнения общесистемных целевых установок. Необходимо также учитывать наличие множества элементов со сложным поведением, например, активных потребителей, и ряда центров принятия решений по обеспечению устойчивого энергоснабжения в ИЭС.

Входящие в состав ИЭС системы энергоснабжения различного типа обладают характерными для отдельного типа особенностями и свойствами. Знания о них необходимо сохранить в форме, пригодной для обработки программными системами, и использовать при решении задач проектирования ИЭС.

С учетом представленных выше соображений сформулированы следующие принципы построения ЦД для проектирования ИЭС:

- обеспечение проведения сложных инженерных расчетов по поиску оптимальных путей создания и развития ИЭС для обеспечения высокой эффективности и надежности их функционирования;
- учет индивидуальных особенностей включенного в ИЭС различного типа систем энергоснабжения и иерархического принципа построения ИЭС;
- организация единого информационного пространства при решении задач проектирования ИЭС;
- формирование двунаправленной связи между внешней средой, в которой существует реальная ИЭС, и ЦД ИЭС (используемым для компьютерного и математического моделирования) в целях отслеживания изменений и актуализации информации в ЦД о реальной ИЭС и формирования проектных решений по созданию и развитию ИЭС;
- отслеживание динамики построения и развития ИЭС во времени;
- необходимость рассмотрения большого числа элементов ИЭС со сложным поведением;
- учет (при решении задач проектирования ИЭС) наличия множества центров принятия решения по обеспечению устойчивого снабжения потребителей энергией различного вида с возможностью преобразования из одного вида энергии в другой;
- использование знаний о ИЭС, ее подсистемах, используемом при решении задач проекти-

рования ИЭС программном обеспечении (ПО), особенностях решения этих задач.

3. Предложенный методический подход и его составляющие

На основе сформулированных в разд. 2 принципов разработан новый методический подход к проектированию ИЭС на базе ее ЦД. В рамках этого подхода создается исходная графическая модель, описывающая ЦД ИЭС, и в автоматизированном режиме строится вычислительная подсистема ЦД ИЭС для решения прикладной задачи. Результаты решения этой задачи используются для подготовки проектных решений, предназначенных для построения или развития ИЭС. В свою очередь, на основе данных с характеристиками реальной ИЭС выполняется уточнение характеристик ее ЦД.

Предложенный методический подход включает в себя следующие составляющие:

- 1) архитектуру программной платформы для создания ЦД;
- 2) набор технологий и инструментальных средств для программной реализации платформы;
- 3) методы автоматизированного построения вычислительной подсистемы ЦД ИЭС на основе концепции *Model-Driven Engineering* (MDE);
- 4) методику решения задачи проектирования ИЭС на базе ее ЦД.

Далее приведем описание перечисленных составляющих разработанного методического подхода.

Архитектура программной платформы для создания ЦД представлена на рис. 1. Она включает в себя следующие составляющие:

- 1) графическую подсистему, обеспечивающую интерактивный графический интерфейс пользователя для работы с графической моделью ЦД ИЭС;
- 2) библиотеки математических программных компонентов;
- 3) подсистему хранения данных;
- 4) онтологию ПО.

Средствами графической подсистемы создается графическая модель ЦД ИЭС, отражающая структурную конфигурацию ИЭС, исходные данные для проведения расчетов и список доступного к установке оборудования. При решении задач проектирования вычислительная подсистема ЦД формируется в автоматизированном режиме. В ходе построения вычислительной подсистемы динамически подключаются необходимые математические программные компоненты.

Подсистема хранения данных предназначена для хранения характеристик модели ИЭС и значений свойств ее элементов в различные моменты времени.

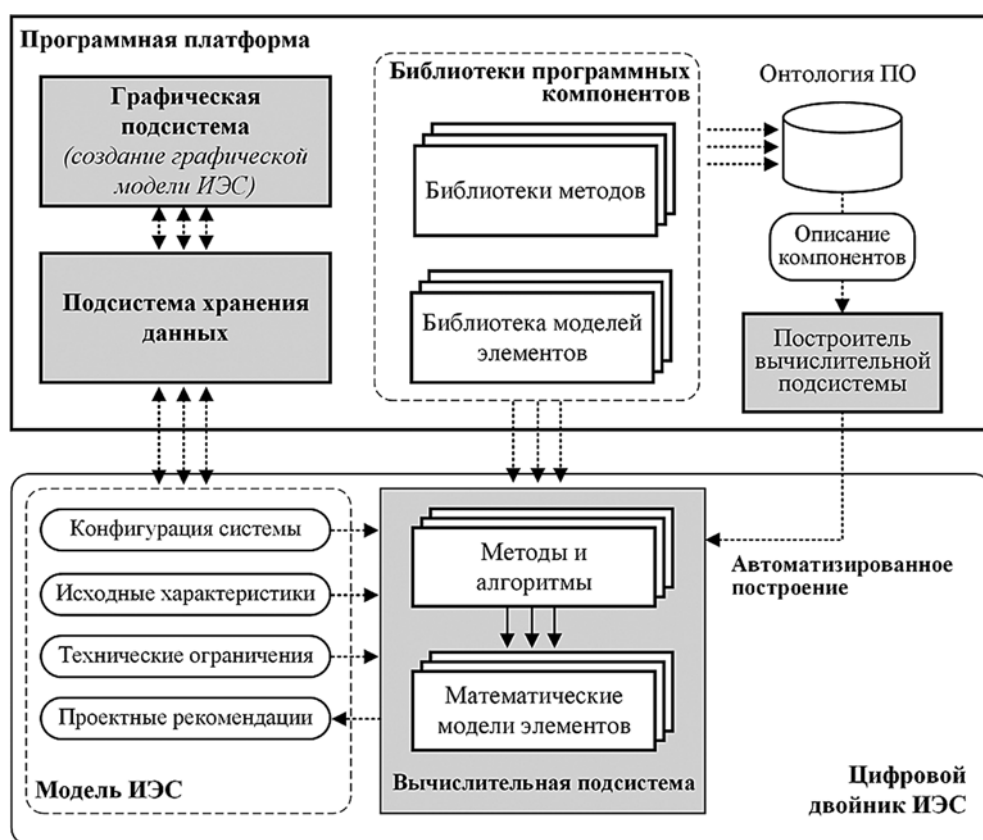


Рис. 1. Архитектура программной платформы

Эта подсистема также включает в свой состав компоненты для обмена данными с внешней средой. При разработке подсистемы хранения данных учтены проблемы интеграции по данным с внешней средой [16]. Обмен данными с внешней средой выполняется на основе стандартизированных интерфейсов для согласования данных о реальной ИЭС и ее ЦД.

Онтология ПО предназначена для хранения знаний, необходимых для автоматизации использования программных компонентов. Эта онтология содержит описание:

- программных компонентов, реализующих методы решения прикладных задач;
- программных компонентов, реализующих модели элементов ИЭС;
- метаданных (входных и выходных параметров, описание форматов данных);
- технологий и интерфейсов доступа к программным компонентам.

Методической основой построения программной платформы являются современные технологии программирования (объектно-ориентированное и компонентное программирование, метапрограммирование), теория алгоритмов, теория баз данных. В качестве инструментальных средств для программной реализации используются платформа Java, мате-

матические библиотеки (Parallel Colt, JAMA, Lpsolve и др.), среда разработки Eclipse, система управления базами данных Firebird. В качестве базового языка программирования используется Java. Его выбор обусловлен наличием следующих особенностей: поддержкой современных технологий объектно-ориентированного, компонентного и функционального программирования; встроенной поддержкой технологий метапрограммирования; широким набором технологий и инструментов для организации распределенных и параллельных вычислений. При разработке программной платформы авторы ориентируются только на свободно распространяемое ПО.

Для построения вычислительной подсистемы ЦД ИЭС адаптированы методы, предложенные в работах [17, 18] и основанные на концепции модельно-управляемой разработки MDE. Эта концепция получила дальнейшее развитие в результате адаптации к решаемым задачам проектирования ИЭС и в применении онтологий и современных технологий метапрограммирования, которые обеспечивают высокую гибкость для динамического конструирования элементов программной системы и внесения в нее необходимых изменений.

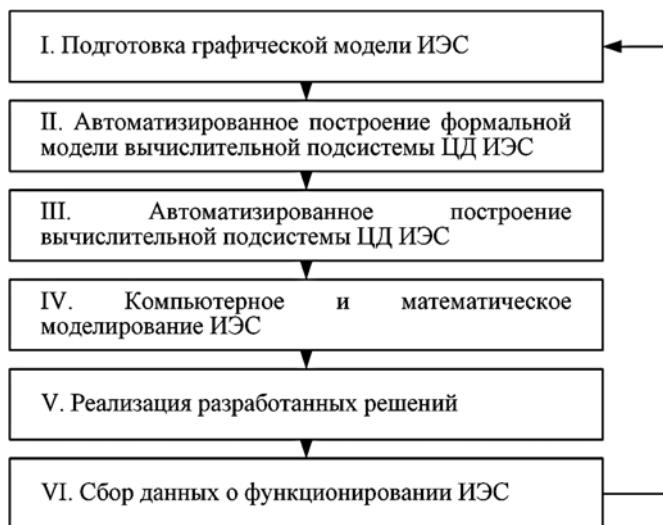


Рис. 2. Этапы методики решения задачи проектирования ИЭС на базе ее ЦД

Предлагаемая методика решения задачи проектирования ИЭС на базе ее ЦД включает перечисленные на рис. 2 этапы.

На этапе I создается исходная графическая модель, описывающая ЦД ИЭС. В рамках этого этапа выполняются следующие шаги.

Шаг 1. Формирование из набора графических моделей проектной схемы ИЭС, представляющей собой граф, описывающий структурную конфигурацию проектируемой системы.

Шаг 2. Задание для каждого элемента ИЭС исходных данных и ограничений.

Шаг 3. Задание для каждого элемента ИЭС набора возможного к установке оборудования.

На этапе II в автоматизированном режиме создается формальная модель вычислительной подсистемы ЦД ИЭС с использованием знаний, хранение которых организовано в виде онтологии ПО. В рамках этого этапа выполняются следующие шаги.

Шаг 1. Формирование общего списка используемого оборудования.

Шаг 2. Загрузка из онтологии описания программных компонентов, реализующих математические модели используемого оборудования.

Шаг 3. Загрузка из онтологии описания программных компонентов, реализующих методы и алгоритмы решения проектных задач.

Шаг 4. Формирование графа, описывающего ход вычислительного процесса.

Шаг 5. Формирование структур данных, описывающих входные и выходные параметры.

На этапе III выполняется автоматизированное построение вычислительной подсистемы ЦД на

основе ее формальной модели. В рамках этого этапа выполняются следующие шаги.

Шаг 1. Загрузка программных компонентов, реализующих математические модели используемого оборудования.

Шаг 2. Загрузка программных компонентов, реализующих методы и алгоритмы решения проектных задач.

Шаг 3. Формирование структур данных, содержащих ссылки на загруженные на шаге 1 и 2 программные компоненты.

На этапе IV выполняется компьютерное и математическое моделирование ИЭС с использованием математических моделей и алгоритмов, реализованных в виде программных компонентов. В результате проведенного моделирования будут получены данные, на основе которых будут подготовлены проектные решения для вновь проектируемых ИЭС или для оптимизации существующих.

На этапе V полученные проектные решения реализуются на практике для построения ИЭС.

На этапе VI осуществляется сбор данных о характеристиках ИЭС при функционировании этих систем в разные периоды времени. Далее происходит переход на этап I для уточнения компьютерной модели ИЭС с использованием собранных данных.

4. Апробация разработанного методического подхода

Разработан прототип программной платформы и выполнена апробация методического подхода к проектированию ИЭС на базе ее ЦД. Создана графическая модель, описывающая конфигурацию ЦД ИЭС. На базе этой модели в автоматизированном режиме построена вычислительная подсистема ЦД. В качестве метода решения задачи использован мультиагентный подход [19–21]. Проведение мультиагентного моделирования требует организации сложного вычислительного процесса, что обусловлено широким разнообразием применяемого оборудования, моделей подсистем ИЭС, сложностью программирования и необходимостью настройки на особенности моделируемой системы. Автоматизация построения вычислительной подсистемы ЦД позволяет преодолеть перечисленные сложности и устранить трудоемкие этапы формирования и настройки мультиагентной модели.

Схема организации вычислительного процесса представлена на рис. 3. Компонент, организующий вычислительный процесс, вызывает программную



Рис. 3. Схема организации вычислительного процесса

среду AnyLogic [22] для выполнения мультиагентного моделирования. Агенты при своей работе используют ЦД как модель, отражающую конфигурацию ИЭС, так и программные компоненты, реализующие математические модели отдельных элементов моделируемой ИЭС.

Преимущества мультиагентного подхода для решения задач проектирования ИЭС состоят в следующем.

1. Отдельная подсистема ИЭС представляется своим агентом, который участвует в формировании решения и отстаивает свои интересы, исходя из условий эффективного энергоснабжения.

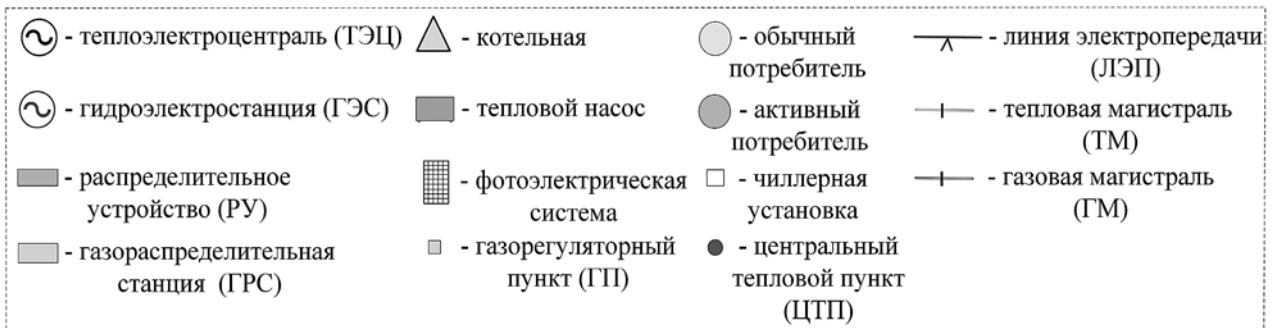
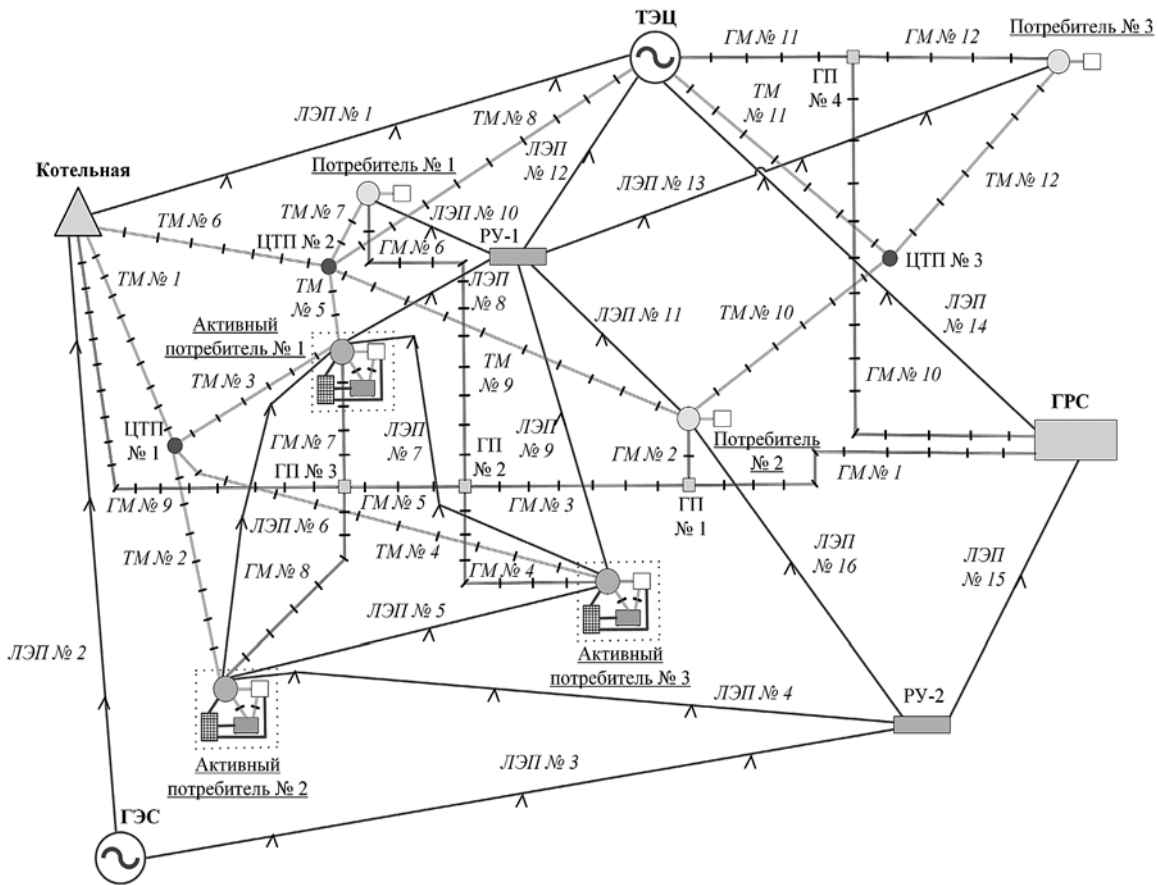


Рис. 4. Схема моделируемой интегрированной энергетической системы

2. ИЭС может быть представлена в виде большого числа различных элементов, ее можно разделить на составляющие части, которые моделируются своими агентами с индивидуальным алгоритмом поведения. Это предоставляет широкие возможности в ходе поиска решения выполнить декомпозицию сложной задачи на несколько более простых.

3. Прямая и обратная связь между элементами ИЭС может быть реализована путем организации связей агентов между собой в зависимости от уровня, на котором они находятся. Такие связи позволяют каждому агенту, участвующему в поиске решения, иметь информацию о других агентах и корректировать свое решение, исходя из полученных данных.

Схема моделируемой ИЭС представлена на рис. 4 и включает следующие элементы: обычных и активных потребителей; электрические бойлеры; фотоэлектрические системы; линии электропередачи; тепловые магистрали; газовые магистрали; источники электрической и тепловой энергии; газораспределительную станцию.

Решение задачи развития моделируемой ИЭС выполняется с использованием разработанных авторами программных компонентов. Интеграция этих программных компонентов в рамках единого вычислительного процесса выполняется динамически на основе знаний из онтологии ПО. В результате взаимодействия агентов и подключенных программных компонентов в мультиагентной модели (рис. 5) было найдено оптимальное решение, в соответствии с которым сформированы и реализованы необходимые меры по строительству сетевого и генерирующего оборудования. Проведенный вычислительный эксперимент показал возможность применения ЦД для решения задачи развития ИЭС.

Затраты на энергоснабжение активных потребителей с найденной конфигурацией ИЭС представлены на рис. 6. Приведены значения по трем активным потребителям на электроснабжение, теплоснабжение и газоснабжение (затраты на охлаждение включены в затраты на электроэнергию и теплоснабжение). Общие затраты на энергоснабжение для первого потребителя составили 572 810,5 руб.,

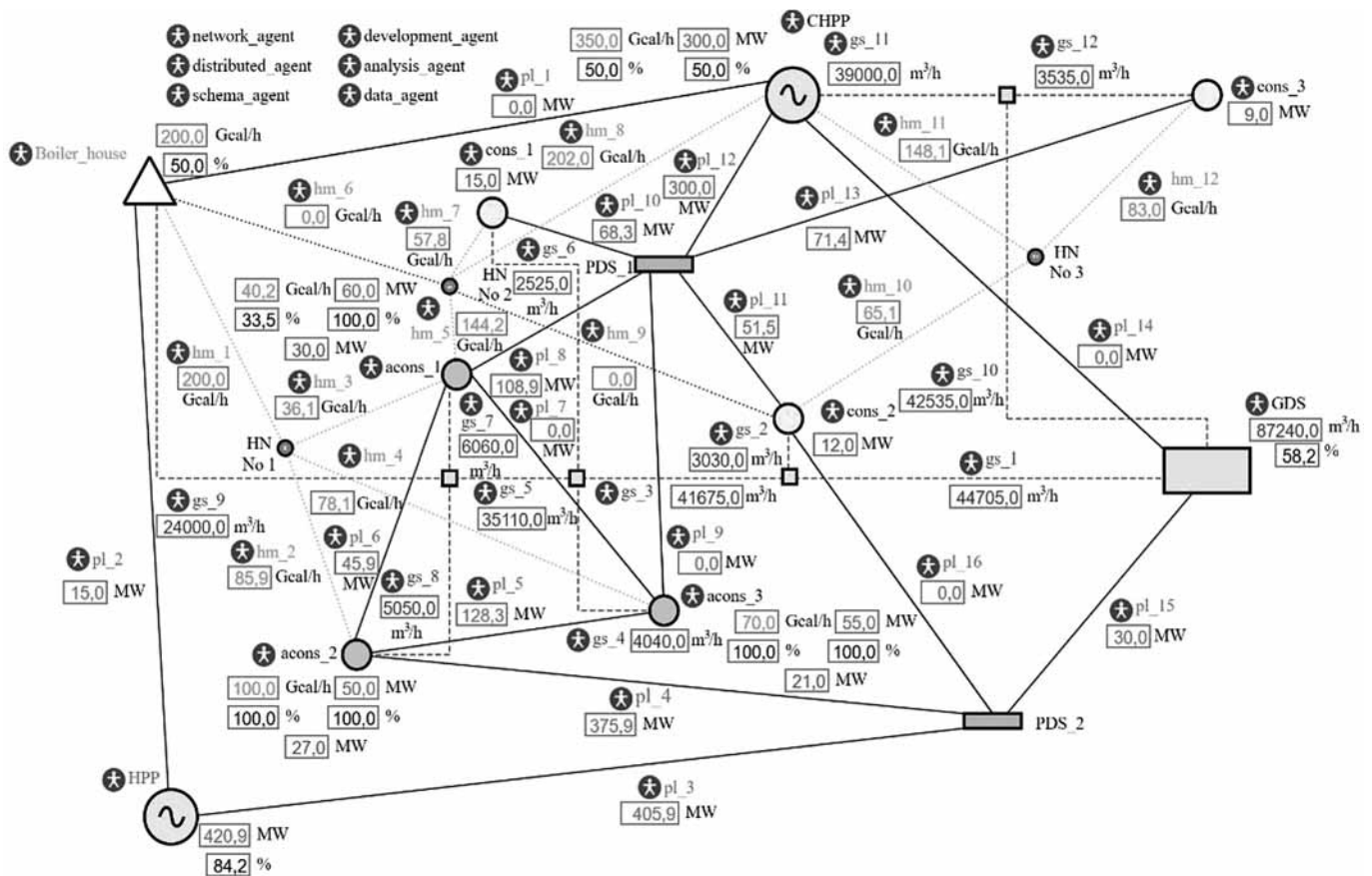


Рис. 5. Модель интегрированной энергетической системы

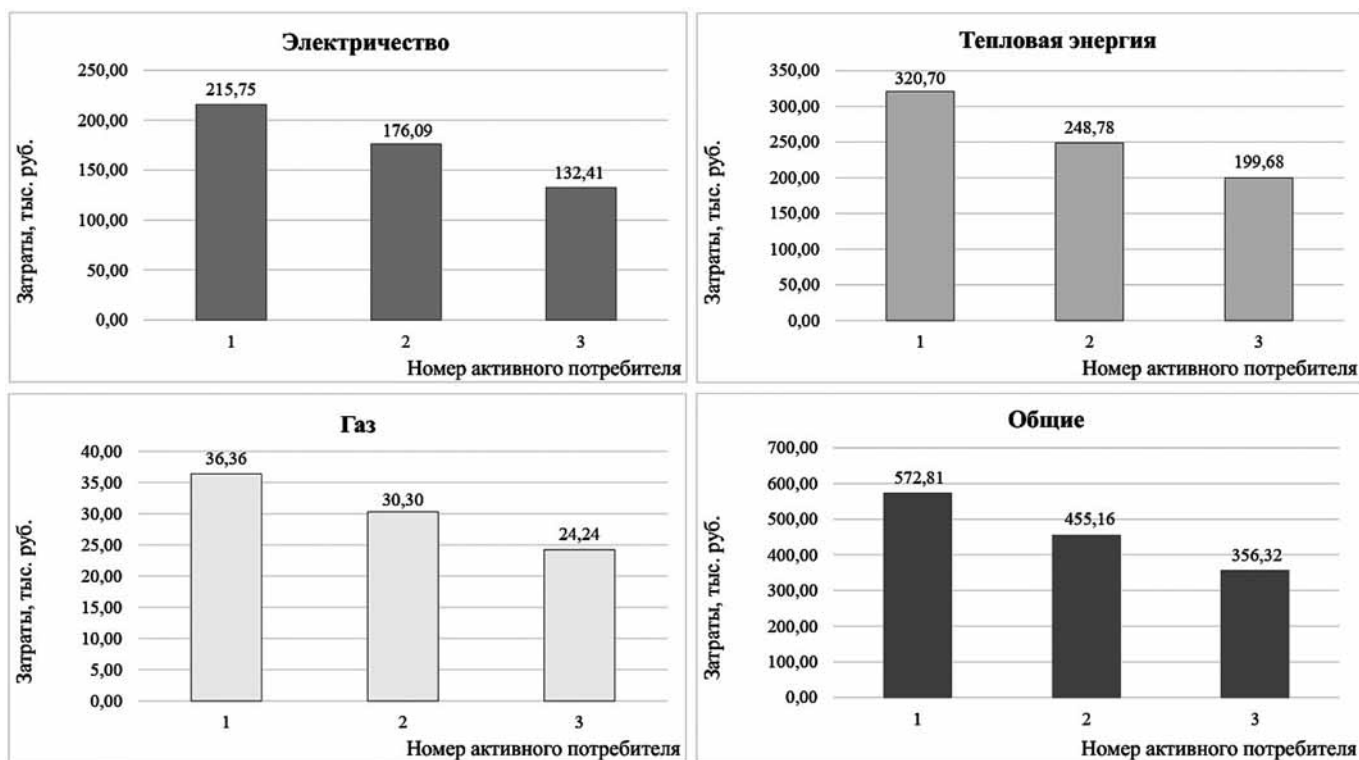


Рис. 6. Затраты на энергоснабжение активных потребителей

для второго потребителя — 455 160 руб., для третьего потребителя — 356 320 руб. Общая стоимость энергоснабжения трех потребителей составила 1 384 290,5 руб.

Заключение

В современной энергетике важность ИЭС постоянно возрастает, что обусловлено высокой значимостью этих систем для промышленности и коммунально-бытовой сферы существования современного общества. В современных условиях становится актуальным оптимальное проектирование этих систем, имеющее под собой научное (техническое и экономическое) обоснование. Проектирование ИЭС представляет собой сложную задачу, что обусловлено высокой сложностью конфигурации этих систем, широким набором применяемого оборудования и используемого для его моделирования разнообразного набора математических моделей и специализированного ПО, необходимостью моделирования ряда центров принятия решений и объектов со сложным поведением. Использование ЦД позволяет эффективно моделировать различные направления развития ИЭС в виртуальном пространстве и обеспечивает создание эффективных проектных решений.

Предложены принципы построения ЦД для решения задач проектирования ИЭС. Эти принципы использованы авторами при разработке методического подхода к проектированию ИЭС на базе ее ЦД. В рамках этого подхода разработана архитектура программной платформы для создания ЦД. Предложен набор современных технологий и инструментов для реализации программной платформы. Разработаны методы автоматизированного построения вычислительной подсистемы ЦД на основе концепции MDE. При реализации MDE используются формализованные знания в виде онтологии и современные технологии метапрограммирования. Разработана методика решения задачи проектирования ИЭС на базе ее ЦД.

Представлены результаты вычислительного эксперимента, полученные с использованием выполненной программной реализации элементов ЦД ИЭС для тестовой схемы энергоснабжения и применением мультиагентного подхода при ее развитии. В результате выполненного эксперимента на разработанном ЦД удалось сформировать оптимальную схему ИЭС для энергоснабжения потребителей.

Разработанный методический подход может применяться научно-исследовательскими, проектными и эксплуатационными организациями, осуществляющими проектирование и развитие

ИЭС. Его применение позволит повысить эффективность процесса проектирования, качество получаемого проектного решения и автоматизировать трудоемкие вычислительные операции, выполняемые при определении конфигурации проектируемой ИЭС и характеристик используемого оборудования.

Исследование выполнено в Институте систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-29-01611).

Список литературы

1. **Stennikov V., Barakhtenko E., Sokolov D., Zhou B.** Current state of research on the energy management and expansion planning of integrated energy systems // *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 10025—10036. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.07.172.
2. **Voropai N. I., Stennikov V. A., Barakhtenko E. A.** Integrated energy systems: Challenges, trends, philosophy // *Studies on Russian Economic Development*. 2017. Vol. 28, No. 5. P. 492—499. DOI: 10.1134/S107570071705015X.
3. **Voropai N. I., Stennikov V. A., Barakhtenko E. A.** Methodological principles of constructing the integrated energy supply systems and their technological architecture // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1111, No. 1. Article: 012001. DOI: 10.1088/1742-6596/1111/1/012001.
4. **Gelernter D.** *Mirror Worlds: Or the Day Software Puts the Universe in a Shoebox. How It Will Happen and What It Will Mean*; Oxford University Press: Oxford, UK, 1993. DOI: 10.1093/oso/9780195068122.001.0001.
5. **Grieves M.** *Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins*. // *Complex Systems Engineering: Theory and Practice* / Eds. S. Flumerfelt et al. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019. P. 175—200. DOI: 10.2514/5.9781624105654.0175.0200.
6. **Tao F., Sui F., Liu A.** et al. Digital twin-driven product design framework // *International Journal of Production Research*. 2019. Vol. 57. P. 3935—3953. DOI: 10.1080/00207543.2018.1443229.
7. **Lim K. Y. H., Zheng P., Chen C.** A state-of-the-art survey of Digital Twin: Techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2020. Vol. 31. P. 1313—1337. DOI: 10.1007/s10845-019-01512-w.
8. **Ullah A. M. M. S.** Modeling and simulation of complex manufacturing phenomena using sensor signals from the perspective of Industry 4.0 // *Advanced Engineering Informatics*. 2019. Vol. 39. P. 1—13. DOI: 10.1016/j.aei.2018.11.003.
9. **Pileggi P., Verriet J., Broekhuijsen J.** et al. A Digital Twin for Cyber-Physical Energy Systems // In Proceedings of the 7th Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems, Montreal, QC, Canada, 5—15 April 2019. IEEE: New York, NY, USA, 2019. DOI: 10.1109/MSCPE.2019.8738792.
10. **Xu X.** Machine Tool 4.0 for the New Era of Manufacturing // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 92. P. 1893—1900. DOI: 10.1007/s00170-017-0300-7.
11. **Zambrano V., Mueller-Roemer J., Sandberg M.** et al. Industrial digitalization in the industry 4.0 era: Classification, reuse and authoring of digital models on Digital Twin platforms // *Array*. 2022. Vol. 14. Article: 100176. DOI: 10.1016/j.array.2022.100176.
12. **You M., Wang Q., Sun H.** et al. Digital twins based day-ahead integrated energy system scheduling under load and renewable energy uncertainties // *Applied Energy*. 2022. Vol. 305. 117899. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117899.
13. **Li H., Zhang T., Huang Y.** Digital Twin Technology for Integrated Energy System and Its Application // In Proceedings of the 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence, Beijing, China, 15 July—15 August 2021. IEEE: New York, NY, USA, 2021. P. 422—425. DOI: 10.1109/DTP152967.2021.9540160.
14. **Chen Y., Chen Q., Gao J.** et al. Hardware-in-loop based Digital Twin Technology for Integrated Energy System: A Case Study of Guangyang Island in Chongqing // In Proceedings of the 5th International Electrical and Energy Conference, Nanjing, China, 27015129 May 2022. IEEE: New York, NY, USA, 2022. P. 4956—4962. DOI: 10.1109/CIEEC54735.2022.9846475.
15. **Bai H., Yuan Z., Tang X.** et al. Automatic Modeling and Optimization for The Digital twin of a Regional Multi-energy System // In Proceedings of the Power System and Green Energy Conference, Shanghai, China, 25—27 August 2022. IEEE: New York, NY, USA, 2022. P. 214—219. DOI: 10.1109/PSGEC54663.2022.9881075.
16. **Климов А. А., Курьяновский В. П., Понкин И. В.** и др. Из истории цифровой энергетики ЕС или энергопотребление близкое к нулю — переход нормативных решений ЕС к онтологиям энергетики, BIM и зданий // *International Journal of Open Information Technologies*. 2019. Том 7, № 6. С. 86—93.
17. **Стенников В. А., Баракхтенко Е. А., Соколов Д. В.** Разработка принципов построения интегрированной графической среды для компьютерного моделирования трубопроводных систем энергетики // *Информационные технологии*. 2018. Том 24, № 5. С. 313—320. DOI: 10.17587/it.24.313-320.
18. **Стенников В. А., Баракхтенко Е. А., Соколов Д. В.** Применение онтологий при реализации концепции модельно-управляемой разработки программного обеспечения для проектирования теплоснабжающих систем // *Онтология проектирования*. 2014. № 4 (14). С. 54—68.
19. **Stennikov V., Barakhtenko E., Mayorov G.** et al. Coordinated management of centralized and distributed generation in an integrated energy system using a multi-agent approach // *Applied Energy*. 2022. Vol. 309. Article 118487. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.118487.
20. **Ren Y., Fan D., Feng Q.** et al. Agent-based restoration approach for reliability with load balancing on smart grids // *Applied Energy*. 2019. Vol. 249. P. 46—57. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.04.119.
21. **Zhang Z., Jing R., Lin J.** et al. Combining agent-based residential demand modeling with design optimization for integrated energy systems planning and operation // *Applied Energy*. 2020. Vol. 263. Article: 114623. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114623.
22. **AnyLogic.** URL: <https://www.anylogic.ru/> (дата обращения 10.07.2023).

Development of Digital Twins for the Design of Integrated Energy Systems

V. A. Stennikov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Director, sva@isem.irk.ru,
E. A. Barakhtenko, PhD, Senior Researcher, barakhtenko@isem.irk.ru,
D. V. Sokolov, PhD, Senior Researcher, sokolov_dv@isem.irk.ru,
G. S. Mayorov, Junior Researcher, mayorovgs@isem.irk.ru,
Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk,
664033, Russian Federation

Corresponding author:

Evgeny A. Barakhtenko, PhD, Senior Researcher,
Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk,
664033, Russian Federation
E-mail: barakhtenko@isem.irk.ru

Received on July 11, 2023
Accepted on September 19, 2023

The design of integrated energy systems (IESs) is a complex problem, which is due to the high complexity of the configuration of these systems, a wide range of equipment used and a diverse set of mathematical models and specialized software used for its simulation, the need to simulate a number of decision centers and objects with complex behavior. The use of IES digital twins makes it possible to effectively simulate various directions of their development in the virtual space, which ensures the creation of effective design solutions.

The article is devoted to the construction of digital twins for the design of IESs. A new methodological approach to the design of an IES based on its digital twin, developed by the authors, is presented, which includes the following components: the architecture of the software platform for creating digital twins; a set of technologies and tools for its implementation; methods for automated construction of a computing subsystem of a digital twin; methodology for the design of IES based on its digital twin. The results of a computational experiment obtained using the completed software implementation of the elements of an IES digital twin are presented.

The results of a computational experiment obtained using the software implementation of the digital twin elements of the IES for a test energy supply scheme are presented. The methodological approach can be applied by research, design and operating organizations that design and develop IES. Its application allows to increase the efficiency of the design process and the quality of the resulting design solution.

Keywords: digital twin, integrated energy system, ontology, methodological approach, model-driven engineering, software platform, software architecture, computing subsystem, automation of programming, design

Acknowledgements: *The research was performed at the Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences under the support of the Russian Science Foundation (Grant number 22-29-01611).*

For citation:

Stennikov V. A., Barakhtenko E. A., Sokolov D. V., Mayorov G. S. Development of Digital Twins for the Design of Integrated Energy Systems, *Programmnyaya Ingeneriya*, 2023, vol. 14, no. 12, pp. 592–602. DOI: 10.17587/prin.14.592-602.

References

1. **Stennikov V., Barakhtenko E., Sokolov D., Zhou B.** Current state of research on the energy management and expansion planning of integrated energy systems, *Energy Reports*, 2022, vol. 8, pp. 10025–10036. DOI: 10.1016/j.egy.2022.07.172.
2. **Voropai N. I., Stennikov V. A., Barakhtenko E. A.** Integrated energy systems: Challenges, trends, philosophy, *Studies on Russian Economic Development*, 2017, vol. 28, no. 5, pp. 492–499. DOI: 10.1134/S107570071705015X.
3. **Voropai N. I., Stennikov V. A., Barakhtenko E. A.** Methodological principles of constructing the integrated energy sup-

ply systems and their technological architecture, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1111, no. 1, article: 012001. DOI: 10.1088/1742-6596/1111/1/012001.

4. **Gelernter D.** Mirror Worlds: Or the Day Software Puts the Universe in a Shoebox. How It Will Happen and What It Will Mean. Oxford University Press, Oxford, UK, 1993. DOI: 10.1093/oso/9780195068122.001.0001.

5. **Grievies M.** Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins, *Complex Systems Engineering: Theory and Practice* / Eds. S. Flumerfelt et al., American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019, pp. 175–200. DOI: 10.2514/5.9781624105654.0175.0200.

6. **Tao F., Sui F., Liu A.** et al. Digital twin-driven product design framework, *International Journal of Production Research*, 2019, vol. 57, pp. 3935–3953. DOI: 10.1080/00207543.2018.1443229.

7. **Lim K. Y. H., Zheng P., Chen C.** A state-of-the-art survey of Digital Twin: Techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2020, vol. 31, pp. 1313–1337. DOI: 10.1007/s10845-019-01512-w.

8. **Ullah A. M. M. S.** Modeling and simulation of complex manufacturing phenomena using sensor signals from the perspective of Industry 4.0, *Advanced Engineering Informatics*, 2019, vol. 39, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.aei.2018.11.003.

9. **Pileggi P., Verriet J., Broekhuijsen J.** et al. A Digital Twin for Cyber-Physical Energy Systems, *In Proceedings of the 7th Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems, Montreal, QC, Canada, 5–15 April 2019. IEEE*, New York, NY, USA, 2019. DOI: 10.1109/MSCPE.2019.8738792.

10. **Xu X.** Machine Tool 4.0 for the New Era of Manufacturing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 92, pp. 1893–1900. DOI: 10.1007/s00170-017-0300-7.

11. **Zambrano V., Mueller-Roemer J., Sandberg M.** et al. Industrial digitalization in the industry 4.0 era: Classification, reuse and authoring of digital models on Digital Twin platforms, *Array*, 2022, vol. 14, article 100176. DOI: 10.1016/j.array.2022.100176.

12. **You M., Wang Q., Sun H.** et al. Digital twins based day-ahead integrated energy system scheduling under load and renewable energy uncertainties, *Applied Energy*, 2022, vol. 305, article 117899. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117899.

13. **Li H., Zhang T., Huang Y.** Digital Twin Technology for Integrated Energy System and Its Application, *In Proceedings of the 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence, Beijing, China, 15 July–15 August 2021. IEEE*, New York, NY, USA, 2021, pp. 422–425. DOI: 10.1109/DTP152967.2021.9540160.

14. **Chen Y., Chen Q., Gao J.** et al. Hardware-in-loop based Digital Twin Technology for Integrated Energy System: A Case Study of Guangyang Island in Chongqing, *In Proceedings of the 5th*

International Electrical and Energy Conference, Nangjing, China, 27–29 May 2022, *IEEE, New York, NY, USA*, 2022, pp. 4956–4962. DOI: 10.1109/CIEEC54735.2022.9846475.

15. **Bai H., Yuan Z., Tang X.** et al. Automatic Modeling and Optimization for The Digital twin of a Regional Multi-energy System, *In Proceedings of the Power System and Green Energy Conference*, Shanghai, China, 25–27 August 2022, *IEEE, New York, NY, USA*, 2022, pp. 214–219. DOI: 10.1109/PSGEC54663.2022.9881075.

16. **Klimov A. A., Kupriyanovsky V. P., Ponkin I. V.** et al. From the history of the digital energy industry of the EU or energy consumption close to zero — the transition of EU regulatory decisions to the ontologies of energy, BIM, and buildings, *International Journal of Open Information Technologies*, 2019, vol. 7, no. 6, pp. 86–93.

17. **Stennikov V. A., Barakhtenko E. A., Sokolov D. V.** A Methodology for the Creation of an Integrated Graphical Environment for Computer Modeling of Energy Pipeline Systems, *Information technologies*, 2018, vol. 24, no. 5, pp. 313–320. DOI: 10.17587/it.24.313-320 (in Russian).

18. **Stennikov V. A., Barakhtenko E. A., Sokolov D. V.** Usage of ontologies in the implementation of the concept of model-driven engineering for the design of heat supply systems, *Ontology of Designing*, 2014, no. 4 (14), pp. 54–68 (in Russian).

19. **Stennikov V., Barakhtenko E., Mayorov G.** et al. Coordinated management of centralized and distributed generation in an integrated energy system using a multi-agent approach, *Applied Energy*, 2022, vol. 309, article: 118487. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.118487.

20. **Ren Y., Fan D., Feng Q.** et al. Agent-based restoration approach for reliability with load balancing on smart grids, *Applied Energy*, 2019, vol. 249, pp. 46–57. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.04.119.

21. **Zhang Z., Jing R., Lin J.** et al. Combining agent-based residential demand modeling with design optimization for integrated energy systems planning and operation, *Applied Energy*, 2020, vol. 263, 114623. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114623.

22. **AnyLogic**, available at: <https://www.anylogic.ru/> (date of access 10.07.2023).

ИНФОРМАЦИЯ

XXVI Международная конференция

«Цифровая обработка сигналов и ее применение — DSPA-2024»

27–29 марта 2024 г.

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва

Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова при поддержке Института проблем управления РАН им. В.А. Трапезникова, Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, компании AUTEX Ltd. проводит XXVI Международную конференцию «Цифровая обработка сигналов и ее применение — DSPA-2024».

Формат проведения: совмещенный формат личного и онлайн-участия

Тематика конференции разделена на следующие секции:

1. Теория сигналов и систем
2. Теория и методы цифровой обработки сигналов
3. Обработка сигналов в системах телекоммуникаций
4. Обработка сигналов в радиотехнических системах
5. Обработка и передача изображений
6. Обработка сигналов в биотехнических системах
7. Проектирование и техническая реализация систем ЦОС
8. Системы «технического зрения», искусственный интеллект и робототехника
9. Обработка сигналов в измерительных системах

Рабочие языки конференции: русский и английский

Подробности: <http://dspace-conf.org>

Е. В. Орлова, д-р техн. наук, проф., ekorl@mail.ru,
Уфимский университет науки и технологий

Методы и алгоритмы RL для моделирования индивидуальных траекторий профессионального развития

Поступила в редакцию 26.07.2023

Принята к публикации 19.09.2023

Рассмотрен подход к управлению человеческим капиталом предприятия на основе формирования индивидуальных траекторий профессионального развития его сотрудников, способствующий повышению его ресурсной эффективности. Представлен подход к формированию динамического режима развития человеческого капитала, основанный на использовании методов машинного обучения с подкреплением. Такой режим позволяет оптимизировать процесс управления и рассматривается как последовательный во времени набор управленческих решений, направленных на развитие работника в профессиональной сфере с учетом его индивидуальных характеристик.

Ключевые слова: человеческий капитал, индивидуальные траектории развития, машинное обучение, обучение с подкреплением, Q-обучение

Для цитирования:

Орлова Е. В. Методы и алгоритмы RL для моделирования индивидуальных траекторий профессионального развития // Программная инженерия. 2023. Том 14, № 12. С. 603—615. DOI: 10.17587/prin.14.603-615.

Введение

Существующие условия технологического развития неизбежно изменяют характер и условия труда. Профессиональный профиль работника становится все более многогранным вследствие расширения разнообразных сфер активности человека, в том числе в цифровом пространстве. По этой причине проблема, связанная с разработкой общих подходов, методов и средств моделирования и управления человеческим капиталом (ЧК) как важнейшим ресурсом деятельности любого предприятия, является актуальной, своевременной, социально и экономически значимой.

Целью исследований, результаты которых представлены в статье, является разработка подхода к управлению ЧК, основанного на методах машинного обучения. Такой подход призван обеспечить эффективное формирование индивидуальных траекторий профессионального развития, обеспечивающее повышение качества ЧК и, как следствие, рост эффективности предприятия в целом.

Человеческий капитал рассматривается как совокупность универсальных и специальных компетенций и других воплощенных в людях качеств, таких как социальные навыки, состояние здоровья, адаптационные возможности, способствующие обеспечению личного, социального и экономического благополучия. Под профессиональным развитием понимается развитие человека в профессиональной сфере деятельности за счет роста качества ЧК.

Управление человеческим капиталом рассматривается как задача последовательного принятия решений в стохастической среде. Для решения этой задачи применяется принцип максимальной ожидаемой пользы от реализации таких решений (далее — полезности, как в работах [1, 2]). Оптимальный выбор последовательности решений основан на рассуждении о будущих последовательных действиях и наблюдениях их результативности. Для формализации задачи последовательного принятия решений используется марковский процесс принятия решений (MDP), который определяет стохастическую динамику описываемой системы, а также полезность, связанную с ее эволюцией.

1. Анализ особенностей методов и их применение для систем управления предприятием

Рассмотрим особенности решаемых задач в системах организации управления предприятием (далее — в организационных системах), а также свойства систем этого класса, обуславливающих выбор адекватных подходов, методов и алгоритмов их моделирования.

1.1. Свойства некоторых задач управления и возможности применения методов обучения с подкреплением

Обучение с подкреплением (*Reinforcement Learning*, RL) является одним из способов машинного обучения, в ходе которого субъект управления (агент) обучается, взаимодействуя с объектом управления (средой) (рис. 1).

Системы RL реализуют цикл управления с обратной связью, где агент и среда обмениваются сигналами, при этом агент стремится максимизировать целевую функцию. Обе стороны взаимодействуют непрерывно: агент выбирает действия, а среда реагирует на эти действия и предлагает агенту новые ситуации. Среды генерируют вознаграждения — числовые значения, которые агент стремится со временем максимизировать посредством выбора действий.

От классических систем управления RL-подход отличается наличием дифференцированных сигналов вознаграждения, получаемых агентом от среды за реализованные им действия. Это позволяет более эффективно (с позиции критериев временных, материальных и финансовых ресурсов для выработки управленческих решений) строить оптимальное управление средой.

Методы RL имеют доказанную эффективность [3, 4] в случаях, когда особенности решаемых задач управления соответствуют перечисленным далее.

1. Объект управления характеризуется стохастической динамикой своих показателей, а управленческие решения не детерминированы. Для описания такого объекта применяется модель MDP



Рис. 1. Цикл управления в системе RL

в виде набора требований к определению и смене состояний системы, когда последовательности действий являются стохастическими. При описании объекта управления применяется марковское свойство [5], состоящее в том, что текущее состояние объекта и проектируемое воздействие на него в текущий момент времени содержат достаточную информацию для определения вероятности перехода объекта в состояние, соответствующее следующему далее моменту времени. Формализм MDP является важной абстракцией в решении задачи обучения целеустремленного агента в процессе взаимодействия со средой. Этот формализм доказал свою широкую эффективность и является полезным для представления большого числа задач управления [6]. Он сводится к следующему: каковы бы не были цели, механизмы получения, хранения и передачи информации у агента, задача управления сводится к следующим трем сигналам, которыми агент обменивается со средой:

- 1) представления действия, выбора агента;
- 2) представления оснований для этого выбора — состояния;
- 3) определения достижимости цели — вознаграждения (награды).

2. Задачи управления носят стратегический характер. Методы RL позволяют изучать долгосрочные стратегии. Решения, эффективные в текущий момент времени, не всегда показывают высокую эффективность в долгосрочной перспективе. Другие же решения могут иметь отложенный эффект и быть востребованными при планировании на среднесрочную перспективу.

3. Решение задачи управления представляется в виде последовательного принятия решений. Методы RL применимы, когда решения принимаются последовательно, а действия связаны с исследованием окружающей среды. Обученная с использованием RL-метода модель позволяет получить оптимальные долгосрочные многоэтапные результаты, которые в терминах RL именуются вознаграждениями. Оптимальный режим управления или последовательный набор действий позволяет максимизировать среднее ожидаемое вознаграждение (награду) за весь период реализации управленческих решений. В качестве теоретического базиса используются классические алгоритмы динамического программирования и принцип оптимальности Беллмана [7]. Базовая концепция динамического программирования в задачах RL состоит в использовании функций ценности для организации и структурирования поиска хороших стратегий. В соответствии с принципом оптимальности управление на текущем шаге необходимо

выбирать так, чтобы вознаграждение на данном шаге совместно с оптимальным вознаграждением на всех последующих шагах было бы максимальным.

Человеческий капитал современного предприятия как объект управления является одним из важнейших ресурсов для инновационного развития. Задача управления ЧК в рамках рассматриваемой модели удовлетворяет всем перечисленным свойствам. Поэтому применение методов и инструментов RL для ее решения теоретически обосновано. Применение методов и алгоритмов искусственного интеллекта при управлении качеством ЧК позволит предприятию справиться с возникающим оттоком кадров и дефицитом компетенций, увеличить скорость адаптации предприятия к глобальным трендам, таким как конкуренция по скорости и качеству принятия организационно-управленческих решений. Есть все основания полагать, что рост качества ЧК позволит предприятиям повысить свою инновационную активность, обеспечить устойчивую конкурентоспособность и расширить потенциал роста.

1.2. Приложения методов обучения с подкреплением в организационных системах

Приложения систем обучения с подкреплением разнообразны, связаны с задачами оптимизации (динамического программирования) процессов и систем. Исследования в области организации управления в различных сферах деятельности человека за последние годы представлены далее.

- В области промышленности и менеджмента RL используется по всему спектру задач управления ресурсами [8–10], включая разработку принципов календарного планирования производства [11], разработку планов пополнения запасов, устанавливающих время и объем пополнения запасов, разработку логистических маршрутов и цепочек поставок [12, 13].

- В робототехнике RL имеет приложения, включая улучшение движения, разработку автономных транспортных средств [14, 15].

- Методы RL позволяют улучшать управление движением на дорогах и используются в алгоритмах управления умными городами [16].

- Приложения RL используются: в области здравоохранения для формирования схем расчета и дозирования лекарственных средств [17]; при конструировании систем образования и электронного обучения, которые могут повысить свою эффективность за счет подбора учебных программ на базе RL [18]; для разработки стратегии принятия решений в биржевой торговле [19–22]; для опти-

мизации инвестиционного портфеля ценных бумаг и в задачах алгоритмической торговли [23–25]; для построения рекомендательных систем в приложениях электронной коммерции [26–28].

В задачах управления персоналом, управления человеческими ресурсами на уровне предприятия методы RL до сих пор не использовались. Возможности методов и алгоритмов RL, позволяющие в условиях стохастичности параметров объекта, а также отсутствия обучающей выборки формировать оптимальные стратегии управления, могут быть использованы в задаче управления ЧК предприятия. Для этого требуется разработать новый подход, который обеспечит поддержку принятия управленческих решений при формировании индивидуальных траекторий профессионального развития.

2. Описание предлагаемого подхода к управлению человеческим капиталом

Представлен подход к управлению ЧК, включающий методику и схему формирования индивидуальных траекторий профессионального развития (динамический режим развития человеческого капитала, ДРРЧК). Он отличается системностью и комплексностью оценки ЧК по связанным блокам, отражающим разные его стороны и свойства. Представлена постановка задачи формирования индивидуальной траектории профессионального развития работника на базе методов RL.

2.1. Концептуальные положения

Динамический режим развития человеческого капитала направлен на его адаптацию к различным ситуациям в разных сферах деятельности человека и улучшение его более высокой отдачи для коллектива (предприятий, учреждений и т. п.) в долгосрочной (за счет отсроченных эффектов) и среднесрочной перспективах. Представленный подход основан на разработке индивидуальных профессиональных траекторий развития ЧК в соответствии с правилами, полученными с использованием RL-методов (политик). Траектория их реализации представляет собой временную последовательность управленческих решений в виде программ обучения, стажировок или предоставляемых предприятием иных социальных благ. Решения реализуются для определенных для конкретного работника целевых значений его характеристик.

Правила принятия решений в ДРРЧК эквивалентны политикам в RL, а результаты управления выражаются функциями вознаграждения (награды).

Входными данными является совокупность данных о работниках по всему спектру факторов ЧК — знания, умения, качество здоровья, социальный капитал, инновационность, социально-демографические факторы, данные цифрового следа, а также данные о причинных связях указанных факторов. Выходные данные формируются в виде управленческих решений для каждого этапа (как состояния в RL-пространстве).

Применение методов RL для решения задачи формирования ДРРЧК имеет ряд перечисленных далее преимуществ, обусловленных теорией MDP и динамического программирования [5–7], связанных с многокритериальным принятием решений в условиях динамичности и неопределенности характеристик задачи.

1. Подход RL способен принимать наилучшее решение во времени для каждого работника в каждый момент времени с учетом разнообразия характеристик работников. Это может достигаться без построения точной математической модели (поведения) работника, а также в отсутствии данных о причинно-следственных связях между решением (воздействием) и результатом (отдачей).

2. Применение RL-подхода и решений, полученных с его помощью, может улучшить долгосрочные результаты с учетом распределения во времени и отсроченного эффекта от таких решений.

3. Механизмы RL позволяют проектировать функцию вознаграждения, которая является адаптивной и основывается на экспертных знаниях в данной предметной области.

4. Предлагаемый подход обеспечивает многокритериальную оптимизацию в условиях критериев эффективности и риска (например, для предприятия — потерять конкурентного работника, который может уйти к другому работодателю).

Подход ДРРЧК состоит из последовательности правил принятия решений для формирования действий в соответствии с текущими показателями деятельности работников и предшествующими воздействиями. Политика разработки формирования индивидуальной профессиональной траектории работника становится все более актуальной и может использоваться для выбора эффективных средств управления ЧК на предприятии в целом. Эта политика представляет собой набор правил для определения оптимального состава программ в определенный момент времени в зависимости от характеристик работников, а также показателей эффективности воздействия уже реализованных программ. Оптимальный режим воздействия (управления) или последовательный набор программ позволяет максимизировать средний ожи-

даемый доход за весь период реализации программ (управленческих решений).

Задача, которую необходимо решить, состоит в том, чтобы определить набор мероприятий (программ), которые приводят к росту эффективности предприятия. При этом учитывается, что эффективность следующей программы зависит от результатов эффективности предыдущих программ у конкретного работника.

Объектом управления является ЧК предприятия, оценки которого по отдельным работникам подробно представлены в работах автора [29, 30]. На основе разработанной автором методики каждый работник имеет определенную численную оценку его ЧК. Оценка проводится по пяти группам показателей (блокам оценки) — оценка уровня здоровья, оценка компетенций, оценка надпрофессиональных компетенций, оценка мотивации и вовлеченности и оценка социального статуса и поведенческих навыков (рис. 2, см. вторую сторону обложки). В зависимости от итогового значения ЧК работник попадает в одну из пяти групп по каждому блоку оценки (каждый блок имеет пять градаций своих значений).

Предложенная методика оценки ЧК является основанием для формирования управленческих решений, направленных на развитие потенциала работников и качества ЧК. Управленческие решения носят персональный характер и зависят от существующего уровня ЧК. Такие управленческие решения, реализованные в динамике, названы индивидуальными траекториями профессионального развития. Разработан перечень решений по каждому блоку оценки ЧК в зависимости от балла, набранного работником [28]. Эти решения (программы) направлены на улучшение ЧК по одному из его показателей. Решения зависят от оценки начального уровня ЧК и реализуются в виде программ обучения персонала, предоставления финансовых грантов, программ вовлечения в спорт, здоровое питание и др. Общая траектория профессионального развития работника определяется композицией управленческих решений из каждого блока. Формирование такой траектории во времени и является задачей, которая решается в рамках RL-подхода.

2.2. Постановка задачи формирования индивидуальной траектории профессионального развития работника

Среда задается как MDP [5]: $M = \{S, A, P, R, \gamma\}$, где S — пространство состояний, в котором определены состояния среды (работников предприятия) $s_i \in S$; A — пространство действий, в котором определены действия агента (центра

принятия решений предприятия) $a_t \in A$; P — переходные вероятности марковского процесса; на каждом временном шаге t следующее состояние s_{t+1} берется из распределения вероятностей P : $p(s_{t+1}|s_t, a_t) \in P$; R — функция награды (вознаграждения), на каждом временном шаге t агент получает награду, зависящую от действия a_t , реализованного для состояния s_t и нового состояния s_{t+1} : $r_t(s_t, a_t, s_{t+1}) \in R$; γ — коэффициент дисконтирования, используемый для суммирования наград, $\gamma \in [0, 1]$. Далее будут равнозначно использоваться обозначения для состояний $s_t = s$, $s_{t+1} = s'$, для действий $a_t = a$ и награды $r_t = r$.

Сеть MDP состоит из множества вершин, соответствующих разным уровням качества ЧК. Состояния заданы в пятимерном пространстве по числу показателей оценки ЧК. Изменение состояния происходит под действием 25 различных решений, по пять решений для каждого из пяти показателей оценки качества ЧК. Введено предположение, что для каждого работника в единицу времени возможна реализация решения (действия) из одного блока $\{A1, A2, A3, A4, A5\} \in A$. Поэтому движение работника по его траектории при реализации определенного решения возможно на один уровень вперед по определенному показателю (т. е. значение этого показателя ЧК растет), назад по этому показателю (т. е. значение этого показателя ЧК снижается) или сохраняется неизменность показателя (т. е. значение ЧК не изменяется). Если в результате реализации действия a_t у работника увеличивается показатель ЧК, на улучшение которого направлено это действие, то агенту возвращается награда $r_t(a_t)$.

В каждом блоке показателей оценки ЧК для каждого из пяти уровней интегрального показателя имеется определенное управленческое решение по наращиванию уровня ЧК. Поэтому имеются 25 различных действий, реализуемых MDP. Зададим состояния графа как $s_{ijkl}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$, где индексы соответствуют показателям пяти бло-

ков оценки ЧК; x_1, \dots, x_5 — значения показателей ЧК по каждому из пяти блоков оценки. В каждом состоянии агент может принимать разные решения, образуя множество решений a_{ij} , где i — блок показателей ЧК, подлежащих управлению; j — соответствующее решение в i -м блоке. Например, при реализации действия переход из состояния S_{22111} через действие a_{13} означает, что применяется решение 3 в блоке 1 (уровень здоровья), позволяющее увеличить уровень ЧК с уровня S_{22111} до уровня S_{32111} с соответствующим приростом показателя ЧК Δx_1 . На рис. 3 схематично представлен граф переходов из состояния s при реализации действия a . Каждая стрелка на рис. 3 соответствует тройке (s', s, a) , на стрелках отражены вероятности перехода $p(s'|s, a)$ из текущего состояния s в новое состояние s' на следующем шаге при реализации действия a , а также соответствующая награда (ожидаемое вознаграждение) $r(s, a, s')$ за этот переход. Сумма вероятностей перехода на стрелках, исходящих из вершины, равна 1. Вероятности переходов $p(s'|s, a)$ определяются на основе результатов рандомизированных испытаний [29–31].

Взаимодействие со средой длится в течение T шагов. Весь процесс делится на эпизоды, в конце каждого из них среда вновь переводится в начальное состояние и взаимодействие начинается снова. Вознаграждения рассматриваются как компоненты аддитивного разложения функции полезности. В задаче с бесконечным горизонтом число решений не ограничено, поэтому вводится коэффициент дисконтирования $\gamma \in [0, 1]$. Полезность (доход) определяется выражением $\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t r_t$, которое характеризует дисконтированную сумму вознаграждения, а коэффициент дисконтирования определяет известную идею о том, что вознаграждение в настоящий момент стоит больше, чем вознаграждение в будущем.

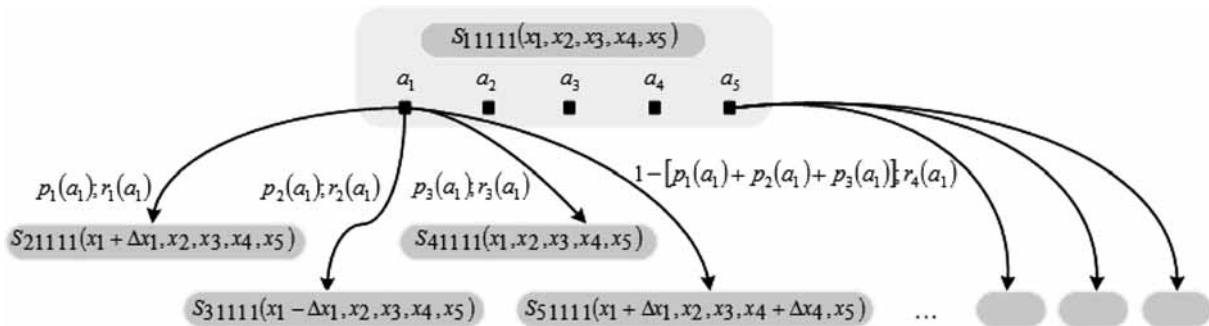


Рис. 3. Граф переходов из состояния s в состояние s' при реализации действия a ; x_i — уровень показателя

Отдача $R(\tau)$ из эпизода $\tau = (s_0, a_0, r_0), \dots, (s_T, a_T, r_T)$ имеет вид

$$R(\tau) = \sum_{t=0}^T \gamma^t r_t. \quad (1)$$

Тогда целевая функция агента $J(\tau)$ будет представлена как математическое ожидание отдачи по нескольким траекториям:

$$J(\tau) = \mathbb{E}_\tau [R(\tau)] = \mathbb{E}_\tau \left[\sum_{t=0}^T \gamma^t r_t \right], \quad (2)$$

где $R(\tau)$ — отдача как сумма дисконтированных вознаграждений за временные шаги $t = 0, \dots, T$; целевая функция $J(\tau)$ — отдача, усредненная по нескольким эпизодам (повторным прогонам).

Задача формирования оптимальной траектории профессионального развития рассматривается как стационарный MDP, в которой вероятностная модель перехода из состояния в состояние при определенном действии и вероятностная модель вознаграждений не меняются со временем.

Функция ценности $Q^\pi(s, a)$ действия a в состоянии s при стратегии π определяет ожидаемый доход, когда агент начинает работу из состояния s , предпринимает действия a и затем следует стратегии π :

$$Q^\pi(s, a) = \mathbb{E}_{t_0=s, a_0=a, \tau \approx \pi} \left[\sum_{t=0}^T \gamma^t r_t \right]. \quad (3)$$

Оптимальную стратегию можно найти, используя метод динамического программирования, который представляет собой упрощение сложной задачи путем ее рекурсивного разбиения на более простые подзадачи.

Запишем уравнения оптимальности Беллмана для $Q^\pi(s, a)$:

$$\begin{aligned} Q^*(s, a) &= \\ &= \mathbb{E} \left[R_{t+1} + \gamma \max_{\pi} Q^*(s_{t+1}, a) \mid s_t = s, a_t = a \right] = \\ &= \max_{\pi} \sum_{s', \tau} p(s', r | s, a) [r + \gamma Q^*(s', a')]. \end{aligned} \quad (4)$$

Для MDP уравнение (4) имеет единственное решение, которое не зависит от стратегии. Уравнения Беллмана представляют собой систему уравнений, записанных по одному для каждого состояния. Если имеется n состояний и n неизвестных, то система разрешима и имеет единственное решение.

Целью алгоритма RL является поиск стратегии π^* , которая максимизирует математическое

ожидание кумулятивного ожидаемого дохода (т. е. достигается максимальная ожидаемая полезность, что согласуется с принципом максимальной ожидаемой полезности — принципом принятия решения рациональным агентом при неполной информации о среде) для всех состояний s :

$$\pi^*(s) = \max_{\pi} Q^*(s, a). \quad (5)$$

3. Описание алгоритма обучения агента

Алгоритм обучения с подкреплением представляет собой последовательность адаптированных процедур, соответствующих динамическому изменению состояния системы. Таким образом, стратегия построения ДРПЧК, разработанная на основе метода обучения с подкреплением, будет динамически меняться с течением времени по мере накопления наблюдений от работников.

Разработан алгоритм формирования индивидуальных траекторий развития работников на основе подхода обучения с подкреплением с учетом текущего уровня ЧК. Стратегия, которую вырабатывает алгоритм, определяет, как агент выбирает действие в данном состоянии, т. е. какие методы управленческого воздействия будут наиболее приемлемыми для данного работника в текущий момент времени. Выбирается решение (действие), максимизирующее полное вознаграждение, которое может быть достигнуто из данного состояния, а не действие, которое приносит наибольший немедленный эффект (вознаграждение). Преследуется долгосрочная цель предприятия по улучшению качества ЧК, росту производительности ресурсов и эффективности его функционирования.

Среда, представленная в виде MDP, и гибкие алгоритмы RL реализуют способ последовательного принятия решений, когда выбранное действие влияет на следующие состояния объекта управления и результаты воздействия решений. Оптимальная стратегия достижения поставленной цели вырабатывается посредством взаимодействия среды и агента.

Для решения поставленной задачи в работе используется алгоритм, основанный на оценках полезности, с помощью которого агент настраивает функцию $Q^\pi(s, a)$ ценности действия a в состоянии s при стратегии π . Настроенная функция полезности используется для оценки пар (s, a) и порождения стратегии агента.

Алгоритм DQN (*Deep Q-Networks*) представляет собой алгоритм обучения глубоких нейронных сетей. Он основан на оценках полезностей и методе

временных различий, который аппроксимирует Q -функцию [3]. Настроенная Q -функция используется агентом для выбора действий и реализуется как Q -обучение.

В Q -обучении используются две стратегии: целевая (постоянно улучшается) и поведенческая ε -жадная, используемая для взаимодействия со средой. Агент на основе сведений о состоянии объекта управления s_t и полученном из среды вознаграждении r_t за действие a_t , переведшее состояние объекта в следующее состояние, вычисляет значение функции $Q(s, a)$, оценивающее ценность действия a_t в состоянии s_t . Настройка Q -функции осуществляется с помощью метода временных различий, значение функции обновляется на накопленные дисконтированные будущие вознаграждения и определяет принцип оптимальности Беллмана:

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha \left[r_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t) \right], \quad (6)$$

где α — скорость обучения функции ценности (при $\alpha < 1$ осуществляется приближение старого состояния к новому, при $\alpha = 1$ осуществляется замена старого состояния новым); $r_t + 1$ — награды, полученные из среды за действия a_t из состояния s_t ; γ — коэффициент дисконтирования; $\max_a Q(s_{t+1}, a)$ — максимальное ожидаемое значение из состояния s_{t+1} (новое значение); $Q(s_t, a_t)$ — предыдущая оценка Q -значения (старое значение).

Полученные Q -значения используются для обучения агента и для определения следующего действия. Для этого используется нейронная сеть (сеть полезности, *value networks*), которая оценивает Q -значения пар (s, a) и выбирает действия с максимальным Q -значением (максимальной полезностью) $Q_{target}^\pi(s, a)$:

$$Q_{target}^\pi(s, a) = r + \gamma \max_{a'} Q^{\pi_0}(s', a'), \quad (7)$$

где θ — это параметры обучаемой нейросети.

Отметим, что алгоритм DQN дает завышенные оценки Q^{π_0} для тех пар (s, a) , которые посещаются часто. Это становится проблемой для агента, если исследование этих пар происходит неравномерно. Тогда завышение оценок также будет неравномерным, что может привести к неверному изменению ранжирования действий относительно Q -значений. В этом случае действие a , которое агент определит как наилучшее для выбора в определенном состоянии s , на самом деле таким не является. Таким образом, целесообразно уменьшение завышения оценок Q -значений.

Для предотвращения ошибок в максимизации в Q -обучении и повышения устойчивости обучения будем использовать алгоритм двойного Q -обучения. Если в алгоритме DQN для выбора действия и получения оценки Q -функции используется одна и та же нейронная сеть, то в предложенном алгоритме двойной DQN (*double DQN*, DDQN) применяются две нейронные сети. Первая сеть — обучаемая θ -сеть — используется для выбора действия a , вторая сеть — прогнозная ϕ -сеть — используется для расчета Q -значения для пар (s, a) , т. е. для оценки этого действия a . Эти две сети обучаются на пересекающихся прецедентах. Применение прогнозной сети позволяет сделать обучение более устойчивым благодаря снижению скорости изменения целевого Q -значения Q_{target}^π :

$$Q_{target}^\pi(s, a) = r + \gamma Q^{\pi_0}(s'_t, \max_{a'} Q^{\pi_0}(s'_t, a'_t)). \quad (8)$$

Алгоритм DDQN уменьшает завышение оценок Q -значений путем настройки оценок Q -функций. Ниже представлен разработанный алгоритм DDQN для оценки Q -значений для всех действий и выбора действия a с максимальным Q -значением.

Алгоритм DDQN

1. Инициализация гиперпараметров: скорость обучения α ; коэффициент дисконтирования γ ; скорость обновления обучаемой нейросети τ ; скорость обновления прогнозной нейросети F
2. Инициализация числа прецедентов за шаг обучения B ; числа обновлений на пакет U ; размера пакета данных P ; памяти прецедентов с максимальным размером K ; числа шагов в эпизоде T ; инициализация параметров сети θ случайными значениями; инициализация параметров прогнозной сети $\phi = \theta$
3. Для каждого эпизода
4. for $m:=1$ to T do
5. Накопить и сохранить h прецедентов (s_i, a_i, r_i, s'_i) , используя текущую стратегию
6. for $b:=1$ to B do
7. % выбрать b -й пакет прецедентов из памяти
8. for $u:=1$ to U do
9. for $i:=1$ to P do

```

9.          % рассчитать целевые Q-значения для каждого прецедента
10.          $y_i := r_i + \delta_{s'_i} \gamma Q^{\pi_\theta}(s'_i, \max_{a'_i} Q^{\pi_\theta}(s'_i, a'_i))$ , где  $\delta_{s'_i} = 0$ , если  $s'_i$  — конечное состояние,
            иначе  $\delta_{s'_i} = 1$ 
11.         end for
12.         % рассчитать функцию потерь с помощью средней квадратической ошибки:
13.          $L(\theta) := \frac{1}{N} \sum_i (y_i - Q^{\pi_\theta}(s_i, a_i))^2$ 
14.         % Обновление параметров обучаемой сети  $\theta$ 
15.          $\theta := \theta - \alpha \nabla_\theta L(\theta)$ 
16.     end for
17. end for
18. уменьшение  $\tau$ 
19.     if  $(m \bmod F) = 0$  then
20.         % обновление параметров прогнозной сети  $\phi$ 
21.          $\phi := 0$ 
22.     end if
23. end for

```

Используются две нейросети — прогнозная и обучаемая. Оценка Q -функции параметризована с помощью обучаемой нейросети с параметрами θ и обозначена Q^{π_θ} . Осуществляется инициализация дополнительной сети как прогнозной, ее параметрам ϕ присваиваются значения θ (шаг 2). Вводится гиперпараметр F , определяющий частоту обновления прогнозной сети. Осуществляются сбор и хранение данных (шаг 4), полученных в соответствии с ε -жадной стратегией, порождающей Q -значения. Для обучения агента осуществляется выборка B (используются пять пакетов и пять обновлений параметров на пакет) пакетов прецедентов из памяти (шаги 5–7). Для каждого набора данных реализуется обновление параметров. Целевые Q -значения рассчитываются с помощью прогнозной сети (шаг 10). Рассчитываются Q -значения для всех действий и выбирается действие с максимальным значением. После этого рассчитываются функции потерь (шаг 13), вычисляется градиент потерь и обновляются параметры θ сети (шаг 15). После реализации этого этапа обучения (шаги 16–18) обновляется параметр τ . Буфер воспроизведения опыта используется, чтобы позволить агенту анализировать свои предыдущие действия и учиться на них. Это хранилище траектории текущего эпизода. Агент может оглянуться назад, чтобы вычислить ожидаемую награду для каждого шага. После выполнения всего этапа обучения (шаги 6–17) осуществляется обновление параметра τ . Прогнозная сеть периодически обновляется (шаги 19–23). Периодическое замещение параметров ϕ

прогнозной сети копией параметров сети θ используется для выполнения обновлений.

На рис. 4 представлена архитектура системы для обучения агента на базе алгоритма DDQN. Обучаемая сеть θ используется для выбора действий, прогнозная сеть ϕ применяется для оценки этого действия, т. е. для расчета Q -значения для пары (s', a') : $y_i := r_i + \delta_{s'_i} \gamma Q^{\pi_\theta}(s'_i, \max_{a'_i} Q^{\pi_\theta}(s'_i, a'_i))$.

4. Численные эксперименты и анализ результатов

Система реализована с использованием программного средства Matlab2021b. Она состоит из трех процессов — создания агента Q -обучения, обучения агента и тестирования. Обучение нейросети проводится каждые 200 эпизодов, каждый из которых включает 50 шагов.

Эксперименты проводятся на основе данных крупного нефтедобывающего и нефтеперерабатывающего предприятия. Имеются данные (подробно

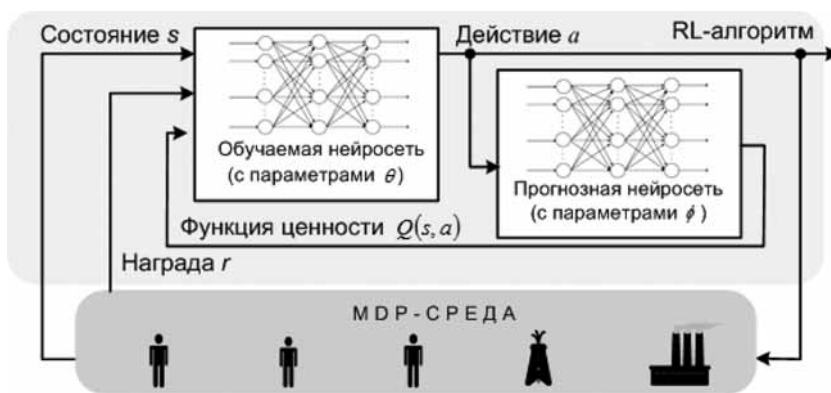


Рис. 4. Архитектура системы для обучения агента на основе DDQN-алгоритма

схема сбора и анализа описана в предыдущих работах автора [32, 33]) об оценке ЧК, производительности труда работников, сформирован комплекс управленческих решений по воздействию на элементы человеческого капитала. В настоящей статье представлены эксперименты, в которых рассматриваются два показателя, формирующие ЧК — показатель уровня здоровья работника и показатель уровня его профессиональных компетенций. Каждый из приведенных показателей имеет пять уровней. Задача улучшения качества ЧК решается на двумерной сетке 5×5 , где по строкам отражаются уровни первого показателя — уровня здоровья работника, по столбцам — уровни второго показателя — компетенций. Анализируются пять уровней по каждому показателю.

По результатам оценки ЧК, определенной по методике, предложенной автором в работах [32, 33], каждый работник получает по каждому из этих двух показателей определенный балл, область значений для каждого показателя 1...1000 баллов. В соответствии с этим он попадает в одну из пяти групп по каждому из показателей, и на сетке 5×5 представляется в виде красного кружка (рис. 5, см. вторую сторону обложки). Всего пять интервалов уровней ЧК по каждому показателю. На рис. 5 (см. вторую сторону обложки) представлен работник с такими значениями показателей, что он попадает в ячейку (3, 2). Это его начальный уровень ЧК.

При определении цели, т. е. уровня потенциально возможного ЧК для конкретного работника, учитывается ряд ограничений, связанных с его возможностями. Так, на рис. 5 (см. вторую сторону обложки) показана область ограничений в виде ячеек, закрашенных черным цветом. Здесь показано, что для этого работника существует возможность движения в сторону улучшения ЧК — цели, ячейка (5, 5). Можно отметить, что для определенного работника добиться максимально возможного уровня компетентности нельзя по причине его текущего уровня образования, а также других объективных факторов, включая здоровье. Это не позволит данному работнику добиться максимально возможного уровня ЧК (ячейка (5, 5)). В таком случае для такого работника определяется другая цель. По совокупности факторов здоровья ему также не удастся добиться повышения уровня профессионализма в данной области с учетом низких значений качества здоровья. То есть условия данной профессии таковы, что 3-й и 4-й уровни профессионального развития невозможны для работника с низкими показателями физических возможностей (черные ячейки (3, 3), (3, 4)). При высоких показателях качества здоровья работника ему также доступен переход на высший уровень профессиональной компетентности, т. е. быстрый переход на уровень 5 по показателю 2, ячейки (4, 4), (4, 5).

Таким образом, работник представлен как среда, в которой заданы ограничения достижимости цели (конечного состояния среды), начальное состояние, функции переходов состояний, награды за эти переходы. Возможны переходы вправо и вниз, что соответствует перемещению работника на следующий уровень по одному из показателей при реализации управленческих решений в соответствующей группе. Действия дискретные и отражают одно из управленческих решений, предназначенных для данной категории работников. Под решением понимается реализация определенного мероприятия (например, повышение квалификации), направленного на рост ЧК и повышение производительности труда. Полный перечень таких мероприятий можно найти в работе [32]. Возможно реализовать 24 различных решения при движении работника из ячейки (1, 1) в ячейку (5, 5). Награды сформированы так, чтобы среди всех возможных путей к целевому состоянию найти кратчайший. Это соответствует разработке стратегии для работника, который должен добиться цели в минимально короткий срок. Каждый шаг имеет штраф -1 балл, достижение цели имеет награду 3, переход через область ограничений, например, перемещение из (4, 3) в (4, 5), награждается в размере 1 балл. Результатом решения задачи является обучение агента формированию наиболее адекватного состава управленческих решений, соответствующих текущему состоянию ЧК работника, и реализации этого комплекса решений за минимальное время в целях роста производительности и эффективности деятельности предприятия в целом.

Проведена серия экспериментов для нескольких работников с разными значениями ЧК. Для каждого работника (среды) были реализованы алгоритмы Q -обучения агента — DQN, DDQN, проводилась оценка сходимости алгоритмов в процессе достижения наибольшей награды. Для разных экспериментов на рис. 6 показаны средние суммы вознаграждения, полученные за каждый из 200 эпизодов моделирования. В каждом эпизоде реализуется 50 испытаний (шагов), итого в каждом эксперименте обучения 10 тыс. испытаний. Результаты моделирования характеризуют относительно быструю сходимость алгоритма.

Для выбора наилучшего алгоритма проводится анализ их производительности. Производительность алгоритмов оценивается по двум критериям: эффективности политики (среднего вознаграждения) и эффективности обучения агента (скорости сходимости). Значения средних наград рассчитаны за каждый из 200 эпизодов моделирования, усредненных по 50 испытаниям. Показано,

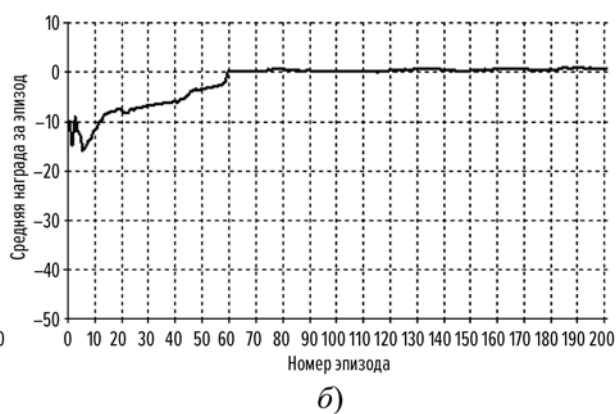
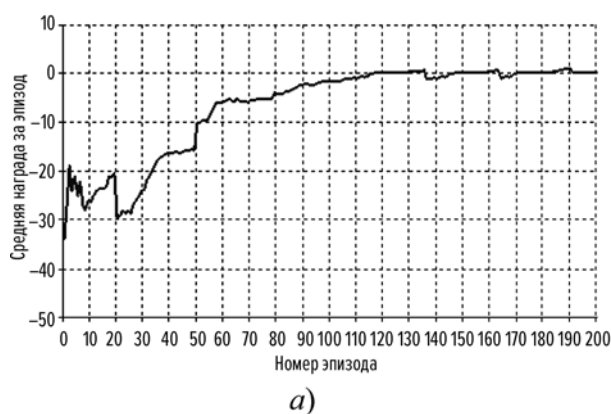


Рис. 6. Результаты обучения агента, коэффициент дисконтирования $\gamma = 0,99$, вероятность случайного действия $\epsilon = 0,04$:

a — эксперимент 1 — обучение на основе алгоритма DQN; *б* — эксперимент 2 — обучение на основе алгоритма DDQN

Результаты оценки эффективности политик и эффективности обучения

Алгоритм	Эффективность политики — среднее вознаграждение	Эффективность обучения — скорость сходимости (число эпизодов)
DQN	-0,15	0,27 (53)
DDQN	0,2	0,29 (58)

что наилучший результат обеспечивает алгоритм DDQN, дающий сравнительно быстрое обучение и положительное вознаграждение (см. таблицу). Поэтому выработка индивидуальных траекторий профессионального развития быть основана на DDQN-агенте.

После процесса обучения агентов был реализован цикл модельных экспериментов, в результате чего для каждого работника с учетом начального и конечного (целевого) состояния были сформированы оптимальные стратегии (траектории) (рис. 7, см. вторую сторону обложки). Они показывают последовательность принятия разных управленческих решений, обеспечивающих рост качества ЧК. На рис. 7 (см. вторую сторону обложки) по мере продвижении по сформированной траектории текущее состояние все более затемняется.

Результаты моделирования демонстрируют, что для первого работника (эксперимент 1) для достижения заданного целевого состояния наилучшими решениями будет следующая последовательность действий. Сначала необходимо реализовать программные мероприятия, направленные на улучшения качества здоровья работника до уровня 2. Затем следует постепенно реализовывать программы по обеспечению роста основных компетенций

до уровня 4. Далее следует применить меры по оздоровлению и только после этого снова можно обеспечить улучшение профессиональных компетенций.

Эта последовательность программных мер обеспечит наилучший результат в кратчайшие сроки. Для второго работника (эксперимент 2) траектория его развития следующая: сначала реализация программы, обеспечивающей рост профессионализма до уровня 3, затем проведение пошаговых программ по улучшению качества здоровья до уровня 4, далее — реализация решения, направленного на рост компетентности.

Таким образом, сформированы индивидуальные профессиональные траекторий для работников предприятия на базе методологии ДРРЧК в соответствии с правилами, полученными из RL. Оптимальные политики (в виде программных мероприятий) сформированы в результате обучения агента на основе использования его предыдущего опыта и являются реализацией динамического режима развития работников. Реализация предложенных политик позволит повысить качество ЧК предприятия, улучшит его ресурсную эффективность и обеспечит рост интегральных показателей деятельности.

Заключение

В статье показано, что методы RL имеют высокую эффективность в случае, когда особенности решаемых задач управления перечислены далее:

- 1) объект управления характеризуется стохастической динамикой своих показателей, а управленческие решения недетерминированы;
- 2) задачи управления носят стратегический характер;

3) решение задачи управления представляется в виде последовательного принятия решений.

Человеческий капитал как объект управления является одним из важнейших ресурсов для инновационного развития современных предприятий. Задача управления ЧК удовлетворяет всем перечисленным выше свойствам. Применение методов и алгоритмов искусственного интеллекта при управлении качеством ЧК позволит существенно увеличить скорость адаптации предприятия к глобальным трендам, справиться с возникающим оттоком кадров и дефицитом компетенций. Рост качества ЧК позволит предприятиям повысить свою инновационную активность, обеспечить устойчивую конкурентоспособность и расширить потенциал роста.

В работе проведена систематизация областей применения моделей и методов RL. Показано, что для сложных организационных систем, таких как системы управления ЧК предприятия, обладающих свойствами самостоятельного целеполагания, рефлексии и ограниченной рациональности при принятии решений, не существует комплексного методологического подхода выработки оптимального режима управления качеством ЧК.

Впервые показано, что одним из эффективных инструментов повышения качества ЧК является индивидуализация решений при разработке стратегии управления. Предложен подход ДРРЧК, основанный на использовании методов обучения с подкреплением, обеспечивающий формирования индивидуальных траекторий профессионального развития работника с учетом его индивидуальных характеристик (качества здоровья, уровня профессиональных и надпрофессиональных компетенций, мотивации, социального капитала) и текущих показателей деятельности.

Подход к разработке ДРРЧК базируется на концепции MDP и алгоритмах RL. Выработанная ДРРЧК политика представляет собой набор правил, сформированный на основе алгоритма RL, для определения оптимального состава программ в определенный момент времени в зависимости от характеристик работника в текущий момент времени и результатов действия предыдущих программ в прошедшие моменты времени. Отличие предложенной методологии ДРРЧК от других состоит в том, что политика управления вырабатывается без наличия точной математической модели (поведения) работника, а также в отсутствии данных о причинно-следственных связях между решением (программой) и результатом (эффективностью программы).

Проведены экспериментальные исследования по использованию предлагаемой методоло-

гии управления человеческим капиталом на базе данных крупного предприятия. Для работников с разным профилем ЧК сформированы оптимальные политики, которые являются реализацией индивидуального динамического режима профессионального развития. Реализация предложенных политик позволит повысить качество ЧК предприятия, улучшить его ресурсную эффективность, обеспечить рост интегральных показателей деятельности.

Теоретическая значимость результатов обусловлена тем обстоятельством, что процесс организации, структурирования и поиска эффективных стратегий управления ЧК рассматривается как задача последовательного принятия решений в стохастической среде. Оптимальные решения вырабатываются в стохастической среде, динамика которой описывается с помощью MDP, по критерию максимизации ожидаемой полезности, на основе алгоритмов Q -обучения. Практическую значимость представляет система поддержки принятия решений на основе разработанной методологии, являющаяся основой для управления человеческими ресурсами предприятия, которая в минимальные сроки позволит обеспечить рост инновационности и конкурентоспособности предприятия за счет улучшения качества ЧК.

Список литературы

1. Samuelson P. A. Consumption Theory in Terms of Revealed Preference // *Economica*. 1948. Vol. 60, No. 15. P. 243–253.
2. Neumann J., Morgenstern O. *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton: Princeton University Press, 1944. 625 p.
3. Орлова Е. В. Методы и модели анализа данных и машинного обучения в задаче управления производительностью труда // *Программная инженерия*. 2020. Том 11, № 4. С. 219–229. DOI: 10.17587/prin.11.219-229.
4. Орлова Е. В. Системный инжиниринг цифровых двойников организационно-технических систем с использованием методов интеллектуального анализа // *Программная инженерия*. 2022. Том 13, № 9. С. 425–440. DOI: 10.17587/prin.13.425-439.
5. Markov A. A. The Theory of Algorithms // *Journal of Symbolic Logic*. 1953. Vol. 18, No. 4. P. 340–341. DOI: 10.2307/2266585.
6. Sutton R. S., Barto A. G. *Reinforcement Learning. An Introduction*. MIT Press, Cambridge, MA, 2020, 552 p.
7. Bellman R. A Markovian decision process // *Journal of Mathematics and Mechanics*. 1957. Vol. 6, No. 4. P. 679–684. DOI: 10.1512/iumj.1957.6.56038.
8. Ding Q., Jahanshahi H., Wang Y. et al. Optimal Reinforcement Learning-Based Control Algorithm for a Class of Nonlinear Macroeconomic Systems // *Mathematics*. 2022. Vol. 10, No. 3. Article 499. DOI:10.3390/math10030499.
9. Li Q., Lin T., Yu Q. et al. Review of Deep Reinforcement Learning and Its Application in Modern Renewable Power System Control // *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 10. Article 4143. DOI: 10.3390/en16104143.
10. Orlova E. V. Decision-Making Techniques for Credit Resource Management Using Machine Learning and Optimization

// Information. 2020. Vol. 11, No. 3. Article 144. DOI: 10.3390/info11030144.

11. **Wang R., Chen Z., Xing Q.** et al. A Modified Rainbow-Based Deep Reinforcement Learning Method for Optimal Scheduling of Charging Station // Sustainability. 2022. Vol. 14, No. 3. Article 1884. DOI: 10.3390/su14031884.

12. **Abideen A. Z., Sundram V. P. K., Pyeman J.** et al. Digital Twin Integrated Reinforced Learning in Supply Chain and Logistics // Logistics. 2021. Vol. 5, No. 4. Article 84. DOI: 10.3390/logistics5040084.

13. **Yan Y., Chow A. H., Ho C. P.** et al. Reinforcement Learning for Logistics and Supply Chain Management: Methodologies, State of the Art, and Future Opportunities // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2022. Vol. 162, Article 102712. DOI: 10.1016/j.tre.2022.102712.

14. **Han D., Mulyana B., Stankovic V., Cheng S.** A Survey on Deep Reinforcement Learning Algorithms for Robotic Manipulation // Sensors. 2023. Vol. 23, No. 7. Article 3762. DOI: 10.3390/s23073762.

15. **Orr J., Dutta A.** Multi-Agent Deep Reinforcement Learning for Multi-Robot Applications: A Survey // Sensors. 2023. Vol. 23, No. 7. Article 3625. DOI: 10.3390/s23073625.

16. **Mohammadi M., Al-Fuqaha A. Guizani M., Oh J.** Semisupervised deep reinforcement learning in support of IoT and smart city services // IEEE Internet of Things Journal. 2018. Vol. 5, No. 2. P. 624–635. DOI: 10.1109/JIOT.2017.2712560.

17. **Yu C., Liu J., Nemati S.** Reinforcement Learning in Healthcare: A Survey. arXiv:1908.08796. 2019.

18. **Chi M., VanLehn K., Litman D.** et al. Empirically evaluating the application of reinforcement learning to the induction of effective and adaptive pedagogical strategies // User Model User-Adap Inter. 2011. Vol. 21. P. 137–180. DOI: 10.1007/s11257-010-9093-1.

19. **Azhikodan A. R., Bhat A. G., Jadhav M. V.** Stock Trading Bot Using Deep Reinforcement Learning // Innovations in Computer Science and Engineering; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2019. P. 41–49.

20. **Пonomarev E. C., Оселедец И. В., Чихоцкий А. С.** Использование обучения с подкреплением в задаче алгоритмической торговли // Информационные процессы. 2019. Том 19, № 2. С. 122–131.

21. **Гурин А. С., Гурин Я. С., Горохова Р. И.** и др. Повышение доходности торгового агента на основе метода Q-learning посредством использования производных финансовых показателей // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2020. Том 16, № 3. С. 799–809. DOI: 10.25559/SITITO.16.202003.799–809.

22. **Гатауллин С. Т., Хасаншин И. Я., Никитин П. В.** и др. Различные подходы применения технологии обучения с подкреплением в алгоритмической торговле // Фундаментальные исследования. 2021. № 12. С. 86–91. DOI: 10.17513/fr.43158.

23. **Jiang Z., Liang J.** Cryptocurrency portfolio management with deep reinforcement learning // In Proceedings of the 2017 Intelligent Systems Conference (IntelliSys), London, UK, 7–8 September 2017. P. 905–913.

24. **Yu P., Lee J. S., Kulyatin I.** et al. Model-based Deep Reinforcement Learning for Dynamic Portfolio Optimization. arXiv 2019, arXiv:1901.08740.

25. **Amirzadeh R., Nazari A., Thiruvady D.** Applying Artificial Intelligence in Cryptocurrency Markets: A Survey // Algorithms. 2022. Vol. 15, No. 11. Article 428. DOI: 10.3390/a15110428.

26. **Feng L., Tang R., Li X.** et al. Deep reinforcement learning based recommendation with explicit user-item interactions modeling. arXiv 2018, arXiv:1810.12027.

27. **Liu J., Zhang Y., Wang X.** et al. Dynamic Pricing on E-commerce Platform with Deep Reinforcement Learning. arXiv 2019, arXiv:1912.02572.

28. **Zheng G., Zhang F., Zheng Z.** et al. DRN: A deep reinforcement learning framework for news recommendation // In Proceedings of the 2018WorldWideWeb Conference, Lyon, France, 23–27 April 2018. P. 167–176.

29. **Orlova E. V.** Inference of Factors for Labor Productivity Growth Used Randomized Experiment and Statistical Causality // Mathematics. 2023. Vol. 11, No. 4. Article 863. DOI: 10.3390/math11040863.

30. **Orlova E. V.** Methodology and Statistical Modeling of Social Capital Influence on Employees' Individual Innovativeness in a Company // Mathematics. 2022. Vol. 10, No. 11. Article 1809. DOI: 10.3390/math10111809.

31. **Orlova E. V.** Innovation in Company Labor Productivity Management: Data Science Methods Application // Applied System Innovation. 2021. Vol. 4, No. 3. Article 68. DOI: 10.3390/asi4030068.

32. **Orlova E. V.** Design of Personal Trajectories for Employees' Professional Development in the Knowledge Society under Industry 5.0 // Social Sciences. 2021. Vol. 10, No. 11, Article 427. DOI: 10.3390/socsci10110427.

33. **Orlova E. V.** Assessment of the Human Capital of an Enterprise and its Management in the Context of the Digital Transformation of the Economy // Journal of Applied Economic Research. 2021. Vol. 20, No. 4. P. 666–700. DOI: 10.15826/vestnik.2021.20.4.026.

Reinforcement Learning Methods and Algorithms for Modeling Individual Trajectories of Professional Development

E. V. Orlova, Dr. of Sc. (Eng), Professor, ekorl@mail.ru,
Ufa University of Science and Technology, Ufa, 450076, Russian Federation

Corresponding author:

Ekaterina V. Orlova, Dr. of Sc. (Eng), Professor,
Ufa University of Science and Technology, Ufa, 450076, Russian Federation
E-mail: ekorl@mail.ru

*Received on July 26, 2023
Accepted on September 19, 2023*

Corporate human capital is one of the most important drivers of sustainable economic growth that is becoming increasingly important under changing nature of work. Due to the expansion of various areas of human activity, an employee portrait is getting multifaceted. Therefore, the problem of human capital management based on the individual trajectories of professional development, aimed at increasing the labor efficiency and contributing to the growth of

the corporate operational efficiency, is relevant, timely, socially and economically significant.

The paper proposes an approach for the dynamic regimes for human capital development (DRHC), to design individual trajectories for the employee's professional development, based on reinforcement learning methods. The DRHC develops an optimal management regime as a set of programs aimed at developing an employee in the professional field, taking into account their individual characteristics (health quality, major and interdisciplinary competencies, motivation and social capital).

The DRHC architecture consists of an environment — an employee model as a Markov decision making process and an agent — decision making center of a company. The DRHC uses Double Deep Q-Network algorithms to maximize the agent's utility function. The implementation of the proposed by DRHC policies would enhance the corporate HC quality, improve its resource efficiency and ensure the performance growth.

Keywords: machine learning, reinforcement learning, Q-learning, corporate human capital, individual development trajectories

For citation:

Orlova E. V. Reinforcement Learning Methods and Algorithms for Modeling Individual Trajectories of Professional Development, *Programmnaya Ingeneria*, 2023, vol. 14, no. 12, pp. 603–615. DOI: 10.17587/prin.14.603-615.

References

1. Samuelson P. A. Consumption Theory in Terms of Revealed Preference, *Economica*, 1948, vol. 60, no. 15, pp. 243–253.
2. Neumann J., Morgenstern O. *Theory of Games and Economic Behavior*, Princeton, Princeton University Press, 1944, 625 p.
3. Orlova E. V. Methods and Models of Data Analysis and Machine Learning in the Problem of Labor Productivity Management, *Programmnaya Ingeneria*, 2020, vol. 11, no. 4, pp. 219–229. DOI: 10.17587/prin.11.219-229 (in Russian).
4. Orlova E. V. System Engineering of the Organizational and Technical Systems' Digital Twins Using Artificial Intelligence Methods, *Programmnaya Ingeneria*, 2022, vol. 13, no. 9, pp. 425–439. DOI: 10.17587/prin.13.425-439 (in Russian).
5. Markov A. A. The Theory of Algorithms, *Journal of Symbolic Logic*, 1953, vol. 18, no. 4, pp. 340–341. DOI: 10.2307/2266585.
6. Sutton R. S., Barto A. G. *Reinforcement Learning. An Introduction*, Cambridge, MA, MIT Press, 2020, 552 p.
7. Bellman R. A Markovian decision process, *Journal of Mathematics and Mechanics*, 1957, vol. 6, no. 4, pp. 679–684.
8. Ding Q., Jahanshahi H., Wang Y. et al. Optimal Reinforcement Learning-Based Control Algorithm for a Class of Nonlinear Macroeconomic Systems, *Mathematics*, 2022, vol. 10, no. 3, article 499. DOI: 10.3390/math10030499.
9. Li Q., Lin T., Yu Q. et al. Review of Deep Reinforcement Learning and Its Application in Modern Renewable Power System Control, *Energies*, 2023, vol. 16, no. 10, article 4143. DOI: 10.3390/en16104143.
10. Orlova E. V. Decision-Making Techniques for Credit Resource Management Using Machine Learning and Optimization, *Information*, 2020, vol. 11, no. 3, article 144. DOI: 10.3390/info11030144.
11. Wang R., Chen Z., Xing Q. et al. A Modified Rainbow-Based Deep Reinforcement Learning Method for Optimal Scheduling of Charging Station, *Sustainability*, 2022, vol. 14, no. 3, article 1884. DOI: 10.3390/su14031884.
12. Abideen A.Z., Sundram V. P. K., Pyeman J. et al. Digital Twin Integrated Reinforced Learning in Supply Chain and Logistics, *Logistics*, 2021, vol. 5, no. 4, article 84. DOI: 10.3390/logistics5040084.
13. Yan Y., Chow A. H., Ho C. P. et al. Reinforcement Learning for Logistics and Supply Chain Management: Methodologies, State of the Art, and Future Opportunities, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2022, vol. 162, article 102712. DOI: 10.1016/j.tre.2022.102712.
14. Han D., Mulyana B., Stankovic V., Cheng S. A Survey on Deep Reinforcement Learning Algorithms for Robotic Manipulation, *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 7, article 3762. DOI: 10.3390/s23073762.
15. Orr J., Dutta A. Multi-Agent Deep Reinforcement Learning for Multi-Robot Applications: A Survey, *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 7, article 3625. DOI: 10.3390/s23073625.
16. Mohammadi M., Al-Fuqaha A., Guizani M., Oh J. Semisupervised deep reinforcement learning in support of IoT and smart city services, *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, vol. 5, no. 2, pp. 624–635.
17. Yu C., Liu J., Nemati S. Reinforcement Learning in Healthcare: A Survey. arXiv:1908.08796. 2019.
18. Chi M., VanLehn K., Litman D. et al. Empirically evaluating the application of reinforcement learning to the induction of effective and adaptive pedagogical strategies, *User Model User-Adap Inter*, 2011, vol. 21, pp. 137–180 DOI: 10.1007/s11257-010-9093-1.
19. Azhikodan A. R., Bhat A. G., Jadhav M. V. Stock Trading Bot Using Deep Reinforcement Learning, *In Innovations in Computer Science and Engineering*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2019, pp. 41–49.
20. Ponomarev E. S., Oseledets I. V., Chikhotsky A. S. Using Reinforcement Learning in the Problem of Algorithmic Trading, *Informacionnyye processy*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 122–131 (in Russian).
21. Gurin A. S., Gurin Ya. S., Gorohova R. I. et al. Increasing the profitability of a sales agent based on the Q-learning method using derivative financial indicators, *Sovremennyye informacionnyye tehnologii i IT-obrazovanie*, 2020, vol. 16, no. 3, pp. 799–809. DOI: 10.25559/SITITO.16.202003.799-809 (in Russian).
22. Gataullin S. T., Khasanshin I. Ya., Nikitin P. V. et al. Different approaches to the application of reinforcement learning technology in algorithmic trading, *Fundamental'nye issledovaniya*, 2021, no. 12, pp. 86–91. DOI 10.17513/fr.43158 (in Russian).
23. Jiang Z., Liang J. Cryptocurrency portfolio management with deep reinforcement learning., *In Proceedings of the 2017 Intelligent Systems Conference (IntelliSys)*, London, UK, 7–8 September 2017, pp. 905–913.
24. Yu P., Lee J. S., Kulyatin I. et al. Model-based Deep Reinforcement Learning for Dynamic Portfolio Optimization. arXiv 2019, arXiv:1901.08740.
25. Amirzadeh R., Nazari A., Thiruvady D. Applying Artificial Intelligence in Cryptocurrency Markets: A Survey, *Algorithms*, 2022, vol. 15, no. 11, article 428. DOI: 10.3390/a15110428.
26. Feng L., Tang R., Li X. et al. Deep reinforcement learning based recommendation with explicit user-item interactions modeling. arXiv 2018, arXiv:1810.12027.
27. Liu J., Zhang Y., Wang X. et al. Dynamic Pricing on E-commerce Platform with Deep Reinforcement Learning. arXiv 2019, arXiv:1912.02572.
28. Zheng G., Zhang F., Zheng, Z. et al. DRN: A deep reinforcement learning framework for news recommendation, *In Proceedings of the 2018WorldWideWeb Conference*, Lyon, France, 23–27 April 2018, pp. 167–176.
29. Orlova E. V. Inference of Factors for Labor Productivity Growth Used Randomized Experiment and Statistical Causality, *Mathematics*, 2023, vol. 11, no. 4, article 863. DOI: 10.3390/math11040863.
30. Orlova E. V. Methodology and Statistical Modeling of Social Capital Influence on Employees' Individual Innovativeness in a Company, *Mathematics*, 2022, vol. 1, no. 11, article 1809. DOI: 10.3390/math10111809.
31. Orlova E. V. Innovation in Company Labor Productivity Management: Data Science Methods Application, *Applied System Innovation*, 2021, vol. 4, no. 3, article 68. DOI: 10.3390/asi4030068.
32. Orlova E. V. Design of Personal Trajectories for Employees' Professional Development in the Knowledge Society under Industry 5.0, *Social Sciences*, 2021, vol. 10, no. 11, article 427. DOI: 10.3390/socsci10110427.
33. Orlova E. V. Assessment of the Human Capital of an Enterprise and its Management in the Context of the Digital Transformation of the Economy, *Journal of Applied Economic Research*, 2021, vol. 20, no. 4, pp. 666–700. DOI: 10.15826/vestnik.2021.20.4.026.

Н. М. Резина, вед. программист, nad@imach.uran.ru,
Р. Н. Шакиров, канд. техн. наук, raul@imach.uran.ru
Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова УрО РАН, Екатеринбург

Разработка адаптивного сайта с применением системы управления контентом NetCat 6

Поступила в редакцию 07.09.2023

Принята к публикации 10.10.2023

Рассмотрена задача оптимизации жизненного цикла разработки сайта с применением технологии *po-code* в системе управления контентом NetCat 6. Примером служит каталог восстанавливаемых домов с геоинформационной функцией, созданный в рамках каскадной модели разработки программного обеспечения. Метод разработки состоит в создании интерактивного прототипа сайта дизайнером с последующей доработкой его автоматически построенных кодов программистом. Практическая значимость работы заключается в применении наиболее предсказуемой по времени и стоимости каскадной модели разработки программного обеспечения для создания сайта с нетиповыми функциональными возможностями и адаптивным дизайном. Предложено усовершенствование инструментария NetCat для увеличения эффективности применяемого подхода.

Ключевые слова: система управления контентом, адаптивная верстка, веб-дизайн, веб-программирование, каскадная модель, ГИС, NetCat, CSS3, *po-code*

Для цитирования:

Резина Н. М., Шакиров Р. Н. Разработка адаптивного сайта с применением системы управления контентом NetCat 6 // Программная инженерия. 2023. Том 14, № 12. С. 616—628. DOI: 10.17587/prin.14.616-628.

Введение

Современные потребители контента используют устройства различных форматов: HD-мониторы, планшеты и телефоны. Для приспособления сайтов к экранам всех размеров применяют адаптивную верстку со свободным размещением информационных блоков. Достигается это с помощью атрибутов CSS3 `display: flex` и `inline-flex`, известных как технология CSS *flexible box*¹. Флексбокс используется совместно с запросами *media queries*². Правила `@media` применяют для задания различных видов CSS-дизайна — одномерного для узких экранов и двухмерного для широких экранов.

Несмотря на относительно длительный срок со времени появления адаптивной верстки (стандартизация *flexible box* выполнена в 2009—2018 гг.,

media queries — в 2001—2021 гг.), многие актуальные сайты до сих пор используют мобильные поддомены³ — устаревшее решение, создающее определенные сложности при поисковой оптимизации. Отчасти это связано с ограничениями инструментальных средств веб-мастеринга, которые отстают в своем развитии от процесса стандартизации веба в документах W3C.

До появления соответствующей инструментальной поддержки в системах управления контентом (CMS — *Content Management System*) и веб-редакторах новые возможности CSS вводились путем правки кода. На настоящее время, с появлением инструментария CSS3, встал вопрос о выборе подходящей CMS, призванной рационализировать разработку современных адаптивных сайтов.

Авторы статьи использовали CMS NetCat 6 в качестве единственного средства разработки адаптивного сай-

¹ CSS Flexible Box Layout Module Level 1. W3C Candidate Recommendation. URL: <https://www.w3.org/TR/css-flexbox-1/>

² Media Queries Level 3. W3C Recommendation. URL: <https://www.w3.org/TR/mediaqueries-3/>

³ Лента.ру, дизайн 2021 года. URL: <https://lenta.ru>, мобильная версия <https://m.lenta.ru>

та. Показана возможность создания интерактивного прототипа сайта в режиме no-code (также zero-code, zeroкодинг) и выполнения всего процесса создания сайта в рамках каскадной модели разработки программного обеспечения. При этом разработчики не ограничены созданием типовых для NetCat¹ интернет-магазинов и корпоративных сайтов.

Отметим, что применение NetCat 6 в качестве инструментария no-code ранее не обсуждалось в научной литературе, поскольку прежние редакции этой CMS были ориентированы на применение программистами, а в режиме no-code позволяют создавать только типовые сайты по готовым шаблонам. Проекты на NetCat, более новые, чем [1, 2], в доступной литературе пока не представлены. Другие рассмотренные аналоги, выбранные по сходству решаемых задач и технологий, не укладываются в рамки каскадной модели, либо обладают ограниченными функциональными возможностями (см. разд. 1).

1. Требования к функциональным возможностям сайта и его аналоги

Для разработки выбран вновь создаваемый сайт² с пополняемой базой восстанавливаемых домов (рис. 1, см. третью сторону обложки). Проект является некоммерческим в виде «клуба по интересам» с поддержкой сообщества строителей. Размещение данных на сайте выполняется внешними авторами после регистрации с помощью функции «личный кабинет», просмотр данных свободный с возможностью комментирования материалов. Предусмотрены каталог восстанавливаемых домов и доска объявлений о домах на продажу.

По каждому дому вводится:

- название проекта и краткая характеристика;
- фотографии и видеоматериалы проекта;
- ссылки на социальные сети, личные страницы строителей, хештеги;
- историческое название дома, год постройки и цели реконструкции;
- решаемые задачи проекта в свободной текстовой форме;
- доводы «за» и «против»;
- формализованные характеристики проекта (число и тип этажей, хоз. помещения);
- размеры дома и участка, сведения о надворных постройках;
- кадастровые номера здания и участка;

- характеристики водоснабжения, водоотведения, отопления, электроснабжения;
- адрес и координаты дома для отображения на Яндекс.картах;
- цена, если дом продается, и другие сведения.

Посетителям сайта предоставляется возможность поиска по параметрам. Зарегистрированные авторы могут обмениваться личными сообщениями, а также предлагать на сайт новости и статьи по тематике, которые размещаются после модерирования.

Принцип «базы данных с геоинформационной функцией, в которую заносят сведения авторизованные пользователи и проводят поиск по параметрам внешние посетители» реализован во множестве других веб-проектов — от узкоспециализированных до широко известных. Ближайший по назначению проект 2019 г. — каталог достопримечательностей России [3]. Это информационный сайт с минимально необходимыми функциональными возможностями, в котором используется язык программирования Python, фреймворки Django и Bootstrap. Каталог пополняется централизованно с делением на категории, а для внешних посетителей предусмотрена возможность поиска. О no-code не упоминается, поскольку подходящий для Django инструмент Soft UI Dashboard³ появился только в 2021 г.

Подобные решения MVP (*Minimal Valuable Product*) могут создаваться и уже создаются в режиме no-code. Примером является прототип веб-приложения логистической компании, выполненный в среде Oracle Application Express (Oracle APEX) [4]. Однако в известной научной литературе по no-code пока не представлены завершённые сайты с личным кабинетом, развитыми основными и дополнительными сервисами. Поэтому для детального сравнения по функциональным возможностям выберем результаты, представленные в работе [5], выполненные на языке программирования PHP с применением популярного фреймворка Bootstrap (табл. 1).

Рассматриваемые веб-порталы имеют сходное с точки зрения организации интерфейса и архитектуры базы данных назначение — сбор сведений о домах в России или растениях в Танзании. Имеются непринципиальные с точки зрения реализации отличия в организации сбора сведений; базовые технологии программирования аналогичны с точностью до применяемых вспомогательных библиотек. Основное отличие состоит в том, что ав-

¹ NetCat CMS. URL: <https://netcat.ru>

² Спаси дом. URL: <https://spasidom.com>

³ Django Soft UI Dashboard. URL: <https://appseed.us/product/soft-ui-dashboard/django/>

Сравнение проектов Spasidom и Arusha

Параметры	Spasidom	Arusha
Назначение	Каталог восстанавливаемых домов	Каталог декоративных растений и цветов
Регион	Россия	Аруша, Танзания
Регистрация	После подтверждения по e-mail	После подтверждения администратором
Аутентификация	По логину и зашифрованному паролю или через сеть ВКонтакте	По логину и зашифрованному паролю
Пополнение базы	Выполняется редактором и посетителями сайта после аутентификации	Выполняется администратором сайта, посетители обмениваются заявками
Геоинформация	Местоположение домов	Местоположение садов
Поиск информации	По адресам, названиям, целям и параметрам объекта	Расширенный поиск для легкого извлечения информации
Просмотр информации	На мобильных устройствах и компьютерах	На смартфонах и компьютерах
Общение	Комментарии и персональные сообщения	Комментарии и групповые чаты
Публикации	Новости и статьи	Не предусмотрены
Язык разметки	HTML5	HTML
Стили	CSS3	CSS
CMS/фреймворк	NetCat 6	BOOTSTRAP
Библиотеки JavaScript	jQuery и др.	Angular, Canvas
Препроцессор	PHP 7.4	PHP
База данных	MySQL (MariaDB 5.5)	MySQL
Модель разработки	Каскадная с интерактивным прототипом	Многошаговое эволюционное прототипирование
Метод no-code	Верстка из готовых блоков	Не применяется

торы данной статьи дополнительно пользуются инструментарием no-code и могут сделать вывод о целесообразности его применения (см. разд. 11 и 12).

2. Инструментальные средства no-code для создания адаптивных сайтов

Применяемая CMS NetCat 6 позволяет вести разработку адаптивных сайтов HTML5/CSS3 в визуальном стиле, без необходимости изучать искусственные языки на ее начальных этапах и подключать разнородные инструментальные средства. Выборка из базы ведется с помощью настраиваемых по полям и параметрам блоков. В итоге, с помощью средства веб-мастеринга реализуется не только адаптивная верстка сайта, но и новый подход к созданию его функционала с применением техники no-code.

В Интернете no-code подается как технология, позволяющая неподготовленному человеку за два месяца тренинга стать современным высокоопла-

чиваемым веб-мастером. «Зерокодинг — это способ самостоятельно, за 1 день и с минимальными затратами реализовать то, для чего нужны разработчики и бюджеты в сотни тысяч рублей» — пример того, что можно найти в сети по поисковому запросу «зерокодинг». Данное обещание нуждается в критическом осмыслении, поскольку речь идет об известной с XX века технологии сборки программных систем из готовых блоков, в которой пока поменялись лишь название и базовые языки программирования. Выдающиеся достижения по сборке сайтов в этой технологии могут быть впереди, а пока лучшие результаты получаются при создании типовых сайтов на основе готовых шаблонов.

Профессиональные разработчики интересуются зерокодингом, поскольку он «...быстро и без особых затрат помогает пройти путь от идеи до технического результата за счет встроенных решений...» [6]. Действительно, предлагаемое программное обеспечение предоставляет богатые функцио-

нальные возможности [7], хотя и с определенными ограничениями на техническую поддержку и не вполне ясными перспективами на будущее. Поэтому веб-программисты с осторожностью относятся к новым веяниям визуальной разработки, предпочитая выписывать и оптимизировать код вручную, с клавиатуры. Пусть это занимает и больше времени, однако понятно, как в дальнейшем поддерживать и модернизировать сайт.

Противоречивый опыт применения LCNC (low-code/no-code)¹-платформ от ведущих производителей программного обеспечения (Microsoft, Oracle, Salesforce, Appian, Mendix) обсуждался в обзорной работе [8]. Среди отмеченных проблемных вопросов — недостаточная гибкость предлагаемых решений, невысокая масштабируемость, подверженность взлому и зависимость от производителя платформы. Для усовершенствования инструментальных средств предлагалось задействовать искусственный интеллект и машинное обучение, т. е. речь шла о применении современных нейросетевых технологий. Данное направление признается перспективным в *будущем* для создания прототипов сайтов, в меньшей степени — для доведения их до уровня завершенных веб-проектов.

Не соглашаясь с этим консервативным выводом, авторы изучили существующий на данный момент инструментарий LCNC. При этом важным был практический вопрос — насколько далеко этот инструментарий позволяет уйти от решения типовых задач, не прибегая к избыточному программированию.

3. Обоснование выбора CMS NetCat 6 для создания адаптивного сайта

Интерес авторов в no-code состоит в том, чтобы получить именно инструментальное средство, а не набор готовых решений. Поэтому на данном этапе авторы не пользуются такими известными системами, как Joomla, Drupal или WordPress с тысячами модулей, которые своими широкими функциональными возможностями способны замаскировать креативные слабости методики no-code.

Выбор CMS NetCat обусловлен тем, что эта система имеет открытый исходный код программного ядра, всех модулей и компонентов в сочетании со стабильным интерфейсом программирования (API). Предоставляется платная техническая поддержка по ежегодной подписке. Современная версия NetCat 6 анонсирована в 2019 г. и ориентиро-

рована на применение языка программирования PHP 7 с возможностью использования в старых проектах PHP 5.3—5.6.

CMS NetCat проходит аудит безопасности в компании ONsec. Обновления NetCat в рамках подписки выходят со времени ее появления на рынке, при этом авторы знакомы с примерами регулярного обновления сайтов, созданных в 2003 г., т. е. на протяжении 20 лет. На CMS NetCat разработаны сайты нескольких институтов РАН [9, 11] и многие другие проекты, в частности, сайты конференций² и электронного научного журнала³ “DIAGNOSTICS, RESOURCE AND MECHANICS of materials and structures”.

Отметим, что заявленная в Интернете концепция zeroкоддинга в большей степени ориентируется на простые конструкторы сайтов по типу Tilda [10]. В то время как CMS NetCat, для полноценного применения которой надо знать языки PHP, HTML, SQL, Java Script и CSS, имеет много общего с программистскими фреймворками. Однако именно применение CMS-фреймворка предоставляет возможность исправить существующие недоработки этого инструментария, а не только пользоваться готовыми решениями. Оценке достоинств zeroкоддинга это ни в коей мере не мешает, а наоборот, помогает предметно ответить на интересующий вопрос о потребности в программировании.

4. Сквозные инфоблоки NetCat 6

Отличие NetCat 6 от предыдущих версий этой CMS состоит в применении «сквозных инфоблоков» — прямоугольных элементов, отображаемых по определенным правилам на всех или выбранных страницах сайта. Это исключает этап создания текстового макета дизайна верстальщиком сайта, требующий знания языков гипертекстовой разметки и программирования скриптов [11].

Сквозные инфоблоки NetCat 6 относятся к трем основным категориям: блоки общего назначения, информационные блоки и функциональные блоки интернет-магазина. Представлено около 70 видов блоков и 20 видов товаров, список которых может пополняться:

- базовые блоки — текст, заголовок, изображение, файл, HTML-код;
- специализированные блоки — факты, таблица, цитаты, события и др.
- контакты, адреса, магазины;

¹ SAP. URL: <https://www.sap.com/cis/products/technology-platform/low-code/what-is-low-code-no-code.html>

² URL: <https://www.imach.uran.ru/conf2022/>

³ URL: <https://dream-journal.org>

- мероприятия, новости и статьи, проекты, клиенты, услуги;
- конструктор форм для заявок;
- навигация — логотип, кнопки, меню, «хлебные крошки», скрытый слой;
- модальные формы авторизации/регистрации, корзина, избранное и сравнения;
- фильтры объектов блока, товаров, строка и результаты поиска;
- товары интернет-магазина, агрегатор товаров и прайс-лист;
- контейнеры для вложенных блоков и контентная область.

Все виды блоков настраиваются по внешнему виду и по необходимым функциональным возможностям, чтобы сократить потребность в ручной правке их кода. При этом программирующий разработчик может добавить к инфоблокам собственные параметры и закодировать их обработку. Компоновка блоков выполняется в интерфейсе редактора и конструктора сайта с помощью управля-

ющих элементов, которые появляются при наведении мыши (рис. 2, см. третью сторону обложки).

Оформление CSS задается для списка отображаемых в блоке объектов и отдельных объектов в списке (рис. 3). При этом могут задаваться ограничения на ширину блока и страницы (точки перехода @media), в зависимости от которых применяется тот или иной набор параметров CSS. Применение точек перехода приводит к увеличению объема файла CSS, поэтому целесообразно, если это возможно, подстроить блоки под ширину экрана с помощью флексбокса.

Предусмотрены следующие компоновки блоков и объектов блока:

- классический display: block с ограничением ширины и выравниванием;
- вертикальный и горизонтальный flexbox со всеми атрибутами;
- плитка с фиксированным числом элементов в строке;
- слайдеры различных видов;

Рис. 3. Настройка параметров CSS в CMS NetCat 6

- колонки (columns).

Блоки могут отображаться в зависимости от вида веб-страницы (список/выборка объектов, полный вывод объекта, добавление/редактирование объекта) и применяемых в ней компонентов (см. разд. 5). Блоки объединяются в иерархические контейнеры с теми же вариантами компоновки и дополнительным вариантом «аккордеон», при котором показываемые блоки выбирает посетитель сайта.

Разработчик может вручную включать и выключать контейнеры и содержащиеся в них блоки, а также блокировать изменение контейнеров и блоков, разработка которых завершена. Блоки могут отображать собственные объекты или быть «зеркальными», отображающими по выборке объекты из других блоков, дополняя иерархию данных перекрестными ссылками.

Новые возможности NetCat 6 позволяют реализовать многие замыслы в области динамического оформления страниц сайта без написания программного и НТМ-кода.

5. Компоненты, модули и контентная область NetCat

Контентная область — это основная часть сайта. Ей соответствует дерево разделов сайта (слева на рис. 4, см. четвертую сторону обложки), к которым подключаются компоненты для отображения данных. Разработчики NetCat, как правило, создают компоненты под свои требования, частично пользуясь стандартными компонентами.

Понятие контентной области важно, несмотря на то, что динамический контент может отображаться не только в ней, но и в любом месте на сайте. Именно к контентной области привязываются условия отображения сквозных инфоблоков. Благодаря этому веб-мастер ориентируется в создаваемой им визуальной структуре адаптивного сайта, которая видоизменяется в зависимости от размеров окна браузера и выводимой в нем информации.

Работа компонентов NetCat поддерживается модулями, в числе которых календарь, комментарии, облако тегов, форум, подписки и рассылки, поиск по сайту, магазин, конструктор

тор лендингов, личный кабинет и др. От набора модулей зависит редакция системы от NetCat Standard до NetCat Extra и стоимость технической поддержки.

6. Интернет-магазин в редакции NetCat Business

Для создания каталога домов была выбрана редакция NetCat Business. Это средняя редакция с типовыми сайтами интернет-магазинов, в дополнение к доступным в базовой редакции системы корпоративным сайтам (рис. 5).

Готовые сайты CMS NetCat 6 интересны вариантами адаптивного дизайна, который может быть приспособлен для различных целей, а не только указанных в названии сайта. Среди них авторы выбрали «Универсальный магазин» с каталогом товаров, выполненным в адаптивном стиле. Карточка товара модифицирована нами под карточку дома, при этом функция купли-продажи исключе-

Добавить сайт

Категория **любая** универсальные дом и уют ремонт техника красота и здоровье услуги

Интернет-магазины

- Интернет-магазин домашней еды
- Интернет-магазин доставки продуктов
- Минималистичный интернет-магазин
- Универсальный магазин №1
- Универсальный магазин №2

Корпоративные сайты

- Дизайн интерьеров
- Монопродуктовый сайт
- Персональный сайт
- Сайт адвокатской компании
- Сайт клининговой компании
- Сайт компании по организации мероприятий
- Сайт компании по ремонту помещений
- Сайт компании по ремонту техники
- Сайт курьерской службы
- Сайт мастера на час
- Сайт медицинской клиники
- Сайт отеля или гостиницы
- Сайт ресторана
- Сайт салона красоты
- Сайт услуг по дистанционному обучению
- Сайт-портфолио
- Универсальный корпоративный сайт

Рис. 5. Добавление сайта в NetCat 6

на за ненадобностью путем отключения лишних полей и комментирования программного кода по их отображению. Поиск по сайту и выборка из каталога организуются с помощью штатных сквозных инфоблоков NetCat (см. разд. 4).

Принятое решение позволило обойтись без создания для каталога домов специального программного кода, ограничившись добавлением новых полей в базу данных и организацией их отображения на страницах сайта (см. разд. 8). Потребовалось также в «копирайтерском» стиле Copy-Paste перенести из вспомогательного компонента «Адреса, магазины» код для отображения местоположения объектов на Яндекс.картах, поскольку в товарах магазина NetCat географическая привязка не предусмотрена.

7. Разработка структуры сайта в CMS NetCat 6

Основными разделами сайта являются каталоги домов и личный кабинет строителя (рис. 6). Каталоги открыты для общего доступа, а доступ в личный кабинет предоставляется после регистрации на сайте или авторизации через социальную сеть ВКонтакте. Функциональные средства интернет-магазина позволяют создать каталог любого уровня вложенности, однако разработчикам хватило одноуровневого деления.

Для вывода данных к разделу подключаются стандартные и вновь создаваемые компоненты. При подключении компонента к разделу можно выбрать шаблон для его отображения, задать предусмотренные в нем параметры и стили CSS для отображения объектов в списке и на отдельной странице (как на рис. 3).

Эти возможности используются для адаптивной верстки и выбора требуемых функциональных возможностей. Например, вспомогательные разделы новостей и статей используют один и тот же компонент «Новости и статьи», но для раздела новостей используется «Альтернативный шаблон новости», а в разделе статей используется «Альтернативный шаблон статьи». Последние новости и статьи отображаются в общем списке на главной странице сайта,

Каталог домов	Новости	Личный кабинет
- Деревянные дома	Статьи	- Мои заказы
- Каменные дома	Блоги (скрытый)	- Инструкция
- Каркасные дома	О сайте	- Мой профиль
Дома на продажу		- Сменить пароль
- Деревянные дома		- Переписка
- Каменные дома		- Друзья
- Каркасные дома		

Рис. 6. Структура сайта spasidom.com

где для них используется универсальный шаблон «текст справа/слева от картинки». Визуальными стилями задается компоновка «плитка» с зависящим от ширины экрана числом объектов в строке.

Кроме отображения своих данных, к разделу могут быть подключены компоненты для выборки данных из других разделов сайта в так называемых зеркальных инфоблоках. Например, для отображения всех домов, новостей и статей пользователя к скрытому разделу «Блоги» подключены компоненты «Дом» и «Новости и статьи». Для каждого раздела и его подключенных компонентов выбираются категории посетителей сайта, которым предоставляются права просмотра, добавления, изменения и удаления содержимого.

8. Разработка компонентов в CMS NetCat 6

Компоненты создаются и модифицируются дизайнером сайта путем задания полей встроенных типов (табл. 2). При добавлении поля автоматически добавляются в структуру базы данных, а также в ее индексы, если отмечаются для поиска. Запросы к базе данных строятся автоматически, при необходимости они могут быть дополнены и переопределены.

В каталоге домов к модифицированному стандартному компоненту «Товар» добавлены поля для характеристик дома и участка, относящиеся к типам строка, число, текстовый блок, логическая переменная, а также список и множественный выбор с вариантами из классификаторов. Форма ввода данных (рис. 7) построена автоматически, с учетом задаваемых для полей форматов.

Таблица 2

Встроенные типы полей NetCat 6

Тип NetCat	Реализация в MySQL
Строка	Поле CHAR(255)
Целое число	Поле INT
Текстовый блок	Поле LONGTEXT
Список	Поле INT для LEFT JOIN ... WHERE
Логическая переменная	Поле TINYINT со значениями 0/1
Файл	Загружаемый файл
Число с плавающей запятой	Поле DOUBLE
Дата и время	Поле DATETIME
Связь с другим объектом	Поле INT
Множественный выбор	Перечень индексов в поле TEXT
Множественная загрузка	Загружаемые файлы

Деревянные дома ⊗

Основное Дополнительно

Статус земельного участка:

Кадастровый номер участка:

Кадастровый номер здания:

Водоснабжение:

Водоотведение:

Отопление:

- Центральное
- Автономное газовое
- Автономное дизельное
- Котел на твердом топливе
- Солнечный нагреватель
- Электрический котел
- Геотермальное
- Печное

Электроснабжение:

- Централизованное
- Автономное (газовый генератор)

Рис. 7. Фрагмент формы ввода данных

Так дизайнер задает функциональные возможности основного компонента сайта, названного «Дом». Делать это он может вместе с заказчиком, чтобы оперативно выполнить его пожелания. А результатом работы становится интерактивный прототип сайта, уже готовый к первоначальному заполнению контент-менеджером. Непрограммирующий дизайнер создает базу данных с простыми взаимосвязями и выборками. Такое решение создает дополнительные возможности, поскольку ориентирует на пополнение базы внешними авторами — неспециалистами.

Полезной особенностью стандартного компонента «Товар» является возможность автоматического отображения характеристик объекта на странице сайта, при условии именовании соответствующих полей как `Property_имя`. И только для реализации более эстетичного отображения данных на сайте дизайнер обращается к веб-

программисту, поскольку NetCat 6 не позволяет свободно размещать поля компонента в визуальном редакторе.

В общем случае для отображения полей NetCat использует вставки PHP кода вида `<?=$f_поле?>` и более сложные, с вызовом методов API. При ручной вставке поля надо также выписывать обрамляющий HTML/JS-код и задавать стили, что требует определенных затрат времени на программирование и отладку. Разработчики пользовались этими возможностями, чтобы разнообразить отображение полей на широких экранах, например, разместить рядом блоки «за» и «против» и подготовить отображение полей для Яндекс.карт, поскольку исходный код показывал только название и адрес дома.

Подчеркнем, что основные функции компонента каталога «Дом» были созданы в визуальном стиле. При этом неожиданно большой объем программирования пришелся на доработку упомянутых в разд. 7 шаблонов новостей и статей, которые реализуют дополнительную функцию сайта «Спаси дом».

9. Оптимизация кода адаптивного сайта в CMS NetCat 6

Код CMS NetCat 6 оптимизирует производительность адаптивных сайтов путем создания файла `components.css`, который строится автоматически по мере создания CSS-описаний отдельных компонентов и блоков. Объем этого файла в нашем проекте составляет менее половины Мбайта, при этом он загружается 1 раз для всех страниц сайта и хранится в кеше браузера. Поэтому производительность адаптивного сайта на компьютере клиента сравнима с производительностью сайтов, созданных в табличной верстке.

Для проверки накладных расходов дизайнера NetCat позволяет загрузить страницу без оформления, т. е. без сквозных инфоблоков и стилей CSS, с параметром `isNaked=1`. С помощью инструмента DevTools браузера Google Chrome определялось полное время загрузки каталога домов на компьютере с 4-ядерным процессором Core 2 Quad 8200 и 4 Гбайтами оперативной памяти DDR2. В медианном тесте время загрузки составило 0,839 с

без оформления страницы и 1,49 с с оформлением страницы, т. е. накладные расходы адаптивного дизайна составили 78 % сверх времени загрузки и отображения данных.

Вопрос большого объема кода CSS3 является общим для многих сайтов, выполненных в этой новой технологии. Понятно, что ручная оптимизация кода сайта позволяет получить наилучший результат, и она может быть выполнена штатным образом в CMS NetCat, если это потребуется. Однако создавая сайт в методике no-code, нельзя полагаться на эту квалификацию разработчика — поэтому производительность обеспечивается автоматически средствами рациональной генерации кода. В свое время этот путь прошли традиционные языки программирования, которым пришлось преодолеть инерцию кодирования на языке ассемблера и даже в машинных кодах.

Что касается производительности среды разработчика, то на упомянутом выше компьютере вызов окна редактора CSS занимает 2,7 с, что связано с необходимостью обработки большого объема данных. Применение более производительного компьютера сделает работу веб-мастера более продуктивной.

По вопросу о скорости выборки данных известно, что организация базы данных NetCat 6 (см. табл. 2) не отличается от предыдущих версий NetCat, т. е. какого-либо падения ее производительности от новаций no-code ожидать не следует. Наоборот, при использовании no-code база данных получается сравнительно простой по структуре, что способствует оптимизации запросов SQL-сервером — это подтверждается нагрузочным тестом магазина NetCat, на основе которого создан каталог домов¹. Разветвленные базы данных, при необходимости, могут создаваться путем переопределения SQL-запросов программистом. Что касается нагрузки адаптивного дизайна, то она возлагается на браузеры посетителей и масштабируется пропорционально росту их заходов.

10. Результаты разработки сайта

Сайт работает на хостинге PHP 7.4/MariaDB 5.5 и находится в стадии первоначального заполнения каталога домов. Он оптимизирован для поисковых систем путем формирования заголовков (Title), описаний (Description) и внутренней перелинковки страниц. Запланировано продвижение сайта в социальных сетях для формирования со-

¹ Нагрузочное тестирование NetCat. URL: <https://netcat.ru/about/ncblog/2017/03/29/performance-2017.html>

общества строителей, к которому уже сейчас может присоединиться любой читатель нашей статьи.

Вдохновители сайта — блогер Андрей Кадычанский и его супруга Елена живут и работают в Судроме (Архангельская область). География сайта (рис. 8, см. четвертую сторону обложки) уже включает в себя несколько областей России.

11. Опыт применения техники no-code в CMS NetCat 6

Необходимость адаптивных сайтов уже не является предметом обсуждения, но техника no-code лишь один из известных способов их создания. На данном этапе своего развития CMS NetCat обеспечивает полноценный зерокодинг при создании адаптивного дизайна сайта, но не при создании компонентов для работы с данными. Это затруднение удалось обойти за счет применения модифицированного каталога товаров интернет-магазина для создания каталога домов. Благодаря такому решению разработка функционального многопользовательского сайта завершена с незначительным по объему программированием low-code — выполнена модификация существующего программного кода объемом около 2000 строк на HTML/CSS/PHP. Такой небольшой объем программирования позволяет квалифицировать нашу разработку как преимущественно дизайнерский, а не программистский проект.

Конструктор NetCat 6 строит адаптивный сайт в иерархии **контейнер — блок — список объектов блока**. Под ней находятся адаптивные компоненты, отображающие поля объектов из базы данных. Удобно иметь банк настраиваемых адаптивных компонентов для различных применений. В частности, разработчиков привлекла возможность добавления к штатному компоненту «Товар» дополнительных характеристик объекта без правки кода компонента. Вообще, функциональные механизмы интернет-магазина являются наиболее проработанными в NetCat 6. Однако следует отметить, что вспомогательные компоненты не всегда отличаются такой же гибкостью — разработчики сайтов обычно используют их как заготовку для создания собственного программного кода. Поэтому на будущее хотелось бы иметь в составе NetCat механизм **создания адаптивных компонентов из блоков**, подобный тому, что уже предлагается в NetCat 6 для оформления дизайна сайта.

Настраиваемые сайты-шаблоны NetCat помогают быстрее освоить CMS и сокращают объем ручной работы. Сайт может быть создан всего за несколько дней труда каждого вовлеченного спе-

циалиста — дизайнера, контент-менеджера и программиста. Но осложняющим фактором стала недостаточность документации по версии NetCat 6, которая на то время находилась в фазе активной разработки. Поэтому в процессе создания сайта было выполнено 24 обращения в техническую поддержку NetCat. Позже, на основе сделанных наборок и полученных инструкций, авторы за 10 дней без программирования и технической поддержки построили небольшой частный сайт-магазин¹.

Обнаруженные недоработки инструментальных средств *no-code* служат доводом в пользу продолжения использования лучше отлаженных фреймворков. По мнению авторов, пусть объем кодирования на многих языках вырастает многократно, однако часть времени будет сэкономлена на решении технических вопросов. В руках опытного программиста легкий фреймворк позволяет сделать все то, что создается с помощью гораздо более сложного инструмента CMS. Верно и обратное: CMS NetCat с API фреймворка функционально покрывает традиционное веб-программирование.

В итоге можно заключить, что CMS NetCat 6 еще не вполне обеспечивает все возможности *no-code*, какими они станут в будущем, однако предоставляет возможность почувствовать *вкус зерокодинга*.

12. Место методики *no-code* в модели управления веб-проектом

Замена программирования «непрограммированием», как мы понимаем, пока является не более чем рекламой нынешней техники *no-code*, для усовершенствования которой предлагается применить методы AI & ML [8]. Однако это в будущем, а на настоящее время основное предназначение *no-code* может состоять в рационализации процесса работы над веб-проектом, в котором участвуют специалисты различного профиля.

Многие модели жизненного цикла программного обеспечения основаны на итеративном повторении различных этапов разработки — это спиральная, гибкие (Agile) и другие методики. Множественность итеративных методик обусловлена необходимостью преодолеть их общий недостаток — неизвестное на время начала проекта число итераций, в ходе которых уточняются требования, реализуются дополнительные и переделываются ранее реализованные функции.

¹ Сайт Наталии Лалетиной (г. Огре, Латвия). URL: <https://nlaletina.com>

Посмотрим, что предлагает в этом плане техника *no-code*. Жизненный цикл сайта «Спаси дом» состоит из пяти последовательно выполняемых этапов.

1. **Задание** — формулирование требований к сайту, выбор инструментария и заготовки сайта (см. разд. 2, 4 и 6).

2. **Прототипирование** — создание интерфейса, структуры и базы данных сайта дизайнером в методике *no-code* и первоначальное заполнение сайта контент-менеджером (см. разд. 7 и 8).

3. **Программирование** — работа программиста над реализацией нестандартного функционала и оптимизацией сайта (см. разд. 8 и 9).

4. **Тестирование** — подготовка и проведение приемочных испытаний (см. разд. 10).

5. **Поддержка** — продвижение сайта в поисковых системах и социальных сетях.

Получившаяся каскадная модель с интерактивным прототипом отводит ведущую роль в разработке веб-дизайнеру. Вместо изготовления макетов, он создает работающий образец сайта, который передается программисту для отладки и реализации нестандартных функций. С применением инструментария *no-code* функционально сложный сайт создается в «два подхода», сначала дизайнером, затем программистом. А соотношение *zero coding* и *coding* в этой методике зависит от нестандартности решаемой задачи.

Формально, применяемая модель может считаться частным случаем эволюционного прототипирования, но ограничивается *одним* прототипом, чтобы не уводить от классической каскадной модели в сторону итеративных методик. Заметим, что авторы работы-аналога [5] использовали многошаговое эволюционное прототипирование — это еще не запутанная спиральная модель, но уже не наиболее простая каскадная.

Преимущества каскадной модели — предсказуемость по времени и стоимости разработки, и ее известные недостатки упоминаются в работе [13], где обсуждается архитектура MVC (*Model-View-Controller*) и каскадная модель, расширенная опцией возврата от этапа тестирования (*testing*) к этапу реализации (*implementation*), рис. 9. Упор при этом делается на всестороннюю проработку интерфейса, алгоритмов базы данных, концепции и структуры сайта на этапе его проектирования (*design*), чтобы попытаться избежать не концептуального возврата на предыдущий этап. В качестве примера приводится простое учебное приложение, построенное на PHP-фреймворке Laravel.

Опыт работ [5, 13] и других проектов показывает, что при создании сайта программистами ка-

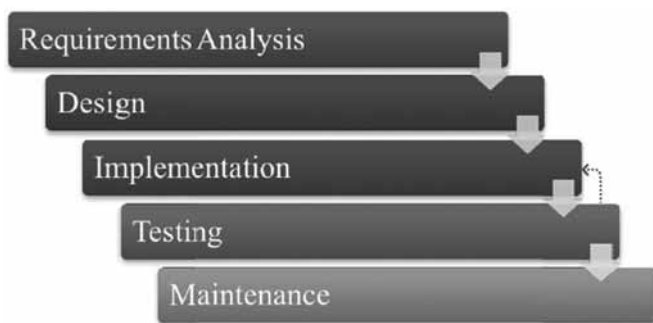


Рис. 9. Каскадная модель разработки сайта с возвратом [13]

каскадную модель приходится дополнять возвратами и циклами, переходя к итеративным методикам. Техническое задание для программистов не формулируется сразу в полном и окончательном виде, как это требуется в каскадной модели. Заказчик выдает предварительное задание, которое потом будет многократно уточняться и, возможно, даже перерабатываться.

Известный метод преодоления неполноты задания состоит в том, чтобы найти способ привлечь заказчика (будущего пользователя) сайта к процессу разработки сайта [14]. Например, организовать его совместную работу с опытным дизайнером, который верстает сайт из блоков — тогда качественное техническое задание возникнет в ходе создания прототипа сайта, и в дальнейшем потребуются лишь небольшие правки и дополнения на этапах тестирования и поддержки. «Спиральные сложности» преодолеваются в работе дизайнера сайта с заказчиком сайта, где, конечно, могут быть доработки и переделки ранее сделанного, но они проводятся в рамках одного этапа разработки и не видны на уровне управления проектом в целом.

Наглядно эффект применения no-code виден на рис. 9, где в соответствии с [13] проведена пунктирная стрелка возврата на этап реализации (*implementation*). В проекте «Спаси дом» этот возврат исключен из модели управления проектом, что подтвердило практическую ценность применения техники no-code. Исключение данного возврата упростило управление проектом до *не улучшаемого предела*.

Таким образом, практический эффект от применения техники no-code может состоять в расширении области применения классической каскадной модели. Отметим также, что применение CMS с API фреймворка и поддержкой no-code придает смысл утверждению о возможности стать профессиональным веб-разработчиком после непродолжительного тренинга (см. разд. 3). Начинаящий веб-дизайнер, успешно освоивший сборку сайтов из готовых блоков, может быть включен в команду

для выполнения несложных заданий по прототипированию сайтов и веб-сервисов. При этом он будет применять тот же инструментарий, что и профессиональные разработчики, что обеспечит плавный переход от создаваемых им прототипов к готовым продуктам.

Авторы предполагают, что проверенный ими подход может быть обобщен для различных CMS с функциями фреймворка, например, Drupal, о котором упоминается¹, как о возможном инструменте no-code. Однако вопрос о применимости каждой конкретной CMS для no-code нуждается в проведении отдельного исследования, а пока доступны аналитика и общая статистика по упоминаниям в сообществе [15, 16].

CMS NetCat применяется авторами в «долгоиграющих» веб-проектах, где существенно наличие долгосрочной технической поддержки. Как показано, в NetCat 6 решаются отмеченные в обзоре [8] вопросы гибкости решений, защищенности и производительности сайта (см. разд. 4, 8, 9). Однако следует признать, что импортные CMS обладают неоспоримым преимуществом по разнообразию готовых функциональных средств, благодаря несопоставимому бюджету на их развитие и поддержке сообщества Open Source. Выбор отечественного или импортного инструментария каждый веб-разработчик делает, исходя из своих приоритетов, и авторы надеются, что этот выбор и в дальнейшем будет совершенно свободным.

Заключение

Выделены технологические составляющие современного веб-проекта — адаптивная верстка сайта, методика создания интерактивного прототипа сайта в технике no-code и каскадная модель разработки на основе CMS-фреймворка. Применение этих подходов позволяет сократить объем программирования и упростить управление проектом.

Авторы выражают благодарность канд. техн. наук Юлии Викторовне Худорожковой и рецензентам журнала «Программная инженерия» за обсуждение и корректуру текста.

Список литературы

1. **Финогенов В. С.** Разработка интернет-магазина для компании автозапчастей // Вестник Совета молодых ученых и специалистов Челябинской области. 2017. Том 4, № 4 (19). С. 56—60.

¹ Drupal as a no-code / low-code tool. URL: <https://www.agiledrop.com/blog/drupal-no-code-low-code-tool>

2. Кириченко Д. В., Бериева М. А., Серый Н. А. и др. Использование CMS NetCat для разработки корпоративного сайта // Актуальные проблемы современной науки: сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. Челябинск, 2017. С. 96—101.
3. Нестерова А. А., Николашин В. О., Смолев А. М., Даниленко А. Н. Разработка информационного сайта-каталога о достопримечательностях России // Междунар. мол. науч. конф. «XV королевские чтения», посвященная 100-летию со дня рождения Д. И. Козлова: тезисы докладов. 2019. Том 1. С. 528—529.
4. Строгонов П. П. Разработка прототипа клиентского приложения для «Сибирской логистической компании» в среде разработки APEX // Студенческая наука — взгляд в будущее: Материалы XVI Всеросс. студ. науч. конф. Красноярск, 2021. Ч. 3. С. 274—275.
5. Asiiwwe K. P., Machuve D., Dida M. A. A Web-based Portal for Ornamental Plants and Flowers in Arusha City, Tanzania // I. J. Information Technology and Computer Science. 2020. Vol. 12, No. 2. P. 32—41. DOI: 10.5815/ijitcs.2020.02.04.
6. Алиев Д. Ф., Щербаков А. Ю. О практических подходах к созданию доверенных защищенных цифровых платформ // Вестник современных цифровых технологий. 2022. № 13. С. 4—12.
7. Приходько А. П. Анализ и выбор инструментария для разработки веб-сайта // Актуальные научные исследования в современном мире. 2020. № 7-1 (63). С. 124—127.
8. Zhaohang Yan. The Impacts of Low/No-Code Development on Digital Transformation and Software Development // arXiv, 2021. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2112/2112.14073.pdf>.
9. Резина Н. М. Шаблон сайта академической организации на базе системы управления контентом NetCat: Свид. регистр. ПрЭВМ № 2016663248. Рос. Федерация, 2018.
10. Ефанова Н. В., Иванова Е. А. Технологии zeroкоддинга как элемент формирования цифровых компетенций // Цифровые технологии в аграрном образовании: Сб. статей по матер. уч.-метод. конф. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, 2022. С. 130—131.
11. Резина Н. М., Шакиров Р. Н. Разработка сайтов для институтов Академии Наук на системе управления контентом NetCat // Программные продукты и системы. 2011. № 2. С. 7—13.
12. Мовсисян М. А., Вершинин Е. В. Сравнительный анализ гибкого и традиционного методов веб-разработки // Наукоёмкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Матер. Всерос. науч.-техн. конф., Калуга. 2022. С. 121—126.
13. Hardyanto W., Purwinarko A., Sujito F. et al. Applying an MVC Framework for The System Development Life Cycle with Waterfall Model Extended // Journal of Physics: Conference Series 824. 2017. Article 012007. DOI: 10.1088/1742-6596/824/1/012007.
14. Belikova S. A., Rogozin Y. I. Designing a Conceptual Model of The Process of User Interface Construction // Программная инженерия. 2022. Том 13, № 10. С. 508—514. DOI: 10.17587/prin.13.508-514.
15. Летунов А. С., Докучаев В. А. W-code платформы, как инструмент разработки программного обеспечения // Телекоммуникации и информационные технологии. 2019. Том 6, № 2. С. 123—128.
16. Петрова Т. О., Ильина О. П. Анализ рынка low-code/ no-code для поиска преимуществ и сфер применения // Интернет-наука. 2022. № 20-2 (243). С. 23—30.

Development of Adaptive Site based on NetCat 6 Content Management System

N. M. Rezina, Leading Programmer, nad@imach.uran.ru,
R. N. Shakirov, PhD, raul@imach.uran.ru,
Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg, 620049, Russian Federation

Corresponding author:

Raul N. Shakirov, PhD, Institute of Engineering Science,
Ekaterinburg, 620049, Russian Federation
E-mail: raul@imach.uran.ru

Received on September 07, 2023

Accepted on October 10, 2023

Content management system NetCat 6 provides the development of adaptive websites with CSS3 layout for desktops and mobile devices. Websites are created in no-code mode based on ready-made components; a programming developer is provided with an API for creating components with new functionality.

The possibilities provided by NetCat 6 are discussed on the example of a catalog of reconstructed houses with a geoinformation function. The development method consists in creating an interactive prototype of the site by a designer, with subsequent refinement of its automatically generated codes by a programmer. The site was created within the waterfall model of software development that turns project management to an unimprovable simplicity.

The practical significance of the work lies in the application of the most predictable software development model in terms of time and cost to create a site with non-standard functionality and adaptive design. An improvement of the NetCat toolkit is proposed to increase the efficiency of the proposed approach.

Keywords: Content Managements System, adaptive layout, web design, web programming, waterfall model, GIS, NetCat, CSS3, no-code

For citation:

Rezina N. M., Shakirov R. N., Development of Adaptive Site based on NetCat Content Management System, *Programmnyaya Ingeneria*, 2023, vol. 14, no. 12, pp. 616–628. DOI: 10.17587/prin.14.616-628.

References

1. **Finogenov V. S.** Development of Online Store for The Company of Auto Parts, *Vestnik Soveta molodykh uchyonykh i spetsialistov Chelyabinskoy oblasti*, 2017, vol. 4, no. 4 (19), pp. 56–60 (in Russian).
2. **Kirichenko D. V., Berieva M. A., Seryy N. A., Danilova V. V., Kulukova N. N.** Ispol'zovanie CMS NetCat dlya razrabotki korporativnogo sayta, *Aktual'nye problemy sovremennoy nauki: Proc. Int. Sci.-Pract. Conf.*, Chelyabinsk, 2017, pp. 96–101 (in Russian).
3. **Nesterova A. A., Nikolashin V. O., Smolev A. M., Danilenko A. N.** Razrabotka informatsionnogo sayta-kataloga o dostoprimechatel'nostyakh Rossii, *Mezhdunarodnaya molodyozhnaya nauchnaya konferentsiya "XV korolyovskie chteniya", posvyashchennaya 100-letiyu so dnya rozhdeniya D. I. Kozlova: tezisy dokladov*, 2019, vol. 1, pp. 528–529 (in Russian).
4. **Strogonov P. P.** Development of a Client Application Prototype for The Siberian Logistics Company in The Apex Development Environment, *Studencheskaya nauka — vzglyad v budushchee: Proc. XVI Sci. Conf.*, Krasnoyarsk, 2021, vol. 3, pp. 274–275 (in Russian).
5. **Asiimwe K. P., Machuve D. and Dida M. A.** A Web-based Portal for Ornamental Plants and Flowers in Arusha City, Tanzania, *I. J. Information Technology and Computer Science*, 2020, vol. 12, no. 2, pp. 32–41. DOI: 10.5815/ijitcs.2020.02.04.
6. **Aliev D. F., Shcherbakov A. Yu.** On Practical Approaches to Creating Trusted Secure Digital Platforms, *Vestnik sovremennykh tsifrovyykh tekhnologiy*, 2022, no. 13, pp. 4–12 (in Russian).
7. **Prikhodko A. P.** Analysis and Selection of Tools for Website Development, *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennoy mire*, 2020, no. 7-1 (63), pp. 124–127 (in Russian).
8. **Zhaohang Yan.** The Impacts of Low/No-Code Development on Digital Transformation and Software Development, arXiv, 2021.
9. **Rezina N. M.** Shablon sayta akademicheskoy organizatsii na baze sistemy upravleniya kontentom NetCat: Patent RF, no. 2016663248, 2018 (in Russian).
10. **Efanova N. V., Ivanova E. A.** Zero-coding technologies as an element of the formation of digital competencies, *Tsifrovyye tekhnologii v agrarnom obrazovanii: Proc. Ed.-Meth. Conf.*, Krasnodar: Kubanskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet imeni I. T. Trubilina, 2022, pp. 130–131 (in Russian).
11. **Rezina N. M., Shakirov R. N.** Development of Academic Sites on Base of CMS NetCat, *Programmnyye produkty i sistemy*, 2011, no. 2, pp. 7–13 (in Russian).
12. **Movsisyan M. A., Vershinin E. V.** Sravnitel'nyy analiz gibkogo i traditsionnogo metodov veb-razrabotki, *Naukoemkie tekhnologii v priboro- i mashinostroenii i razvitie innovatsionnoy deyatelnosti v vuze: Proc. Sci.-Tech Conf.*, Kaluga, 2022, pp. 121–126 (in Russian).
13. **Hardyanto W., Purwinarko A., Sujito F.** et al. Applying an MVC Framework for The System Development Life Cycle with Waterfall Model Extended, *Journal of Physics: Conference Series* 824, 2017, article 012007. DOI: 10.1088/1742-6596/824/1/012007.
14. **Belikova S. A., Rogozin Y. I.** Designing a Conceptual Model of The Process of User Interface Construction, *Programmnyaya Ingeneria*, 2022, vol. 13, no. 10, pp. 508–514. DOI: 10.17587/prin.13.508-514.
15. **Letunov A. S., Dokuchaev V. A.** Low-Code Development Platform as a Tool for Software Development, *Telekommunikatsii i informatsionnyye tekhnologii*, 2019, vol. 6, no. 2, pp. 123–128 (in Russian).
16. **Petrova T. O., Il'ina O. P.** Analiz rynka low-code/no-code dlya poiska preimushchestv i sfer primeneniya, *Internauka*, 2022, no. 20-2 (243), pp. 23–30 (in Russian).

ООО "Издательство "Новые технологии". 107076, Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23, стр. 2
Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *А. В. Чугунова*.

Сдано в набор 18.10.2023 г. Подписано в печать 28.11.2023 г. Формат 60×88 1/8. Заказ П11223
Цена свободная.

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунки к статье Н. М. Резиной, Р. Н. Шакирова
«РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОГО САЙТА С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ КОНТЕНТОМ NETCAT 6»

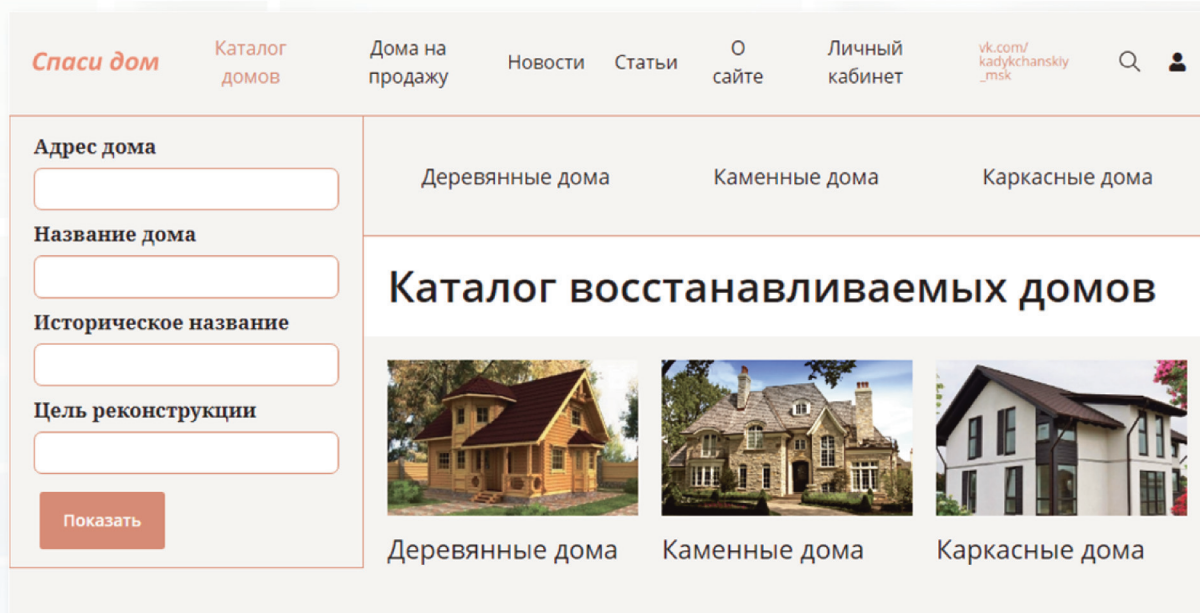


Рис. 1. Интерфейс сайта spasiidom.com (Front End)

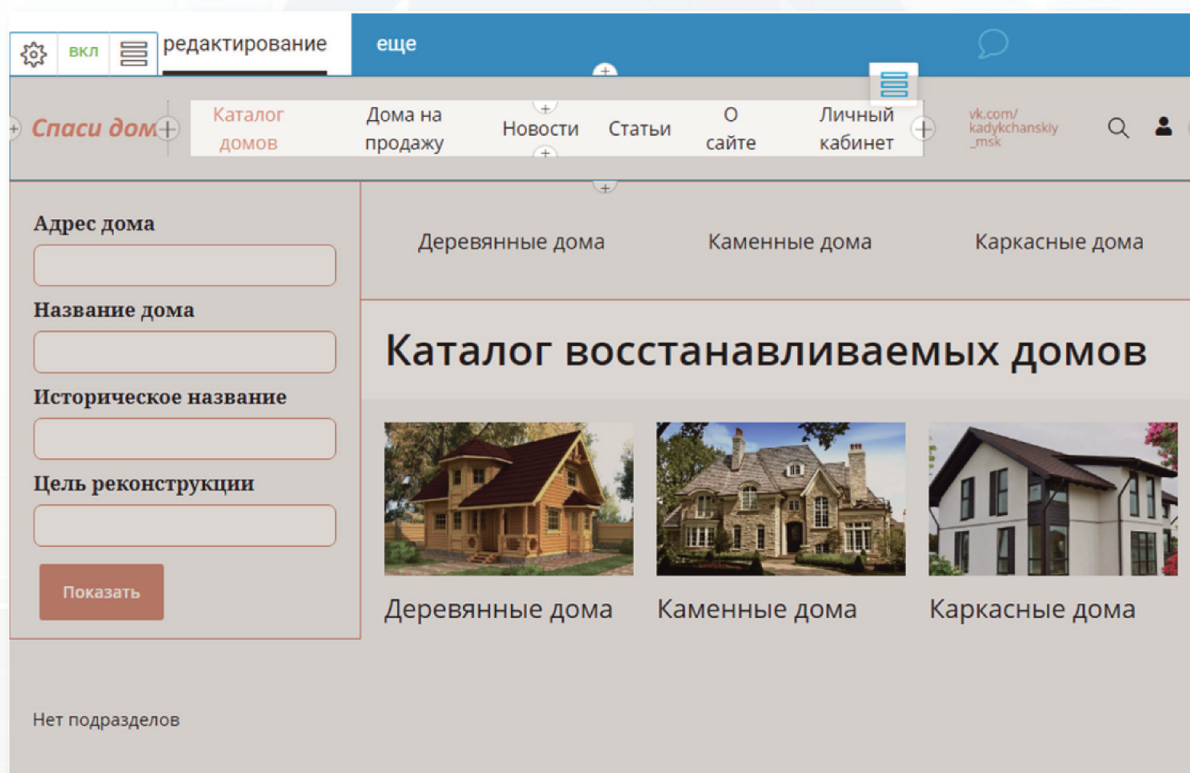


Рис. 2. Интерфейс конструктора сайта (Back End)

Рисунки к статье Н. М. Резиной, Р. Н. Шакирова
«РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОГО САЙТА С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ КОНТЕНТОМ NETCAT 6»

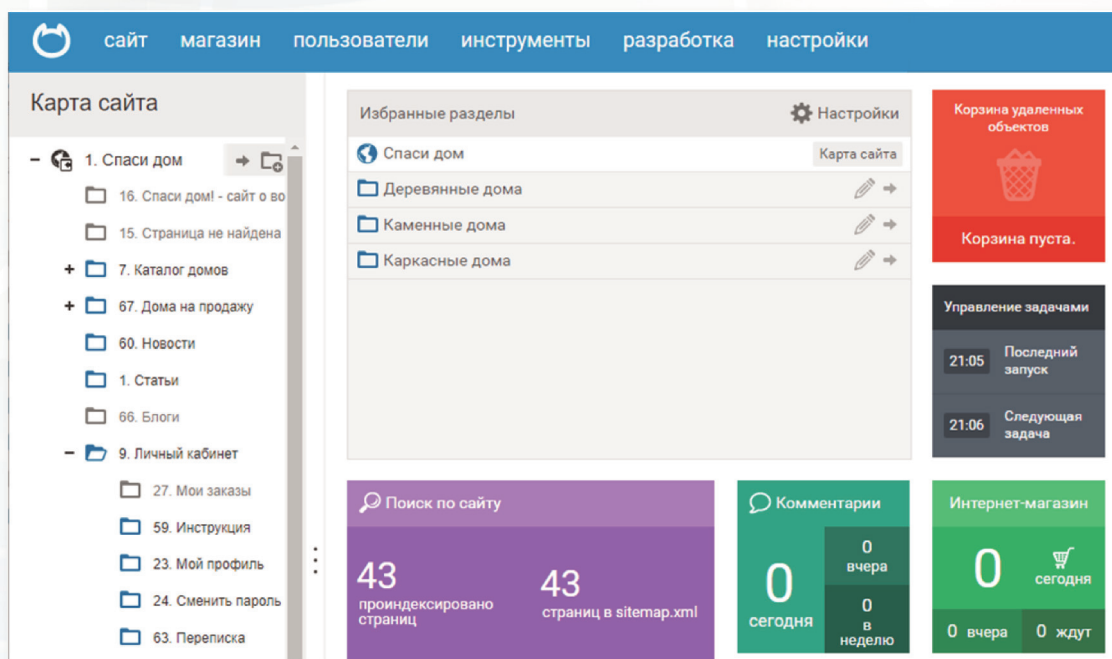


Рис. 4. CMS NetCat 6.2

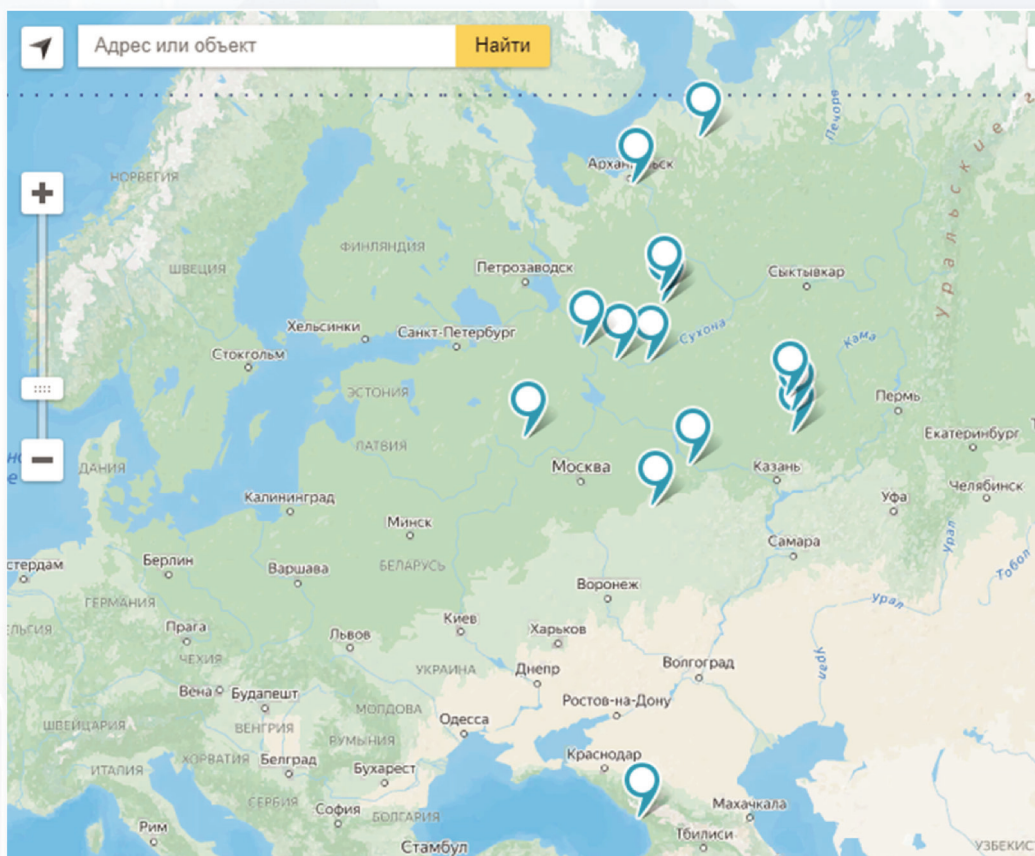


Рис. 8. География домов на сайте spaside.com