

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ**
**INFORMATION SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING
AND CONTROL**

УДК 51-7:622.691

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА НА ОСНОВЕ СЕТЕЙ
ПЕТРИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ МНОГОПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ
ПРОГРАММНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ
В ТРАНСПОРТЕ ГАЗА**

© Д.Г. ЛЕОНОВ, Т.М. ПАПИЛИНА
(Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина,
Российская Федерация, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 65)

**SIMULATION BY MEANS OF PETRI NETS AND DESIGN
OF DISTRIBUTED MULTIUSER SOFTWARE SUITES
FOR GAS TRANSPORTATION**

D.G. LEONOV, T.M. PAPILINA
(Gubkin Russian State University of Oil and Gas
(National Research University),
Leninskiy prospect, 65, 119991, Moscow, Russian Federation)

В статье рассматриваются проблемы разработки и интеграции современных распределённых программно-вычислительных комплексов (ПВК), ориентированных на решение задач АСДУ в транспорте газа. Предлагается решение по преобразованию сетевого ядра ПВК «Веста» в основу открытой интеграционной платформы, позволяющей объединить разнородные программные комплексы и стандартизирующей формат и протоколы обмена данными через открытый программный интерфейс. Показана обусловленная сложностью решаемых задач необходимость привлечения математического аппарата, обеспечивающего обобщённое формализованное представление о системе. Рассматриваются вопросы построения непротиворечивых прикладных протоколов взаимодействия распределённых вычислительных комплексов на примере задачи стыковки синхронных и асинхронных компонентов ПВК «Веста». Предлагаются модели, формализующие взаимодействие разнородных программных комплексов на основе аппарата иерархических раскрашенных сетей Петри.

The article discusses the development and integration of modern distributed software suites in gas transportation dispatching systems. The proposed solution includes transformation of Vesta suite network system into the base of an open integration platform. The platform allows uniting of heterogeneous software suites and standardizes data format and protocols by means of open API. The complexity of tasks necessitates the use of mathematical apparatus providing generalized representation of the whole system. The design of concordant application protocols in distributed computing systems is considered. The matter deals with heterogeneous software interaction and connections of synchronous and asynchronous components of "Vesta" software used in gas transportation industry. The models of the system have been designed by means of colored Petri nets.

Ключевые слова: программно-вычислительные комплексы, АСДУ, транспорт нефти и газа, сети Петри.

Keywords: control systems software, automatic dispatch control system, oil and gas transport, colored Petri net.

Развитие сложных программных систем происходит от накопления определённого количества независимых подсистем (в свою очередь, сколь угодно сложных) к их интеграции. В большинстве случаев каждая подсистема разрабатывается изолировано от других, имеет свою структуру, внутренние механизмы взаимодействия элементов и, что особенно важно при интеграции с другими подсистемами, свой собственный интерфейс взаимодействия с внешним миром.

Ключевую роль в управлении Единой системой газоснабжения РФ играет автоматизированная система диспетчерского управления (АСДУ). Процесс непрерывного совершенствования АСДУ является сложной наукоёмкой задачей, носящей междисциплинарный характер и базирующейся на интеграции знаний и опыта производственных, академических, научно-исследовательских, учебных институтов и учреждений в области автоматизации, управления и информационных систем [2]. Одним из компонентов АСДУ являются специализированные программно-вычислительные комплексы (ПВК), решающие задачи многовариантного моделирования режимов транспорта газа (как стационарных, так и нестационарных), а также задачи оптимизации, адаптации и идентификации. Их разработка требует привлечения знаний как из прикладной области (моделирование сложных технологических систем), так и из области информационных технологий (построение сложных информационных систем, соответствующих текущему уровню развития ИТ). Кроме того, сложность решаемых задач обуславливает необходимость привлечения математического аппарата, обеспечивающего обобщённое формализованное представление о системе в целом.

В настоящее время существует несколько ПВК, представленных отдельными разработчиками и используемых в различных региональных газотранспортных организациях. Несмотря на то что все газотранспортные организации входят в единую иерархическую структуру, каждый ПВК реализует сходные функции с помощью собственных, зачастую закрытых, моделей и алгоритмов, при этом отсутствуют как общий формат обмена данных, так и общие прото-

колы взаимодействия. Фактически каждый комплекс представляет собой чёрный ящик с собственным форматом входных и выходных данных. В результате пользователям и службам поддержки приходится проделывать большую работу по созданию и актуализации технологических схем транспорта газа для каждого ПВК в отдельности, а результаты расчёта одного ПВК могут использоваться в другом лишь после переноса информации вручную.

Построение открытой интеграционной платформы

Эволюционное развитие архитектуры разрабатываемого в РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина ПВК «Веста» [7, 8] создало предпосылки для преобразования его сетевого ядра в основу открытой интеграционной платформы (ОИП), позволяющей объединить разнородные программные комплексы и стандартизирующей формат и протоколы обмена данными через открытый программный интерфейс (application programming interface, API) (рисунок 1).

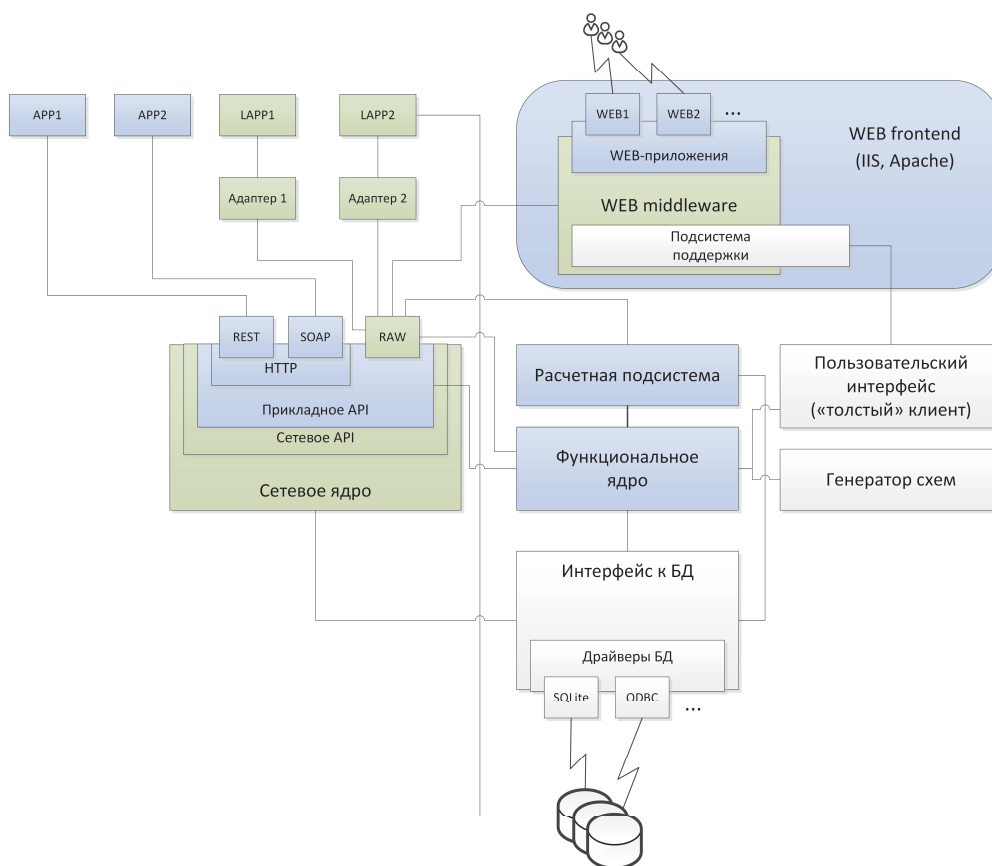


Рисунок 1. Проектируемая архитектура открытой интеграционной платформы

Сетевое ядро относится к системам класса middleware (таким как ZeroMQ, RabbitMQ и т.п.), традиционным решением для которых является использование механизма передачи сообщений в качестве основы обработки и передачи данных. Реализованные элементы API носили фрагментарный характер и были ориентированы на использующее механизм бинарной сериализации прямое взаимодействие с сетевым ядром комплекса (блок RAW на рисунке 1). Подключение сторонних приложений (legacy applications, LAPP_i) требовало реализации специализированных адаптеров, обеспечивающих преобразование форматов используемых данных.

Целью проектирования ОИП является обеспечение интеграции со сторонними приложениями (APP_i) с помощью добавления стандартных открытых интерфейсов, основанных на протоколах REST (Representational state transfer, передача состояния представления) и SOAP (Simple Object Access Protocol, простой протокол доступа к объектам) и использующих передачу данных в унифицированных форматах JSON и XML.

При этом возникает задача построения непротиворечивых прикладных протоколов взаимодействия компонентов распределённой среды, связанная, в частности, с необходимостью стыковки синхронных (запросы с помощью API, web-клиенты) и асинхронных компонентов комплекса.

Подходы к формализации распределённых систем

Неотъемлемой частью разработки сложных систем является необходимость моделирования функционирования системы на этапе проектирования: сначала для выработки архитектурных решений, затем – для оценки показателей функционирования системы [10]. ПВК «Веста», проектируемый в соответствии с принципами объектно-ориентированного подхода, для выработки архитектурных решений использовал аппарат теории конечных автоматов [5]. Данный подход в сочетании со средствами автоматизированной генерации исходного кода хорошо зарекомендовал себя при проектировании так называемых реактивных систем [11, 12]. Но изменение характера решаемых задач требует смены подхода к формализации представления о проектируемой системе, так как при переходе к полностью асинхронным распределённым системам модели конечных автоматов становятся плохо применимыми из-за необходимости выявления «глобальных» состояний системы.

Наиболее распространённым в настоящее время подходом к формализации распределённых и параллельных систем с асинхронным взаимодействием является аппарат сетей Петри, позволяющий свести исследование механизмов взаимодействия к изучению логической структуры сети [1, 3, 4]. Для решения поставленной задачи было выбрано подмножество иерархических раскрашенных сетей Петри, для которых характерно наличие составных переходов, а фишкам позиций (мест) соответствуют передаваемые от перехода к переходу объекты, имеющие дополнительные атрибуты. Таким образом, иерархичность сетей Петри позволяет провести декомпозицию сложной системы, а возможность задания типа для фишек позволяет отразить неоднородность информа-

ционных потоков [6]. Для визуализации и моделирования был выбран программный пакет CPN Tools 4.0.1 (AIS group, Технический университет Эйндховена) [13].

Поскольку сетевое ядро ПВК «Веста» разрабатывалось в первую очередь как средство построения распределённых тренажёров, сначала необходимо рассмотреть базовую модель тренажёра, в дальнейшем расширив её для использования в гетерогенной среде.

Модель тренажёра

В режиме тренажёра в системе присутствует один сервер (АРМ преподавателя) и N клиентов (АРМы обучающихся), взаимодействующих с помощью сетевого менеджера, являющегося ключевым компонентом сетевого ядра (рисунок 2). АРМ преподавателя и АРМы обучающихся являются клиентами сетевого менеджера, имеющего N_{ch} обслуживающих каналов.

Сетевой менеджер отвечает за регистрацию новых клиентов и передачу данных. Каждый клиент хранит идентификационный номер, полученный при подключении к сетевому менеджеру, и номер назначенной подсистемы (по умолчанию – вся схема). На языке CPN Tools они описываются следующим образом:

colset Subs = index ss with 0..K;

val DefSs=ss(0);

var sS: Subs.

Каждый клиент получает с сервера один из $K \geq N$ участков системы (подсистему), с которой связана определённая учебно-тренировочная задача (УТЗ). Обучение начинается после получения клиентами своих УТЗ (рисунок 3). После запуска УТЗ на исполнение в определённый момент времени генерируется аварийная ситуация: разрыв трубопровода, отказ оборудования и т.д. – которую необходимо ликвидировать. Расчёт осуществляется с заданным шагом моделирования вне зависимости от действий пользователей.

colset ID = INT;

*colset Emergency = product INT*Subs*INT*STRING;*

*colset Action = product ID*ID*STRING.*

Взаимодействие с сетевым ядром осуществляется с помощью механизма передачи сообщений. При отправке сообщения ставятся в очередь, из которой последовательно выбираются для последующей обработки и доставки клиентам (рисунок 4). Сообщения состоят из заголовка, включающего служебную



Рисунок 2. Режим тренажёра на базе ПВК «Веста»

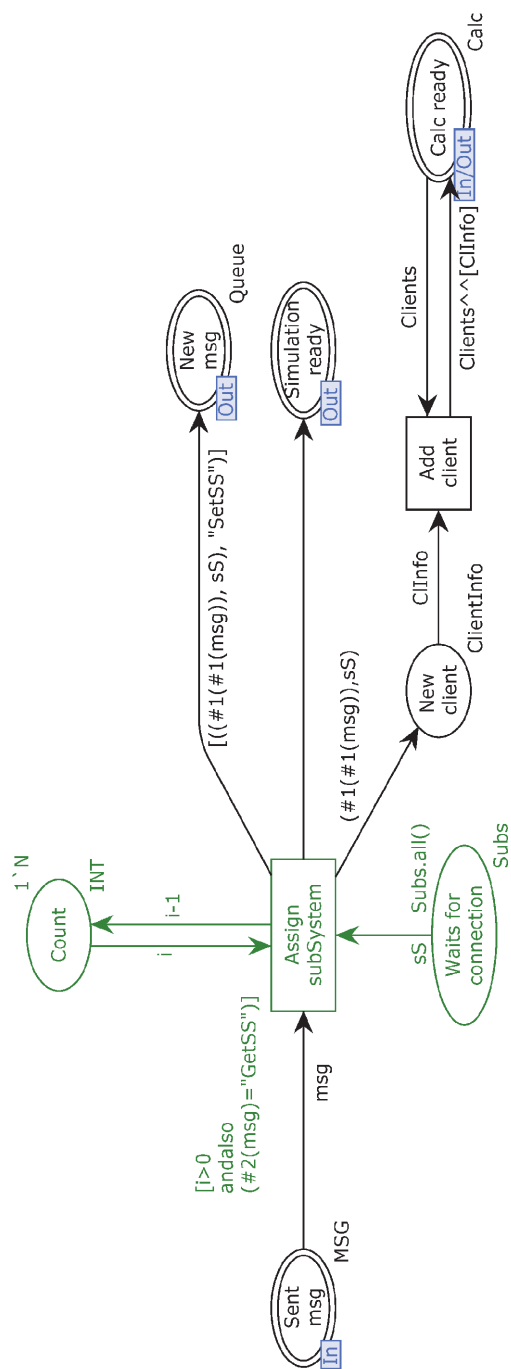


Рисунок 3. Получение УТЗ

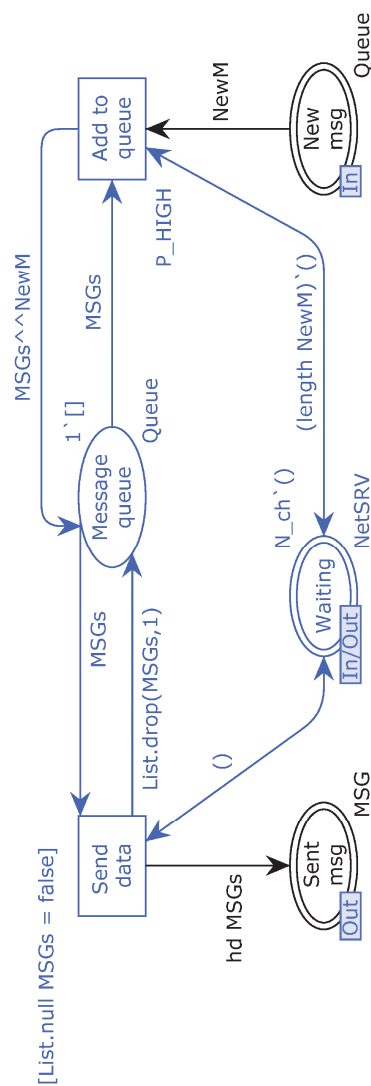


Рисунок 4. Передача данных

информацию, и собственно данных. В терминах CPN Tools они описываются следующим образом:

```
val StartID=101;  
  
var Id: ID;  
  
colset NetSRV = unit;  
  
colset ClientInfo = product ID* Subs;  
  
var CInfo: ClientInfo;  
  
colset MSG = product ClientInfo *STRING;  
  
var msg: MSG.
```

Переход к открытому API

При переходе от тренажёра к распределённой гетерогенной системе главным отличием является одновременная работа нескольких клиентов с несколькими схемами. Это, в свою очередь, приводит к необходимости добавления в систему нового компонента: менеджера схем, обеспечивающего по запросу клиентов запуск расчётных модулей.

Предварительное моделирование показало, что для корректной маршрутизации потоков сообщений в сетевом менеджере необходимо введение понятия «Тип клиента», поскольку сетевой менеджер должен обеспечивать взаимодействие разнородных компонентов (рисунок 5).

```
colset CInfoType = with Calc/API/NetSrv/CalcMgr;  
  
colset Mgr = product INT*CInfoType.
```

Каждый клиент должен хранить идентификатор соответствующего ему расчётного модуля:

```
colset ClientInfo = record selfId:INT*pairId:INT*t:CInfoType.
```

Для маршрутизации потоков сообщений в сетевом менеджере предусмотрены отдельные очереди для каждого типа клиентов:

```
colset MSG = record to:INT*from:INT*t:CInfoType*data:STRING.
```

В целом работа каждой новой пары «клиент-расчётный модуль» разбивается на несколько шагов (рисунок 6):

- регистрация клиента в сети;
- запрос у менеджера схем списка доступных схем;
- запрос к менеджеру схем на запуск расчётного модуля с конкретной схемой;

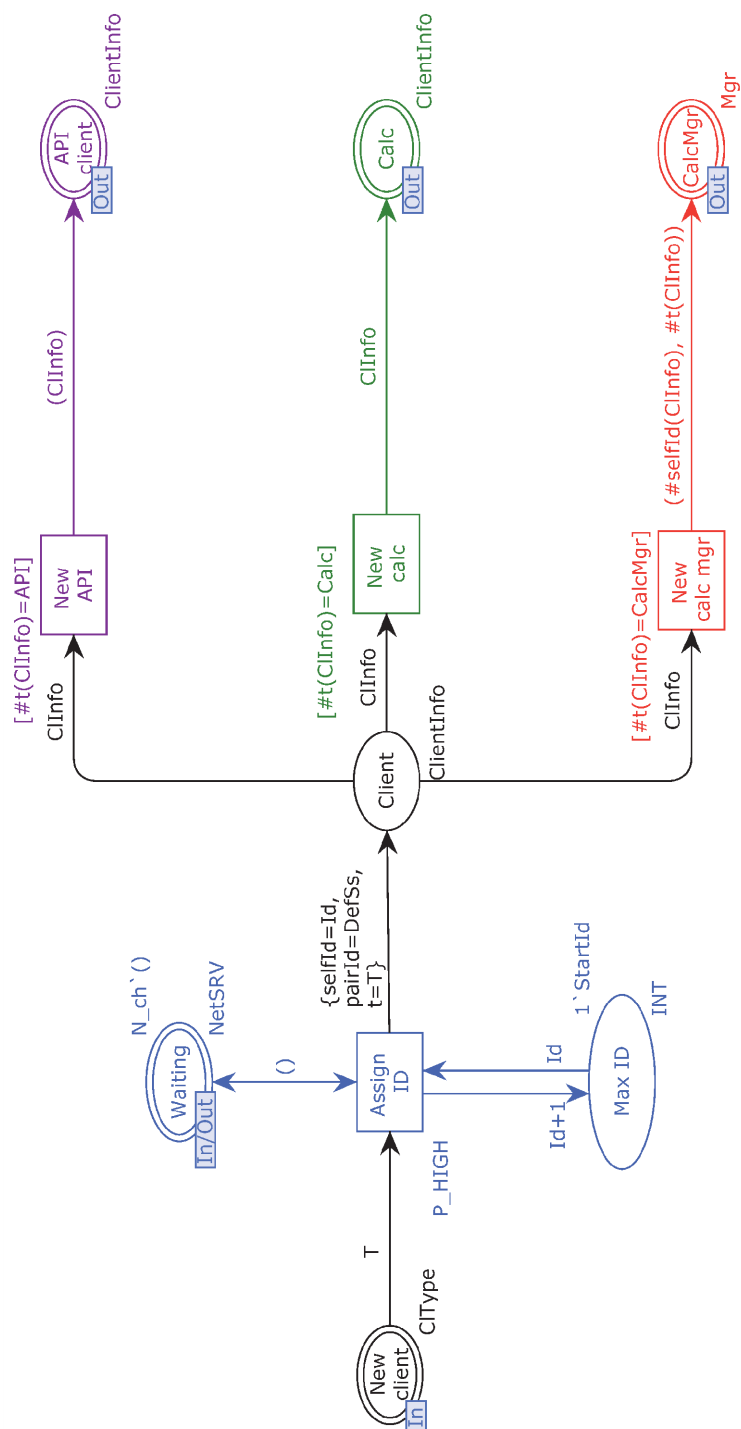
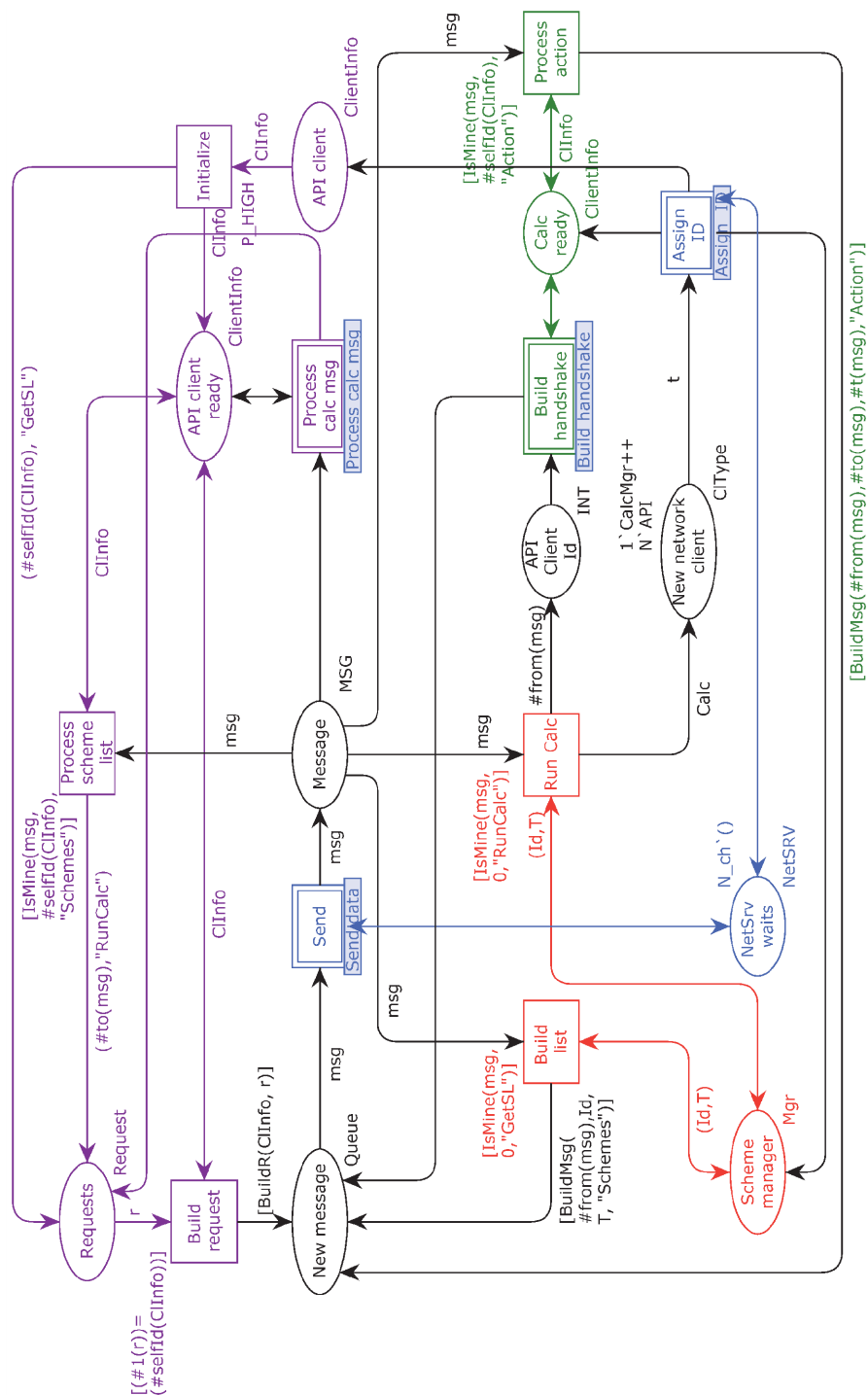


Рисунок 5. Регистрация клиентов, общий случай



- запуск расчётного модуля менеджером схем;
- регистрация расчётного модуля в сети;
- отправка идентификационных данных расчётного модуля клиенту;
- взаимодействие клиента и расчётного модуля.

В данной модели для упрощения представления рассматривается стационарный режим работы, при котором расчёт происходит в ответ на действия пользователя, а не на каждую единицу модельного времени, как в случае обучения в нестационарном режиме.

ВЫВОД

В ходе исследования были построены модели сетевого взаимодействия разрабатываемой на базе ПВК «Весты» открытой интеграционной платформы. В результате моделирования были выявлены необходимые изменения в существующей реализации сетевого ядра ПВК «Веста», которые позволят перейти от взаимодействия через механизм бинарной сериализации к интерфейсу на открытых протоколах передачи данных в унифицированных форматах JSON и XML. Применение в формализации системы иерархических раскрашенных сетей Петри позволило перейти от моделирования изолированных компонентов системы к моделированию их взаимодействия, а также провести эксперименты по подключению компонентов, находящихся на стадии проектирования.

Основным направлением дальнейшей работы является переход на автоматизированное генерирование программного кода из XML-представления полученных сетей Петри.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимов Н.А., Голенков Е.А., Харитонов Д.И. Композиционный подход к разработке параллельных и распределенных систем на основе сетей Петри//Программирование. – 2001. – № 6. – С. 30.
2. Григорьев Л.И., Костогузов А.И. Актуальность и основы инновационного пути развития АСДУ//Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2016. – № 3. – С. 12–20.
3. Котов В.Е. Сети Петри. – М.: Наука, 1984. – 160 с.
4. Коротиков С.В., Воевода А.А. Применение сетей Петри в разработке программного обеспечения центров дистанционного управления и контроля//Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2007. – № 4. – С. 15–32.
5. Леонов Д.Г. Объектно-ориентированная технология разработки систем поддержки принятия диспетчерских решений в транспорте газа//Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2000. – № 4–5. – С. 11–17.
6. Леонов Д.Г. Применение сетей Петри к построению адаптируемого распределенного прикладного программного обеспечения//Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2017. – № 1. – С. 5–11.
7. Леонов Д.Г., Васильев А.В. Построение многоуровневой системы поддержки принятия диспетчерских решений, основанное на развитии распределенной архитектуры программно-вычислительного комплекса «Веста»//Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2014. – № 6. – С. 13–18.

8. Леонов Д.Г., Папилина Т.М. АСДУ без границ. Преодоление архитектурных ограничений программно-вычислительных комплексов в автоматизированной системе диспетчерского управления//Деловой журнал NEFTEGAZ.RU. – 2016. – № 1–2. – С. 14–18.
9. Папилина Т.М. Платформа разработки прикладных web-инструментов для диспетчерского персонала нефтегазовой отрасли//Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2015. – № 11. – С. 41–46.
10. Папилина Т.М., Леонов Д.Г., Стёпин Ю.П. Моделирование и оценка эффективности функционирования системы облачных вычислений в АСДУ//Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2016. – № 7. – С. 29–33.
11. Поликарпова Н.И., Шальто А.А. Автоматное программирование. – СПб: Питер, 2009. – 167 с.
12. Шальто А.А. Switch-технология. Алгоритмизация и программирование задач логического управления. – СПб: Наука, 1998. – 628 с.
13. CPN Tools [Электронный ресурс]/ URL: <http://cpntools.org/>.

REFERENCES

1. Anisimov N.A., Golenkov E.A., Kharitonov D.I. Kompozitsional'nyy podkhod k razrabotke parallel'nykh i raspredelennykh sistem na osnove setey Petri. Programmirovaniye, 2001, no. 6, p. 30.
2. Grigor'ev L.I., Kostogryzov A.I. Aktual'nost' i osnovy innovatsionnogo puti razvitiya ASDU. Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoy promyshlennosti, 2016, no. 3, p. 12–20.
3. Kotov V.E. Seti Petri. M.: Nauka, 1984, p. 160.
4. Korotikov S.V., Voevoda A.A. Primeneniye setey Petri v razrabotke programmnoy obespecheniya tsentrov distantsionnogo upravleniya i kontrolya. Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2007, no. 4, p. 15–32.
5. Leonov D.G. Ob'ektno-orientirovannaya tekhnologiya razrabotki sistem podderzhki prinyatiya dispetcherskikh resheniy v transporte gaza. Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoy promyshlennosti, 2000, no. 4–5, p. 11–17.
6. Leonov D.G. Primeneniye setey Petri k postroyeniyu adaptiruемого raspredelennogo prikladnogo programmnoy obespecheniya. Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoy promyshlennosti, 2017, no. 1, p. 5–11.
7. Leonov D.G., Vasil'ev A.V. Postroyeniye mnogourovnevnoy sistemy podderzhki prinyatiya dispetcherskikh resheniy, osnovannoye na razvitiye raspredelennoy arkhitektury programmno-vychislitel'nogo kompleksa «Vesta». M.: Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoy promyshlennosti, 2014, no. 6, p. 13–18.
8. Leonov D.G. Papilina T.M. ASDU bez granits. Preodoleniye arkhitekturnykh ograniicheniy programmno-vychislitel'nykh kompleksov v avtomatizirovannoy sisteme dispetcherskogo upravleniya. Delovoy zhurnal NEFTEGAZ.RU, 2016, no. 1–2, p. 14–18.
9. Papilina T.M. Platforma razrabotki prikladnykh web-instrumentov dlya dispetcherskogo personala neftegazovoy otrasli. Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoy promyshlennosti, 2015, no. 11, p. 41–46.
10. Papilina T.M., Leonov D.G., Stepin Yu.P. Modelirovaniye i otsenka effektivnosti funktsionirovaniya sistemy oblachnykh vychisleniy v ASDU. Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoy promyshlennosti, 2016, no. 7, p. 29–33.
11. Polikarpova N.I., Shalyto A.A. Avtomatnoye programmirovaniye. SPb.: Piter, 2009, p. 167.
12. Shalyto A.A. Switch-tekhnologiya. Algoritmizatsiya i programmirovaniye zadach logicheskogo upravleniya. SPb.: Nauka, 1998, p. 628.
13. CPN Tools [Elektronnyy resurs]/ URL: <http://cpntools.org/>.

Дмитрий Геннадьевич ЛЕОНОВ окончил ГАНГ имени И.М. Губкина в 1992 г. Кандидат технических наук, доцент кафедры АСУ РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. Ведущий разработчик семейства программно-вычислительных комплексов моде-

лирования газотранспортных систем «Веста». Автор более 50 научных и методических работ.

Dmitry G. LEONOV graduated from Gubkin Russian State University of Oil and Gas in 1992. He is Candidate of Technical Sciences, assistant professor at the Department of Automated Control Systems of Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University). Leading developer of the software suite for the gas transportation systems "Vesta". He is author of more than 50 scientific and methodical publications.

E-mail: dl@asugubkin.ru

Татьяна Михайловна ПАПИЛИНА окончила магистратуру РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина в 2012 г. Ассистент кафедры АСУ РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. Специалист в области разработки распределенных и облачных систем.

Tatyana M. PAPILINA graduated from Gubkin Russian State University of Oil and Gas in 2012. She is assistant lecturer at the Department of Automated Control Systems of Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University). She is specialist in distributed and cloud systems design.

E-mail: papilina.tm@asugubkin.ru

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ТОПЛИВА CHEMICAL ENGINEERING OF FUEL

УДК 665.767; 620.197.7; 691.175.5/8

УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЗАЩИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ ДЛЯ БАКОВ-АККУМУЛЯТОРОВ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

© И.Р. ТАТУР, А.В. ЛЕОНТЬЕВ, В.Г. СПИРКИН, Ю.С. БЕЛОМЕСТНОВА
(Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина,
Российская Федерация, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 65)

IMPROVING THE PERFORMANCE PROPERTIES OF PROTECTIVE LIQUIDS FOR HOT WATER STORAGE TANKS FOR POWER PLANTS

I.R. TATUR, A.V. LEONT'EV, V.G. SPIRKIN, YU.S. BELOMESTNOVA
(Gubkin Russian State University of Oil and Gas
(National Research University),
Leninskiy prospect, 65, 119991, Moscow, Russian Federation)