

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 004.457

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ВРЕДНОСНЫХ ПРОГРАММ НА ОСНОВЕ ПЛАТФОРМЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ БИНАРНОЙ ИНСТРУМЕНТАЦИИ PIN

Ф.Ф. Буканов, Р.А. Сергеев

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Современные системы автоматизированного динамического анализа вредоносных файлов представляют собой особый класс инструментов в рамках динамического подхода к исследованию функциональности образцов. Целью данной статьи является разработка системы автоматизированного динамического анализа вредоносных программ с использованием платформы динамической бинарной инструментации Pin. Кратко охарактеризован принцип работы систем анализа. Описаны известные системы и сформулированы требования, которым должна удовлетворять разрабатываемая система. Проанализированы возможности Pin, используемые в разработанной системе. Приведено описание структуры предлагаемой системы, а также ее анализирующего компонента, реализованного в виде программы на языке C++.

Ключевые слова: автоматизированный динамический анализ, вредоносные программы, платформа Pin.

Вредоносные программы являются одной из наиболее серьезных угроз компьютерной безопасности в настоящее время. Для изучения функциональности таких программ их подвергают анализу. При статическом подходе к анализу функциональности образцов используются дизассемблеры, различные утилиты и фреймворки для исследования свойств файла. Особенностью данного подхода является то, что теоретически возможно исследование функциональности всех частей программы. На практике же статический анализ усложняется применением упаковщиков, обфускаторов, а также специальных техник, вызывающих неправильную работу алгоритмов дизассемблирования. Поэтому возникает необходимость в применении другого подхода – динамического, который предполагает исполнение программы во время анализа. Базовым инструментом при таком подходе является отладчик.

В рамках динамического подхода существует специальный класс инструментов – системы автоматизированного динамического анализа вредоносных программ, которые позволяют быстро получить информацию об операциях, прово-

Федор Федорович Буканов (к.т.н., доц.), профессор кафедры «Электронные системы и информационная безопасность».

Роман Алексеевич Сергеев, аспирант.

димых той или иной программой во время ее исполнения. Подобные системы призваны ускорить и автоматизировать задачу анализа растущего числа вредоносных программ. При этом у специалистов появляется время на исследование тех программ, которые нуждаются в более тщательном ручном анализе.

Современные системы автоматизированного динамического анализа представляют собой большие программные комплексы, в которых анализ производится путем запуска образца на исполнение в специальной среде и последующего автоматического мониторинга его активности. В результате работы системы получается отчет, содержащий в том или ином виде информацию об операциях, выполненных вредоносной программой. В общем виде отчет можно выразить при помощи формулы

$$O = (f_1, f_2, f_3, \dots, f_i, \dots, f_N). \quad (1)$$

Здесь O – отчет, полученный по завершении работы системы автоматизированного динамического анализа; f_i – элемент отчета – функция, которая в зависимости от конкретной реализации системы может представлять собой функцию уровня библиотек API, функцию библиотеки ntdll.dll, функцию ядра операционной системы и т. п.; N – количество элементов (функций) в отчете.

От того, как реализована система автоматизированного динамического анализа, будут зависеть ее различные характеристики, в частности конкретный вид функций в отчете. В настоящий момент существует множество систем автоматизированного динамического анализа.

Обзор систем автоматизированного динамического анализа вредоносных программ

Система CWSandbox [1] состоит из приложения cwsandbox.exe и библиотеки cwmonitor.dll. Процесс анализа может производиться как на физическом оборудовании, так и в виртуальной машине. В основе CWSandbox лежит перехват API функций. Такой перехват осуществляется перезаписью первых байт функций инструкцией безусловного перехода на обработчик перехвата. Во время исполнения обработчики перехвата инспектируют параметры API функций, а также информируют основной процесс о вызове функции через объекты уведомлений. Cwmonitor.dll реализует некоторую функциональность руткита для сокрытия объектов, относящихся к системе CWSandbox, от вредоносных программ. Отчет по завершении анализа генерируется в виде XML и содержит информацию о взаимодействии образца с файловой системой, с реестром, с сетью, а также с сервисами операционной системы.

Система Cuckoo Sandbox [2] представляет собой модульную систему с открытым исходным кодом, состоящую из хост-машины и гостевых машин. В состав системы входит множество модулей: модули для управления виртуальными машинами, модули обработки результатов, модули для генерации отчетов в виде файлов разных типов (например, в виде HTML, JSON) и другие. Главный компонент процесса анализа – библиотека Cuckoo Monitor. Библиотека реализует логирование вызываемых функций и соответствующих аргументов через перехват путем перезаписи кода в памяти функций. При этом есть особенности такого перехвата по сравнению с перехватом, реализуемым CWSandbox. Библиотека способна рандомизировать записываемые на местах перехвата инструкции для затруднения детектирования перехватов, а также обработчик имеет в своем составе несколько специальных блоков-трамплинов, которые предотвращают логирование функций, вызываемых в обработчике, а также правильно обрабатывают зна-

чение LastError. Отметим расширение Cuckoo Sandbox zer0m0n, которое реализует перехваты через подмену входов таблицы SSDT и установку функций обратного вызова на события реестра, т. е. данное расширение работает на уровне ядра.

Система Ether [3], как и система DRAKVUF [4], задействует в процессе анализа вредоносных файлов возможности, предоставляемые расширением аппаратной виртуализации процессора. Обе системы построены на основе Xen. Ether реализует мониторинг системных вызовов путем указания заведомо не представленного в физической памяти виртуальной машины адреса в регистре MSR SYSENTER_EIP_MSR. В случае использования для системного вызова прерывания INT2Eh механизм мониторинга аналогичен. DRAKVUF осуществляет прямой перехват внутренних функций ядра через инъекцию точки останова (#BP). Скрытность систем, у которых анализ встроен в интроспекцию виртуальных машин, высока. В то же время отметим накладные расходы, возникающие при выходе из гостевой системы и передаче управления гипервизору (при возникновении событий, вызывающих VMExit).

Система TTAalyze [5] явилась основой системы автоматизированного анализа Anubis. TTAalyze основан на эмуляторе с открытым исходным кодом Qemu. Данный эмулятор модифицирован таким образом, чтобы вызывались процедуры обратного вызова прежде, чем случится трансляция очередного базового блока. TTAalyze проводит анализ путем мониторинга вызовов API функций, а также вызовов системных сервисов. Мониторинг вызовов функций происходит путем сравнения текущего значения указателя инструкций виртуального процессора со стартовыми адресами всех интересующих функций. Такое сравнение использует тот факт, что стартовый адрес функции всегда соответствует первой инструкции в блоке трансляции. Таким образом, анализ происходит в функциях обратного вызова, находящихся за пределами виртуальной среды, что повышает скрытность системы.

Требования к разрабатываемой системе автоматизированного динамического анализа вредоносных программ

Сформулируем требования, которым должна удовлетворять разрабатываемая система автоматизированного динамического анализа вредоносных файлов.

Во-первых, компонент анализа должен работать в операционной системе на уровне режима пользователя. Причиной такого требования являются те задачи, которые ставятся перед системой анализа, – она должна в первую очередь анализировать активность вредоносных приложений на уровне пользователя. Системы типа DRAKVUF, работающие на уровне ядра, больше подходят, например, для анализа руткит-частей вредоносных программ. Более того, реализация и развертывание таких систем представляются достаточно трудными.

Во-вторых, система должна обеспечивать достаточный уровень скрытности. Системы типа CWSandbox, реализующие перехваты на уровне пользователя, выдают свое присутствие наличием внедренных в код перехватываемых функций известных инструкций изменения потока управления.

В-третьих, система должна по результатам своей работы выдавать достаточно полный отчет. Идеальным случаем было бы попадание в отчет функций приложения уровня API. Однако такое решение не подходит для вредоносных программ, вызывающих напрямую сервисы системы через библиотеку ntdll.dll. Поэтому потребуем, чтобы в отчет попадали функции уровня системных вызовов

(уровень библиотеки ntdll.dll).

Наконец, система должна предусматривать возможность написания инструментов для низкоуровневого анализа. Система Cuckoo Sandbox, несмотря на широкие возможности по расширению функциональности, не приспособлена к комплексному анализу на уровне инструкций процессора.

Ни одна из рассмотренных систем в полной мере не удовлетворяет сформулированным требованиям.

Анализ возможностей платформы Pin

Pin – это платформа для создания инструментов анализа бинарного кода. Такие инструменты носят название pin tool и представляют собой библиотеки, которые загружаются в адресное пространство процесса анализируемой программы. В своей основе Pin реализует динамическую инструментацию бинарного кода [6]. Существует множество pin tools, которые используются для решения широкого круга задач по отладке памяти, анализу производительности, а также задач, связанных с безопасностью, например поиска потенциально уязвимых функций в бинарном коде.

Представляют интерес возможности платформы Pin по контролю за системными вызовами, производимыми программой, находящейся под анализом. Внутренне обработка системных вызовов при работе Pin происходит следующим образом. Pin детектирует инструкции системного вызова при генерации трасс в кэше кода. В случае архитектуры IA-32 такими инструкциями являются sysenter и int 2E, а в случае архитектуры Intel64 – syscall. Исполнение системных вызовов происходит в виртуальной машине, а не в кэше кода, для чего происходит вставка инструкции прыжка в виртуальную машину на место инструкции системного вызова. Специальная часть – эмулятор системных вызовов – выполняет все системные вызовы, которые могут повлиять на состояние виртуальной машины (например, отображение в память, завершение процесса, тред и т. д.), а остальные системные вызовы перенаправляются в другую специальную часть Pin – системный шлюз, в задачи которого входит прозрачное исполнение системных вызовов и обработка возможных прерываний прерываемых системных вызовов. Важным здесь является тот факт, что во время работы эмулятора системных вызовов происходит уведомление pin tool о событии системного вызова. Данное уведомление может поступить в pin tool как до исполнения системного вызова, так по завершении исполнения.

Pin предоставляет набор API функций для регистрации функций, получающих управление до/после системного вызова, получения номера системного вызова, аргументов системного вызова, возвращаемого значения, номера ошибки, а также установки аргументов системного вызова, его номера. С таким набором API появляется возможность создания эффективных инструментов анализа программ на уровне системных вызовов.

Предлагаемая система автоматизированного динамического анализа вредоносных программ

Архитектурно разработанная система представляет собой совокупность следующих взаимосвязанных компонентов: среда виртуализации, операционная система, платформа Pin и компонент анализа, представляющий собой pin tool.

В качестве среды для запуска операционной системы используется программный продукт по виртуализации VirtualBox. Данный программный продукт

позволяет делать снимки состояния системы. Вследствие этого появляется возможность быстро восстановить состояние системы до начала анализа, а значит, до возможного инфицирования системы.

Операционная система, на которой запускается образец для анализа, – Windows OS. Так как платформа динамической бинарной инструментации Pin способна работать на множестве версий данной операционной системы (XP, 7 и т. д.), то разработанный pin tool как главный компонент представляемой системы анализа должен также запускаться на разных версиях Windows OS.

Компонентом анализа, как уже упоминалось, является специальный pin tool. Данный pin tool реализован в виде программы на языке C++. Данный инструмент вначале производит разбор таблицы экспорта библиотеки ntdll с целью определить соответствие между номером системного вызова, закрепленного за функцией в ntdll, и ее экспортируемым символом. Далее pin tool регистрирует функции обратного вызова на события, связанные с системными вызовами анализируемой программы. При возникновении системного вызова управление передается на функцию-обработчик, где происходит анализ номера системного вызова, а по нему определяется имя вызываемой функции, которое далее записывается в файл отчета. Таким образом, элементом отчета f_i по формуле (1) является в данном случае имя системного вызова в виде, представленном библиотекой ntdll.dll.

На рисунке представлена структура разработанной системы автоматизированного динамического анализа вредоносных программ.

На рисунке Malware Process – процесс вредоносной программы; Pin.exe – исполнимый модуль платформы Pin; Pinvm.dll – библиотека виртуальной машины Pin; Pintool.dll – библиотека инструмента pin tool; Malware.exe и Malware.dll – основной модуль вредоносного процесса и библиотека вредоносного процесса (если имеется) соответственно; троеточием обозначены системные библиотеки и возможные дополнительные библиотеки вредоносного процесса; Ntdll.dll – библиотека системных вызовов операционной системы Windows.

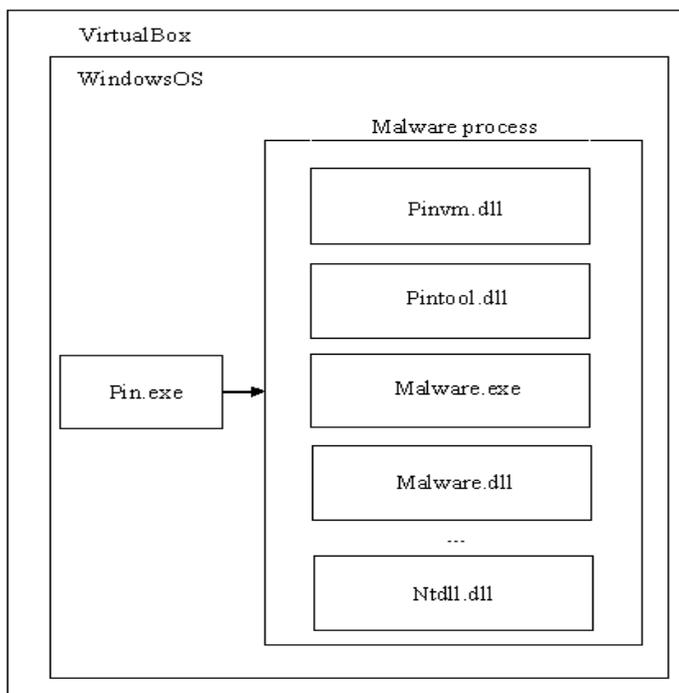
Обозначим основные особенности представляемой системы.

Скрытность системы. Компонентом анализа в предлагаемой системе является инструмент на основе платформы Pin. В настоящее время вероятность встретить образец вредоносного программного обеспечения, реализующего техники детектирования инструментирования, мала. Поэтому с этой точки зрения система имеет хороший уровень скрытности. Вопрос о скрытности среды виртуализации решается другими методами и выходит за рамки данной статьи.

Работа на уровне режима пользователя и простота реализации. Платформа Pin, как и инструменты, разработанные на ее основе, работают на уровне режима пользователя. Всю работу по перехвату системных вызовов, регистрации функций обратного вызова и прочее берет на себе платформа Pin. Здесь же можно отметить простоту развертывания в том смысле, что в предлагаемой системе не используются комплексные компоненты, работающие за пределами виртуальной среды, как, например, в Ether и DRAKVUF.

Уровень логирования системных вызовов. Решения по анализу, которые используют в своей работе перехваты функций уровня API, уязвимы к тем вредоносным программам, которые вызывают системные сервисы напрямую, с использованием библиотеки ntdll.dll. Разработанная система производит логирование системных вызовов анализируемых программ, тем самым не упуская моменты прямого обращения образцов к библиотеке ntdll.dll в обход API функций.

Здесь же отметим, что на уровне логирования системных вызовов получается достаточное представление о работе анализируемой программы.



Структура системы автоматизированного динамического анализа на основе Pin

Возможности для написания собственных инструментов низкоуровневого анализа. Платформа Pin, будучи фреймворком динамической бинарной инструментации, имеет широкие возможности для разработки средств по анализу бинарного кода. С точки зрения анализа вредоносных программ представляется актуальным внедрение в предлагаемую систему таких техник, как, например, динамическое символическое исполнение.

Заключение

В результате разработана система автоматизированного динамического анализа вредоносных программ на основе платформы Pin. Основной компонент анализа реализован в виде pin tool. Предлагаемая система производит логирование системных вызовов анализируемых программ, работает на уровне режима пользователя, отличается достаточным уровнем скрытности, а также поддерживает возможности по написанию дополнительных инструментов низкоуровневого анализа, тем самым удовлетворяя обозначенным выше требованиям.

В настоящее время использование автоматизированных динамических систем является одним из продвинутых способов быстрого изучения функциональности вредоносных программ. Разработанная система может использоваться для эффективного в смысле сформулированных требований динамического анализа вредоносных программ. Дальнейшим улучшением представленной системы является интегрирование низкоуровневых механизмов для обхода множества путей анализируемой программы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Toward Automated Dynamic Malware Analysis Using CWSandbox / Carsten Willems, Thorsten Holz, Felix Freiling // IEEE Security and Privacy. – 2007. – Volume 5 Issue 2. – P. 32-39.
2. Cuckoo Sandbox – open source automated malware analysis // Blackhat. URL: <https://media.blackhat.com/us-13/US-13-Bremer-Mo-Malware-Mo-Problems-Cuckoo-Sandbox-WP.pdf/> (дата обращения: 10.01.2016).
3. Dinaburg Artem, Royal Paul, Sharif Monirul, Lee Wenke. Ether: malware analysis via hardware virtualization extensions // CCS '08 Proceedings of the 15th ACM conference on Computer and communication security. – ACM New York, NY, USA, 2008. – P. 51-62.
4. Lengyel Tamas K., Maresca Steve, Payne Brayan D., Webster George D., Vogl Sebastian, Kiayias Aggelos. Scalability, fidelity and stealth in the DRAKVUF dynamic malware analysis system // ACSAC '14 Proceedings of the 30th Annual Computer Security Applications Conference. – ACM New York, NY, USA, 2014. – P. 386-395.
5. TTAalyze: A Tool for Analyzing Malware / Ulrich Bayer, Christopher Kruegel, Engin Kirda // Ucsb. URL: https://www.cs.ucsb.edu/~chris/research/doc/eicar06_ttanalyze.pdf/ (дата обращения: 13.01.2016).
6. Dynamic Instrumentation with Pin / Robert Cohn // Rice. URL: <http://cscads.rice.edu/workshops/july2007/perf-slides-07/Cohn-Pin.pdf/> (дата обращения: 14.01.2016).

Статья поступила в редакцию 20 марта 2016 г.

AUTOMATED DYNAMIC MALWARE-ANALYSIS SYSTEM ON THE BASIS OF THE DYNAMIC BINARY INSTRUMENTATION PIN PLATFORM

F.F. Bukanov, R.A. Sergeev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeiskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Modern automated dynamic malware-analysis systems are a special type of tools in the area of dynamic approach of the samples functionality study. The purpose of this paper is to develop the automated dynamic malware-analysis system using the dynamic binary instrumentation Pin platform. The principle of operation of analysis systems is characterized briefly. The known systems are described and requirements for the developed system are formulated. Useful capabilities of Pin for the developed system are analyzed. The structure of the proposed system and analysis component in the form of C++ program are shown.

Keywords: *automated dynamic analysis, malicious software, platform Pin.*

*Fedor F. Bukanov (Ph.D. (Techn.)), Professor.
Roman A. Sergeev, Postgraduate Student.*

УДК 62-631.2:665.65

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS WORKBENCH

Е.И. Заборовский¹, Д.В. Гуськов²

¹Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

²ООО «Новокуйбышевский завод масел и присадок»
Россия, 446207, г. Новокуйбышевск, ул. Производственная, 2

Рассмотрена возможность применения метода конечных элементов для определения линейных потерь давления в трубопроводах и сравнения полученных данных с результатами аналитического расчета. К сожалению, при определенных граничных условиях аналитический метод дает неточные результаты, имеющие расхождение с экспериментальными данными. Метод конечных элементов в газогидродинамических задачах дает точное решение, не уступающее по точности аналитическому методу, а в отдельных случаях даже превосходящее его. За короткий промежуток времени можно выполнить много вычислений типа «что-если».

Ключевые слова: оптимальный расход, гидравлический расчет, гидравлические потери, аналитический метод, метод конечных элементов (МКЭ).

Определение полного гидравлического сопротивления (гидравлический расчет) – одна из главных задач, стоящая перед инженером, при проектировании трубопроводов различного назначения.

Гидравлические потери, или гидравлическое сопротивление – безвозвратные потери удельной энергии на участках гидравлических систем, обусловленные наличием вязкого трения. Это сопротивление вызывается двумя причинами: трением жидкости о стенки трубопровода (линейные потери) и образованием завихрений потока в местах прохода его через стыки труб, арматуру и прочие изменения формы и размера канала (местные потери) [1].

Так как на основании гидравлического расчета осуществляется определение оптимального расхода (производительности) Q и диаметра трубопровода d , подбор необходимого насосного оборудования, точность полученных результатов напрямую влияет на работоспособность и экономическую эффективность всей проектируемой системы.

В настоящее время учебная и научная литература описывает только один аналитический метод гидравлического расчета трубопроводов, который можно назвать классическим. В нем изначально считаются заданными скорость течения жидкости и диаметр трубопровода. Зависимость коэффициента гидравлического трения в неявном виде рассматривается в виде функции числа Рейнольдса, относительной шероховатости и формы поперечного сечения трубопровода [2].

При расчетах линейных потерь данный аналитический метод выражается формулой Дарси – Вейсбаха

*Евгений Иванович Заборовский, доцент кафедры «Трубопроводный транспорт».
Денис Валерьевич Гуськов, инженер-механик.*

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2} \cdot \rho, \quad (1)$$

где ΔP – линейные потери давления, Па;
 λ – коэффициент гидравлического сопротивления на трение по длине;
 ρ – плотность жидкости, кг/м³;
 V – скорость потока, м/с;
 D – внутренний диаметр, м;
 L – длина трубопровода, м.

К сожалению, при определенных граничных условиях аналитический метод дает неточные результаты, имеющие расхождение с экспериментальными данными. Например, гидравлический расчет в переходной зоне между турбулентным и ламинарным режимами, а также при неустановившемся движении (момент пуска-остановки трубопровода). Один из способов решения такого рода задач с высокой точностью – это использование метода конечных элементов.

Метод конечных элементов (МКЭ) – это численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики.

Основные идеи и процедуры МКЭ впервые были использованы Курантом в 1943 г. при решении задачи о кручении стержня. Но только с 50-х годов началось активное практическое применение МКЭ, сначала в области авиации и космонавтики, а затем и в других направлениях. Развитию этого метода способствовало совершенствование цифровых электронных вычислительных машин [3].

В данной работе рассмотрена возможность применения метода конечных элементов для определения линейных потерь давления в трубопроводах и выполнено сравнение полученных данных с результатами аналитического расчета.

Исходные данные для расчета

Основные исходные данные для определения линейных потерь давления:

- вода при 25 °С – перекачиваемый продукт;
- $\rho = 997,07$ кг/м³ – плотность перекачиваемого продукта (вода);
- $\nu = 0,9025 \times 10^{-6}$ м²/с – кинематическая вязкость перекачиваемого продукта (вода);
- $Q = 1260$ м³/час – производительность перекачки;
- $Q_M = 349$ кг/с – массовый расход;
- $L = 15$ м – длина трубопровода;
- $D = 510$ мм – внутренний диаметр трубопровода;
- $\Delta = 0,0002$ м – абсолютная шероховатость стенки трубы.

Используемые константы:

- $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения;
- число $\pi = 3,14$.

Расчет аналитическим методом [4]

Определим скорость потока в трубопроводе по формуле

$$V = \frac{4 \cdot Q}{3600 \cdot \pi \cdot D^2}, \quad V = \frac{4 \cdot 1260}{3600 \cdot 3,14 \cdot 0,51^2} = 1,71 \text{ м/с.}$$

Характеристикой потока жидкости является число Рейнольдса, которое определяется по формуле

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu}, \quad Re = \frac{1,71 \cdot 0,51}{0,9025 \cdot 10^{-6}} = 966316$$

Различают два режима течения жидкости в трубопроводе – ламинарный и турбулентный. Турбулентный режим, в свою очередь, делится на три зоны:

- зона гидравлически гладких труб;
- зона смешанного трения;
- зона квадратичного трения.

Переход из режима в режим и из зоны в зону определяется значениями критических (переходных) чисел Рейнольдса, которые определяются по формулам:

$$Re_1 = \frac{10 \cdot D}{\Delta}, \quad Re_1 = \frac{10 \cdot 0,51}{0,0002} = 25500$$

$$Re_2 = \frac{500 \cdot D}{\Delta}, \quad Re_2 = \frac{500 \cdot 0,51}{0,0002} = 1275000$$

Анализируя критические числа Рейнольдса, можно определить характер потока в трубопроводе:

$$Re_1 < Re < Re_2 \text{ – зона смешанного трения.}$$

Определим коэффициент гидравлического сопротивления по формуле Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta}{D} \right)^{0,25}, \quad \lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{966316} + \frac{0,0002}{0,51} \right)^{0,25} = 0,01613$$

Определим линейные потери давления по формуле

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2} \cdot \rho, \quad \Delta P = 0,01613 \cdot \frac{15}{0,51} \cdot \frac{1,71^2}{2} \cdot 997,07 = 691,58 \text{ ПП}$$

Расчет методом конечных элементов

Решение задачи будет производиться в модуле CFX программного комплекса ANSYS Workbench.

Модуль CFX – модуль, позволяющий решать гидрогазодинамические задачи различного уровня сложности [5].

Производим построение геометрической модели в модуле DesignModeler. В нашем случае модель представляет собой цилиндр с диаметром 510 мм и длиной 15 м. Результат построения приведен на рис. 1.

В модуле Meshing производим разбиение геометрической модели на конечные элементы.

Устанавливаем следующие опции:

– Proximity and Curvature (близость и кривизна) – между близкими элементами геометрии сетка уплотняется, а в области сильного искривления ребер – измельчается;

– Relevance Center – Fine (мелкая) – управление размерами конечных элементов;

– Initial Sizeseed – Active Assembly (активная сборка) – генерация сетки с минимальным размером элемента;

– Smoothing – High (высокое) – качество сглаживания;

– Transition – Slow (медленно) – степень изменения размера элемента;

– Sweep Method (протягивание) – метод создания 3D-сетки с преимуще-

ственно структурированными гексаэдрами в качестве элементов. Так как течение в трубе имеет одно характерное направление, а расчетная область – простую форму, структурированная сетка гексаэдров/четырёхугольников может дать более качественное решение с меньшим количеством элементов и узлов;

– Inflation Control – создание и контроль пограничного слоя. Опция позволяет измельчить сетку в указанной приграничной области.

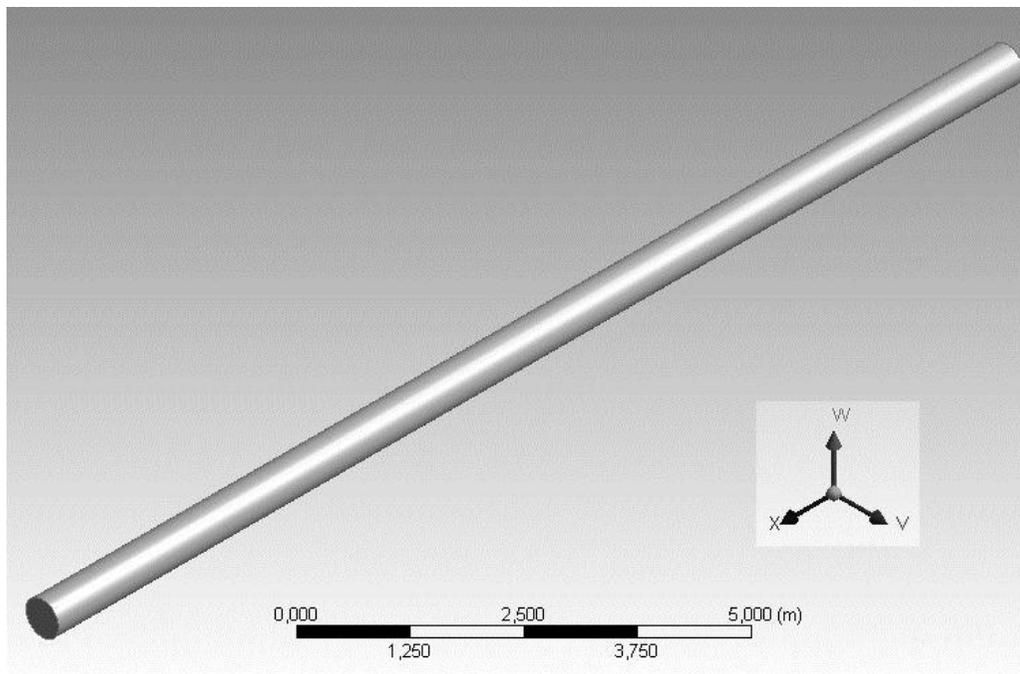


Рис. 1. Расчетная геометрическая модель

В результате разбиения получена сетка с количеством конечных элементов 48 316, узлов – 50 652. Минимальный размер грани элемента – $2,2 \cdot 10^{-3}$ м, максимальный – 0,1 м. Результат генерации сетки представлен на рис. 2.

В модуле CFX-Pre определяем границы входа и выхода перекачиваемого продукта (Boundary 1 – inlet, Boundary 2 – outlet), стенки (Boundary 2 – Wall), вид решаемой задачи – стационарная.

Задаем исходные условия задачи: тип перекачиваемого продукта (вода при 25 °С), абсолютную шероховатость стенки трубы ($\Delta = 0,0002$ м), давление на выходе (0 Па – свободный выход продукта) и массовый расход ($Q_M = 349$ кг/с).

Выбираем расчетную модель турбулентности – ShearStressTransport (SST). ShearStressTransport является моделью сдвиговых напряжений. SST модель принадлежит классу RANS моделей (основанных на уравнениях Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу) и является комбинацией K-ε (K-эпсилон) и K-ω (K-омега) моделей турбулентности [6].

Благодаря такой комбинации она может хорошо считать пристеночные течения и свободные течения вдали от стенок. Огромный опыт применения этой модели мировым сообществом позволил откалибровать ее для большинства задач [7].

В модуле CFX-Solver производим решение задачи. После окончания решения все результаты будут записаны и станут доступными для анализа.

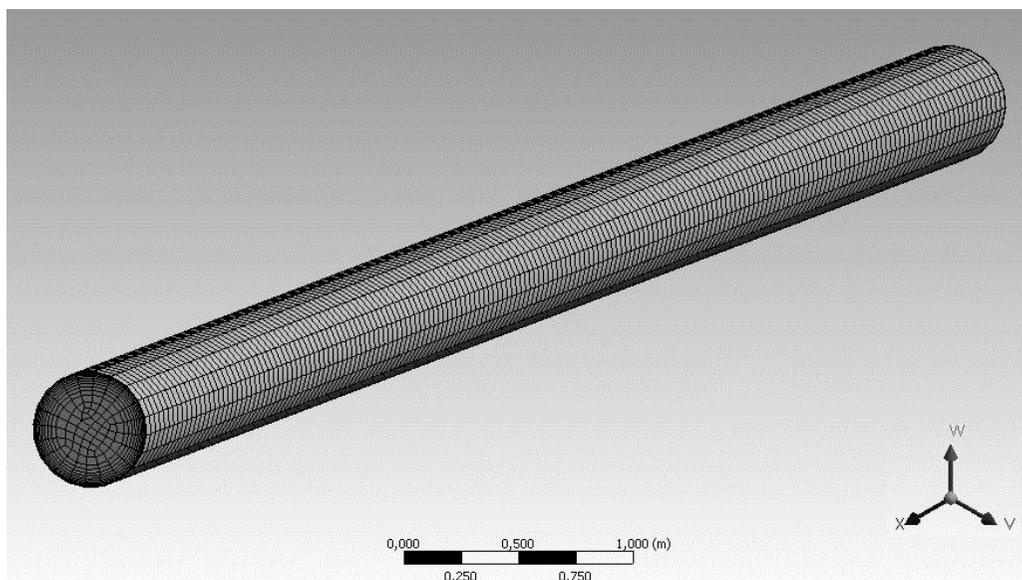


Рис. 2. Расчетная сетка

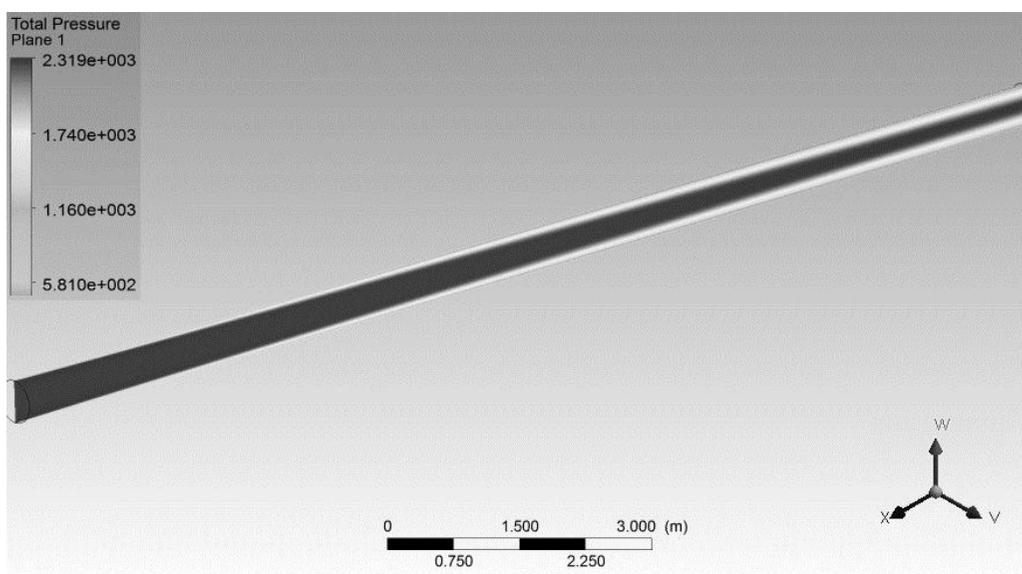


Рис. 3. Распределение полного давления

Произведем построение результатов решения в модуле CFD-Post.

На рис. 3 представлено распределение полного давления в трубопроводе.

Используя следующее CEL-выражение, определим перепад полного давления на входе и выходе трубопровода [8]:

« $dP_{tot} = \text{massFlowAve}(\text{Total Pressure})@Boundary 1 - \text{massFlowAve}(\text{Total Pressure})@Boundary 2$ ».

Таким образом, перепад давления (P_n) равен 684,947 Па.

Выводы

Анализируя и сравнивая полученные решения, можно сделать вывод о том, что метод конечных элементов в газогидродинамических задачах дает точное решение, не уступающее по точности аналитическому методу, а в отдельных случаях даже превосходящее его. В процентном соотношении разница решений составляет (к аналитическому решению) ~ 0,96 %.

Технология моделирования газогидродинамических задач в модуле AN-SYSCFX позволяет выполнять глубокий анализ механики жидкости и газов во многих типах изделий и процессов, что дает возможность не только снизить необходимость дорогостоящих прототипов, но и получить данные, которые не всегда доступны при проведении экспериментальных исследований.

Во время разработки нового оборудования за короткий промежуток времени можно выполнить много вычислений типа «что-если». Результатом этого становится лучшее соответствие продукта, увеличенная производительность, надежность.

Моделирование потока жидкостей и газов может служить дополнением к физическому эксперименту. Данные, полученные в ходе вычислений методом конечных элементов, позволяют скорректировать нюансы физического эксперимента, что дает возможность сократить время и снизить стоимость разработки или исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям» / Под ред. М.О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – С. 10.
2. *Михалёв М.А.* Гидравлический расчет напорных трубопроводов / Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 6(32). – С. 20-28.
3. *Бруйка В.А.* Инженерный анализ в ANSYS Workbench: Учеб. пособие / В.А. Бруйка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова, Н.А. Глазунова, И.Е. Адеянов. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.: ил.
4. *Тугунов П.И., Новосёлов В.Ф., Коршак А.А., Шаммазов А.М.* Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов: Учеб. пособие. – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2002. – 658 с.
5. *Justin Penrose and Phill Stopford.* Моделирование течения многофазного потока в трубопроводе с ловушкой для конденсата / ANSYS Advantage – Русская редакция. – 2008. – № 8. – Аэрокосмическая отрасль. – С. 34-35.
6. *Хитрых Д.П.* Проектирование турбомашин: обзор моделей турбулентности / ANSYS Advantage – Русская редакция. – 2005. – № 1. Авиация и двигателестроение. – С. 8-11.
7. *Хитрых Д.П.* Пример параметрического расчета вентиляционного коллектора с использованием ANSYS Workbench / ANSYS Advantage – Русская редакция. – 2010. – № 14. Нефтеперерабатывающая промышленность. – С. 39-44.
8. ANSYS CFX User's Guide – «ANSYS Inc.». Canonsburg PA, 2013.

Статья поступила в редакцию 8 ноября 2015 г.

DEFINITION OF LINEAR LOSSES OF PRESSURE BY METHOD OF FINAL ELEMENTS IN A PROGRAM COMPLEX ANSYS WORKBENCH

E.I. Zaborovskiy¹, D.V. Guskov²

¹Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

²OOO "Novokuybyshevsk Plant of Oils and Additives"
2, Proizvodstvennaya st., Novokuybyshevsk, 446207, Russian Federation

The possibility of application of final elements method for of linear losses definition of pressure in pipelines and comparison of the obtained data with results of analytical calculation is considered. Unfortunately, under certain boundary conditions in the the analytical method the results are approximate which diverge from experimental data. The final elements method in gas-hydrodynamic tasks gives the exact result like in the analytical method, and in some cases even surpasses it. For a short period it is possible to make many calculations like "that - if".

Keywords: optimum expense, hydraulic calculation, hydraulic losses, analytical method, method of final elements (MFE).

*Evgeny I. Zaborovskiy, Associate Professor.
Denis V. Guskov, Engineer.*

УДК 519.7

РАЗВИТИЕ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ КАБЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Д.И. Кулешова

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Определены основные этапы становления и развития системного анализа, рассмотрены возможности его применения для разработки системы управления процессом изолирования кабелей связи. Для решения данной задачи было проведено исследование исторического развития системных идей, описаны этапы исследования сложных систем с использованием системного анализа и принципы системного подхода. На основании проведенного исследования можно говорить о том, что зарождение системного анализа является адекватной реакцией на возникшую потребность в создании и исследовании сложных систем, в принятии решений в условиях неполноты информации, на наличие неопределенностей, а также временных ограничений и ограничений, связанных с ресурсами.

Ключевые слова: *проводные кабели связи (ПКС), системный анализ, системный подход.*

Большая часть операций по производству проводного кабеля связи непрерывны, т. е. осуществляются последовательно друг за другом в определенном порядке, по мере продвижения изделия через производственное оборудование.

Таким образом, можно говорить о том, что технологический процесс производства кабельной продукции является непрерывным и многооперационным [1, 2]. Изучение такой системы требует от исследователя широкого круга знаний и применения новых подходов. Это привело к появлению потребности в обобщающем, междисциплинарном направлении науки, которое занималось бы исследованием сложных систем и имело упорядоченную базу терминов и понятий. Наиболее востребованным из направлений, применяемых для изучения таких систем, к настоящему моменту является системный подход.

Выявление на основе системного подхода к автоматизации непрерывных технологических процессов кабельного производства системных свойств технологической операции изолирования позволит с учетом глобального критерия качества функционирования системы управления процессом изолирования перейти к локальным критериям качества [3].

Возникновение общей теории систем связывают с именем австрийского физиолога Людвиг фон Бергаланфи (1901–1972), который в 20–30-е гг. прошлого века занимался вопросами системного подхода при изучении живых организмов. Свои взгляды Бергаланфи представил в книгах «Современная теория развития» (1929) и «Общая теория систем» (1969) [4].

Также необходимо отметить важный вклад в становление системных представлений нашего соотечественника А.А. Богданова. В своей трехтомной работе «Тектология», изданной в 1910–1920-х годах, он впервые сформулировал основ-

ные положения системного подхода и теории самоорганизации систем [5].

По-настоящему явное и массовое усвоение системных понятий, осознание обществом системности мира, общества и человеческой деятельности началось в послевоенные годы – с 1948 года, когда американский математик и биолог Н. Винер опубликовал знаменитую книгу «Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине». Название книги несколько сузило сферу приложения кибернетики из-за научных интересов самого Винера [6].

Развитие аспектов системности особенно интенсивно началось со второй половины XX века. Значительную роль в этом сыграла научно-техническая революция. Многообразные кардинальные открытия в области науки в значительной степени были вызваны системным мировоззрением и широким применением системного анализа. Последовавшая за научной техникой революция также была обусловлена системным подходом в создании технических нововведений. Наконец, успехи производства тоже обусловлены системностью.

В эти годы начала оформляться общая теория систем, а также частные теории. В последующем стало происходить выделение прикладной области системного знания – системотехники как прикладного, инженерного направления знаний о системах. Постепенно различные виды системных теорий интегрируются в системологию, которая включает в себя общую теорию систем, частные и отраслевые теории систем, системотехнику.

Системный анализ признается в настоящее время наиболее конструктивным из направлений системных исследований. Этот термин впервые появился в 1948 г. в работах корпорации RAND в связи с задачами военного управления. Первая книга по системному анализу вышла в 1956 г. – ее издала корпорация RAND, а авторами стали американские ученые Кан и Манн [7].

Методология системного анализа была детально разработана и представлена в вышедшей в 1960 г. книге Ч. Хитча и Р. Маккина «Военная экономика в ядерный век». В 1965 г. появилась весьма обстоятельная книга Э. Квейда «Анализ сложных систем для решения военных проблем». В ней представлены основы новой научной дисциплины – анализа систем, направленной на обоснование методов оптимального выбора при решении сложных проблем в условиях высокой неопределенности. В 1965 г. вышла книга С. Оптнера «Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем», которая дает полное и ясное представление о системном анализе с характеристикой проблем делового мира, сущности систем и методологии решения проблем [8].

В бывшем СССР методологию системного анализа стали применять фактически сразу же после его зарождения. При Президиуме АН СССР уже в конце 60-х гг. был создан Комитет системного анализа. Основными сферами применения системного анализа стали радиоэлектроника, автоматика, средства вычислительной техники, информационные системы, автоматизированные системы управления, системы связи и др. С 60-х годов в СССР издается ежегодник «Системные исследования», в котором обсуждаются основные методологические проблемы системного анализа.

Существенный вклад в развитие системного анализа и практики его применения внесли отечественные ученые А.Г. Аганбегян, Л.В. Канторович, Д.М. Гвишиани, С.В. Емельянов, Н.Н. Моисеев, Г.С. Поспелов, Л.Н. Сумароков, Г.В. Шорин, В.М. Глушков, Е.П. Голубков, Ю.И. Черняк, В.Н. Садовский, В.В. Дружинин, А.А. Ляпунов, И.В. Блауберг, А.И. Уемов и др. [9]

В настоящее время системный анализ широко используется при принятии

решений в теоретических и прикладных исследованиях и разработках в самых различных областях человеческой деятельности: в науке и технике, экономике и биологии, медицине и истории, политике и педагогике, юриспруденции и военном деле. Можно говорить о существенном обновлении системных идей, которое связано с работами В.А. Карташова, С.А. Кузьмина, И.И. Пригожина, В.Н. Спицнаделя, Г. Хагена и др. [10].

Существуют различные точки зрения на содержание понятия «системный анализ» и область его применения. Дадим определение системного анализа на основе обобщения различных точек зрения [11].

Системный анализ:

1) используется в тех случаях, когда решаемая задача не может быть сразу представлена и решена с использованием формальных, математических методов, т. е. присутствует большая начальная неопределенность решаемой проблемной ситуации и многокритериальность задачи;

2) основывается на базовых понятиях теории систем и философских концепций, которые лежат в основе исследования общесистемных закономерностей;

3) уделяет особое внимание этапу постановки задачи и использует для этого не только формальные методы, но и методы качественного анализа;

4) для построения процесса исследования и принятия решения требует обязательной разработки методики системного анализа, которая определяет последовательность этапов проведения анализа и методы их выполнения, объединяет методы из групп, направленных на активизацию использования интуиции и опыта специалистов (МАИС), и методы формализованного представления систем (МФПС);

5) позволяет сформировать процесс коллективного принятия решения, объединяя при этом специалистов различных областей знаний;

6) изучает процессы образования целей и создания средств работы с целями (включая создание методик структурирования целей);

7) в качестве основного метода использует расчленение большой неопределенности на более обозримые, лучше поддающиеся исследованию элементы при сохранении целостного представления об объекте исследования и проблемой ситуации.

Технология системного анализа представляет собой результат синтеза операций системного подхода и научного исследования.

Системный анализ применяется для решения широкого круга задач в различных областях. В соответствии с этим многие ученые, занимающиеся исследованиями в области системного анализа, выработали свою классификацию этапов. Чаще всего на классификацию оказывала влияние непосредственно область, для исследования которой применялся системный анализ. Например, классификация этапов по С. Оптнеру формировалась в соответствии с объектом изучения – оценкой и выбором систем вооружения, промышленных систем и капиталовложений; классификация по Н.П. Федоренко основывалась на отечественной экономико-математической школе; классификация по С.П. Никанорову была связана с отраслевым уровнем и разработкой АСУ.

Однако несмотря на различия во всех концепциях прослеживается общность воззрений авторов и единство подходов к разделению системного анализа на этапы.

Последовательность этапов системного анализа, которая не имеет привязки к конкретной области исследования, была разработана Ю.А. Черняком [12]:

1. Анализ проблемы (определение, формулирование, анализ структуры, развитие, внешние связи, разрешимость).
2. Определение системы (специфика задач, определение объекта, границы разбиения, подсистемы, среда).
3. Анализ структуры системы (иерархия, функции, процессы управления, информационные каналы, специфика подсистем).
4. Формулирование общей цели и критерия системы (цели-требования, накладываемые ограничения, общая цель, критерии, выработка общей цели/критерия из целей/критериев подсистем).
5. Декомпозиция цели, выявление потребностей в ресурсах и процессах (формулировка целей: верхнего приоритета, текущих, развития, внешних и т. п.).
6. Выявление ресурсов и процессов, композиция целей (оценки: технологий и мощностей, состояния ресурсов, реализуемых и планируемых проектов, возможностей взаимодействия с другими системами).
7. Прогноз и анализ будущих условий (развития системы, появления новых факторов влияния, ресурсов, возможных сдвигов критериев и целей).
8. Оценка целей и средств (оценка приоритетности цели, оценка взаимосвязей, вычисление оценок согласно критериям, оценка внешних факторов и их влияния).
9. Отбор вариантов (планирование достижения целей; анализ совместимости, отбор избыточных вариантов, сравнение вариантов и т. п.).
10. Диагноз существующей системы (моделирование процессов, вычисление мощностей, определение недостатков, мероприятия по совершенствованию).
11. Построение комплексной программы развития (построение проектов и программ мероприятий, определение очередности целей, разработка общего плана мероприятий с учетом накладываемых временных ограничений и ограничений по ресурсам и т. п.).
12. Проектирование организации для достижения целей (назначение целей организации, формулирование функций организации, проектирование отдельных структур).

На начальном этапе системный анализ основывался на применении сложных математических методов. Но дальнейшие исследования позволили сделать вывод, что математика неэффективна при анализе сложных теоретических и практических проблем, которые обладают множеством неопределенностей, что характерно для исследования и разработки технологий как единого целого. Поэтому перед учеными встала проблема, решением которой явилась выработка концепции такого системного анализа, в котором акцент делается в большей степени на разработку новых диалектических принципов научного мышления, логического анализа технических систем с учетом их связей и различных направленностей. При таком подходе на первый план выдвигаются уже не математические методы, а сама логика системного анализа, упорядочение процедуры принятия решений.

Возрастающее количество взаимосвязанных обстоятельств больших, неоднозначных и сложных технических систем при росте числа ограничений на время принятия решения потребовало специального теоретического обоснования методологического характера. Таким образом, на основе работ по системному анализу возник термин «системный подход». Такие нормы познания позволили проанализировать сложные проблемы как единое целое и обеспечили рассмотрение

многих альтернатив, каждая из которых описывалась большим количеством переменных.

Необходимо отметить, что в литературе довольно часто термины «системный анализ», «системный подход» и «принцип системности» употребляются как синонимы. Однако их следует различать. Системный подход – это принцип познания, а системный анализ представляет собой процесс, некоторое развертывание принципа системности в методологический комплекс.

Приблизительно с середины 50-х годов XX века системный подход проникает в самые различные исследовательские области научных исследований.

Методология изучения системы как единого целого, состоящего из отдельных частей, с различных точек зрения формализации позволяет сформулировать следующие девять принципов системного подхода [13].

1. Конечной цели: абсолютный приоритет конечной (глобальной) цели.
2. Единства: совместное рассмотрение системы как единого целого и как совокупности частей (элементов).
3. Связности: рассмотрение любой части совместно с ее связями с окружением.
4. Модульного построения: выделение модулей (подсистем) в системе и рассмотрение ее как совокупности подсистем.
5. Иерархии: выделение главных и подчиненных частей (элементов) и (или) их ранжирование.
6. Функциональности: совместное рассмотрение структуры и функций с приоритетом функций над структурой.
7. Развития: учет изменяемости системы, ее способности к развитию, расширению, замене частей, накапливанию информации.
8. Децентрализации: сочетание в принимаемых решениях управления централизации и децентрализации.
9. Неопределенности: учет неопределенностей и случайностей в системе.

В последнее время под системным подходом зачастую понимается некоторая совокупность системных принципов.

Технологический процесс изготовления кабельной продукции согласно сказанному ранее может рассматриваться как система, удовлетворяющая постулатам системного подхода. Каждый производственный этап неразрывно связан со следующим и предыдущим; таким образом, отдельные технологические операции не позволяют достигнуть цели всего процесса. Эффективная работа технологической системы характеризуется глобальным параметром качества, оценить который возможно только после выполнения всех операций, на готовом изделии [14]. Отдельные производственные этапы характеризуются локальными критериями качества, которые в конечном счете формируют глобальный критерий. В связи с этим появляется необходимость контроля и регулирования основного параметра качества на промежуточных операциях производства кабеля и возможности своевременного вмешательства в производственный процесс для предотвращения брака.

Применение системного подхода при разработке системы автоматического управления процессом изолирования кабеля связи позволяет обеспечить достижение требуемого качества готового кабеля с учетом полосы передаваемого сигнала. Таким образом, значительно повышается качество выпускаемой продукции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Митрошин В.Н., Митрошин Ю.В., Кулешова Д.И. Использование системного подхода при автоматизации многооперационных технологических процессов производства кабелей связи // Информационные, измерительные и управляющие системы (ИИУС-2012): Материалы III Международной научно-технической конференции (Самара, 29-31 мая 2012 г.). – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2012. – С. 43–48.
2. Митрошин В.Н., Митрошин Ю.В. Использование системного подхода при автоматизации непрерывных технологических процессов кабельного производства // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2010. – № 7(28). – С. 26–31.
3. Митрошин В.Н. Многопараметрическое управление производством кабелей связи на основе прогнозирующих моделей // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 4 (40). – С. 37–44.
4. Бергаланфи Л. фон. Общая теория систем – критический обзор // Исследования по общей теории систем: Сборник переводов / Общ. ред. и вст. ст. В.Н. Садовского и Э.Г. Юдина. – М.: Прогресс, 1969. – С. 23–82.
5. Флейшман Б.С. Элементы теории потенциальной эффективности сложных систем. – М.: Сов. радио, 1971. – 224 с.
6. Винер Н. Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине. 1948–1961. – 2-е изд. – М.: Наука; Главная редакция изданий для зарубежных стран, 1983. – 344 с.
7. Системный анализ и принятие решений: Словарь-справочник / Под. ред. В.Н. Волковой, В.Н. Козлова. – М.: Высш. шк., 2004. – 616 с.
8. Дроздов Н.Д. Основы системного анализа: Учеб. пособие. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2002. – 90 с.
9. Лихолетов В.В. Системный анализ и проектирование систем управления: Учеб. пособие. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 160 с.
10. Сурмин Ю.П. Теория систем и системный анализ: Учеб. пособие для вузов. – К.: МАУП, 2003. – 368 с.
11. Спицнадель В.Н. Основы системного анализа: Учеб. пособие для вузов. – СПб: Бизнес-пресса, 2000. – 326 с.
12. Черняк Ю.И. Системный анализ в управлении экономикой. – М.: Экономика, 1975. – 191 с.
13. Девятов Д.Х. Системный анализ: Учеб. пособие для вузов / Д.Х. Девятов, И.М. Ячиков, А.П. Морозов. – Магнитогорск: МГТУ, 2001. – 67 с.
14. Митрошин В.Н., Кулешова Д.И. Разработка системы управления процессом изолирования кабелей связи, обеспечивающей достижение требуемого эксплуатационного качества продукции // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 1 (45). – С. 71–77.

Статья поступила в редакцию 21 марта 2016 г.

DEVELOPMENT OF A SYSTEMATIC APPROACH TO THE PROBLEMS OF AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF CABLE PRODUCTION

D.I. Kuleshova

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

This paper is devoted to definition of main stages of system analysis development and its application for develop process control systems isolate communication cables. The historical development of system ideas has been analysed and main stages of complex systems research using system analysis has been described. Conducted research shows that system analysis nucleation was an adequate reaction on the necessity of complex systems creation, decision making under partial uncertainty, time and resource constraints.

Keywords: *wired communication cable, system analysis, system approach.*

Darya I. Kuleshova, Postgraduate Student.

УДК 681.51

ИДЕНТИФИКАТОР СОСТОЯНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

И.С. Левин

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: levin_ilja@yahoo.com

Рассмотрена задача построения идентификатора состояния в оптимальной по быстрдействию замкнутой системе управления процессом индукционного нагрева цилиндрических слитков, описываемая нелинейным неоднородным уравнением теплопроводности. Использовалась цифровая модель процесса, разработанная во FLUX. Предлагаемая процедура идентификации в условиях параметрической неопределенности характеристик объекта базируется на разработанной ранее методике аналитического синтеза безынерционного наблюдателя состояния объектов с распределенными параметрами, описываемых линейными пространственно одномерными уравнениями в частных производных параболического типа.

Ключевые слова: система с распределенными параметрами, индукционный нагрев, управление в условиях интервальной неопределенности, наблюдатель состояния.

В работе предлагается метод решения задачи проектирования идентификатора состояния нелинейной модели объекта с распределенными параметрами, в качестве которого рассматривается процесс индукционного нагрева. Методика решения подобной задачи для линейных моделей представлена в [1]. Далее рассматривается распространение данного метода на сложные, нелинейные цифровые модели объекта.

Процесс индукционного нагрева металлических заготовок цилиндрической формы с сосредоточенным управляющим воздействием по мощности внутреннего тепловыделения $u(t)$ можно описать следующим двумерным неоднородным уравнением теплопроводности [2]:

$$c(\theta)\gamma(\theta)\frac{\partial\theta(x,y,t)}{\partial t} = \frac{1}{x}\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(\theta)x\frac{\partial\theta(x,y,t)}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(\theta)\frac{\partial\theta(x,y,t)}{\partial y}\right) + F(x,y)u(t);$$

$$0 < x < R; 0 < y < L; 0 < t < t_1; \quad (1)$$

с краевыми условиями

$$\lambda(\theta)\frac{\partial\theta(R,y,t)}{\partial x} = \alpha(\theta_C(t) - \theta(R,y,t));$$

$$\lambda(\theta)\frac{\partial\theta(x,L,t)}{\partial y} = \alpha(\theta_C(t) - \theta(x,L,t));$$

$$\lambda(\theta)\frac{\partial\theta(x,0,t)}{\partial y} = -\alpha(\theta_C(t) - \theta(x,0,t));$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta(0, y, t)}{\partial x} &= 0; \\ \theta(x, y, 0) &= \theta_0(x, y) = \theta_0 = \text{const}. \end{aligned} \quad (2)$$

На управляющее воздействие $u(t)$ накладывается следующее ограничение:

$$0 \leq u(t) \leq u_{\max} \quad \forall t \in [0, t_1] \quad (3)$$

Здесь x и y – соответственно радиальная и продольная пространственные координаты; R, L – радиус и длина цилиндра; α – коэффициент теплоотдачи, определяющий уровень тепловых потерь с боковой и торцевых поверхностей цилиндра в окружающую среду с температурой $\theta_C(t)$; $F(x, y)$ – функция, характеризующая распределение электромагнитных источников тепла по объему заготовки; θ_0 – начальное распределение температур; $\theta(x, y, t)$ – температурное поле нагреваемого металлического изделия; $c(\theta), \gamma(\theta), \lambda(\theta)$ – удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности материала.

Определяя начальную температуру θ_0 и коэффициент теплоотдачи α с точностью до принадлежности заданным интервалам их возможных значений $\theta_0 \in [\theta_{0_{\min}}, \theta_{0_{\max}}]$, $\alpha \in [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$, зададим вектор неопределенных факторов как $z = (\theta_0, \alpha) \in Z$, где Z – множество всех допустимых по указанным ограничениям комбинаций величин θ_0 и α .

Пусть качество процесса управления оценивается по критерию оптимального быстрогодействия в интегральной форме:

$$I = \int_0^{t_1} dt = t_1 \rightarrow \min. \quad (4)$$

В случае, когда в системе управления может быть получена в реальном масштабе времени достоверная информация о реализуемой в каждом конкретном случае величине $z = \mathcal{Z} \in Z$ путем наблюдения за поведением управляемой величины, требования к конечному температурному состоянию $\theta(x, y, \mathcal{Z}, t_1)$ записываются в виде неравенства

$$\max_{x \in [0, R]; y \in [0, L]} \left| \theta(x, y, \mathcal{Z}, t_1) - \theta^{**}(x, y) \right| \leq \varepsilon_0(\mathcal{Z}), \quad (5)$$

с учетом заданного в равномерной метрике допуска $\varepsilon_0 \geq \varepsilon_0(\mathcal{Z})$ на отклонение конечного температурного состояния $\theta(x, y, \mathcal{Z}, t_1)$ от требуемого равномерного распределения температур $\theta^{**}(x, y) = \theta^{**} = \text{const}$.

Сформулируем задачу оптимального быстрогодействия.

Необходимо найти такое оптимальное управление $u^*(t)$ в условиях заданных ограничений (3), которое переводит объект, описываемый бесконечной системой уравнений (1), (2), из заданного начального в требуемое конечное состояние (5) за минимально возможное время $t_1 = t_{1_{\min}}$ для каждой из допустимых величин $z = \mathcal{Z} = (\tilde{\theta}_0, \tilde{\alpha}) \in Z$.

Если пренебречь инерционностью и погрешностями процедур наблюдения и идентификации, величина z определяется по некоторой заранее фиксируемой детерминированной зависимости $F(\theta_u(x, y, t))$ от результатов всегда неполного наблюдения $\theta_u(x, y, t)$ за текущим состоянием $\theta(x, y, t)$ объекта:

$$z = F(\theta_u(x, y, t)), \quad (6)$$

где $\theta_u(x, y, t)$ и $F(\theta_u(x, y, t))$ выбираются из условия минимальной сложности технической реализации системы управления.

Таким образом, возникает задача проектирования идентификатора (6) и синтеза регулятора $u^* = u^*(\theta_u(x, y, t))$, обеспечивающих решение детерминированной краевой задачи (1)–(6) за минимально возможное время $t_{1\min}$ при некоторых зафиксированных значениях θ_0 и α .

Задачу синтеза такой системы рассмотрим на примере построения оптимальной по быстродействию системы управления процессом индукционного нагрева металлических изделий цилиндрической формы, математическая модель которого представлена уравнениями (1)–(3).

Рассмотрим случай, когда мощность нагрева равномерно распределена по всей длине заготовки при одинаковых тепловых потерях на торцах $y = 0$ и $y = L$ цилиндра и можно ограничиться контролем температурного поля в среднем сечении цилиндра $y = \frac{L}{2}$ с нулевым температурным градиентом $\frac{\partial \theta \left(x, \frac{L}{2} \right)}{\partial y}$, в пре-

делах которого радиальное распределение температур описывается одномерным уравнением теплопроводности.

Пусть в соответствии с требованиями (5) к конечному температурному состоянию требуется обеспечить равномерный нагрев тела до заданной температуры $\theta^{**} = \text{const}$ с предельно достижимой в классе оптимальных по быстродействию двухинтервальных управляющих воздействий u^* релейной формы абсолютной точностью $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(2)}$ за минимально возможное время $t_1 = t_{1\min}$ при равномерно распределенной начальной температуре $\theta_0(x, y) = \theta_0 = \text{const} < \theta^{**}$ в условиях интервальной неопределенности по величинам θ_0 и α .

Решение детерминированной задачи синтеза замкнутой оптимальной по быстродействию системы управления для любых заранее фиксируемых значений вектора $z = z = (\tilde{\theta}_0, \tilde{\alpha}) \in Z$ приводит к следующему виду оптимального регулятора [3]:

$$u^*(\theta_1, \theta_2, z) = \frac{u_{\max}}{2} \left[1 + \text{sign } h_1(\theta_1, \theta_2, z) \right], \quad (7)$$

где $h_1(\theta_1, \theta_2, z)$ – функция переключения оптимального управления u^* , формируемая по измеряемым температурам $\theta_j(t)$ на поверхности $\theta_1 = \theta(R, t)$ и в центре $\theta_2 = \theta(0, t)$ выбранного сечения нагреваемого изделия:

$$h_1(\theta_1, \theta_2, \mathbf{z}) = \sum_{j=1}^2 \rho_j(\mathbf{z}) (\theta_j^T(\mathbf{z}) - \theta_j(t)). \quad (8)$$

Здесь $\theta_j^T(\mathbf{z}) = \theta^{**} - \varepsilon_{\min}^{(2)}(\mathbf{z})$, $j=1,2$ – значения температур $\theta_j(t)$ в конце оптимального процесса; коэффициенты $\rho_j(\mathbf{z})$ являются нетривиальными решениями однородной системы линейных уравнений:

$$\sum_{j=1}^2 \rho_j(\mathbf{z}) (\theta_j^T(\mathbf{z}) - \theta_j(\tilde{t}_m)) = 0, \quad (9)$$

где \tilde{t}_m – момент переключения оптимальной программы u^* с первого интервала управления на второй длительностями Δ_1^* и Δ_2^* , которые могут быть найдены вместе со значением $\varepsilon_{\min}^{(2)}(\mathbf{z})$ минимакса альтернативным методом [4].

Коэффициент ρ_1 в (8) можно принять равным единице, тогда ρ_2 вычисляется по следующему выражению:

$$\rho_2(\mathbf{z}) = \frac{\theta_1(\tilde{t}_m, \mathbf{z}) - \theta^{**} + \varepsilon_{\min}^{(2)}(\mathbf{z})}{\theta^{**} - \theta_2(\tilde{t}_m, \mathbf{z}) - \varepsilon_{\min}^{(2)}(\mathbf{z})}. \quad (10)$$

Полученная замкнутая система управления с регулятором (7) должна быть дополнена идентификатором (6) реализуемых величин $z = \mathbf{z}$. Алгоритм идентификации, методика получения которого описана в [1], принимает в линейном приближении следующий вид:

$$z_m = z_{mH} + \sum_{j=1}^2 \eta_{mj} (\theta_j(t_\Phi(\mathbf{z})) - \theta_{jH}); \eta_{mj} = \left(\frac{\partial z_m}{\partial \theta_j(t_\Phi(\mathbf{z}))} \right)_{z=z_H}; m=1,2. \quad (11)$$

Здесь $\theta_j(t_\Phi(\mathbf{z}))$ – наблюдаемые значения температур на поверхности и в центре заготовки в некоторый фиксированный момент времени $t_\Phi \in (0, \Delta_1^*)$, θ_{jH} – значения температур на поверхности и в центре заготовки в зафиксированный момент времени при номинальных значениях неопределенных параметров $z_H = (\theta_0^*, \alpha^*)$, а коэффициенты η_{mj} при наличии аналитических зависимостей температур $\theta_j(t_\Phi(\mathbf{z}))$ вычисляются по правилам дифференцирования неявных функций [1]:

$$\eta_{11} = \frac{\frac{\partial \theta_2}{\partial \alpha}}{\frac{\partial \theta_2}{\partial \alpha} - \frac{\partial \theta_1}{\partial \alpha}}; \eta_{12} = \frac{\frac{\partial \theta_1}{\partial \alpha}}{\frac{\partial \theta_2}{\partial \alpha} - \frac{\partial \theta_1}{\partial \alpha}}; \eta_{21} = -\eta_{22} = -\frac{1}{\frac{\partial \theta_2}{\partial \alpha} - \frac{\partial \theta_1}{\partial \alpha}}. \quad (12)$$

В этом случае алгоритмы определения в реальном времени коэффициента $\rho_2(\mathbf{y})$ в (10) и конечных значений температурных состояний $\theta_i^T(\mathbf{y})$, $i=1,2$ устанавливаются по следующим зависимостям [1], где

$$\rho_2(\bar{z}) = \rho_2(z_H) + \sum_{j=1}^2 \gamma_{2j} (\theta_j(t_\Phi(\bar{z})) - \theta_{jH}); \quad (13)$$

$$\theta_i^T(\bar{z}) = \theta_i^T(z_H) + \sum_{j=1}^2 \gamma_{ij}^* (\theta_j(t_\Phi(\bar{z})) - \theta_{jH}); \quad i=1,2; \quad (14)$$

$$\gamma_{ij} = \sum_{m=1}^2 \eta_{mj} \beta_{mi}; \quad \gamma_{ij}^* = \sum_{m=1}^2 \eta_{mj} \beta_{mi}^*; \quad (15)$$

$$\beta_{1i} = \left(\frac{\partial \rho_i}{\partial \theta_0} \right)_{z=z_H}; \quad \beta_{2i} = \left(\frac{\partial \rho_i}{\partial \alpha} \right)_{z=z_H}; \quad \beta_{1i}^* = \left(\frac{\partial \theta_i^T}{\partial \theta_0} \right)_{z=z_H}; \quad \beta_{2i}^* = \left(\frac{\partial \theta_i^T}{\partial \alpha} \right)_{z=z_H}.$$

Для исследуемых нелинейных моделей все указанные в (12), (15) производные могут быть найдены с требуемой точностью их заменой конечными разностями, вычисленными непосредственно на цифровой модели объекта:

$$\eta_{11} \cong \frac{\frac{\Delta \theta_2}{\Delta \alpha}}{\frac{\Delta \theta_2}{\Delta \alpha} - \frac{\Delta \theta_1}{\Delta \alpha}}; \quad \eta_{12} \cong \frac{\frac{\Delta \theta_1}{\Delta \alpha}}{\frac{\Delta \theta_2}{\Delta \alpha} - \frac{\Delta \theta_1}{\Delta \alpha}}; \quad \eta_{21} = -\eta_{22} \cong -\frac{1}{\frac{\Delta \theta_2}{\Delta \alpha} - \frac{\Delta \theta_1}{\Delta \alpha}}, \quad (16)$$

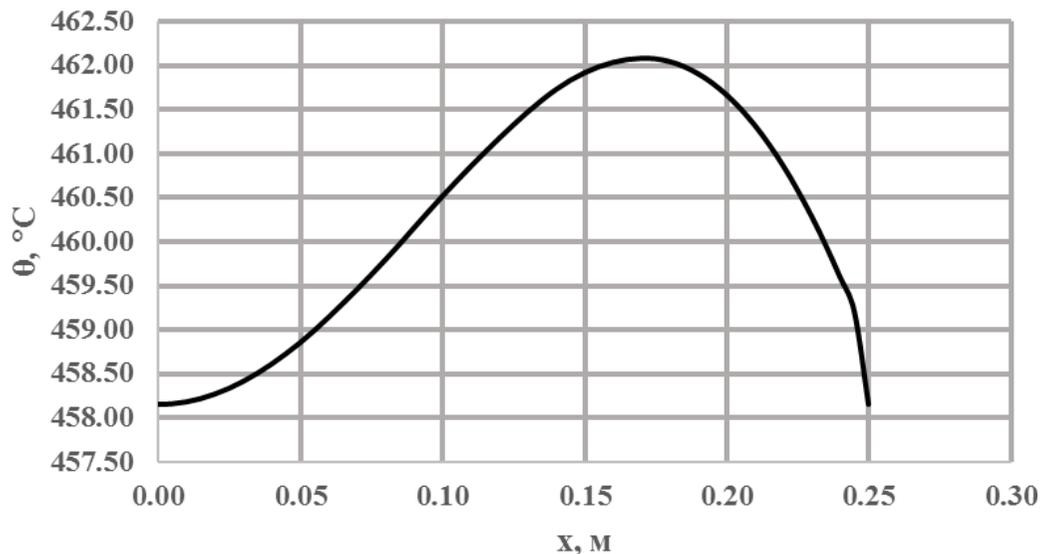
$$\beta_{1i} \cong \frac{\Delta \rho_i}{\Delta \theta_0}; \quad \beta_{2i} \cong \frac{\Delta \rho_i}{\Delta \alpha}; \quad \beta_{1i}^* \cong \frac{\Delta \theta_i^T}{\Delta \theta_0}; \quad \beta_{2i}^* \cong \frac{\Delta \theta_i^T}{\Delta \alpha}.$$

Описанная математическая модель объекта управления (1)–(3) может быть реализована в виде численной двумерной электротепловой модели. В данном исследовании была использована модель процесса сквозного периодического индукционного нагрева алюминиевых цилиндрических слитков, разработанная в специализированном пакете FLUX [5]. Исходные данные модели представлены в таблице.

Исходные данные для процесса индукционного нагрева

Параметр	Значение
$2R$, толщина заготовки, мм	500
L , длина заготовки, мм	1000
λ , теплопроводность, Вт/(м · °С)	115(1+0,0008 θ)
$B(H)$, кривая намагничивания, Тл	$4\pi \cdot 10^{-7} H$
$\rho_{Cp}(\theta)$, объемная теплоемкость, Дж/(м ³ · °С)	$2,34 \times 10^6 (1 + 5,7 \times 10^{-4} \theta)$
$\rho(\theta)$, сопротивление, Ом	$0,3 \times 10^{-7} (1 + 0,007 \theta)$
α , коэффициент конвективного теплообмена	20
θ_0 , начальная температура, °С	20
θ^{**} , конечная температура, °С	460
u_{\max} , напряжение на индукторе, В	470
ν , частота, Гц	50

Для данной модели были найдены следующие значения оптимальных параметров: $\Delta_1^* = 1835$ сек.; $\Delta_2^* = 140$ сек.; $\varepsilon_{\min}^{(2)} = 1.8$ °С. Поиск оптимальных параметров осуществлялся путем подбора длительностей интервалов с контролем формы температурного распределения по радиусу заготовки $\theta\left(x, \frac{L}{2}, \Delta_1^*, \Delta_2^*\right)$ (см. рисунок) в центральном сечении $L/2$, согласно альтернансному методу.



Температурное распределение по радиусу центрального сечения цилиндра

$$\theta\left(x, \frac{L}{2}, \Delta_1^*, \Delta_2^*\right)$$

Для исходных номинальных данных, представленных в таблице, а также $z_H = (\theta_0^*, \alpha^*)$, $\theta_0^* = 20$ °С, $\alpha^* = 20$ получены следующие значения коэффициентов в (10), (16):

$$\rho_2 = 0.89 \quad \eta_{11} = 0.13, \eta_{12} = 0.87, \eta_{21} = 0.31, \eta_{22} = -0.31, \beta_{12} = 0.03, \beta_{22} = -0.06,$$

$$\gamma_{21} = -0.02, \quad \beta_{11} = \beta_{21} = 0, \quad \beta_{11}^* = 0.35, \quad \beta_{12}^* = 0.44, \quad \beta_{21}^* = 0.13, \quad \beta_{22}^* = 0.44$$

$$\gamma_{11} = \gamma_{12} = 0, \gamma_{22} = 0.05, \gamma_{11}^* = 0.08, \gamma_{21}^* = 0.19, \gamma_{12}^* = 0.26, \gamma_{22}^* = 0.24.$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рапопорт Э.Я., Левин И.С. Структурно-параметрический синтез оптимальных по быстродействию систем управления с распределенными параметрами в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта // Автометрия. – 2015. – Т. 51. – № 5. – С. 3–16.
2. Рапопорт Э.Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. – М.: Металлургия, 1993. – 279 с.
3. Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2009. – 677 с.
4. Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. – М.: Наука, 2012. – 309 с.

5. Плешивцева Ю.Э., Попов А.В., Дьяконов А.И. Двумерная задача оптимального по типовым критериям качества управления процессом сквозного индукционного нагрева // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2014. – № 2 (42). – С. 148–163.

Статья поступила в редакцию 21 марта 2016 г.

STATE IDENTIFIER OF DIGITAL MODEL OF THE INDUCTION HEATING PROCESS

I.S. Levin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: levin_ilja@yahoo.com

The solution of the following problem was described. It is necessary to construct a state identifier of time-optimal closed loop system that controls the process of induction heating of cylindrical billets. This process can be specified by a nonlinear nonhomogeneous heat-transfer equation. For the purpose of the modelling such process a digital model developed in FLUX software was used. The procedure of identification in conditions of interval uncertainty of process parameters was proposed. It based on previously developed algorithm of analytical synthesis of inertialess state observer for the objects with distributed parameters which was described with linear spatial one-dimensional partial differential parabolic equations.

Keywords: distributed parameter system, induction heating, control with interval uncertainty of object's characteristics, state observer.

УДК 681.3.06

СЕТЬ ПЕТРИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЕКТОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВИРТУАЛЬНЫХ АУКЦИОНОВ

П.И. Марычев, С.П. Орлов

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассматривается проблема распределения сложных проектов по группам исполнителей (акторам). С целью эффективного управления и оптимального использования ресурсов проводится виртуальный аукцион со многими итерациями, в течение которых акторы предлагают не только контрактную цену, но и календарно-сетевой график выполнения проекта в виде диаграммы Ганта. Предложено использовать имитационные модели на сетях Петри для анализа выполнимости и синхронизации проектов. Сформулированы правила перехода от диаграммы Ганта к сетевой модели Петри, которая учитывает взаимные связи между различными проектами. Приведен пример модели проекта на сети Петри. Предложенная модель может быть использована в рамках теоретико-игрового моделирования виртуального аукциона для описания взаимной информированности акторов о своих возможностях.

Ключевые слова: управление проектами, системный анализ, сети Петри, виртуальный аукцион, имитационное моделирование.

В современных крупных компаниях транспорта нефти и нефтепродуктов реализуются сложные инновационные проекты, цель которых – повысить эффективность производства. Эти проекты имеют комплексный характер, и практика показывает, что при централизованном управлении возникает много сложностей при их выполнении. Существует ряд методологий управления сложными процессами в матричных организационных структурах [1]. В работе [2] предложены виртуальные аукционы для определения состава исполнителей при матричной организации компании. Рассмотрена модель P2P взаимодействия при проведении виртуальных аукционов [3]. Проблема заключается в том, что выполнение сложного комплексного проекта напрямую зависит от своевременного и качественного выполнения отдельных проектов. В свою очередь, эти проекты также содержат множество задач и должны выполняться в заданные сроки. В то же время динамика выполнения проектов и их взаимосвязь в существующих системах управления проектами отслеживаются недостаточно. При этом проведение виртуальных аукционов может привести к ситуации, когда отдельные компоненты сложного проекта не будут реализованы в заданные сроки либо результаты не будут удовлетворять исходным требованиям. Для решения этой проблемы предлагается использовать модель на основе сети Петри. Такой подход к управлению проектами был развит в работе [4]. В статье описывается сетевая модель Петри, которая позволяет проводить имитационное моделирование процесса проектирования в P2P структуре при распределении проектов путем виртуальных аукционов.

Павел Иванович Марычев, аспирант.

Сергей Павлович Орлов (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Вычислительная техника».

Виртуальные аукционы при распределении проектов

Будем использовать многоакторную P2P модель, в которой обеспечивается наилучшее взаимодействие исполнителей (акторов) при выполнении проектов в компании с матричной структурой управления [3].

Формальное описание проекта представляется следующим образом:

$$P = (Z_p, T_p, C_p),$$

где $Z_p = \{z_1, \dots, z_{N_z}\}$ – работы; $T_p = \{(\tau_1, \Delta\tau_1), \dots, (\tau_{N_z}, \Delta\tau_{N_z})\}$ – множество заданных сроков окончания работ и длительностей их выполнения; $C_p = \{c_1, \dots, c_{N_z}\}$ – стоимости выполнения каждой работы.

В результате первоначального планирования проекта определяется диаграмма Ганта, согласно которой задаются сроки и последовательность выполнения работ:

$$G = (Z_p, T_p, V_G),$$

где V_G – связи между работами.

Определим P2P взаимодействие в организационной матричной структуре как

$$S_{P2P} = (U_{P2P}, V_{P2P}, F_{P2P}),$$

где U_{P2P} – множество акторов, V_{P2P} – множество одноранговых связей между ними, $F_{P2P}: U_{P2P} \times U_{P2P} \rightarrow V_{P2P}$ – функция, определяющая организацию связей между акторами.

Целью взаимодействия акторов в P2P сети является обеспечение своевременного решения поставленных проектных заданий с минимальной стоимостью:

$$\sum_{i=1}^{N_z} c_i \rightarrow \min; \quad \max(\tau_i) < T_z, \quad (1)$$

где $c_i \in C_p$ – стоимость выполнения работы z_i ; τ_i – время ее завершения; N_z – количество работ; T_z – директивное время выполнения работы z_i .

Каждый актор после получения проекта может запланировать его выполнение с помощью собственных ресурсов либо разделить его на несколько других работ (декомпозировать) и передать часть новых работ другим соисполнителям (акторам). Такая процедура является аутсорсингом проектных заданий. Аутсорсинг реализуется в ходе проведения итерационных виртуальных аукционов.

Аукцион – это публичная продажа одного лота по заранее установленным правилам, определяемым диспетчером перед началом аукциона. Роль такого диспетчера может выполнять как управляющий центр, так и актор в момент декомпозиции задачи. При этом он в разные интервалы времени выставляет подзадачи (лоты), интересные другим акторам. В самом начале процесса планирования диспетчер осуществляет первоначальную декомпозицию комплексного проекта P по принципу WBS. При этом формируются начальные календарно-сетевые графики в виде диаграмм Ганта G_n^0 , где $n = \overline{1, R}$, R – число проектов после декомпозиции.

Целью диспетчера является обеспечение максимального суммарного выигрыша от реализации всех лотов за некоторый интервал времени. Победителем аукциона становится актор, выигравший аукцион в соответствии с его правилами. Целью актора является приобретение максимального количества лотов наибольшего интереса при минимальных затратах.

В ходе виртуального аукциона на каждой итерации k -й актор представляет

свой вариант календарно-сетевое планирования в виде диаграмм Ганта $G_{nk}^m, k = \overline{1, K}$, где K – число акторов, участвующих в аукционе, m – номер итерации виртуального аукциона. Теперь организатор аукциона кроме предлагаемой договорной цены имеет информацию о намерениях и возможностях акторов. Эта информация может быть использована для определения на раннем этапе планирования согласованности проектов разных акторов, выявления нестыковок в сроках, использовании ресурсов, финансировании.

Для решения этих задач в статье предлагается сетевая модель Петри, которая строится на базе диаграммы Ганта для каждого проекта.

Сетевая модель Петри

Актор предоставляет в центр управления виртуальным аукционом диаграмму Ганта работ проекта, на которой найдены критические пути и для каждой работы $z_i \in G$ рассчитаны параметры $\tau_i, \tau_{i,ran}^H, \tau_{i,pozd}^H, \tau_{i,ran}^K, \tau_{i,pozd}^K$ – длительность выполнения работы и моменты ее раннего и позднего начала и окончания.

Определим правила перехода $G \rightarrow S_{ПР}$, где $S_{ПР} = (W, T, U, \tau, R_0)$ – сетевая модель Петри проекта, W – конечное множество позиций, T – конечное множество переходов, τ – времена срабатывания переходов, $U \subseteq W \times T \cup T \times W$ – отношение инцидентности, R_0 – начальная разметка в начальный момент времени. На диаграмме Ганта работа z_i характеризуется длительностью выполнения τ_i , заданными моментами начала и окончания выполнения задачи, а также связями с предшествующими и последующими работами. Кроме того, важно привязать расписание работ к календарному времени для учета выходных дней и сверхурочных.

В работе [4] была предложена методика перехода к сети Петри путем сопоставления работам z_i проекта элементарных фрагментов сетевой модели (рис. 1).

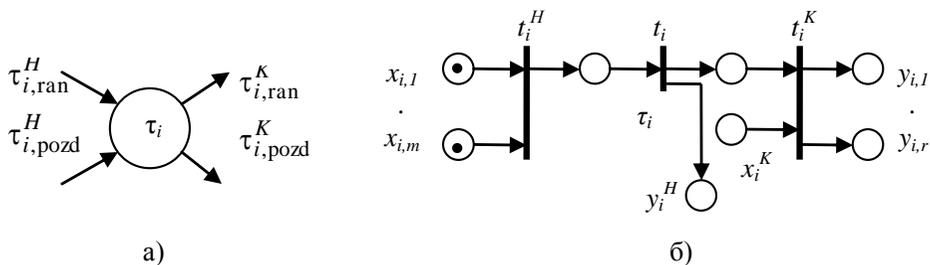


Рис. 1. Элементы диаграммы Ганта и сети Петри:

a – элемент диаграммы для работы z_i с ее параметрами; *б* – элементарный фрагмент сети Петри

Элементарный фрагмент сети Петри содержит три перехода:

t_i – переход, моделирующий процесс выполнения работы z_i с длительностью срабатывания τ_i ;

t_i^H, t_i^K – начальный и конечный переходы, у которых длительности срабатывания либо равны нулю, либо зависят от одного из значений $\tau_{i,ran}^H, \tau_{i,pozd}^H, \tau_{i,ran}^K, \tau_{i,pozd}^K$;

x_{i1}, \dots, x_{im} – входные позиции, определяющие условия начала выполнения работы;

y_{i1}, \dots, y_{ir} – выходные позиции, являющиеся входными для других фрагментов модели и разрешающие начало их выполнения;

x_i^K – внешняя разрешающая позиция конечного перехода t_i^K , которая обеспечивает связь с тем фрагментом другого проекта, после завершения которого возможно окончание данной работы;

y_i^H – внешняя выходная позиция перехода t_i , которая разрешает выполнение работы во фрагменте сети другого проекта.

В позициях сети Петри расположены маркеры, определяющие разметку сети и разрешающие срабатывания переходов (на рис. 1 это черные точки в позициях x_{i1}, x_{im}).

Отображение $G_{nk}^m \rightarrow S_{nk}^m$ описывает композицию общей сети Петри проекта по диаграмме Ганта, которая представляет собой последовательно-параллельную структуру. Однако в большинстве проектов реализуются классическая итерационная, каскадная модели либо спиральная модель объектно-ориентированного проектирования. Это приводит к появлению циклических участков в сети Петри проекта.

Рассмотрим пример, в котором для заданного проекта с диаграммой G_E (рис. 2) следует построить соответствующую сеть Петри.

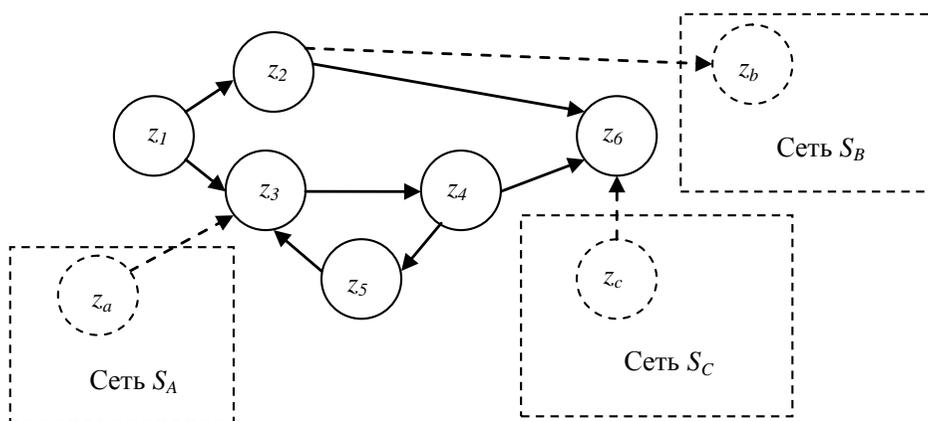


Рис. 2. Пример диаграммы Ганта G_E проекта

Проект содержит шесть работ $z_1 - z_6$, причем работы z_3 и z_6 зависят от того, как выполняются работы в других проектах, представляемых, в свою очередь, сетями Петри S_A и S_C . А работа z_2 определяет возможность начать работу z_b в сети Петри S_B . На рис. 3 показана сеть Петри S_E для проекта G_E , а также связи с другими сетями проектов.

Имитационное моделирование в сетях Петри заключается в генерировании множества начальных разметок и приписывании переходам сети временных значений. При этом длительности выполнения работ задаются случайным образом с заданным законом распределения. Таким образом, при проведении виртуального аукциона со множеством акторов диспетчер получает множество сетевых моделей и анализирует их свойства. Это позволяет согласовать различные подпроекты комплексного инновационного проекта и принимать решение о выигрыше в аукционе тех или иных акторов.

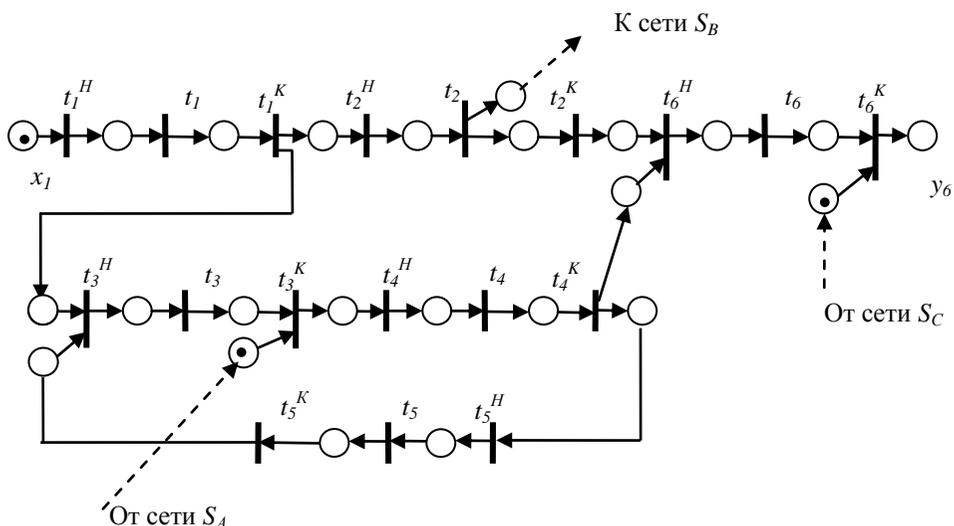


Рис. 3. Сеть Петри S_E для диаграммы G_E

Информацию в виде имитационных моделей выполнения проектов можно использовать и в случае применения в виртуальных аукционах теоретико-игровых моделей. В работе [5] описана рефлексивная теоретико-игровая модель для оптимального распределения проектов при коллективном поведении акторов в условиях их взаимной информированности в одноранговой P2P сети. Предложенная модель сети Петри выполнения проекта может описывать не только способность актора выполнить задание в срок, но и также степень использования ресурсов. Для этого следует использовать раскрашенные сети Петри [6], в которых цветные маркеры будут соответствовать трудовым и материальным ресурсам. Очевидно, что такие модели могут работать не только на этапе распределения проекта, но и в течение всего жизненного цикла проектирования.

Заключение

Виртуальные аукционы целесообразно применять в крупных холдинговых компаниях, где можно организовать матричную структуру с одноранговым взаимодействием как проектных групп, так и производственных единиц. Эффективность виртуальных аукционов при управлении проектами базируется на использовании единого информационного пространства предприятия. Конечной целью развиваемого научного исследования является создание информационной системы, выполняющей функции управления и поддержки принятия решений в процессе проектирования.

Можно сформулировать следующие перспективные направления научного исследования:

- разработка имитационных моделей на базе раскрашенных сетей Петри и исследование свойств достижимости и живости сетей, выявление ловушек и дедлоков;
- исследование поведения акторов с помощью рефлексивной теоретико-игровой модели, в которой сеть Петри описывает динамику перераспределения ресурсов проектов в течение жизненного цикла;
- разработка программного комплекса имитационного моделирования и управления проектами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Новиков Д.А.* Математические модели формирования и функционирования команд / Д.А. Новиков. – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2008. – 184 с.
2. *Ивашенко А.В.* Модель аукциона в задачах управления взаимодействием активных программ по схеме P2P / А.В. Ивашенко, А.М. Леднев // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 3(35). – С. 19-25.
3. *Орлов С.П.* Применение модели P2P аутсорсинга в задачах управления проектами на предприятиях нефтегазовой отрасли / С.П. Орлов, А.М. Леднев, А.В. Ивашенко // Вестник Волжского университета им. Татищева. – 2013. – № 5(21). – С. 5-10.
4. *Орлов С.П.* Сетевая модель Петри расписания задач при управлении программными проектами / С.П. Орлов, М.М. Ефремов, Е.Б. Бабамуратова // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 2(30). – С. 30-36.
5. *Orlov S.P.* Reflexive game model for control the teams of software developers / S.P. Orlov // Proceedings of International Conference of Soft Computing and Measurements, SCM '2015'. V.1. P. 66-69. St.-Petersburg, Russia. Publisher: IEEE Xplore, 2015.
6. *Мараховский В.Б.* Моделирование параллельных процессов. Сети Петри. Курс для системных архитекторов, программистов, системных аналитиков, проектировщиков сложных систем управления / В.Б. Мараховский, Л.Я. Розенблюм, А.В. Яковлев. – СПб.: Профессиональная литература, АйТи-Подготовка, 2014. – 400 с. – ISBN-978-5-9905552-0-4.

Статья поступила в редакцию 3 марта 2016 г.

PETRI NET FOR PROJECT MODELLING IN VIRTUAL AUCTION

P.I. Marychev, S. P. Orlov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The paper deals with the problem of complex projects allocation for groups of actors. For the purpose of efficient management and optimal resource use the virtual auction with multiple iterations is held during which the actors not only offer a contract price, but also provide a project schedule as Gantt charts. The use of simulation models on Petri nets to analyze the feasibility and synchronization projects is proposed. The rules of the transition from the Gantt chart to the Petri net model describing the interconnections between various projects are formulated. The example of a model project on Petri net is given. The proposed model can be used within the game theoretic modeling of virtual auction for describing the mutual actors' knowledge in accordance with their capabilities.

Keywords: *management, systems analysis, Petri nets, virtual auction, simulation.*

*Pavel I. Marychev, Postgraduate Student.
Sergey P. Orlov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

УДК 303.732.4; 336.24

О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМАХ ТАМОЖЕННОГО КОНТРОЛЯ

А.В. Ненашев

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассматривается надежность выполнения организационно-технической подсистемой Федеральной таможенной службы России своей локальной задачи по приему и обработке электронных деклараций на товары. Уточняется функциональное назначение подсистемы исходя из структуры целеполагания Федеральной таможенной службы России, на базе которой анализируется ее надежность. Проводится поэлементный анализ работы организационно-технической подсистемы Федеральной таможенной службы России. На основании статистических данных об отказах подсистемы производится приближенный расчет параметров ее надежности.

Ключевые слова: Федеральная таможенная служба России, организационно-техническая подсистема, надежность, отказ, поток отказов, интенсивность отказов, вероятность безотказной работы.

Рассматривая таможенную службу страны как подсистему сложной инфраструктуры суверенного государства, а таможенное регулирование – как основную функцию этой подсистемы (рис. 1), оценим один из многочисленных факторов, влияющих на эффективность выполнения этой функции. Проанализируем надежность выполнения организационно-технической подсистемой (ОТП) Федеральной таможенной службы (ФТС) своей локальной задачи по приему и обработке электронных деклараций на товары, которая в существенной степени влияет на достижение ФТС глобальной системной цели.

Для этого обратимся к функциональному назначению ОТП, которое содержит 4 основные компоненты:

- 1) обработка формальных заявлений участников внешнеэкономической деятельности о перемещении товаров через таможенную границу РФ;
- 2) фиксация результатов контроля товаров, перемещенных через таможенную границу РФ;
- 3) фиксация результатов взимания таможенных платежей в пользу РФ;
- 4) передача решений Таможенного органа в сторону участника внешнеэкономической деятельности.

В соответствии с назначением локальными потребителями ОТП ФТС являются:

- государство;
- участник внешнеэкономической деятельности (УчВЭД).

Понятие «локальные потребители» введено, чтобы не использовать сложную процедуру поиска общего источника интересов этих потребителей.

С точки зрения государства отказом ОТП ФТС является нарушение нормативных требований – например, сроков таможенного контроля, его качества или непрерывности и т. п.

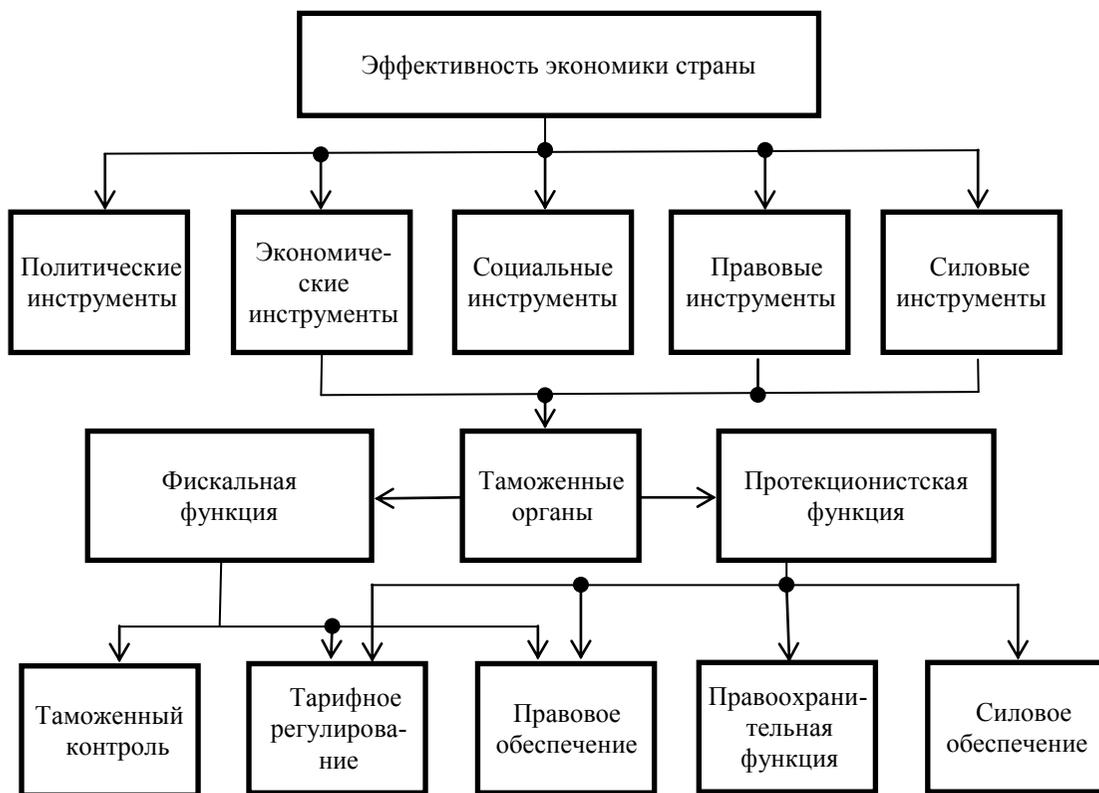


Рис. 1. Упрощенная структурная схема целеполагания ФТС

С точки зрения УчВЭД отказом является невозможность оформлять грузы в пределах одного таможенного поста с установленными нормативами продолжительностью, объемом контроля, качеством контроля. Дело в том, что УчВЭД осуществляет свою деятельность в одной или более территориальных зонах, количество которых невелико и ограничено. Это означает, что УчВЭД обычно направляет заявление и передает товары на контроль в пределах зоны деятельности одного таможенного поста, реже количество постов может быть больше.

В соответствии с изложенным определим два типа отказов ОТП ФТС:

1) нарушение сроков контроля. Регламентом установлены следующие сроки таможенного контроля:

- на принятие решения по заявлению – 3 часа от момента поступления полного комплекта документов на груз в таможенный орган без продления процедуры таможенного контроля;

- на принятие решения по заявлению – до 10 суток при продлении процедуры таможенного контроля;

2) нарушение объема и качества контроля.

Относительно второго типа отказов отметим следующее. С точки зрения государства нарушением качества контроля будет невыявление фактического нарушения нормативов при перемещении товаров через таможенную границу.

В рамках ОТП ФТС определить наличие отказа невозможно. Он диагностируется специальными методами и отражается в ОТП ФТС соответствующими организационными мероприятиями.

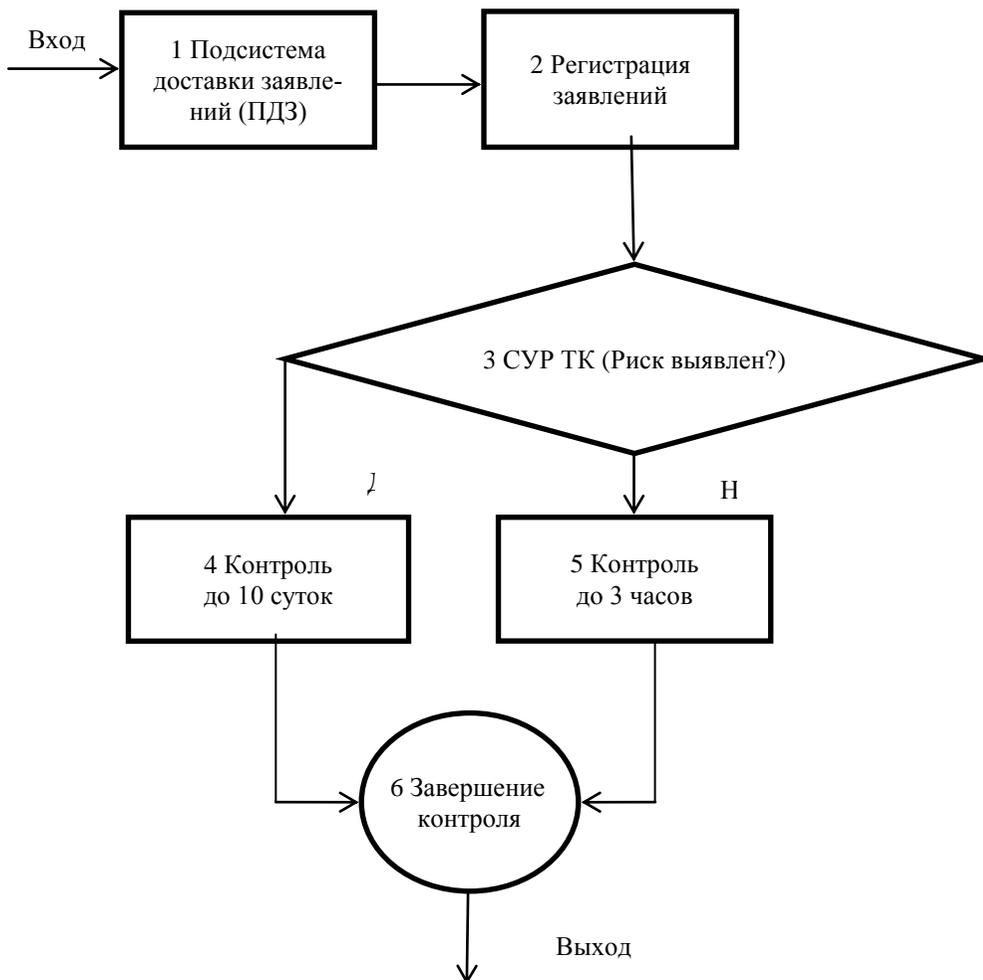


Рис. 2. Схема процедуры контроля в подсистеме ОТП ФТС

Каждый элемент этой схемы содержит все необходимые технические и программные средства, а также соответствующий персонал. Наличие персонала определяет ОТП ФТС как социотехническую структуру, а выявление ее надежности формальными методами [1] общей теории надежности, строго говоря, без тщательных доказательств, проводить нельзя. Однако оценочные характеристики надежности ОТП ФТС этими методами, по мнению автора, получить возможно.

Будем рассматривать ОТП ФТС в период ее рабочей эксплуатации [1-3]. Поэтому интенсивность обоих типов отказов для ОТП ФТС в целом и ее элементов в частности будем предполагать постоянными, а распределение во времени вероятности безотказной работы – экспоненциальным.

Отказы обоих типов в любом из элементов ОТП ФТС (рис. 2) приводят к от-

казу всей подсистемы ОТП ФТС. При этом ОТП ФТС имеет следующую особенность: учет времени, затраченного на контроль заявления, начинается с момента поступления заявления на регистрацию (элемент 2), а потеря времени на контроль за счет отказа системы доставки (элемент 1) таможенными органами не учитывается, но приводит к превышению норматива и является отказом первого типа. Поэтому для оценки надежности ОТП ФТС ее схему надежности можно считать последовательной (рис. 3), с эквивалентным по надежности элементом, объединяющим элементы 4 и 5.

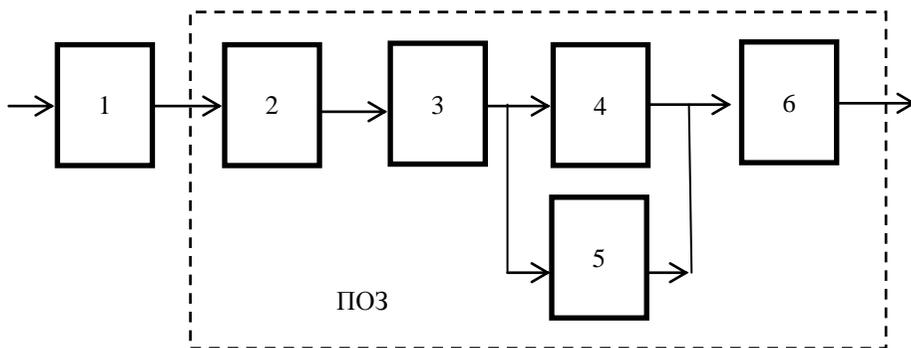


Рис. 3. Схема расчета надежности ОТП ФТС

К сожалению, достоверная статистика отказов ПДЗ (элемент 1, см. рис. 3) в настоящее время не накоплена. Предполагая экспоненциальное распределение вероятности безотказной работы в этом элементе, отметим, что интенсивность отказов ПДЗ по сравнению с подсистемой обработки заявлений (ПОЗ) незначительна и не приводит существенному увеличению продолжительности процедуры таможенного контроля и дополнительным издержкам, связанным с погрузочно-разгрузочными работами, оплатой услуг складов временного хранения и т. п. Поэтому сосредоточимся на анализе надежности ПОЗ, преимущественно связанной с отказами 2-го типа.

Номера элементов на рис. 3 соответствуют обозначениям на рис. 2. При этом подсистема 3 – система управления рисками в таможенном контроле (СУРТК) – распределяет заявления по двум параллельным ветвям. Если в элементе 3 выявлен риск, то заявление отправляется на элемент 4, если не выявлен, то на элемент 5. При этом ошибка в элементе 3 приводит к отказу всей системы за счет нарушения сроков из-за необоснованно тщательного контроля. Ошибки в элементах 4 и 5 теоретически частично могут быть взаимно скомпенсированы путем тщательного анализа на этапе рассмотрения заявлений в элементе 5 или достаточно оперативного анализа в элементе 4. Детализация отказов ПОЗ – предмет дальнейшего тщательного анализа. На оценочном уровне рассмотрим ПОЗ как элемент схемы расчета надежности без его детализации.

На макроуровне основным источником отказов второго типа в системе является элемент 3 (см. рис. 2). Именно здесь формируются решения об объеме таможенного контроля в отношении конкретного заявления в форме применения к представленным с заявлением документам и товарам мер по минимизации риска таможенного контроля (ММР), т. е. происходит выявление риска.

Официальная статистика СУРТК относительно отказов второго типа в 2015 году в Самарской таможне по месяцам приведена в табл. 1.

Таблица 1

Результаты работы СУРТК в Самарской таможне за 11 месяцев 2015 г.

Период	Общее количество заявлений $C_i^{общ}$	Количество заявлений с примененными ММР $c_i^{ММР}$	Количество заявлений, по которым применение ММР принесло результат, $c_i^{ММР(рез)}$
Январь	3179	1246	37
Февраль	4121	1745	106
Март	4402	1803	97
Апрель	4194	1844	133
Май	3728	1539	125
Июнь	3899	1619	119
Июль	3460	1559	122
Август	3476	1463	83
Сентябрь	3736	1607	68
Октябрь	4121	1764	47
Ноябрь	3515	1662	46
Итого	41137	17851	983

Данные таблицы показывают, что в 2015 г. в Самарской таможне было обработано 41 137 заявлений. Из них по 17 851 заявлению было принято решение о применении ММР, и только по 983 (5,5 % от общего количества примененных ММР) заявлениям увеличение объема контроля привело к положительному результату с точки зрения государства, под которым понимается увеличение таможенных платежей, выявление нарушений таможенного законодательства. В остальных 94,5 % случаях с точки зрения добросовестного УчВЭД в отношении его заявления произошел отказ второго типа.

На основании статистических данных рассчитаем параметры функций надежности СУРТК относительно отказов второго типа [4, 5].

$\lambda_{\text{суртк}} = \sum_{i=1}^{11} \lambda_{\text{суртк}}^i / 11$ – среднегодовая интенсивность отказов СУРТК (1/ч);

$\lambda_{\text{суртк}}^i = \frac{c_i / \Delta t_i}{C_i}$ – интенсивность отказов СУРТК в i -том месяце 2015 г. (1/ч);

Δt_i – количество рабочих часов в i -том месяце 2015 г.;

$c_i = c_i^{\text{ММР}} - c_i^{\text{ММР(рез)}}$ – количество отказов СУРТК в i -том месяце 2015 г.;

$c_i^{\text{ММР}}$ – количество заявлений, обработанных ПОЗ в i -том месяце 2015 г. с применением ММР;

$c_i^{\text{ММР(рез)}}$ – количество заявлений, обработанных ПОЗ в i -том месяце 2015 г. с результативным применением ММР;

$C_i^{\text{общ}}$ – количество заявлений, обработанных ПОЗ в i -том месяце 2015 г.;

$C_i = C_i^{\text{общ}} - c_i$ – количество заявлений, обработанных ПОЗ в i -том месяце 2015 г., по которым не произошло отказа.

Результаты расчета параметров надежности сведем в табл. 2.

Распределение интенсивности отказов СУРТК

i , месяц	c_i , шт.	C_i , шт.	Δt_i , ч.	$\lambda_{\text{суртк}}^i$, 1/ч
1	1209	1970	120	0,005114
2	1639	2482	152	0,004344
3	1706	2496	168	0,004068
4	1711	2483	176	0,003915
5	1414	2314	144	0,004243
6	1500	2399	168	0,003722
7	1437	2023	184	0,003860
8	1380	2096	168	0,003919
9	1539	2197	176	0,003980
10	1717	2404	176	0,004058
11	1616	1899	160	0,005319

График распределения интенсивности отказов второго типа (рис. 4), построенный на данных табл. 2, иллюстрирует ее относительную равномерность, что подтверждает справедливость допущения $\lambda = \text{const}$ и экспоненциального распределения вероятности безотказной работы.

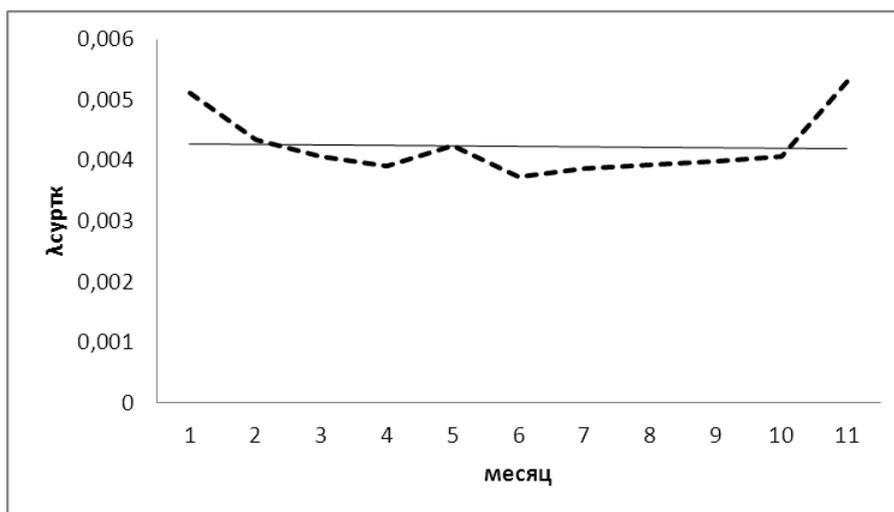


Рис. 4. Распределение интенсивности отказов ОТП ФТС
2-го типа в 2015 г.:

----- $\lambda_{\text{суртк}}^i$; — математическое ожидание $\lambda_{\text{суртк}}^i$

Согласно данным табл. 2 получим:

– интенсивность отказов $\lambda_{\text{суртк}} = 0,004231 \frac{1}{\text{ч}}$;

- частота отказов $a_{\text{суртк}}(t) = \lambda_{\text{суртк}} e^{-\lambda_{\text{суртк}} t} = 0.004231 e^{-0.004231 t} \frac{1}{\text{ч}}$;
- вероятность безотказной работы $P_{\text{суртк}}(t) = e^{-\lambda_{\text{суртк}} t} = e^{-0.004231 t}$;
- средняя наработка на отказ $T_{\text{суртк}} = \frac{1}{\lambda_{\text{суртк}}} = \frac{1}{0.004231} = 236,35 \text{ ч.}$

Несмотря на приближенный характер проведенного исследования, можно сделать следующий вывод.

Значительный вклад в количество отказов ОТП ФТС с точки зрения УчВЭД вносит процедура принятия таможенными органами решения об объеме контроля по заявлению. Средняя наработка на отказ составляет 236,35 часов, что свидетельствует о пробелах в методике принятия решений. Это зачастую приводит к необоснованному применению мер дополнительного контроля и наносит ущерб законопослушным УчВЭД, что особенно существенно для промышленных предприятий, т. к. сокращает их конкурентоспособность. Ситуация требует дальнейшего глубокого исследования с целью выработки мер по ее исправлению.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козлов В.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. – М.: Советское радио, 1985. – 462 с.
2. Воеводин В.П. Эволюция понятия и показателей надежности вычислительных систем: Препринт ИФВЭ 2012–24. – Протвино, 2012. – 24 с.
3. Надежность программного обеспечения / Т. Тейер, М. Липов, Э. Нельсон. – М.: Мир, 1981. – 323 с.

Статья поступила в редакцию 3 марта 2016 г.

ON SOME PROBLEMS OF CUSTOMS CONTROL

A.V. Nenashev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The reliability of solving the local task for reception and processing of electronic declarations of goods by organizational and technological subsystem (OTP) of the Federal Customs Service of Russia (FCS) is considered. When analyzing the OTP reliability a significant problem was revealed by FCS. The analysis of the organizational and technological subsystem is given. On the statistical data of the system failure the approximate parameter calculation is done.

Keywords: *Federal Customs Service of Russia, logistical subsystem, reliability, failure, failure flow failure rate, the probability of failure-free operation.*

УДК 621.785, 669.14, 519.6

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНДУКЦИОННЫХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ¹

**Ю.Э. Плешивецва¹, Э.Я. Рапопорт¹, Б. Наке², А.Н. Никаноров²,
А.В. Попов¹**

¹Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

²Институт электротехнологий Университета им. Лейбница, г. Ганновер
Германия, D-30167, г. Ганновер, Wilhelm-Busch st., 4

Описаны основные подходы и приведены примеры решения задач многокритериальной оптимизации индукционных нагревательных установок. Основной целью исследования является применение различных оптимизационных алгоритмов и методов численного моделирования при решении многокритериальных задач оптимизации, сформулированных для типовых критериев качества, которые обеспечивают максимальную равномерность конечного температурного распределения по объему заготовки, минимальный расход энергии на нагрев и минимум окалинообразования. Представлено решение двухкритериальной задачи оптимизации на базе альтернативного метода процесса индукционного нагрева алюминиевых заготовок, моделируемого двумерной численной моделью, разработанной с помощью специализированного программного пакета FLUX (Cedrat). В качестве примера трехкритериальной задачи рассмотрена оптимизация с помощью стандартных генетических алгоритмов процесса нагрева стальных заготовок, моделируемого двумерной численной моделью, разработанной в мультифизическом пакете ANSYS. Разработанные оптимизационные процедуры планируется использовать для решения различных задач оптимального проектирования и управления промышленными электротехнологическими установками и системами.

Ключевые слова: индукционный нагрев, многокритериальная оптимизация, численная модель, альтернативный метод, генетические алгоритмы, Cedrat FLUX, ANSYS, оптимальное проектирование.

Оптимизация играет ключевую роль при проектировании любой установки или системы, и электромагнитные устройства, к которым относятся индукционные нагревательные установки, не являются исключением. Задача оптимального проектирования заключается в нахождении области проектных параметров установки, которые обеспечивают соответствие предъявляемым технологическим

¹ Работа финансирована Минобрнауки РФ (базовая часть госзадания, проект №1436).

Юлия Эдгаровна Плешивецва (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Управление и системный анализ в теплоэнергетических и социотехнических комплексах».

Эдгар Яковлевич Рапопорт (д.т.н. проф.), профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Антон Валерьевич Попов, аспирант, ассистент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Бернард Наке, директор Института электротехнологий университета им. Лейбница, г. Ганновер.

Александр Николаевич Никаноров (к.т.н.), научный сотрудник Института электротехнологий университета им. Лейбница, г. Ганновер.

требованиям, часто задаваемым в виде ряда критериев оптимальности, экстремальные значения которых не могут быть достигнуты одновременно. Во многих случаях сведение такой постановки к однокритериальной задаче различными методами свертки иерархической системы частных критериев оптимальности невозможно, что обуславливает необходимость формулировки задачи многокритериальной оптимизации, т. е. задачи поиска решения, удовлетворяющего одновременно нескольким конфликтующим целевым функциям [1].

В данной статье описаны основные подходы и приведены примеры решения задач многокритериального оптимального проектирования индукционных нагревательных установок, реализованных с помощью объединения численных моделей взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей и оптимизационных процедур.

В работе рассматривается решение задачи двухкритериальной оптимизации на базе альтернативного метода процесса индукционного нагрева алюминиевых цилиндрических заготовок, моделируемого численной двумерной FLUX-моделью. В качестве примера трехкритериальной задачи рассмотрена оптимизация с помощью стандартных генетических алгоритмов процесса нагрева стальных заготовок, моделируемого двумерной численной моделью, разработанной в пакете ANSYS. Представленные результаты получены в рамках научных исследований, проводимых совместно Самарским государственным техническим университетом (г. Самара, Россия) и Университетом им. Лейбница (г. Ганновер, Германия).

Многокритериальная постановка задачи оптимального проектирования

Задачи оптимального проектирования индукционных нагревательных систем могут быть сформулированы как нелинейные задачи оптимизации, характеризующиеся вектором целевых функций $\bar{F}(\bar{p}) = \{\tilde{f}_1(\bar{p}), \dots, \tilde{f}_{n_f}(\bar{p})\}$, состоящим из $n_f \geq 2$ элементов в пространстве целевых функций \mathcal{R}^{n_f} . Многокритериальная задача поиска вектора неизвестных значений параметров $\bar{p} = (p_1, p_2, \dots, p_{n_v})$ в пространстве оптимизируемых переменных \mathcal{R}^{n_v} может быть записана в следующем виде:

$$\text{дано } \bar{p}_0 \in \mathcal{R}^{n_v}, \text{ найди } \inf_{\bar{p}} \bar{F}(\bar{p}), \bar{p} \in \mathcal{R}^{n_v}, \quad (1)$$

при выполнении n_c ограничений в виде неравенств и n_e ограничений в виде равенств:

$$g_i(\bar{p}) \leq 0, \quad i = \overline{1, n_c}; \quad h_j(\bar{p}) = 0, \quad j = \overline{1, n_e}, \quad (2)$$

а также $2n_v$ ограничений, накладываемых на оптимизируемые параметры:

$$p_{k \min} \leq p_k \leq p_{k \max}, \quad k = \overline{1, n_v}. \quad (3)$$

В задаче оптимального проектирования \bar{p} представляет собой вектор конструктивных параметров индуктора или ключевых режимных параметров процесса нагрева.

Зависимость j -той целевой функции \tilde{f}_j , $j = \overline{1, n_f}$ от вектора \bar{p} может быть достаточно сложной. В большинстве случаев n_f конфликтующих целевых функций, имеющих различные физические размерности, относятся к наиболее важным технико-экономическим характеристикам технологического процесса

(себестоимость конечного продукта, качество полуфабрикатов, энергетические и материальные затраты и др.), что вынуждает проектировщика искать наилучшие компромиссные решения.

Решение сложной взаимосвязанной системы уравнений Максвелла и Фурье, описывающей поведение электромагнитных и тепловых полей в процессе индукционного нагрева, и вычисление значений целевых функций включают расчеты, связанные с конструктивными параметрами, являющимися компонентами вектора \bar{p} . Вследствие этого целевая функция f_j , определяющая характеристики электромагнитных и тепловых полей или технико-экономические показатели процесса, зависит от \bar{p} как явно, так и неявно, что позволяет определить последовательность вычислений:

$$\text{геометрия } \{\bar{p}\} \rightarrow \text{поле } S(\bar{p}) \rightarrow \text{целевая функция } \tilde{f}_j(\bar{p}) \equiv f_j(\bar{p}, S(\bar{p})), j = \overline{1, n_f}. \quad (4)$$

Согласно формулировке (4), оптимальный синтез электромагнитных и тепловых полей $S(\bar{p})$ в процессе индукционного нагрева неразрывно связан с оптимизацией основных конструктивных параметров.

Задача (1)–(3) является нетривиальной в случае, когда пара целевых функций $(\tilde{f}_i, \tilde{f}_j)$ представляет собой конфликтующие функции для всех $i \neq j$. В общем случае n_f функций будут находиться в конфликте, если $\exists \tilde{p}_i \in P$ и $\exists \tilde{p}_j \in P$, для которых выполняется выражение

$$\tilde{f}_i(\tilde{p}_i) = \inf_p \tilde{f}_i(\bar{p}), \quad \tilde{f}_j(\tilde{p}_j) = \inf_p \tilde{f}_j(\bar{p}) \quad (5)$$

при $\tilde{p}_i \neq \tilde{p}_j, i \neq j, i, j \in \overline{1, n_f}$, где P – область определения вектора \bar{p} .

Конфликт между целевыми функциями является основным обстоятельством, препятствующим достижению ими экстремальных значений одновременно [1].

Одним из наиболее важных критериев оптимизации при рассмотрении процессов индукционного нагрева является максимальная равномерность температурного распределения по объему заготовки. В качестве отвечающей технологическим требованиям оценки точности нагрева часто может рассматриваться максимальное абсолютное отклонение температуры $T(\bar{x}, \bar{p}, t_{нагр})$ в конце процесса нагрева от требуемого значения $T^*(\bar{x}) = const$. Следовательно, целевая функция f_1 , соответствующая критерию максимальной точности нагрева, может быть записана в форме чебышевской нормы:

$$f_1(\bar{p}, T(\bar{x}, \bar{p}, t_{нагр})) = \max_{\bar{x} \in X} |T(\bar{x}, \bar{p}, t_{нагр}) - T^*(\bar{x})| \rightarrow \min_{\bar{p} \in \Omega \subseteq \mathfrak{R}^{n_p}}, \quad (6)$$

где $\bar{x} \in X$ – вектор пространственных координат, изменяющихся в области X .

Во многих практических ситуациях основным показателем, характеризующим эффективность процесса нагрева, являются энергетические затраты. В этом случае целевая функция, минимизирующая общее энергопотребление в процессе нагрева, может быть представлена в следующей интегральной форме:

$$f_3(\bar{p}, T(\bar{x}, \bar{p}, t)) = \int_0^{t_{нагр}} W(\bar{p}, T(\bar{x}, \bar{p}, t), t) dt \rightarrow \min_{\bar{p} \in \Omega \subseteq \mathfrak{R}^{n_p}}, \quad (7)$$

где $W(\bar{p}, T(\bar{x}, \bar{p}, t), t)$ – мощность внутренних источников тепла.

В других ситуациях ведущая роль может принадлежать материальным затратам, существенную долю которых при высокотемпературном индукционном нагреве обычно составляют потери металла в окалину.

Методы многокритериальной оптимизации

Поиск решения задачи (1)–(3) представляет значительные трудности, так как в общем случае целевые функции могут не иметь производных и являться невыпуклыми или негладкими. Кроме того, оценка целевых функций является затратной с точки зрения вычислительных ресурсов, поскольку каждый вызов функции требует решения нелинейной системы уравнений для электромагнитного и теплового полей. Это является главным источником возникающих при решении подобных задач проблем, приводящих к необходимости поиска компромисса между точностью получаемого решения, требуемым временем вычислений и возможностью сохранения истории расчетов.

Наиболее общий подход при решении многокритериальной оптимизационной задачи основан на сведении ее к однокритериальной задаче различными методами свертки иерархической системы частных критериев оптимальности, удовлетворяющих выбранным ограничениям. Традиционно многокритериальная задача редуцируется к однокритериальной путем введения функции предпочтения, т. е. взвешенной суммы целевых функций:

$$\psi(\bar{p}) = \sum_{i=1}^{n_f} c_i f_i(\bar{p}) \quad (8)$$

при $0 < c_i < 1$, $\sum_{i=1}^{n_f} c_i = 1$, которая должна быть минимизирована по $x \in \mathfrak{R}^{n_v}$ при условиях (2)–(3). Иерархическое предпочтение локальных целевых функций при их свертке в единый критерий оптимальности может быть изменено путем изменения соответствующих весовых коэффициентов: для заданного множества весовых коэффициентов соответствующее решение, если оно имеется, принимается в качестве оптимального.

Однако наиболее общее решение задачи может быть представлено фронтом Парето недоминируемых решений, т. е. совокупностью решений, для которых уменьшение одной из целевых функций невозможно без одновременного увеличения по крайней мере одной другой целевой функции. По существу, это означает, что имеется семейство оптимальных решений, которые необходимо сравнить исходя из опыта проектировщика и выбрать единственное решение согласно дополнительным критериям.

На практике для получения фронта Парето могут использоваться различные алгоритмы многокритериальной параметрической оптимизации, большинство из которых основано на недерминистских методах оптимизации, использующих принципы естественной эволюции [1].

Во многих случаях нет необходимости в получении широкого семейства оптимальных решений. Поэтому многие многокритериальные задачи формулируются для нахождения конечного числа Парето-оптимальных решений, которые равномерно распределены вдоль фронта Парето. С инженерной точки зрения целесообразно выбрать единственное решение из полученного семейства. Оно должно принадлежать к совокупности недоминируемых решений и удовлетво-

рять заданным требованиям проектировщика.

Альтернативный метод параметрической оптимизации давно и успешно применяется при решении задач управления и проектирования индукционных систем. Методы оптимального управления и базирующиеся на них методики оптимизации основаны на физических свойствах контролируемых нестационарных процессов теплопроводности в процессе индукционного нагрева. Эти свойства позволяют составить систему уравнений, которая должна быть решена относительно неизвестных оптимизируемых параметров.

Подобная оптимизационная стратегия была представлена в ряде публикаций [2–6] и применена для решения сформулированной ниже двухкритериальной задачи.

Пример решения двухкритериальной задачи оптимизации альтернативным методом

Рассмотрим типичный для кузнечного производства процесс периодического индукционного нагрева алюминиевых цилиндрических заготовок перед операциями пластической деформации (рис. 1) [6, 10].

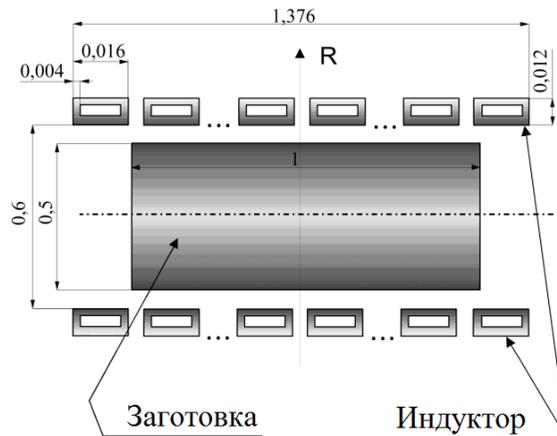


Рис. 1. Геометрические параметры системы «индуктор – заготовка»

Основной целью процесса индукционного нагрева является получение требуемого (обычно равномерного) температурного распределения; однако одним из недостатков индукционного нагрева является наличие поверхностных, концевых и краевых эффектов, обуславливающих неравномерный нагрев. Предъявляемые к процессу нагрева требования обеспечения максимально достижимой равномерности распределения температурного поля по объему заготовки в конце процесса нагрева при минимальном энергопотреблении, в принципе, находятся в противоречии друг с другом, поэтому задача оптимального по критериям (6) и (7) проектирования нагревателя должна быть сформулирована как задача многокритериальной оптимизации.

В общем случае распределение температурного поля по объему нагреваемого тела описывается весьма сложной системой взаимосвязанных уравнений Максвелла и Фурье для электромагнитного и теплового полей [2, 5].

В настоящее время большинство коммерческих программ численного анализа электромагнитных и температурных полей основано на методе конечных элементов. Для решения сформулированной задачи была разработана двумерная

численная модель периодического индукционного нагрева изделий цилиндрической формы в конечно-элементном программном пакете Cedrat FLUX [7, 8].

В рассматриваемой двухкритериальной задаче в качестве оптимизируемых параметров выбраны параметры, оказывающие наиболее существенное влияние на процесс: напряжение источника питания $U(t)$, связанное с мощностью внутренних источников тепла, и время нагрева $t_{нагр}$. Возможные интервалы изменения оптимизируемых параметров могут быть заданы в виде ограничений:

$$U_{min} \leq U \leq U_{max}; t_{min} \leq t_{нагр} \leq t_{max}. \quad (9)$$

Противоречие, возникающее между целевыми функциями (6) и (7), является одной из главных предпосылок к решению задачи многокритериальной оптимизации, которая может быть сформулирована следующим образом. Для процесса индукционного нагрева, описываемого двумерной численной FLUX-моделью, необходимо определить такие значения оптимизируемых параметров $U = U^{opt}$ и $t_{нагр} = t_{нагр}^{opt}$, стесненных ограничениями (9), которые обеспечили бы нагрев заготовки от начальной 20 °С до требуемой конечной температуры 450 °С при минимально возможных значениях целевых функций (6) и (7).

Исходные данные для моделирования, а также геометрия системы «индуктор – заготовка» представлены в табл. 1 и на рис. 1 соответственно. Результаты решения задачи, полученные с использованием альтернативного метода оптимизации, приведены в табл. 2. Соответствующий фронт Парето представлен на рис. 2 на плоскости целевых функций (6) и (7). Как можно видеть из рисунка, фронт Парето имеет выпуклую форму, а уменьшение значения целевой функции f_1 приводит к возрастанию значения целевой функции f_2 , что согласуется с физическими закономерностями рассматриваемых процессов и означает необходимость дополнительных затрат энергии для увеличения точности нагрева.

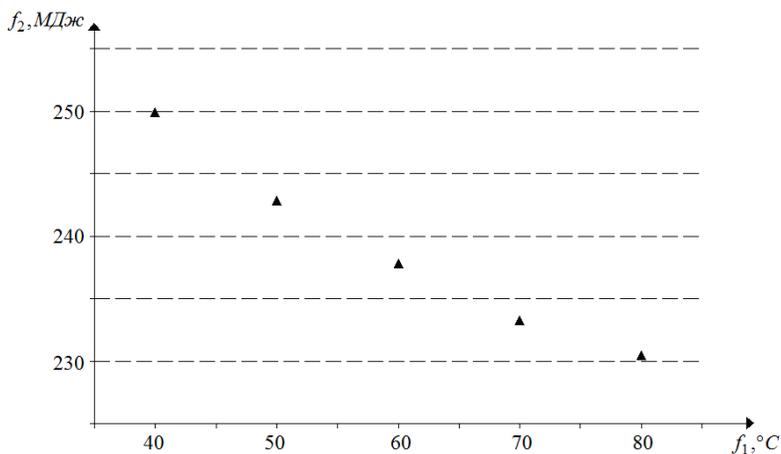


Рис. 2. Результаты решения двухкритериальной задачи на плоскости целевых функций

Последующий анализ фронта Парето состоит в выборе единственного решения из полученного множества оптимальных по Парето решений. С технологической точки зрения, руководствуясь требованиями, предъявляемыми на последующих операциях пластического формоизменения, целесообразно выбрать решение, соответствующее максимальной точности нагрева, т. е. минимальному зна-

чению целевой функции (6). Данное решение представлено самой правой точкой фронта Парето со следующими значениями целевых функций: $f_1 = 40^\circ\text{C}$; $f_2 = 249.91 \times 10^6$ Дж, что соответствует следующему решению задачи проектирования в пространстве оптимизируемых параметров: $U_{opt}^{nm} = 347$ В; $t_{нагр}^{nm} = 3.126 \times 10^3$ с.

Решение сформулированной двухкритериальной задачи оптимизации было проведено также для различных значений геометрических и физических параметров системы. Во всех случаях результаты решения демонстрируют аналогичные качественные характеристики оптимальных процессов нагрева.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования

Число витков индуктора	69
Длина заготовки, м	1.0
Частота питающего напряжения, Гц	50
Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$\lambda(T) = 115(1 + 0.8 \cdot 10^{-3}T)$
$B(H), \text{Тл}$	$B(H) = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot H$
Электрическое сопротивление, Ом	$\rho(T) = 0.3 \cdot 10^{-7}(1 + 0.007T)$
Объемная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	$\rho C_p(T) = 2.34 \cdot 10^6(1 + 5.7 \cdot 10^{-4}T)$

Таблица 2

Результаты решения задачи

$U_{opt}, \text{В}$	$t_{нагр}^{nm}, \text{с}$	$f_1, ^\circ\text{C}$	$f_2, \text{МДж}$
456	1663	80	230,448
434	1868	70	233,283
405	2183	60	237,809
379	2543	50	242,83
347	3126	40	249,91

Пример решения трехкритериальной задачи оптимизации

Рассмотренная выше двухкритериальная задача оптимального проектирования была сформулирована для двух типовых критериев оптимизации: максимальной точности нагрева и минимального энергопотребления. Целый ряд технологических процессов предусматривает нагрев стальных заготовок до высоких температур 1100–1200 °С. Выравнивание температуры в центре заготовки в таких процессах протекает с низкой скоростью, что приводит к увеличению длительности нагрева до десятков минут. В этом случае металл начинает активно окисляться, что вызывает существенные его потери, ухудшение свойств конечного продукта и срока службы формовочного оборудования [3]. Все вышеперечисленные причины обуславливают необходимость минимизации образования окалины в процессе нагрева стальных изделий. Данное требование может быть сформулировано в виде следующей целевой функции:

$$f_3 = \int_0^{t_{нагр}} 10 \cdot e^{-\frac{1}{T}} \sqrt{t} dt, \quad (10)$$

где T – температура поверхности [9].

Задача трехкритериальной оптимизации была решена с помощью интегрирования двумерной численной модели процесса, разработанной в пакете ANSYS, в оптимизационную процедуру, построенную на основе генетического алгоритма. В качестве объекта оптимизации рассматривается индукционная установка для нагрева стальных цилиндрических заготовок диаметром 100 мм до температуры 1200 °С при частоте питающего тока 1000 Гц [10].

Критерии максимальной точности нагрева и минимального энергопотребления сформулированы согласно выражениям (6) и (7). В качестве оптимизируемых параметров процесса выбраны сила тока индуктора и время нагрева.

Фронт Парето, полученный в результате решения данной задачи, представляет собой трехмерную поверхность в пространстве трех целевых функций: точности нагрева, энергопотребления и окалинообразования, которые определяются выражениями (6), (7) и (10) соответственно.

Проекция семейства решений на плоскость целевых функций (6) и (7) показана на рис. 3. В данном случае фронт Парето представляет собой левую вогнутую границу V-образной кривой, на которой для каждой точки уменьшение значения целевой функции (6) приводит к возрастанию значения целевой функции (7), что свидетельствует о ярко выраженном конфликте между рассматриваемыми критериями и нетривиальностью задачи выбора единственного решения.

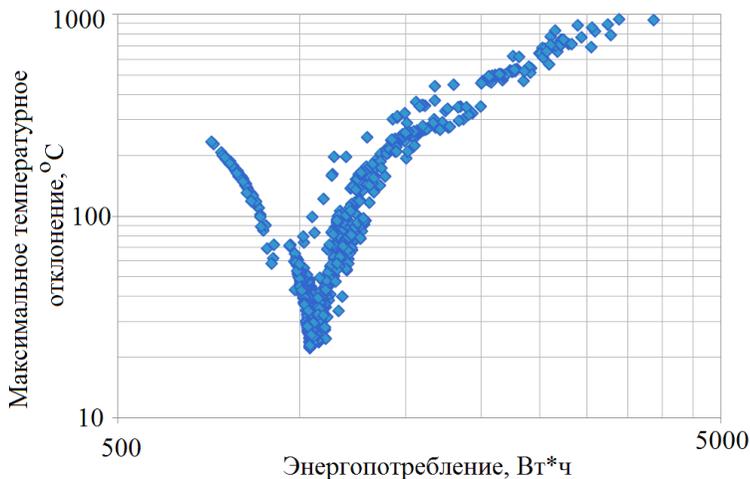


Рис. 3. Проекция фронта Парето на плоскость целевых функций (6) и (7)

Проекция семейства решений задачи на плоскость целевых функций (6) и (10), показанная на рис. 4, представляет собой две группы точек с явно выраженным промежутком между ними. Максимальная точность нагрева, определяемая согласно критерию (6), соответствует нижним точкам правой группы, в то время как минимальному значению критерия (10) отвечают несколько решений левой группы, соответствующих различным значениям критерия (6). Этот эффект, как и эффект разделения решений на группы, позволяет сделать вывод о не столь явно выраженном конфликте целевых функций, как в предыдущем случае (рис. 3), и необходимости дальнейшего детального анализа для выбора един-

ственного решения.

Анализ проекции найденного фронта Парето на плоскость целевых функций (7) и (10), представленной на рис. 5, позволяет сделать вывод о существовании единственного решения, удовлетворяющего одновременно минимальным значениям обоих критериев, что свидетельствует об отсутствии конфликта между ними.

Заключение

Идея формулировки и решения задачи оптимального проектирования электротехнических установок как задачи многокритериальной оптимизации сама по себе не нова. Однако проблема интегрирования численных нелинейных многомерных моделей взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей в автоматизированные оптимизационные процедуры является весьма нетривиальной, а ее решение открывает перед проектировщиками большие возможности по выбору и оценке принимаемых решений.

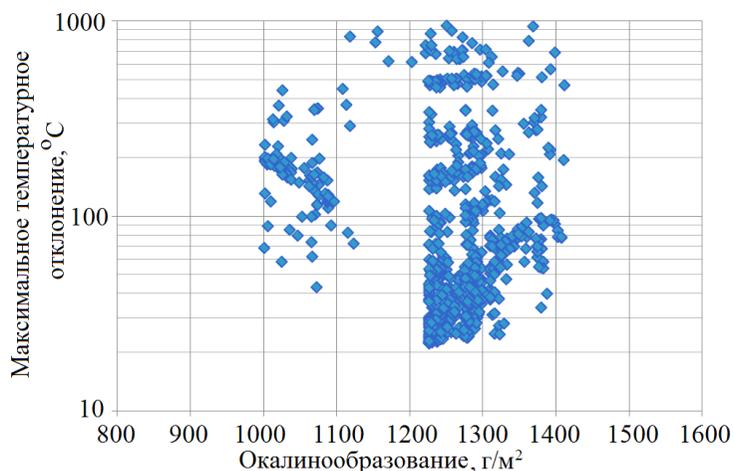


Рис. 4. Проекция фронта Парето на плоскость целевых функций (6) и (10)

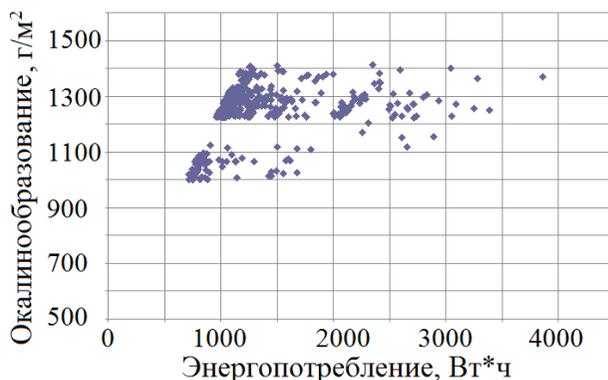


Рис. 5. Проекция фронта Парето на плоскость целевых функций (7) и (10)

В работе рассмотрены многокритериальные задачи оптимального проектирования индукционных установок для нагрева заготовок перед операциями пластического формоизменения. В качестве целевых функций рассмотрены типовые критерии качества процесса нагрева: максимальная точность нагрева, минимальное энергопотребление и минимальное окалинообразование.

С помощью альтернативного метода получено решение двухкритериальной задачи оптимизации процесса индукционного нагрева алюминиевых цилиндрических заготовок, моделируемого двумерной численной моделью, разработанной с помощью специализированного программного пакета FLUX (Cedrat). В качестве примера трехкритериальной задачи рассмотрена оптимизация с помощью стандартных генетических алгоритмов процесса нагрева стальных заготовок, моделируемого двумерной численной моделью, разработанной в мультифизическом пакете ANSYS.

Полученные результаты свидетельствуют о работоспособности предложенных подходов, необходимости дополнительных исследований полученных решений и выявляют возможности расширения сферы применения рассмотренных оптимизационных процедур к практическим задачам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оптимизация и управление электротехнологическими системами. Интенсивный курс. Специализация III / А.И. Алиферов, Э. Бааке, Д. Барглик, Р. Бикеев, Ф. Брессан, П. Ди Барба, Л. Горелова, С. Лупи, Б. Наке, А.Н. Никаноров, С. Павлов, Ю.Э. Плешивцева, Э.Я. Рапопорт, А. Смальцеж, С. Спитан, М. Форзан, А. Якович. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. – 266 с.
2. Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. – М.: Наука, 2012. – 309 с.
3. Плешивцева Ю.Э., Попов А.В., Дьяконов А.И. Двумерная задача оптимального по типовым критериям качества управления процессом сквозного индукционного нагрева // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2014. – № 2(42). – С. 148–163.
4. Попов А.В., Дьяконов А.И. Оптимальное по быстродействию управление процессом периодического индукционного нагрева с учетом ограничения на максимальную температуру // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 3(47). – С. 56–68.
5. Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2009. – 678 с.
6. Pleshivtseva Yu., Di Barba P., Rapoport E., Nikanorov A., Nacke B., Forzan M., Lupi S., Sieni E. Multi-objective optimization of induction heaters design based on numerical coupled field analysis // Int. J. Microstructure and Materials Properties. – 2014. – Vol. 9. – Nos. 6. – pp. 532-551. ISSN online: 1741-8429
7. Flux [Электронный ресурс]: сайт программного продукта Cedrat Flux. Режим доступа: www.cedrat.com/en/software/flux.html (дата обращения 20.05.2016).
8. Шапанова О.Ю. Численное моделирование процесса периодического индукционного нагрева на базе конечно-элементного программного пакета FLUX // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 7(28). – С. 180–185.
9. Börgerding R. Optimierung des Betriebs inductiveSchmiedeblockerwärmer // Fortschr. – Ber. VDI. – Düsseldorf: VDI Verlag, 1997. – Reihe 2, Nr. 451.
10. Pleshivtseva Yu., Di Barba P., Rapoport E., Nikanorov A., Nacke B., Forzan M., Lupi S., Sieni E. Design concepts of induction mass heating technology based on multiple-criteria optimization // Proc.: International Seminar “Heating by Electromagnetic Sources” HES-16. – Padua, Italy, May 24–27, 2016,

Статья поступила в редакцию 25 марта 2016 г.

INDUCTION HEATING INSTALLATIONS DESIGN BASED ON MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION

*Yu.E. Pleshivtseva*¹, *E.Ya. Rapoport*¹, *A.N. Nikanorov*², *B. Nacke*²,
*A.V. Popov*¹

¹Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, Russian Federation

²Institute of Electrotechnology, Leibniz Universität Hannover
4, Wilhelm-Busch-st., Hannover, D-30167, Germany

The paper describes main ideas and demonstrates results of the researches in the field of induction heating installations design based on multiple-criteria optimization. The main goal of the research is the application of different optimization methods and numerical techniques to solve the multi-objective optimization problem that is mathematically formulated in terms of the most important optimization criteria, i.e. temperature uniformity, energy efficiency and scale formation. Standard genetic algorithm and alternance method of optimal control theory are applied as effective tools for the practice-oriented problems solutions based on non-linear coupled electromagnetic and temperature field analysis. Optimization procedures are tested and investigated for two- and three-criteria optimization problems solution on the examples of induction heating of aluminum billets prior to hot forming. The developed optimization procedures are planned to be applied to the wide range of real-life industrial problems of the optimal design and control of different electromagnetic devices and systems.

Keywords: *induction heating, multi-criteria optimization, numerical model, alternance method, genetic algorithm, Cedrat FLUX, ANSYS, optimal heater design.*

Yulia E. Pleshivtseva (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Edgar Ya. Rapoport (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Anton V. Popov, Postgraduate Student, Assistant.

Bernard Nacke, Director Institute for Electrotechnology, Hannover.

Alexandr N. Nikanorov (Ph.D. (Techn.)), Research Scientist.

УДК (665.6/7:681.5)002.2

ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМАТИЧЕСКИХ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

В.С. Семенов

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассмотрены вопросы обеспечения эксплуатационной надежности автоматических и автоматизированных систем управления технологическими объектами, процессами, комплексами. Отмечена важность быстрого восстановления работы систем управления после отказов, а также планирования и организации их эффективного профилактического обслуживания. Подчеркнута необходимость сбора, обработки, анализа и использования данных о надежности систем управления. Введено понятие коэффициента нормального функционирования системы, отмечена важность обеспечения автоматической или автоматизированной системы запасными деталями и элементами.

Ключевые слова: *отказ, профилактическое обслуживание, восстановление работоспособности, наработка на отказ, коэффициент готовности, число профилактик, интегральный показатель, пополнение запаса.*

Эффективность и безопасность функционирования сложных технологических объектов, процессов, комплексов в промышленности (прокатные станы, компрессорные станции магистральных газопроводов, установки НПЗ, гидроэлектростанции, энергоблоки АЭС и т. д.), в сельском хозяйстве (птицефабрики, теплицы, элеваторы и т. д.) обеспечивают автоматические и автоматизированные системы управления. Однако это будет достигнуто только в том случае, если автоматические и автоматизированные системы будут иметь высокую надежность.

Автоматические и автоматизированные системы управления технологическими объектами, процессами, комплексами в промышленности и в сельском хозяйстве являются системами длительного применения. В случае отказа элемента прибор, аппарат, устройство системы управления, в котором произошел отказ, ремонтируется и после замены отказавшего элемента вновь включается в работу.

В некоторых случаях всю совокупность приборов, аппаратов, устройств, входящих в состав автоматических и автоматизированных систем управления технологическим объектом, процессом или комплексом, будем называть системой управления этим объектом, процессом или комплексом.

Вопросам обеспечения надежности системы управления технологическим объектом, комплексом, процессом должно быть уделено особое внимание при проектировании системы, при изготовлении всех аппаратных средств, при разработке математического и программного обеспечения, при создании информационного обеспечения, при проведении монтажных и пусконаладочных работ, при эксплуатации системы [1, 2, 3, 4].

Владимир Семенович Семенов (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Вычислительная техника».

В данной статье мы рассмотрим вопросы обеспечения надежности автоматических и автоматизированных систем управления технологическими объектами, комплексами, процессами за счет оптимального обслуживания этих систем.

Только высокая надежность систем управления гарантирует безопасное и эффективное функционирование современных производств и предприятий.

Основными методами поддержания работоспособности, т. е. надежности, автоматических и автоматизированных систем управления технологическими объектами, процессами, комплексами в процессе эксплуатации являются:

- повышение квалификации обслуживающего персонала и уровня обслуживания;
- быстрое восстановление работоспособности системы после отказа;
- планирование и организация эффективного профилактического обслуживания системы;
- сбор, обработка, анализ и использование данных об эксплуатационной надежности системы управления;
- обеспечение системы запасными деталями и элементами.

Повышение квалификации обслуживающего персонала и уровня обслуживания

Обучение обслуживающего персонала должно быть начато еще на стадии проектирования системы управления. На этой стадии и в последующем при эксплуатации системы для обучения и тренировки как оперативного, так и ремонтного персонала целесообразно использовать компьютерные тренажеры. На предприятии должна быть создана служба надежности.

Быстрое восстановление работоспособности системы после отказа

Рассмотрим одно из устройств системы. Это устройство в момент времени $t=0$ является полностью работоспособным. В случайный момент времени t_1 в устройстве происходит отказ и оно становится неработоспособным. Должно быть проведено внеплановое обслуживание системы, необходимое вследствие возникновения отказа или из-за неправильной работы эксплуатируемой системы. Целью такого обслуживания является восстановление функций системы путем замены, ремонта или наладки элементов, вызывающих нарушение нормальной работы.

Затраты времени на восстановление работоспособности прибора, устройства, аппарата, системы определяются как

$$T_B = T_o + T_y + T_p, \quad (1)$$

где T_o – затраты времени на обнаружение отказа;

T_y – затраты времени на устранение отказа;

T_p – затраты времени на пуск устройства после устранения отказа.

При отыскании неисправностей применяют ручной (инструментальный) поиск отказов, полуавтоматический и автоматический контроль с индексацией места повреждения. Аппаратное и программное обеспечение системы управления должно включать средства диагностики. Задача состоит в том, чтобы уменьшать значения T_o .

В современных системах автоматического и автоматизированного управления целесообразно применять все три вида поиска неисправностей (ручной, полуавтоматический и автоматический).

Затраты времени на устранение отказа T_y зависят от конструкции вышедшего

из строя аппарата (прибора, устройства), т. е. от его ремонтпригодности и приспособленности к быстрому ремонту. Кроме того, T_y существенно зависит от квалификации ремонтного персонала и от наличия запасных деталей и элементов.

Для более быстрого пуска в работу прибора, аппарата, устройства, системы (для уменьшения значения T_p) необходимо четко следовать инструкциям по эксплуатации приборов, аппаратов, устройств, системы, а также совершенствовать свои знания и умения регулярными занятиями на компьютерных тренажерах.

Планирование и организация эффективного профилактического обслуживания

В состав автоматических и автоматизированных систем управления входят детали и элементы, подверженные износу и старению. Системы управления технологическими объектами, процессами, комплексами являются системами длительного применения, и они неизбежно из периода нормальной эксплуатации, для которого характерно постоянное значение интенсивности отказов ($\lambda = const$), переходят в период старения, в котором происходит возрастание интенсивности отказов.

Профилактическое обслуживание приборов, аппаратов, устройств системы управления обеспечивает замену деталей и элементов, приближающихся к работе в период старения, на новые детали и элементы и, следовательно, приводит к поддержанию надежности системы управления на заданном высоком уровне.

Профилактическое обслуживание является плановым обслуживанием и должно проводиться через регулярные промежутки времени.

В профилактическое обслуживание входят контроль, осмотр, проверка, в процессе которых:

- обеспечивается обслуживание нормально работающих элементов, узлов, блоков, требующих постоянного внимания (смазка, очистка, регулировка, проверка и т. д.);

- проверяются, заменяются или ремонтируются отказавшие резервные элементы, если система резервирована;

- осматриваются и заменяются элементы и детали, близкие к износу.

После перехода системы управления технологическим объектом, процессом, комплексом в постоянную эксплуатацию на приборах, аппаратах, устройствах системы должны регулярно проводиться профилактические мероприятия.

Виды и регламент профилактического обслуживания указаны в заводских инструкциях по эксплуатации приборов, аппаратов, устройств системы управления.

Заводские (фирменные) правила по срокам проведения и содержанию профилактических работ должны выполняться первые 1-2 года промышленной эксплуатации системы управления, а затем должны быть скорректированы по результатам сбора, обработки и анализа данных по надежности системы.

Сбор, обработка, анализ и использование данных об эксплуатационной надежности системы управления

На предприятии, на котором эксплуатируются системы автоматического и автоматизированного управления, должен быть организован сбор данных:

- о внезапных отказах приборов, аппаратов, устройств (дата отказа; признаки; затраты времени на обнаружение; использование аппаратно-программных

средств для обнаружения отказа; влияние отказа на работу системы управления; затраты времени на устранение отказа; ресурсы, использованные для устранения отказа; затраты времени на пуск в работу прибора, аппарата, устройства);

– о профилактическом обслуживании приборов, аппаратов, устройств системы управления (дата проведения; продолжительность работ; использованные аппаратно-программные средства при проведении работ; содержание работ; использованные ресурсы).

Полученные материалы по отказам и профилактическим работам в первую очередь должны быть использованы для определения количественных характеристик эксплуатационной надежности каждого прибора, аппарата, устройства, каждой группы однотипных приборов, аппаратов, устройств, а также системы управления в целом.

Введем следующие обозначения:

– индексы приборов, аппаратов, устройств, входящих в состав системы управления, обозначаем как

$$q = 1, 2, \dots, Q; \quad q = \overline{1, Q};$$

– индексы типов деталей и элементов, входящих в приборы, аппараты, устройства, обозначаем как

$$r = 1, 2, \dots, R; \quad r = \overline{1, R};$$

– количество однотипных деталей и элементов в составе прибора, аппарата, устройства обозначаем как

$$h_q^{(r)},$$

например, запись $12_2^{(3)}$ означает, что в состав прибора типа 2 входят 12 элементов с индексом 3.

Назначается значение интервала наблюдения ($T=1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000$ или 7000 часов).

Определяется значение наработки на отказ, т. е. среднего времени между двумя соседними отказами:

– для приборов, аппаратов, устройств каждого типа

$$\bar{T}_{oq} = \frac{\sum_{i=1}^{nq} \tau_{iq}}{n_q}, \quad (2)$$

где τ_{iq} – время исправной работы прибора, аппарата, устройства типа q между i -тым и $(i+1)$ отказами;

n_q – число отказов одного прибора, аппарата, устройства типа q за время T ;

– для всей группы приборов, аппаратов, устройств типа q

$$\bar{T}_{oq}^{(gr)} = \frac{\sum_{i=1}^{n_q^{(gr)}} \tau_{iq}^{(gr)}}{n_q^{(gr)}}, \quad (3)$$

где $\tau_{iq}^{(gr)}$ – время исправной работы группы приборов, аппаратов, устройств типа q между i -тым и $(i+1)$ отказами;

$n_q^{(gr)}$ – число отказов всех приборов, аппаратов, устройств типа q за время T ;

– для системы управления в целом

$$\bar{T}_0^{(c)} = \frac{\sum_{i=1}^{nc} \tau_i^{(c)}}{n_c}, \quad (4)$$

где $\tau_i^{(c)}$ – время исправной работы системы управления между i -тым и $(i+1)$ отказами;

n_c – число отказов системы управления в целом за время T .

Будем рассматривать системы без применения методов резервирования. В этом случае на время устранения отказа или проведения профилактических мероприятий функционирование прибора, аппарата, устройства прекращается.

На основании собранных за время интервала наблюдения T данных должно быть определено среднее время восстановления после отказа приборов, аппаратов, устройств каждого типа

$$\bar{T}_{Bq} = \frac{\sum_{i=1}^{n_q} t_{iq}}{n_q}, \quad (5)$$

где t_{iq} – время восстановления после i -го отказа прибора, аппарата, устройства типа q .

По формулам, аналогичным (5), определяются среднее время восстановления для каждой группы приборов, аппаратов, устройств $\bar{T}_{Bq}^{(gr)}$ и среднее время восстановления для системы управления в целом $\bar{T}_B^{(c)}$.

По полученным значениям наработки на отказ \bar{T}_{oq} , $\bar{T}_{oq}^{(gr)}$, $\bar{T}_o^{(c)}$ и времени восстановления \bar{T}_{Bq} , $\bar{T}_{Bq}^{(gr)}$, $\bar{T}_B^{(c)}$ должны быть определены величины коэффициента готовности:

а) для приборов, аппаратов, устройств каждого типа

$$K_q = \frac{\bar{T}_{oq}}{\bar{T}_{oq} + \bar{T}_{Bq}}; \quad (6)$$

б) для группы приборов, аппаратов, устройств

$$K_q^{(gr)} = \frac{\bar{T}_{oq}^{(gr)}}{\bar{T}_{oq}^{(gr)} + \bar{T}_{Bq}^{(gr)}}; \quad (7)$$

в) для системы управления в целом

$$K^{(c)} = \frac{\bar{T}_o^{(c)}}{\bar{T}_o^{(c)} + \bar{T}_B^{(c)}}. \quad (8)$$

Анализ полученных данных по наработке на отказ, по затратам времени на восстановление после отказа, по коэффициенту готовности позволит наметить мероприятия, реализация которых приведет к повышению эксплуатационной надежности приборов, аппаратов и системы в целом.

Далее рассмотрим влияние продолжительности профилактик и частоты их проведения на эксплуатационную надежность системы управления.

Как было сказано выше, первые 1-2 года работы системы виды и регламенты

профилактического обслуживания принимаются в соответствии с рекомендациями заводских инструкций по эксплуатации приборов, аппаратов, устройств.

В этот период для выбранного интервала наблюдений T необходимо найти значения ряда показателей. Итак, заводскими инструкциями заданы: ΔT_{prq} – интервал между двумя соседними профилактиками для приборов, аппаратов, устройств типа q и T_{prq} – продолжительность проведения одной профилактики на приборе, аппарате, устройстве типа q .

Определяем число профилактик на приборе, аппарате, устройстве типа q на интервале T :

$$W_q = \frac{T}{\Delta T_{prq}}, \quad q = \overline{1, Q}. \quad (9)$$

Затраты времени на интервале времени T на проведение профилактик на всех приборах, аппаратах и устройствах системы управления определяются как

$$T_{prs} = \sum_{q=1}^Q W_q \cdot b_q \cdot T_{prq}, \quad q = \overline{1, Q}, \quad (10)$$

где b_q – количество однотипных приборов, аппаратов, устройств типа q .

Считаем, что профилактики не проводятся одновременно на двух или более приборах, аппаратах, устройствах.

Находим затраты времени на устранение всех отказов на интервале времени T :

$$T_{Bc} = \sum_{q=1}^Q n_q T_{Bq}, \quad q = \overline{1, Q}. \quad (11)$$

Находим значение интегрального показателя, который может быть назван коэффициентом нормального функционирования системы:

$$K_{nf} = \frac{T - (T_{Bc} + T_{prs})}{T}. \quad (12)$$

Изменяя стратегию профилактического обслуживания и организацию работ по восстановлению приборов, аппаратов системы управления после отказов, необходимо анализировать значения коэффициента нормального функционирования системы K_{nf} и добиваться на интервалах T ($T_1=T_2=T_3\cdots$) нужных значений надежности систем автоматического и автоматизированного управления технологическим объектом, процессом, комплексом.

Обеспечение системы запасными деталями и элементами

Значение коэффициента K_{nf} существенно зависит от обеспечения системы управления запасными деталями и элементами. Недостаточный объем запасных деталей и элементов или их отсутствие приводит к увеличению затрат времени на восстановление системы после отказов и возникновению затруднений при проведении профилактических работ.

Однако объем запасов не должен быть чрезмерным, так как возникают затраты на их содержание, возрастающие пропорционально увеличению объема запасов и времени их хранения.

При определении объема запасов деталей и элементов необходимо учитывать следующие факторы:

- сроки выполнения заказов на детали и элементы, т. е. значения интервала времени между моментом размещения заказа и моментом выполнения заказа;
- затраты на хранение запасов деталей и элементов;
- риск замораживания денежных средств предприятия при чрезмерных запасах.

Однако отсутствие в нужный момент какого-либо запасного элемента может привести к длительному неработоспособному состоянию как вышедшей из строя системы управления, так и технологического объекта, процесса, комплекса. При этом может произойти уменьшение или полное прекращение выхода продукции, создаться аварийная ситуация.

Запасы деталей и элементов должны создаваться по деталям и элементам всех типов $r = \overline{1, R}$, использованных в приборах, аппаратах, устройствах автоматических и автоматизированных систем управления технологическим объектом, процессом или комплексом.

Общее число отказов элементов типа r за интервал наблюдения T представляет собой ряд

$$N_{OT}^{(r)} = N_1^{(r)} + N_q^{(r)} + \dots + N_Q^{(r)} = \sum_{q=1}^Q N_q^{(r)}, \quad q = \overline{1, Q}; r = \overline{1, R}. \quad (13)$$

Накапливаются данные по отказам деталей и элементов и других типов за интервал наблюдения T :

$$N_{OT}^{(1)}; N_{OT}^{(2)}; \dots; N_{OT}^{(R)}.$$

При проведении профилактических работ в течение интервала наблюдения T фиксируется расход элементов каждого типа $r = \overline{1, R}$. Будет получен ряд

$$N_{pr}^{(1)}; N_{pr}^{(2)}; \dots; N_{pr}^{(r)}; \dots; N_{pr}^{(R)}.$$

Этот ряд на каждом последующем интервале T должен корректироваться.

Суммируя расход элементов и деталей каждого типа r на устранение отказов и проведение профилактических работ, получаем ожидаемую потребность элементов и деталей типа r при интервале времени $t = T$:

$$N_{potrT}^{(r)} = N_{OT}^{(r)} + N_{pr}^{(r)}. \quad (14)$$

В результате получаем значение потребностей по всем элементам и деталям при интервале времени $t = T$:

$$N_{potrT}^{(1)}; N_{potrT}^{(2)}; \dots; N_{potrT}^{(r)}; \dots; N_{potrT}^{(R)}.$$

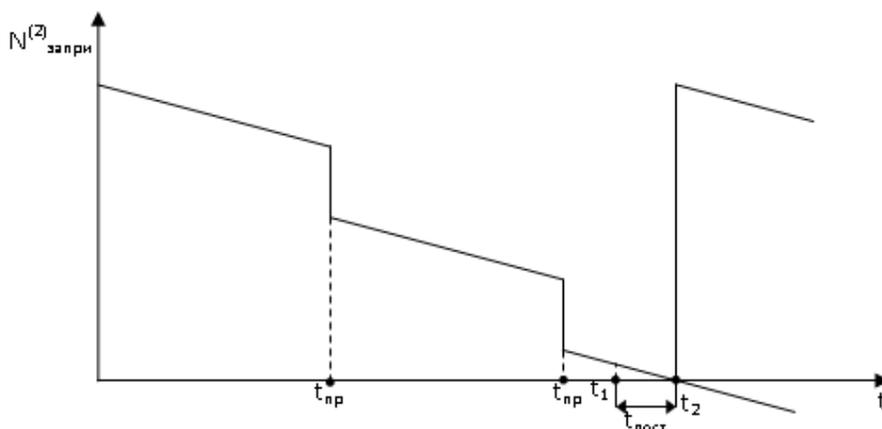
Введем понятие расчетного интервала. Обозначим расчетный интервал как Δt . Потребность в деталях и элементах различного типа, как правило, неодинакова, различным может быть и интервал времени между моментом размещения заказа и моментом его пополнения. В связи с этим расчетный интервал Δt может быть различным: $\Delta t^{(1)}; \Delta t^{(2)}; \dots; \Delta t^{(r)}; \dots; \Delta t^{(R)}$.

Количество деталей или элементов типа r , которые должны быть в наличии в расчетном интервале, определяется как

$$N_{zapRI}^{(r)} = \frac{N_{potrT}^{(r)} \cdot \Delta t^{(r)}}{T}, \quad r = \overline{1, R}. \quad (15)$$

Принимая во внимание затраты времени на пополнение запаса (заказ, при-

обретение, доставка) $t_{\text{пост}}$, построим кривую изменения запасов деталей или элементов типа r (см. рисунок).



Кривая изменения запасов деталей или элементов типа r

На рисунке: $t_{\text{пр}}$ — моменты проведения профилактических работ; t_1 — момент начала оформления заказа на детали или элементы типа r ; t_2 — момент поставки деталей или элементов типа r ; $t_{\text{пост}}$ — интервал времени от заказа до поступления деталей или элементов типа r на предприятие.

Заключение

В процессе эксплуатации технологического объекта, процесса, комплекса должна быть обеспечена высокая надежность их систем автоматического и автоматизированного управления. Только в этом случае технологические объекты будут функционировать безопасно и эффективно.

Для получения высокой эксплуатационной надежности систем управления необходимо постоянно повышать квалификацию обслуживающего персонала; обеспечивать быстрое восстановление после отказов работоспособности приборов, аппаратов, устройств; планировать и организовывать эффективное профилактическое обслуживание; осуществлять сбор, обработку, анализ и использование данных об эксплуатационной надежности систем автоматического и автоматизированного управления технологическим объектом, процессом, комплексом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семенов В.С. Оценка надежности систем автоматического и автоматизированного управления // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. — 2015. — № 2(46). — С. 42-47.
2. Тихомиров А.А., Семенов В.С. Пути повышения надежности программного обеспечения автоматизированных систем управления технологическими процессами нефтедобывающего предприятия // Естественные и технические науки. — 2013. — № 3(65). — С. 253-257.
3. Семенов В.С. К оценке надежности информационно-измерительных установок нефтедобывающего предприятия // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. — 2012. — № 1(33). — С. 61-65.
4. Ушаков И.А. Курс теории надежности систем. — М.: Дрофа, 2008. — С. 240.

Статья поступила в редакцию 3 марта 2016 г.

THE PROBLEM OF OPTIMAL OPERATION OF THE AUTOMATIC AND AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

V.S. Semenov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The aspects of providing the serviceability of automatic and automated control system of technological structures, processes, complexes are considered. The importance of rapid recovery of control system after refuses and also planning of the routine maintenance is shown. The necessity of collection, treatment, analysis and use of control system reliability is underlined.

Keywords: *refuse, prophylactic service, renewal of capacity, work on a refuse, coefficient of readiness, number of prophylactic, integral index, addition to the supply.*

УДК 658.011.56

РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПРОГРАММНОЙ ЧАСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СКЛАДСКИМИ ЗАПАСАМИ НА БАЗЕ АППАРАТА КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

А.В. Сергеев

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Излагаются очередные результаты исследования вопроса о применимости математического аппарата и методов классической теории автоматического управления к построению систем управления производственными и бизнес-процессами предприятий. На основе предложенных ранее математической модели системы в форме дискретных передаточных функций и критерия решения задачи оптимального управления уровнем складских запасов предприятия разработана функциональная модель программной части соответствующей автоматизированной системы управления. Рассмотрены основные программные модули и блоки системы, информационные связи между ними. Приведено описание ключевых алгоритмов и базовых принципов работы системы. Сделан вывод о перспективах практической реализации предложенных моделей.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, теория автоматического управления, модель управления запасами, склад, страховой запас, функциональная схема, программные модули, ПИД-алгоритм регулирования, расходы на содержание запасов, критерий оптимального управления уровнем запасов, настройка регулятора.

Настоящая статья продолжает цикл работ автора и его коллег, посвященных исследованию вопроса о возможности применения математического аппарата и методов классической теории автоматического управления (ТАУ) для анализа и синтеза систем управления производственными и бизнес-процессами предприятий. В работе [1] была предложена математическая модель автоматизированной системы управления складом в форме дискретной передаточной функции (рис. 1).

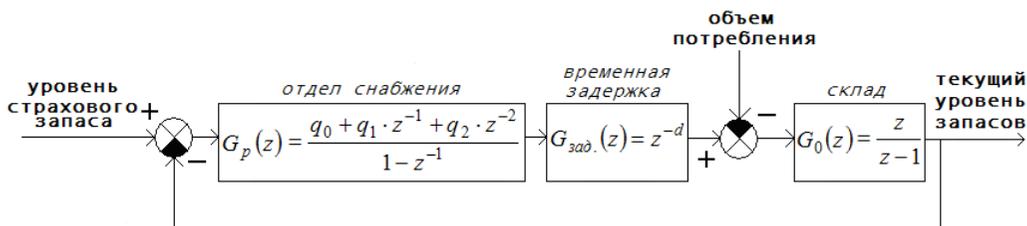


Рис. 1. Структурно-функциональное представление модели управления запасами

Антон Владимирович Сергеев (к.т.н.), доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

В приведенной модели входным сигналом является заданный уровень так называемого «страхового запаса». Объектом управления является склад, который представлен в модели интегрирующим звеном. На входе объекта управления действует возмущающее воздействие – потребление сырья и материалов со склада. Органом управления является структурное подразделение предприятия (например, отдел снабжения), отвечающее за обеспечение производственного процесса необходимыми материалами, или в более узком смысле – поддерживающее необходимый уровень запасов на складах. Его передаточная функция определяется применяемым в подразделении алгоритмом расчета необходимого объема заказа на основании информации о разнице между текущим и заданным уровнем запасов (т. е. принятым алгоритмом регулирования уровня запасов). Исходя из практики построения систем автоматического управления наиболее широко используемым алгоритмом регулирования является ПИД-алгоритм, который и предлагается применять здесь в указанных целях. В связи с наличием временных задержек по поставкам в модель управления включено звено запаздывания. Процесс учета товарно-материальных ценностей на складе представляет собой обратную связь в системе управления запасами.

В работе [2] исходя из предложенной модели управления запасами был сформулирован критерий решения задачи оптимального управления уровнем складских запасов предприятия, учитывающий различный характер дополнительных издержек их содержания, вызванных отклонениями уровня запаса в большую или в меньшую сторону от заданного значения (1):

$$J(q_0, q_1, q_2) = \sum_{k=0}^{k^f} c(k) \cdot e(q_0, q_1, q_2, k) \rightarrow \min_{q_0, q_1, q_2 \in R}, \quad (1)$$

$$\text{где } \begin{cases} c(k) = c_1, & \text{при } e(q_0, q_1, q_2, k) \geq 0; \\ c(k) = -c_2, & \text{при } e(q_0, q_1, q_2, k) < 0. \end{cases}$$

Здесь e – ошибка управления (отклонение запаса от заданного уровня);

(q_0, q_1, q_2) – вектор настраиваемых параметров регулятора;

k – дискретные моменты времени, в которые производится оценка состояния системы и выработка управляющих воздействий (такты работы системы);

k^f – момент окончания переходных процессов в системе;

c_1 – удельные совокупные расходы предприятия на хранение единицы сырья;

c_2 – оценка убытков от простоя производства и неудовлетворенного потребительского спроса, отнесенных на единицу сырья.

При этом, как было отмечено в [2], конечным результатом предпринятого исследования автору видится разработка единой методологии и математического инструментария построения автоматизированных систем управления ресурсами предприятий (ERP-систем), в том числе и реализующих оптимальное управление предприятиями в строгом смысле этого термина. В связи с этим не последним вопросом, на который предстоит получить ответ по ходу движения в выбранном направлении исследования, является вопрос о возможности технической реализации предлагаемых моделей управления. И для этого прежде всего отметим, что в автоматизированных системах управления бизнес-процессами (в отличие от систем управления техническими объектами и технологическими процессами) в подавляющем большинстве случаев существенные особенности их функциони-

рования реализуются программным путем. Не будет исключением и рассматриваемая здесь система управления запасами, отличительные особенности которой от предшествующих аналогов будут содержаться в ее программной части.

Исходя из этих соображений и приведенных выше метаматематической модели системы и постановки задачи управления автором была построена функциональная схема программного комплекса, в составе которого предполагается реализация рассмотренных ранее моделей и алгоритмов управления запасами (рис. 2).

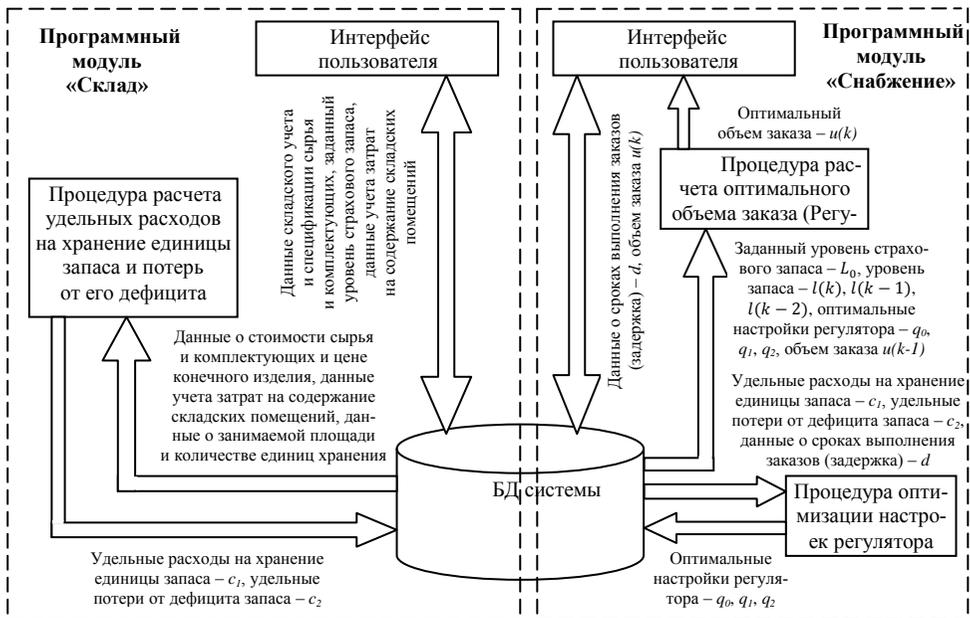


Рис. 2. Функциональная схема программной части АСУ управления запасами

Здесь необходимая нам функциональность достигается в результате интеграции двух типичных для ERP-систем модулей «Склад» и «Снабжение», дополненных нетипичными для них процедурами: расчетом удельных расходов на хранение единицы запаса и потерь от его дефицита, оптимизацией настроек регулятора, расчетом оптимального объема заказа. Общий порядок работы системы можно представить двумя циклами: настройка регулятора и управление запасами.

Цикл настройки регулятора состоит из последовательного выполнения двух из упомянутых выше процедур: расчета удельных расходов на хранение единицы запаса и потерь от его дефицита и оптимизации настроек регулятора.

В результате выполнения первой процедуры определяются параметры c_1 и c_2 критерия (1) оптимальной настройки регулятора.

Исходными данными, на основе которых производится расчет удельных расходов на хранение единицы запаса c_1 , являются данные управленческого учета затрат на содержание складских помещений и запасов, сведения об общей площади, предназначенной для складирования, и площади занимаемой хранимыми сырьем и материалами. Набор расходных статей, используемых при расчете дан-

ного параметра, определяется по усмотрению пользователя системы и, в частности, может включать в себя: стоимость аренды помещений; затраты на освещение, отопление и кондиционирование; упущенную выгоду от замораживания в запасах оборотных средств (исходя из данных о стоимости запасов).

Противоположный тип издержек c_2 , связанный с дефицитом запасов, ассоциируется с неудовлетворенным потребительским спросом, в качестве оценки потерь от которого можно предложить маржинальный доход (разницу между выручкой и переменными издержками), приходящийся на единицу готовой продукции, для изготовления которой предназначен хранимый материал. Учитывая гипотетический характер данного вида издержек, в программе можно предусмотреть опцию учета при его определении оценки вероятности возникновения ситуации дефицита.

Найденные значения параметров c_1 и c_2 заносятся в базу данных системы и обновляются либо по запросу пользователя, либо в том случае, если отклонение их текущих значений от хранящихся в базе данных превысит заданный пользователем порог.

На втором этапе цикла настройки регулятора на основе найденных значений удельных издержек c_1 и c_2 и информации о сроке выполнения заказа d производится непосредственный поиск оптимальных настроек регулятора (q_0, q_1, q_2) исходя из критерия (1). Решение этой задачи в рассматриваемой системе будет осуществляться в результате выполнения процедуры (программного блока) оптимизации настроек регулятора. При этом, поскольку предложенный критерий исключает возможность применения аналитических методов решения данной оптимизационной задачи, ее решение будет выполняться с помощью одного из поисковых методов, проблему выбора которого еще предстоит решить.

Вне зависимости от выбранного метода поиска кроме него самого процедура оптимизации регулятора должна включать в себя и алгоритм расчета величины показателя качества регулирования $J(q_0, q_1, q_2)$, зависящего от настраиваемых параметров регулятора, поскольку данная переменная является основным входным параметром для поискового алгоритма. Для ее определения исходя из выражения (1) должна быть в первую очередь вычислена ошибка регулирования для всего интервала управления.

Расчет ошибки регулирования может быть выполнен непосредственно с помощью математической модели системы, для чего исходя из ее передаточной функции по ошибке определяется реакция системы на единичное ступенчатое возмущающее воздействие.

Передаточная функция системы по ошибке от возмущающего воздействия имеет следующий вид:

$$G_e(z) = \frac{G_o(z)}{1 + G(z)}, \quad (2)$$

$$G_o(z) = \frac{1}{1 - z^{-1}}, \quad (3)$$

$$G(z) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} \cdot z^{-d} \cdot \frac{1}{1 - z^{-1}} = \frac{q_0 z^{-d} + q_1 z^{-(1+d)} + q_2 z^{-(2+d)}}{(1 - z^{-1})(1 - z^{-1})}, \quad (4)$$

где $G_o(z)$ – передаточная функция объекта управления (склада),

$G(z)$ – передаточная функция разомкнутой системы.

После подстановки (3) и (4) в (2) и проведения соответствующих преобразований передаточная функция системы по ошибке окончательно примет вид

$$G_e(z) = \frac{1 - z^{-1}}{1 - 2z^{-1} + z^{-2} + q_0z^{-d} + q_1z^{-(1+d)} + q_2z^{-(2+d)}}. \quad (5)$$

На этом основании изображение реакции системы на единичное ступенчатое возмущающее воздействие будет выглядеть следующим образом:

$$e(z) = \frac{(1 - z^{-1}) \cdot 1(z)}{1 - 2z^{-1} + z^{-2} + q_0z^{-d} + q_1z^{-(1+d)} + q_2z^{-(2+d)}}, \quad (6)$$

где $1(z)$ – изображение единичной ступенчатой функции.

Из (6) получаем уравнение, связывающее между собой изображения сигнала ошибки и возмущающего воздействия:

$$\begin{aligned} e(z) - 2z^{-1}e(z) + z^{-2}e(z) + q_0z^{-d}e(z) + q_1z^{-(1+d)}e(z) + q_2z^{-(2+d)}e(z) = \\ = 1(z) - z^{-1}1(z). \end{aligned} \quad (7)$$

Переходя от изображения сигналов в частотной области к их оригиналам во временной, из уравнения (7) получаем рекуррентное выражение для вычисления значений временной последовательности, соответствующей ошибке регулирования:

$$\begin{aligned} e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) + q_0e(k-d) + q_1e(k-1-d) + q_2e(k-2-d) = \\ = 1(k) - 1(k-1), \quad k = 0, \overline{k^f}, \end{aligned} \quad (8)$$

или с учетом того, что $1(k) = 1(k-1)$, для всех $k = \overline{1, k^f}$ и $e(0) = 1$, как следует из уравнения (8),

$$\begin{cases} e(0) = 1 \\ e(k) = 2e(k-1) - e(k-2) - q_0e(k-d) - q_1e(k-1-d) - q_2e(k-2-d), \quad k = \overline{1, k^f}. \end{cases} \quad (9)$$

Далее исходя из полученного временного ряда по алгоритму, определяемому выражением (1), рассчитывается величина показателя качества регулирования $J(q_0, q_1, q_2)$, задачу минимизации которой, как уже было отмечено выше, предполагается решать с помощью некоторого поискового метода оптимизации.

Применение любого поискового метода оптимизации предполагает итерационную организацию процедуры настройки регулятора, последовательно выполняющую расчет показателя качества регулирования, для некоторого значения вектора настраиваемых параметров и определение нового вектора настроек исходя из динамики изменения показателя качества.

Цикл управления запасами также состоит из двух последовательно выполняемых функций: учет запасов и формирование заказа на поставку сырья и материалов.

Учет запасов в системе осуществляется посредством выполнения набора типовых складских операций, таких как приемка, размещение, отгрузка товара и т. п., представляющих базовый функционал любого программного решения для

управления складами. В результате выполнения данной функции в конце каждого операционных суток в системе будет содержаться актуальная информация о текущем уровне запаса по каждому наименованию хранимого сырья или материалов. Эти данные вместе с заданным уровнем страхового запаса являются входными параметрами для процедуры расчета оптимального объема заказа, по результатам выполнения которой в системе формируется заказ на поставку требуемого сырья или материалов. Расчет заказываемого объема товара производится по ПИД-алгоритму исходя из разницы между текущим и необходимым уровнем его запаса, представляющей собой ошибку регулирования:

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2). \quad (10)$$

Здесь $u(k)$ – формируемый в текущих операционных сутках объем заказа, $u(k-1)$ – объем заказа, сформированный в предыдущих операционных сутках.

Таким образом, для выполнения процедуры расчета оптимального объема заказа необходимы данные не только о текущем отклонении запасов от заданного уровня, но и о предыдущем заказе и отклонениях за предыдущие двое суток, а также о параметрах регулятора q_0 , q_1 , q_2 , определенных в результате выполнения цикла настройки.

Выполнение процедуры расчета заказа в зависимости от настроек системы может осуществляться либо вне рабочего времени по заданному расписанию, предоставляя пользователю в начале следующих операционных суток уже готовые результаты, либо в это же время по его запросу. Выдачей заказа заканчивается очередной операционный цикл управления запасами.

Подводя итог приведенному выше описанию функциональной модели программной части автоматизированной системы управления запасами, можно констатировать, что предложенный новый подход к построению данного вида систем не требует внесения существенных изменений в уже отработанный на текущий момент их программный функционал. Данное обстоятельство является, по мнению автора, дополнительным аргументом в пользу практической значимости исследования, результаты которого представлены в настоящей статье.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Сергеев А.В., Новиков А.А.* Разработка модели системы управления поставками материалов для промышленных предприятий на базе классической теории автоматического управления // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 3(39). – С. 41–47.
2. *Сергеев А.В., Новиков А.А.* Разработка модели и критерия оптимизации автоматизированной системы управления складскими запасами на базе аппарата классической теории автоматического управления // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – № 1(49). – С. 36–40.

Статья поступила в редакцию 25 марта 2016 г.

DESIGNING OF FUNCTIONAL MODEL OF SOFTWARE PART OF THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR WAREHOUSE STOCKS ON THE BASIS OF THE CLASSICAL AUTOMATIC CONTROL THEORY METHODS

A.V. Sergeev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The next research results of question of applicability of mathematical apparatus and methods of the classical theory of automatic control for the analysis and synthesis of control systems for production and business processes of the enterprises is offered to examination. On the basis of offered earlier: mathematical model of system in the form of discrete transfer functions, and criterion of the solution of a task of optimum control of the warehouse stocks the functional model of software part of the corresponding automated control system is designed. The base software modules and blocks of system and information communications between them are considered. The description of key algorithms and basic principles of work of system is provided. The conclusion about prospects of practical realization of the offered models is drawn.

Keywords: *automated control systems, theory of automatic control, stockpile management model, warehouse, insurance stock, function chart, software modules, PID-algorithm of regulation, maintenance costs of stocks, criterion of optimum control of a stock rate, setup of the regulator.*

УДК 519.816+519.876.5

КОНЦЕПЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ГЛОБАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ

А.В. Чуваков

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Территориально распределенные организации, имеющие глобальный пространственный характер, рассматриваются как единая глобально распределенная организационная система с учетом двух методов организационного управления: централизованного и децентрализованного. Принятие решения о выборе того или иного способа управления координируется системой поддержки принятия решений (СППР) с использованием единого информационного пространства знаний. Глобально распределенная организационная система представлена в виде семантической GRID-системы с возможностью равномерного распределения работ между элементами с учетом их эффективности.

Ключевые слова: глобально распределенная организационная система, системы поддержки принятия решений, единое пространство знаний, GRID-технологии, бионические алгоритмы.

Существует большой класс территориально распределенных организаций (ТРО), имеющих глобальный пространственный размах (страна, регион), таких как предприятия нефтеперерабатывающей области, электроэнергетические системы, системы управления железнодорожного транспорта, учреждения государственного и муниципального управления и т. д. Они, в свою очередь, декомпозируются на более простые организационные элементы (подсистемы), например отделы на промышленных предприятиях или департаменты в муниципалитете. Совокупность структурных единиц ТРО, их функций, потоков между ними, бизнес-процессов и их отношений, технологий может быть рассмотрена как единая глобально распределенная организационная система (ГРОС) (рис. 1). В настоящее время каждый элемент ГРОС в основном имеет централизованную организационную структуру управления, что является именно тем «узким звеном», которое приводит к неоправданному увеличению времени реакции, лишнему вмешательству во внутренние дела подсистем и в конечном счете к инертности организационной системы в целом.

Стремление ГРОС к централизации должна быть минимальной, но обеспечивающей достижение поставленной цели, однако и у децентрализованного управления есть недостаток – увеличенное время адаптации системы, что весьма существенно для быстро меняющихся сред. То, что в централизованных системах можно сделать за короткое время, в децентрализованной будет осуществляться медленнее. Недостатком централизованного подхода также является сложность управления из-за огромного потока данных, подлежащих переработке в старшей по иерархии системе управления [1].

В идеале в ТРО должны присутствовать два способа организационного

Александр Владимирович Чуваков (к.х.н., доц.), доцент кафедры «Вычислительная техника».

управления. Если экономическая ситуация меняется латентно, то децентрализованная часть ГРОС успешно справляется с адаптацией к среде и с достижением глобальной цели за счет оперативного управления, а при резких изменениях среды применяется централизованное управление по быстрому переводу системы в новое состояние. В то же время централизованное управление плохо масштабируется, тогда как в децентрализованной структуре масштабирование реализуется эффективно [2]. Следовательно, для максимальной эффективности всей ГРОС в целом должно быть налажено взаимодействие между локальными центрами управления и элементами системы (рис. 2) и, самое главное, оперативное принятие решения об изменении организационного управления в зависимости от изменений в среде, как локальных, так и глобальных.

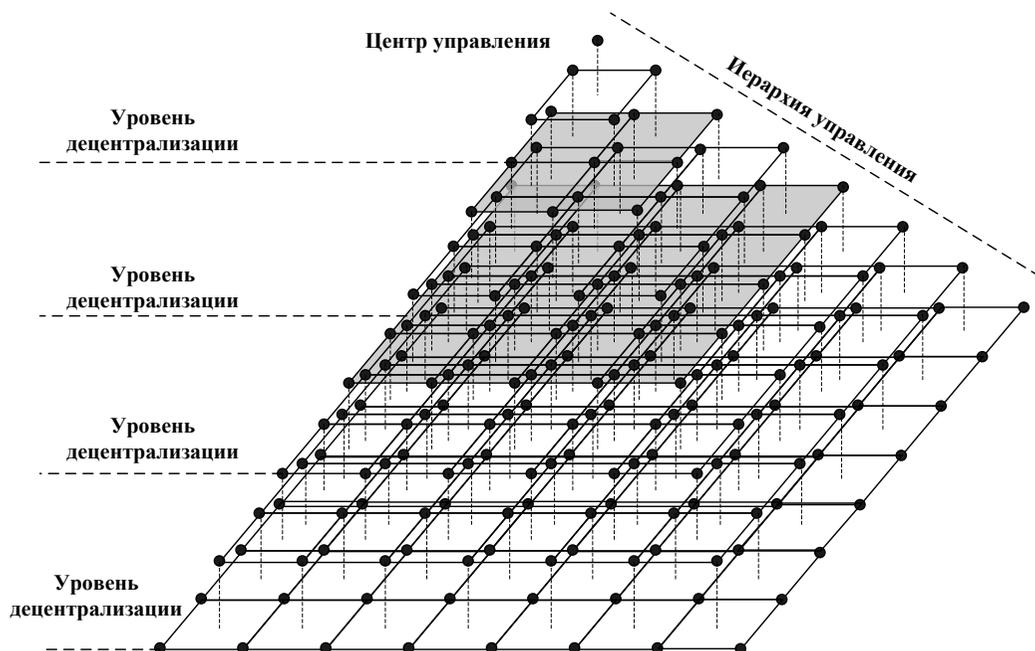


Рис. 1. Общая структура системы организационного управления ГРОС

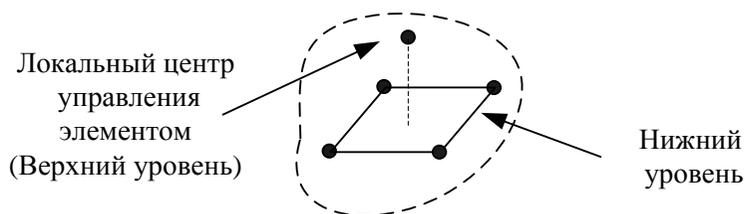


Рис. 2. Общая структура элемента организационного управления ГРОС системы управления

В работе [3] предлагается для достижения этой цели применять территориально распределенную вычислительную среду (ТРВС), призванную объединить удаленные вычислители в единое целое с согласованным параллельным взаимодействием вычислителей на относительно больших расстояниях и обеспечением

обработки исходных и текущих данных по месту их возникновения для решения, например, задач управления и распределения ресурсов в глобальных проектах.

В настоящее время большое распространение получили системы класса ERP (Enterprise Resource Planning, планирование ресурсов предприятия). При их внедрении происходят изменения в организационно-функциональной структуре, корпоративной культуре, общем уровне производительности. Меняются функциональные обязанности, системы мотивации и продуктивности работы отдельных структурных единиц организации [4, 5], позволяющие оперативно получить информацию об экономической ситуации на предприятии, провести некоторую аналитику и принять решения об изменениях в структуре управления организации.

Но даже использование TPBC и ERP в совокупности не позволяет решить задачу координирующего процесса и требует больших затрат для внедрения, а также колоссальных вычислительных мощностей для использования в ГРОС. Следовательно, только объединение этих средств под управлением систем поддержки принятия решений (СППР) [6, 7], основанных на знаниях, позволит скоординировать взаимодействие составляющих элементов ГРОС для принятия оперативных решений при переходе от централизованного управления к децентрализованному и обратно. Использование GRID-технологий [8] поможет в управлении и структуризации элементов ГРОС, а значит, в распределении в равной степени ресурсов организации и создании возможности сокращения вычислительных мощностей для обработки данных.

Единое информационное пространство знаний ГРОС

Огромный объем информации, поступающей в органы управления ГРОС и непосредственно к руководителям, усложнение решаемых задач, необходимость учета большого числа взаимосвязанных факторов и быстро меняющейся обстановки настоятельно требуют использовать вычислительную технику в процессе принятия решений [9] и такой класс вычислительных систем, основанных на знаниях, как СППР.

Независимо от типа организационного управления иерархия подчиненности ГРОС относится к несбалансированному типу. Она может иметь циклы с нечетким распределением знаний по вертикальным уровням и взаимодействием по горизонтали через верхние уровни. Применяя разные базисы знаний, сотрудники различных служб (отделы, департаменты и т. д.) используют разнообразные информационные системы (ИС). Даже в одной ветви управления возможно использование ИС, не интегрированных в единую информационную среду корпоративных знаний. Это основная сложность взаимодействия всех типов пользователей для синтезированного анализа данных и дальнейшего принятия рационального решения без использования СППР. Следовательно, разрабатываемая СППР должна консолидировать знания всех служб, ветвей, уровней иерархий ГРОС и организовать непрерывное информационное пространство знаний ГРОС для принятия рациональных решений тактического, стратегического и оперативного уровней (рис. 3).

Единое информационное пространство знаний должно содержать формальные явные описания терминов предметной области и отношений между ними, то есть требуется разработка соответствующей онтологии [10].

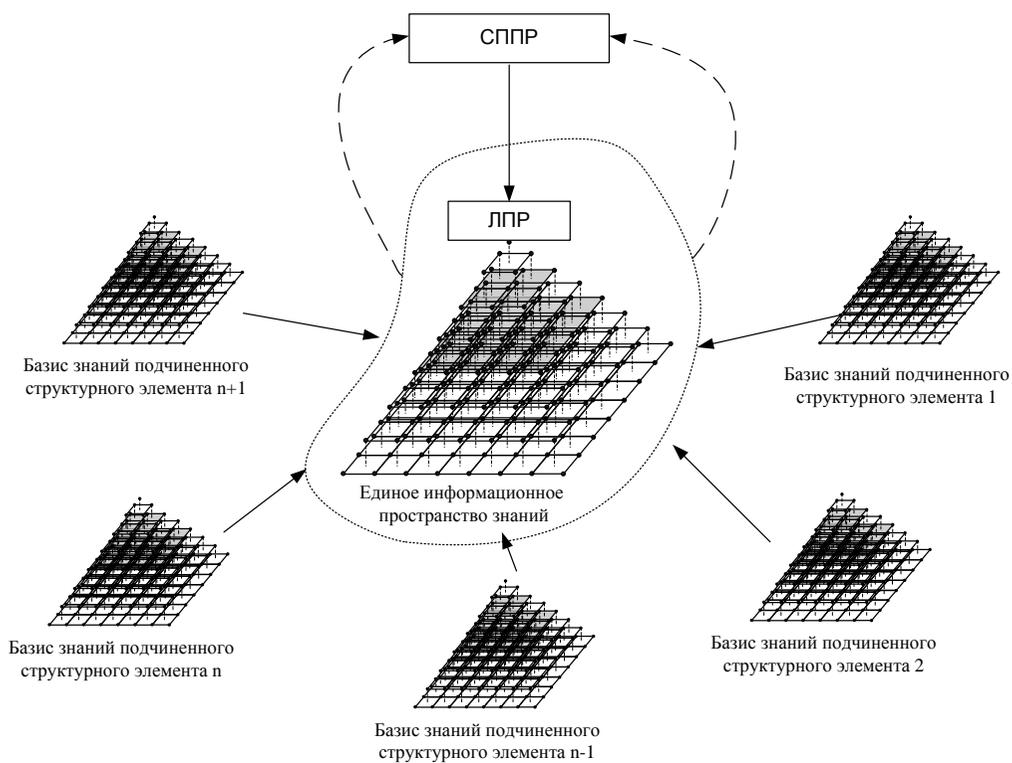


Рис. 3. Единое информационное пространство знаний ГРОС

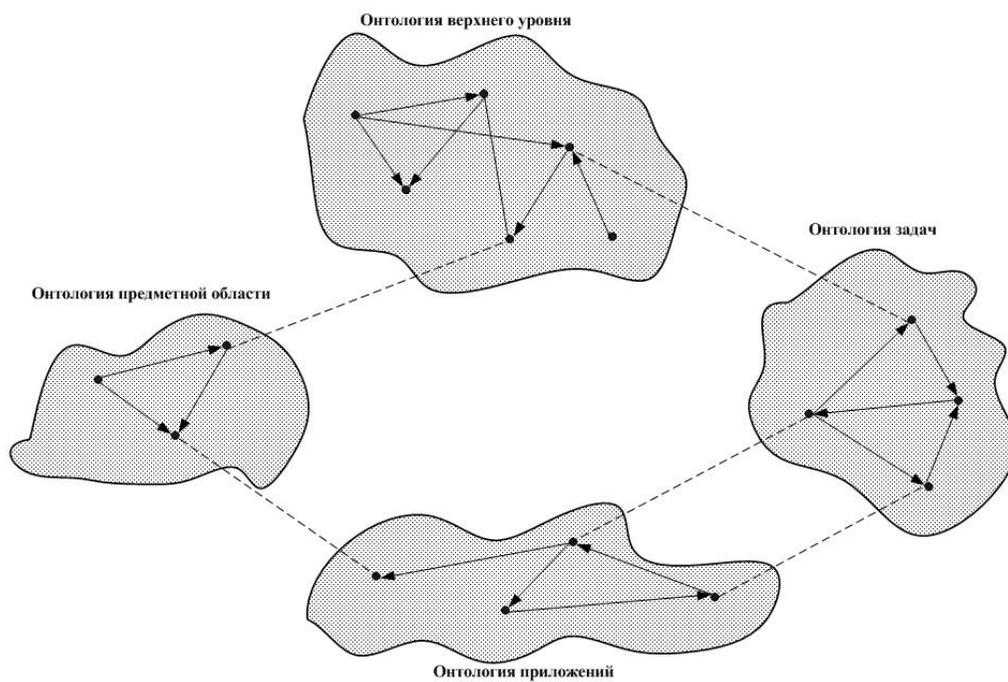


Рис. 4. Классификация онтологий по назначению

В настоящий момент отсутствует комплексный общий подход, который бы унифицировал многочисленные методики решения локальных задач по использованию онтологических моделей в системах управления знаниями [11], но некоторая классификация онтологий все же имеется, например по назначению: онтологии верхнего уровня, онтологии предметных областей, онтологии задач и онтологии приложения (рис. 4) [12]. В нашем случае предпочтительнее разработка онтологий верхнего уровня, так как они решают задачи определения соответствий различных онтологий нижнего уровня и, следовательно, устраняют проблему взаимодействия систем и подсистем.

GRID концепция представления ГРОС

Распределенная система является кластером, если общее количество элементов не превышает несколько десятков. Распределенная система корпоративного уровня содержит в своем составе уже сотни, а в некоторых случаях и тысячи элементов. Глобальной системой называется распределенная система с количеством элементов, входящим в ее состав, более тысячи. При этом зачастую элементы таких систем также глобально распределены [13]. По типу предоставляемых ресурсов различают [14]: распределенные вычислительные системы (Computational GRID), распределенные информационные системы (Data GRID), семантический GRID (Semantic GRID). В Computational GRID в качестве основного ресурса предоставляется вычислительная мощность всей системы. Основное направление развития систем подобного типа заключается в наращивании вычислительных мощностей системы посредством увеличения числа вычислительных узлов. Распределенные информационные системы (Data GRID) предоставляют вычислительные ресурсы для обработки больших объемов данных для задач, не требующих больших вычислительных ресурсов. Семантический GRID предоставляет не только отдельные вычислительные мощности, но и совокупность вычислительных и информационных систем для каждой конкретной предметной области [15]. В GRID-системах децентрализованной ГРОС часто используются матричные организационные структуры с P2P (peer-to-peer) взаимодействием [16].

Для ГРОС наиболее подходящим по типу является семантический GRID, который объединяет разнородные вычислительные ресурсы: персональные компьютеры, рабочие станции, кластеры и суперкомпьютеры, находящиеся на различных уровнях децентрализованной системы (рис. 5). Тогда в общем виде GRID-система для ГРОС строится по следующей схеме: уровень исполнителей, уровни локальных узлов, уровень координирующего центра и уровень СППР (рис. 6).

Уровень исполнителей – программно-аппаратные средства, используемые для решения поставленных задач в GRID. Организационно сюда могут входить как один пользователь с персональным устройством, так и отдел, выполняющий одну функцию.

Уровень локальных узлов – программно-аппаратные средства, обеспечивающие функционирование каждого из GRID-системы. Данные узлы являются диспетчерами каждого из GRID отдельно и назначаются координирующим центром.

Уровень координирующего центра – программно-аппаратные средства, обеспечивающие функционирование локальных узлов GRID-системы. В зависимости от поставленной на данный момент задачи происходит децентрализация

системы на GRID нижних уровней, назначение локальных центров и их координация.

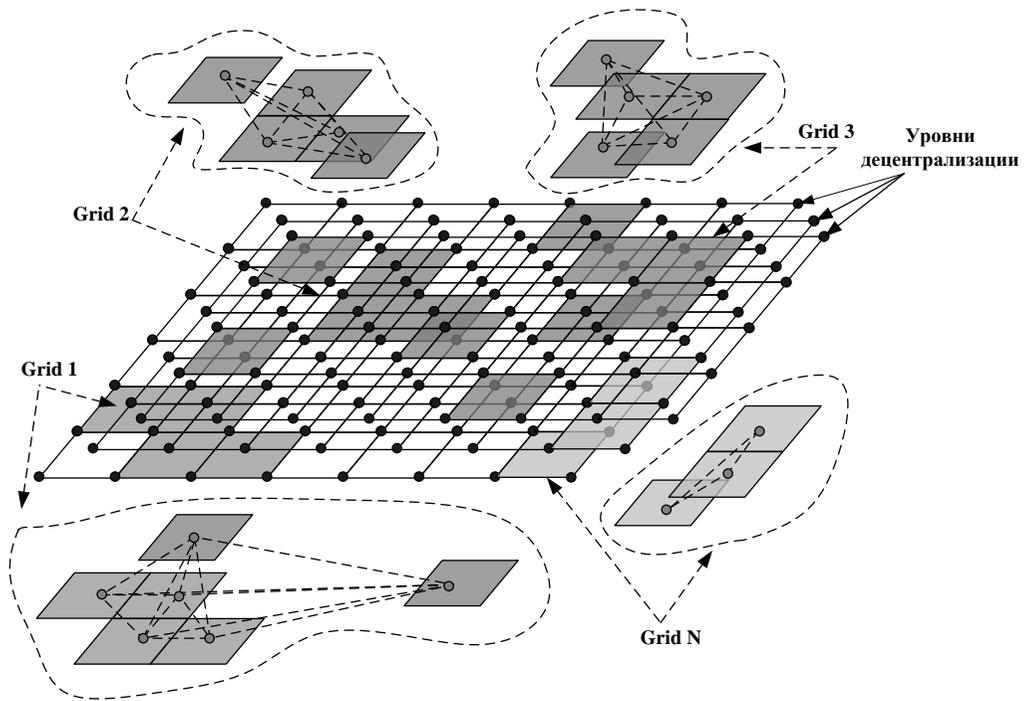


Рис. 5. GRID-системы децентрализованной ГРОС

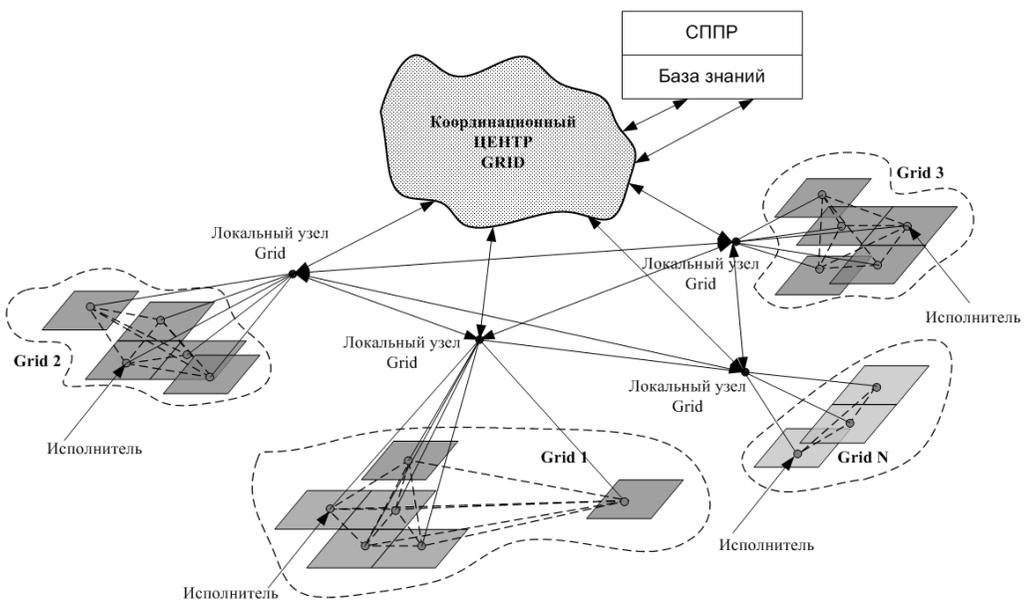


Рис. 6. Схема GRID-системы для ГРОС

Уровень СППР – программно-аппаратные средства, на которых формируются задачи для GRID, заполняется (изменяется) база знаний резолюциями, выданными GRID, и подготавливается информация о вариантах решений для лица, принимающего решения (ЛПР).

Несмотря на то, что уже сейчас предлагаются стандартные средства создания GRID-инфраструктур, существует ряд важных научных задач, в том числе и теоретических, без решения которых полномасштабное использование возможностей GRID-технологий невозможно. Одной из актуальных задач в настоящее время является эффективное управление уровнем исполнителей, или задача о равномерном распределении работ между элементами данного уровня. С ростом числа равноправных исполнителей, входящих в распределенную инфраструктуру, отсутствие хорошего планировщика, обеспечивающего равномерное распределение нагрузки, не только значительно снижает эффективность использования всей GRID-инфраструктуры, но может сделать бессмысленным ее создание. При этом следует отметить, что для таких распределенных систем характерным является динамичное развитие, что делает невозможным решение задачи эффективного управления «в статике» – один раз и навсегда [17].

Задача о равномерном (наилучшем) распределении некоторого числа работ между таким же числом исполнителей при условии взаимно однозначного соответствия между множествами работ и исполнителей сводится к поиску оптимального назначения из условия максимума общей производительности, равной сумме производительности исполнителей. Производительность каждого исполнителя при выполнении каждой из имеющихся работ задается заранее. В математической модели задача представляется в виде двудольного графа, разбитого на два подмножества вершин Z и V одинаковой мощности n и множество ребер R , соединяющих вершины из разных подмножеств. Информация о графе хранится в матрице чисел D_{ij} , где $i, j \in 1, 2, \dots, n$, представляющих собой эффективность выполнения j -й работы i -м исполнителем. Требуется найти перестановку φ из элементов множества Z , такую, что

$$F(\varphi) = \sum_i D(i, \varphi_i) \rightarrow \min.$$

На данный момент в IT-инфраструктуре широко используется инженерный подход к решению такого рода задач, но имеется и множество других – в частности, построенных на принципах бионики при сочетании инженерии и биологии.

В бионических алгоритмах, основанных на наблюдениях за живой природой NIA (Nature Inspired Algorithms), на уровне искусственного интеллекта репродуцируют поведение колоний насекомых, птиц или рыб. Данные алгоритмы нашли применение в различных оптимизационных приложениях и все чаще распространяются и на задачи управления. Так как природные процессы обладают естественным параллелизмом, то выполнение NIA может быть ускорено при использовании больших пулов данных [1].

В большинстве своем NIA имитируют свойства сообществ, состоящих из примитивных особей, в первую очередь способность к децентрализованному принятию решения. Сообщества простых организмов представляют пример синергетического эффекта, когда совокупная способность сообщества больше суммы способностей отдельных частей – из мелких составляющих образуется коллективный интеллект, или интеллект роя SI (Swarm Intelligence), благодаря которому рой демонстрирует поведение и принятие таких решений, которые по

своей сложности заведомо недоступны одной отдельно взятой особи. За время использования SI в оптимизационных задачах были созданы десятки различных подходов, и из их разнообразия можно выделить три основных типа алгоритмов: муравьиный алгоритм (Ant Colony Optimization, ACO), метод оптимизации роем частиц (Particle Swarm Optimization, PSO) и пчелиный алгоритм (Bee Colony Optimization, BCO) [18].

Результаты

Предложено рассматривать территориально распределенные организации, имеющие глобальный пространственный характер, как единую глобально распределенную организационную систему. В ней должны реализовываться два способа организационного управления: централизованное и децентрализованное. При этом переходы из одного способа управления в другой должны координироваться СППР в зависимости от ситуации, наступившей в тот или иной момент времени. Работа СППР основывается на едином информационном пространстве знаний, описываемом с помощью онтологий верхнего уровня.

Саму глобально распределенную организационную систему предложено представлять в виде семантического GRID, разделенного на несколько уровней: уровень исполнителей, уровни локальных узлов, уровень координирующего центра и уровень СППР. Это обеспечивает возможность равномерного распределения работ между элементами системы с помощью бионических алгоритмов с учетом их эффективности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Черняк Л.Л.* Интеллект роя для ИТ // Открытые системы. СУБД. – 2014. – № 2. – С. 68–75. ISSN 1028-7493
2. Иерархические модели в анализе и управлении режимами электроэнергетических систем / О.А. Суханов, Ю.В. Шаров. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007. – 312 с.
3. *Дзегеленок И.И., Кузнецов А.Ю.* Параллельные мультикомпьютерные сети как направление развития распределенных суперЭВМ // Системы управления и силовая электроника. – М.: Изд-во ВЭИ, 2011. – С. 26–32.
4. Менеджмент процессов / Й. Бэккер, Л.Л. Вилков, В.Л. Таратухин и др. – М.: Эксмо, 2007. – 384 с.
5. *Esteves J.* A Framework Proposal for Monitoring and Evaluating Training in ERP Implementation Projects / J. Esteves, J. Pastor, J. Casanovas // Technical Research Report. – 2012.
6. *Орлов С.П., Чуваков А.В., Нечаев Д.А.* Разработка экспертной системы в составе интеллектуальной системы поддержки принятия решений в области водоподготовки и водоочистки природных вод // Современные наукоемкие технологии. – 2010. – № 5. – С. 44–52.
7. *Орлов С.П., Нечаев Д.А.* Модели анализа и принятия решений при управлении региональными программами // Системы управления и информационные технологии. – 2013. – № 2(52). – С. 35–38.
8. *Дзегеленок И.И., Абдулрахд О.А., Оцоков Ш.А., Ильин П.Е.* Декомпозиционный подход к осуществлению GRID- технологий // Информационная математика. – 2005. – № 1(5). – С. 139–148.
9. *Кириллов М.И.* Территориально-распределенная система поддержки принятия проектных решений при проектировании и производстве высокотехнологичных изделий: дис. ... канд. тех. наук. – М.: Моск. гос. инст. электроники и математики, 2006. – 185 с.
10. Онтологии в компьютерных системах / В.А. Лапшин. – М. Научный мир, 2010. – 224 с. ISBN 978-5-91522-193-1
11. Базы знаний интеллектуальных систем / Т.А. Гаврилова, Ф.В. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2010. – 384 с.
12. *Тузовский А.Ф.* Онтолого-семантические модели в корпоративных системах управления знаниями: дис. ... докт. техн. наук. – Томск: ТГПУ, 2007. – 381 с.
13. *Rodin A.V., Burtsev V.L.* Parallel'nye ili raspredelennye vychislitel'nye sistemy? // Trudy Nauchnoi

- sessii MIFI-2006. Т. 12. Informatika i protsessy upravleniia. Komp'uternye sistemy i tekhnologii [Parallel or distributed computing system? // Proceedings of the Scientific session MEPhI-2006. V. 2. Informatics and management processes. Computer systems and technology]. pp. 149-151.
14. *Цветков В.Я., Алпатов А.Н.* Проблемы распределенных систем // Перспективы науки и образования. – 2014. – № 6(12). – С. 31-36.
 15. *Бабич А.В., Берсенева Г.Б.* Алгоритмы динамической балансировки нагрузки в распределенной системе активного мониторинга // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2011. – № 3. – С. 251–261.
 16. *Орлов С.П., Леднев А.М., Иващенко А.В.* Применение P2P аутсорсинга в задачах управления проектами на предприятиях нефтегазовой отрасли // Вестник Волжского университета им. Татищева. – 2013. – № 5(21). – С. 5-10.
 17. *Шокин Ю.И. и др.* Распределенная информационно-аналитическая система для поиска, обработки и анализа пространственных данных // Вычислительные технологии. – 2007. – Т. 12. – № 3. – С. 108-115.
 18. *Штовба С.Д.* Муравьиные алгоритмы // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2003. – № 4. – С. 70-75.

Статья поступила в редакцию 4 марта 2016 г.

CONCEPT FORMATION OF DECISION SUPPORT SYSTEM IN THE MANAGEMENT OF GLOBAL DISTRIBUTED ORGANIZATIONAL SYSTEMS

A.V. Chuvakov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Geographically-distributed organizations with a global spatial scope are treated as a single globally distributed organizational system based on two organizational management methods of centralized and decentralized. The decision to choose one or another method of control of DSS is coordinated with a common information space of knowledge. Globally distributed organizational system is presented in the form of semantic Grid with a uniform distribution of work between the elements of the system with regard to their effectiveness.

Keywords: *global distributed organizational system, decision support system, a common space of knowledge, Grid technology, bionic algorithms.*

Alexander V. Chuvakov (Ph.D (Chem.)), Associate Professor.